Berichte aus dem
INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK UND LOGISTIK
Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz
UNIVERSITÄT STUTTGART

David Pfleger

Methodik zur ganzheitlichen Betrachtung der Elektrifizierung der Stückgutlogistik in einem geografischen Großraum

November 2024

Methodik zur ganzheitlichen Betrachtung der Elektrifizierung der Stückgutlogistik in einem geografischen Großraum

Methodology for an integrated consideration of the electrification of general cargo logistics in a geographical area

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

Vorgelegt von

David Pfleger

aus Homburg/Saar

Hauptberichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz
Mitberichter:	Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Prof.h.c. Christian Landschützer
Tag der mündlichen Prüfung:	24. Oktober 2024

Institut für Fördertechnik und Logistik
der Universität Stuttgart

2024

„TU ERST DAS NOTWENDIGE,
DANN DAS MÖGLICHE,
UND PLÖTZLICH SCHAFFST DU DAS UNMÖGLICHE.“

Franz von Assisi

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart.

Mein herzlichster Dank gilt Herrn Professor Robert Schulz für die Übernahme des Hauptberichtes, die Möglichkeiten zur Forschung an meinem Thema sowie die interessanten und lehrreichen Projekte, die ich in meiner Zeit am Institut bearbeiten durfte. Das mir entgegengebrachte Vertrauen und die damit verbundene wissenschaftliche Freiheit habe ich jederzeit sehr geschätzt. All das hat wesentlich zu meiner wissenschaftlichen und persönlichen Entwicklung beigetragen. Herrn Professor Christian Landschützer danke ich herzlich für die Übernahme des Mitberichtes. Für die organisatorische Betreuung des Promotionsprozesses bedanke mich herzlich bei Herrn Professor Wolfram Remlinger.
Vielen Dank auch an alle Kollegen, HiWis und Studierenden der Universität Stuttgart für die gute Zusammenarbeit und die schöne Zeit am Institut, insbesondere Ali, Charlotte, Daniel, Domenic, Kathrin, Laura, Manuel, Michael und Ruben. Außerdem möchte ich meine Anerkennung gegenüber der Landeshauptstadt Stuttgart und den Speditionen für die Bereitstellung der Daten zum Ausdruck bringen.

Privat danke ich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mich in meiner Ausbildung stets unterstützt und gefördert haben. Meiner Frau Johanna, meiner Tochter Louise und meinem Sohn Lennard danke ich für die Schaffung der notwendigen Freiräume an den vielen Wochenenden, Urlauben und Nachmittagen. Zudem gaben sie mir die notwendige Motivation zur Überwindung beruflicher und persönlicher Herausforderungen.

Stuttgart, im November 2024
David Pfleger

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis viii

Tabellenverzeichnis ix

Abkürzungsverzeichnis x

1 Einleitung 1

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung . . . 1
1.2 Zielsetzung . . . 3
1.3 Aufbau der Arbeit . . . 4

2 Logistik, Verkehr und Transport 7

2.1 Grundlagen . . . 7
2.1.1 Logistik . . . 8
2.1.2 Verkehr und Güterverkehr . . . 9
2.2 Straßengüterverkehr . . . 15
2.2.1 Systemelemente des Straßengüterverkehrs . . . 15
2.2.2 Transportmarkt . . . 19
2.2.3 Akteure im Straßengüterverkehr . . . 20
2.2.4 Transportformen und Netzwerkstrukturen des Straßengüterverkehrs 21
2.2.5 Urbane Logistik . . . 27
2.2.6 Stückgutlogistik . . . 30

3 Elektromobilität im Straßengüterverkehr 33

3.1 Elektrische Fahrzeugkonzepte und Antriebstechnologien . . . 33
3.1.1 Batterieelektrische Fahrzeuge . . . 34
3.1.2 Hybride Fahrzeuge . . . 35
3.1.3 Brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge . . . 36
3.1.4 Vergleich der Antriebstechnologien . . . 37
3.1.5 Analyse des Fahrzeugmarktes . . . 42
3.2 Lade- und Energieinfrastruktur . . . 43
3.2.1 Ladeinfrastruktur . . . 44
3.2.2 Energieinfrastruktur . . . 46
3.3 Akteure des elektrifizierten Straßengüterverkehrs . . . 46
3.4 Zusammenfassung . . . 48

4 Konzeption der Methodik zur Betrachtung der Elektrifizierung der Stückgutlogistik 51

4.1 Ziele und Anforderungen der Methodik . . . 51
4.2 Abgrenzung der Methodik . . . 52
4.2.1 Abgrenzung zum Stand der Technik . . . 52

4.2.2 Systemgrenzen . . . 56
4.3 Aufbau der Methodik . . . 59
4.3.1 Logistisches Vorgehen . . . 60
4.3.2 Stromnetzintegration . . . 62
4.3.3 Analyse der Elektrifizierbarkeit . . . 63
4.3.4 Optimierung der Elektrifizierbarkeit . . . 64

5 Entwicklung der Auftragserzeugung 67
5.1 Methodisches Vorgehen . . . 67
5.2 Anforderungen an die Auftragserzeugung . . . 69
5.3 Eingangsdaten für die Auftragserzeugung . . . 71
5.3.1 Geografische Daten . . . 72
5.3.2 Zelleneigenschaften . . . 77
5.3.3 Auftragseigenschaften . . . 79
5.3.4 Saisonalitätsdaten . . . 82
5.4 Entwurf der Auftragserzeugung . . . 84
5.5 Implementierung der Auftragserzeugung . . . 90
5.6 Test und Betrieb der Auftragserzeugung . . . 92
5.7 Ergebnis und Validierung der Auftragserzeugung . . . 94
5.8 Übertragbarkeit . . . 98

6 Tourenplanung 103
6.1 Grundlagen der Tourenplanung . . . 103
6.2 Rechnergestützte Tourenplanung . . . 105
6.3 Vorgehen zur Tourenplanung . . . 108
6.3.1 Import der Daten . . . 108
6.3.2 Tourenbildung . . . 110
6.3.3 Export der Daten . . . 113
6.4 Ergebnis und Validierung der Tourenplanung . . . 114

7 Analyse und Optimierung der Methodik 117
7.1 Analyse der Elektrifizierbarkeit . . . 117
7.2 Optimierung der Elektrifizierbarkeit . . . 120

8 Anwendung und kritische Reflexion 123
8.1 Ausgangssituation des Anwendungsbeispiels . . . 123
8.2 Anwendung und Ergebnisse . . . 124
8.3 Kritische Reflexion . . . 128

9 Zusammenfassung und Ausblick 131
9.1 Zusammenfassung . . . 131
9.2 Ausblick . . . 133

Literaturverzeichnis **135**

Anhang **151**

A: Anforderungsliste des Programms der Auftragserzeugung 152
B: Aufteilung der Nachfragerbranchen 154
C: Mautabschnitte 156
D: Abgleich der synthetischen mit realen Auftragslisten 157
E: Heatmaps von synthetischen und realen Aufträgen einer Spedition 159
F: Planungsparameter der Tourenplanung 160
G: Vergleich der Ergebnisse der Tourenplanung mit den Vorgabewerten 163
H: Batteriekapazitäten der verfügbaren batterieelektrischen Nutzfahrzeuge . . . 165
I: Anwendungsergebnisse 166

Abbildungsverzeichnis

1.1 Herausforderungen und Multiplikatoren der Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs . . . 2
1.2 Aufbau der Arbeit . . . 5
2.1 Verknüpfung der Bereiche Transport, Verkehr und Logistik . . . 7
2.2 Logistikvolumen nach Leistungsart und Logistiksegmenten 2021 . . . 9
2.3 Entstehung von Ortsveränderungen . . . 11
2.4 Verkehrsmedien, -träger und -mittel . . . 12
2.5 Einordnung des Wirtschaftsverkehrs zu anderen Verkehrsarten . . . 13
2.6 Zusammenhang zwischen Logistik- und Güterverkehrsnachfrage . . . 14
2.7 Beförderungsleistung Deutschlands nach Verkehrsträgern in Mio. Tonnenkilometern . . . 15
2.8 Aufbauten von LKW . . . 17
2.9 Verteilung der Tagesfahrweiten unterteilt in drei Größenklassen von LKW 18
2.10 Umsätze der Logistiksegmente aufgeteilt auf die Gewichtsklassen der Güterkraftfahrzeuge . . . 20
2.11 Akteure im Straßengüterverkehr . . . 21
2.12 Unterteilung von Transportketten . . . 22
2.13 Aufbau von Transportketten . . . 23
2.14 Direktverkehrsnetz und Hub-and-Spoke-Netz . . . 25
2.15 Fahrankunftsverteilung an einem Depot . . . 27
2.16 Stückgutspediteure und -kooperationen mit dem höchsten Stückgutaufkommen in Deutschland 2022 . . . 31
3.1 Systemaufbau von alternativen und konventionellen Antriebstechnologie . 34
3.2 Batteriekapazitäten in Abhängigkeit der Motorleistung verfügbarer Güterkraftfahrzeugmodelle . . . 37
3.3 Wirkungsgrade der Antriebstechnologien . . . 38
3.4 Antriebsabhängige Nutzungskosten (TCO) von Sattelzugmaschinen im Jahr 2025 . . . 40
3.5 Prognostizierte Absatzzahlen schwerer Nutzfahrzeuge (>12t) in Deutschland laut Herstellerangaben . . . 42
3.6 Marktverfügbarkeit von batterieelektrischen Güterkraftfahrzeugen nach Größenklasse . . . 43
3.7 Ladeszenarien mit empfohlener Ladeleistung . . . 44
3.8 Ladekonzepte für einen E-LKW . . . 45
3.9 Akteure im Straßengüterverkehr mit Elektromobilität . . . 47
4.1 Vier-Stufen-Modell der Verkehrsplanung . . . 53
4.2 Räumliche Gliederung des Untersuchungsraumes am Beispiel des Stadtgebiets Stuttgart . . . 58

4.3 Methodik zur Bestimmung einer Elektrifizierungsrate von Nutzfahrzeugen in der Stückgutlogistik . . . 59
4.4 Ableitung des logistischen Vorgehens der Methodik . . . 60
5.1 Wasserfallmodell mit Rückführschleifen . . . 68
5.2 Funktionalitäten des Tools . . . 70
5.3 Übersicht zu den Eingangsdaten . . . 72
5.4 Rasterung des Stadtgebiets Stuttgart . . . 74
5.5 Gewerbegebiete im Stadtgebiet Stuttgart . . . 75
5.6 Standorte der Stückgutspeditionen, welche im Stadtgebiet Stuttgart operieren 76
5.7 B2B-Anteil von Stückgutaufträgen . . . 77
5.8 Verteilung der Erwerbstätigenzahlen und Einwohnerzahlen in Stuttgart . 78
5.9 B2C-Anteil von Stückgutaufträgen . . . 82
5.10 Indexierte Abschnittsbefahrungen in den Talkessel Stuttgarts für das Jahr 2022 über Mautdaten des BALM . . . 83
5.11 Nachfrager bzw. Kenngrößen einer Zelle . . . 86
5.12 Ablaufdiagramm der Auftragsgenerierung . . . 88
5.13 Bedienoberfläche zur Auswahl des Zeitraums und der Speditionen . . . 92
5.14 Aufteilung von POI und Gewerbegebiete . . . 93
5.15 Mittelwert des Verhältnisses der Zustellungen/Abholungen und Innerhalb/Außerhalb mehrerer synthetischer Auftragslisten . . . 95
5.16 Mittlere Anzahl der Aufträge mehrere synthetischer Auftragslisten in allen PLZ-Bereichen im Stadtgebiet Stuttgart . . . 95
5.17 Mittelwert des Verhältnisses der Zustellungen/Abholungen und Innerhalb/Außerhalb mehrerer synthetischer und realer Auftragslisten . . . 96
5.18 Mittlere Abweichung der Anzahl an Aufträgen synthetischer zu realen Auftragslisten in den PLZ-Bereichen im Stadtgebiet Stuttgart . . . 97
5.19 Datenaustausch bei Wechsel des Logistiksegments und/oder geografischen Großraums . . . 99
5.20 Verteilung der Aufträge und deren Änderung durch den Austausch der Daten von Gewerbe-/Industriegebiet, POI, Einwohner- und Erwerbstätigenzahlen . . . 100
6.1 Oberfläche der Tourenplanungssoftware PTV Route Optimiser ST . . . 107
6.2 Vorgehen in der Tourenbildung . . . 108
8.1 Heatmap zu allen synthetisch erzeugten Aufträgen der Speditionen im Stadtgebiet Stuttgart in KW19 . . . 124
8.2 Anzahl an Aufträgen in KW19, aufgeteilt auf die Stadtbezirke Stuttgarts 125
8.3 Synthetisch erzeugte Touren einer Spedition in KW19 . . . 126

Tabellenverzeichnis

2.1 Logistiksegmente und Gewichtsbereiche 10
2.2 Gewichtsklassen von LKW 16
2.3 Übersicht von Depottypen 28
2.4 Ansätze in der urbanen Logistik 29
5.1 Klassifizierung der Servicezeiten 80
5.2 Häufigkeitsverteilung der Kundenanforderung Zeitfenster 80
5.3 Eintrittswahrscheinlichkeiten von Aufträgen mit Zustellungen und Abholungen 81
5.4 Eintrittswahrscheinlichkeiten von Aufträgen innerhalb und außerhalb Stuttgarts 81
5.5 Herkunft der Daten 84
6.1 Fahrzeug-Gewichtsklassen mit stellvertretenden Fahrzeugen 109
6.2 Servicezeitklassen und deren Zeitanteile 112
8.1 Auswertung der Tourenplanung 127
8.2 Logistische Elektrifizierungsrate im realen und optimierten Zustand 128
8.3 Aspekte der Reflexion 130

Abkürzungsverzeichnis

BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug, battery electric vehicle
BALM	Bundesamt für Logistik und Mobilität
BVWP-Modell	Güterverkehrsmodell der Bundesverkehrswegeplanung
CCS	Combined Charging System
CSV	Comma seperated values
DVZ	Deutsche Verkehrszeitung
E-LKW	Elektrolastkraftwagen
FCEV	Brennstoffzellenbetriebenes Fahrzeug, fuel-cell electric vehicle
GIS	Geografisches Informationssystem
HGB	Handelsgesetzbuch
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
IHK	Industrie- und Handelskammer
KEP	Kurier-, Express- und Paketdienst
KiD	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland
KWM	Kleinräumiges Wirtschaftsverkehrsmodell
MCS	Megawatt Charging System
NUTS	Nomenclature des unités territoriales statistiques
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
OSM	OpenStreetMaps
POI	Point of Interest
PwC	PricewaterhouseCooper
RO-ST	PTV Route Optimiser ST
TCO	Total Cost of Ownership
TMS	Transportation Management System
TUL	Transportieren, Umschlagen, Lagern
WMS	Warehouse Management System

Abstract

Due to the European Union's climate protection targets and the increase in road freight transport, the switch to alternative drive systems is becoming unavoidable. The current trend is leading towards battery-electric trucks, similar to passenger cars. However, the electrification of road freight transport is progressing slowly partly due to the lack of a nationwide charging infrastructure. To expand this infrastructure, new players from the energy sector are entering the road freight transport sector.
In order to involve all players at an early stage, a uniform methodology is required for an integrated analysis of the electrification potential of a logistics segment in a large geographical area. To date, there is no approach for this. The methodology is based on a logistical approach for mapping a logistics segment in a selected area, which is required to analyze the energy sector with electricity grid integration. From these results, the electrification feasibility is logistically and energetically analyzed and optimized.
The aim of the work is to develop the logistics approach. For this purpose, general cargo logistics is selected as the logistics segment due to the current potential for electrification. Transferability to other logistics segments is taken into account. The approach is based on a customer structure adapted to the area, whereby the order generation and route planning generate the image of general cargo logistics. The order generation, developed using the waterfall model, generates synthetic order lists based on public data and a small amount of real data from freight forwarders. The order lists are the basis for route planning, which creates the routes using route planning software.
The functionality of the approach is confirmed by carrying out an application example in the Stuttgart urban area. The logistical electrification rate is determined, although this must be corrected by the energy analysis and can be optimized. In addition, the approach is verified and validated by comparing real freight forwarding data. By exchanging the database and customer structure, the transferability to a different geographical area and logistics segment is made possible.

Kurzfassung

Durch die Klimaschutzziele der Europäischen Union und der Zunahme des Straßengüterverkehrs wird die Umstellung auf alternative Antriebe unumgänglich. Der Trend führt derzeit zum batterieelektrischen LKW, analog zum PKW. Die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs schreitet jedoch nur langsam voran, was unter anderem auf die fehlende flächendeckende Ladeinfrastruktur zurückzuführen ist. Zum Ausbau von dieser Infrastruktur treten neue Akteure aus dem Energiesektor in den Straßengüterverkehr ein. Für eine frühzeitige Einbindung aller Akteure bedarf es einer einheitlichen Methodik zur ganzheitlichen Analyse der Elektrifizierbarkeit eines Logistiksegments in einem geografischen Großraum. Hierfür gibt es bisher keinen Ansatz. Die Methodik basiert auf einem logistischen Ansatz zur Abbildung des Logistiksegments in einem gewählten Gebiet, welcher zur Analyse des Energiesektors mit der Stromnetzintegration benötigt wird. Aus diesen Ergebnissen wird die Elektrifizierbarkeit logistisch sowie energetisch analysiert und optimiert.

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung des logistischen Ansatzes. Hierfür wird die Stückgutlogistik aufgrund des derzeitigen Potentials der Elektrifizierbarkeit als zu analysierendes Logistiksegment gewählt. Eine Übertragbarkeit auf andere Logistiksegmente wird berücksichtigt. Die Vorgehensweise basiert auf einer an das Gebiet angepassten Kundenstruktur, womit die Auftragserzeugung und Tourenplanung das synthetische Abbild der Stückgutlogistik erzeugen. Die Auftragserzeugung, entwickelt mithilfe des Wasserfallmodells, generiert synthetische Auftragslisten auf Basis von öffentlichen Daten und einer geringen Menge an realen Daten von Speditionen. Die Auftragslisten sind die Basis für die Tourenplanung, welche mit einer Tourenplanungssoftware die Touren bildet. Mit der Durchführung eines Anwendungsbeispiels am Stadtgebiet Stuttgart wird die Funktionsweise des Ansatzes bestätigt. Die logistische Elektrifizierungsrate wird ermittelt, die anschließend durch die energetische Analyse korrigiert wird und weiter optimiert werden kann. Zusätzlich wird der Ansatz mit dem Abgleich von realen Speditionsdaten verifiziert und validiert. Durch den Austausch der Datenbasis sowie Kundenstruktur wird die Übertragbarkeit auf einen anderen geografischen Großraum sowie ein anderes Logistiksegment ermöglicht.

1 Einleitung

In den kommenden Jahren wird der Verkehr in Deutschland weiter zunehmen, insbesondere im Güterbereich. Knapp drei Viertel des Güterverkehrs in Deutschland erfolgt derzeit über Straßen. Der Anteil liegt bei 504,8 Mrd. Tonnenkilometer mit einer steigenden Tendenz [Sta23]. Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr prognostiziert einen Zuwachs bis 2051 von 54 % [Bun23e]. Der LKW ist somit das dominierende Verkehrsmittel. Die Verlagerung auf andere und umweltfreundliche Verkehrsträger, wie den Eisenbahnverkehr oder die Binnenschifffahrt, wird durch die Politik vorangetrieben, stößt jedoch gleichzeitig an die Kapazitätsgrenzen (Eisenbahnverkehr: Schienennetz; Binnenschifffahrt: Häfen) [Bur21; Bun23g, S. 26]. Diese Entwicklung stellt eine erhebliche Herausforderung für den Klimaschutz dar.
Sechs Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen in der EU und über ein Viertel der Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs fallen auf LKW und Busse [Eur23]. Um das Ziel der deutschen Bundesregierung und EU, der Netto-Null Treibhausgasemissionen bzw. Klimaneutralität, bis 2045 bzw. 2050 zu erreichen, sind daher umfassende Maßnahmen durch die Politik, Wirtschaft und Gesellschaft erforderlich.
Zudem werden in europäischen Städten Fahrverbote für Verbrenner diskutiert. Als Vorbild gilt die schwedische Hauptstadt Stockholm, die ab 2025 eine Null-Emissions-Zone in einem Geschäftsviertel mit vorwiegend emissionsfreiem Lieferverkehr einführt [DER23a].

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Als Alternativen zum Verbrenner werden durch die Bundesregierung und Industrie batterieelektrische Fahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge forciert. Neben diesen elektrischen Antriebstechnologien bieten Verbrennungsfahrzeuge mit synthetischen Kraftstoffen ebenso eine klimaneutrale Fahrweise. Jedoch weist ein Fahrzeug mit synthetischen Kraftstoffen einen deutlich ineffizienteren Wirkungsgrad auf. Ähnlich ist es beim Brennstoffzellenfahrzeug. Der Trend führt derzeit zum batterieelektrischen LKW bzw. Elektrolastkraftwagen (E-LKW), analog zum PKW, welcher durch den Technologievorsprung, besonders in der Batterieentwicklung, gegenüber den Alternativen begünstigt wird. Trotz der derzeitigen Verfügbarkeit von über 60 E-LKW-Modellen sind im Jahr 2023 lediglich 1,8 % des Bestands elektrifiziert [e-m23]. Es verdeutlicht und bestätigt die Zurückhaltung der Transportunternehmen zum Kauf bzw. Leasing und Nutzung des E-LKW. Als Gründe stellen sich vor allem die fehlende Produktverfügbarkeit mit ausreichender Reichweite, eine fehlende flächendeckende Ladeinfrastruktur, die langen Batterieladezeiten, die Kostenparität und die fehlende politische Unterstützung heraus. Gleichzeitig können diese Gründe auch als Multiplikatoren gelten. Daher ist in den kommenden Jahren ein Hochlauf an elektrischen Nutzfahrzeugen mit zufriedenstellenden Reichweiten und einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur gefordert. Für eine Klimaneu-

tralität müssen rechtzeitig die richtigen Rahmenbedingungen und Voraussetzungen, wie z. B. die Förderung durch die Bundesregierung, geschaffen werden, um die Multiplikatoren für die Elektromobilität steigen zu lassen.

Für Logistikzentren ist die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs ebenfalls eine Herausforderung [Pfl18]. Das Laden der Batterien von E-LKW auf dem Betriebshof oder an der Rampe erfordert einen zusätzlichen Zeitbedarf und wirkt sich somit auf die logistischen Prozesse aus [PW19, S. 27]. Zusätzlich ergibt sich durch den erhöhten Energiebedarf ein neuer Energieverbraucher am Logistikzentrum. Aufgrund der hohen Ladeleistungen von E-LKW werden die verfügbaren Netzanschlussleistungen vermutlich nicht ausreichen. Hierzu kann ein Netzausbau erforderlich sein, wobei dieser weitestgehend vermieden werden sollte. Eine Untersuchung im Forschungsprojekt FELSeN bestätigte dies [Pfl+20b]. Das Projekt weist daraufhin, dass eine Analyse von mehreren Logistikzentren oder eines ganzen Logistiksegments, wie z. B. der Stückgutlogistik, zwingend erforderlich ist.

Zur Beschleunigung der Elektrifizierung sind Herausforderungen zu überwinden und in Multiplikatoren umzuwandeln. Eine Auswahl wird in Abbildung 1.1 in Form eines Eisberg-Modells dargestellt. Die den Transportdienstleistern bekannten Herausforderungen liegen im oberen sichtbaren Bereich des Eisbergs. Die vorwiegend noch unbekannten Herausforderungen sind unter Wasser verborgen. Um diese zu fördern, müssen alle Akteure am Elektrifizierungsprozess beteiligt werden. Hierzu gehören Akteure aus dem Logistiksektor zur Prozess- und Tourenanalyse sowie dem Energiesektor für den Aufbau der Ladeinfrastruktur und die Integration ins Netz.

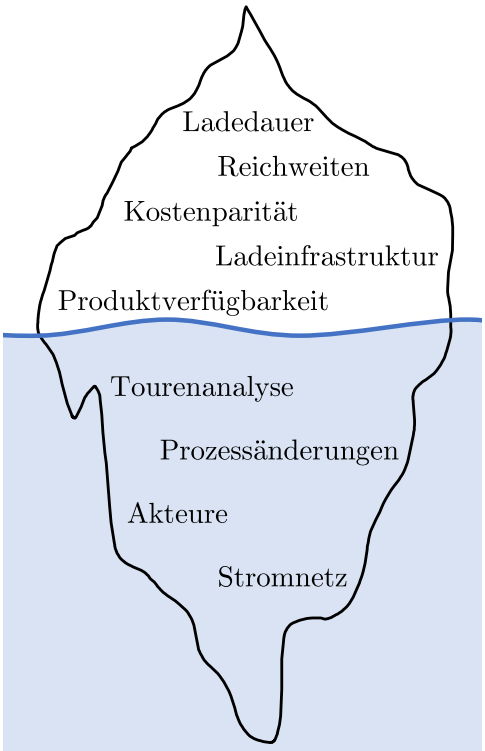


Abbildung 1.1: Herausforderungen und Multiplikatoren der Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs

Es bedarf einer einheitlichen Vorgehensweise zur ganzheitlichen Betrachtung der Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs, welche alle Akteure integriert. Allerdings wäre eine Betrachtung mehrerer oder sogar aller Logistiksegmente sowie Regionen bzw. deutschlandweit äußerst komplex. Jedes Segment und jede Region hat unterschiedliche Anforderungen, wie z. B. die Nutzung unterschiedlicher LKW-Größenklassen oder das Höhenrelief, welche die Elektrifizierung beeinflussen. Bisher gibt es keine Modelle, welche diese Betrachtung beider Sektoren ermöglichen. Güterverkehrsmodelle bilden Wirtschaftsverkehre ab, jedoch fehlt die Verknüpfung zum Energiesektor. Zudem betrachten sie vorwiegend Deutschland und stützen auf einer alten Datenbasis (aus dem Jahr 2010).

Daher ist die Neuentwicklung einer Methodik zur ganzheitlichen Analyse der Elektrifizierbarkeit eines Logistiksegments in einem geografischen Großraum[1] unausweichlich.

1.2 Zielsetzung

Für die Entwicklung einer Methodik zur integralen Analyse greifen das Institut für Fördertechnik und Logistik und das Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart folgende wissenschaftliche Fragestellung auf:
Kann eine ganzheitliche Betrachtung der Elektrifizierung eines Logistiksegments in einem geografischen Großraum erreicht werden?
Zur Beantwortung der Fragestellung wird diese Methodik für das Logistiksegment Stückgutlogistik am urbanen Raum der Stadt Stuttgart entworfen und untersucht. Das Vorgehen wird ganzheitlich betrachtet, sodass alle Akteure des Elektrifizierungsprozesses eingebunden sind. Dies erfordert die Integration des Logistik- und Energiesektors. Mit einer Praxisphase des Projekts REALIST (Reallabor zur beschleunigten Elektrifizierung des urbanen Logistikverkehrs in Stuttgart) [Pfl+24] der beiden Institute wird die Methodik validiert. Es werden mehrere E-LKW im Stadtgebiet Stuttgart zum Einsatz kommen.
Der logistische Schwerpunkt der Methodik und somit das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Vorgehens zur synthetischen Abbildung der Stückgutlogistik eines geografischen Großraums und die anschließende Analyse der Elektrifizierbarkeit, um die logistische Elektrifizierungsrate zu ermitteln. Die Elektrifizierungsrate gibt an, welchen Anteil der LKW-Fahrten eines Logistiksegments E-LKW übernehmen können. Hierzu ist für die Betrachtung des gesamten Stückgutverkehrs eine Skalierung aller Auftrags- und Tourendaten der agierenden Speditionen im geografischen Großraum erforderlich. Die Relevanz der Skalierung wird zudem durch fehlende Datensätze von Speditionen bestätigt. Aus Datenschutzgründen stellen diese keine Datensätze bereit, weshalb sie synthetisch erzeugt werden. Daher wird eine Vorgehensweise gefordert, welche auf öffentlichen Daten und einer geringen Menge an realen Daten von Speditionen (Auftragslisten bzw. Tourenpläne) basiert. Als öffentliche Daten werden beispielsweise geografische Daten (z. B. Adressen und die Lage von Gewerbe- und Industriegebieten), Einwohnerzahlen, Erwerbstätigenzahlen und Kennzahlen aus Studien zum Logistiksegment (z. B. Verteilungen der Nachfrager des Logistiksegments) verwendet. Mit den synthetischen Auftragslisten und daraus erzeugten Tourenplänen wird die Elektrifizierbarkeit analysiert. Weiterführende Ziele zur Verbesserung der Elektrifizierbarkeit können beispielsweise mithilfe der Optimierung von Logistikprozessen sowie der Planung des Netz- und Ladeinfrastrukturausbaus (Netzintegration) erreicht werden.

[1] Ein geografischer Großraum bzw. Ballungsraum bezeichnet eine Verdichtung, die durch gemeinsame morphologische, geografische, siedlungsstrukturelle sowie wirtschaftliche Merkmale gekennzeichnet ist [BT18, S. 38].

Abgeleitet aus dem Ziel der Arbeit resultiert die folgende übergeordnete Forschungsfrage:

> **F1: Kann eine Abbildung der Stückgutlogistik eines geografischen Großraums und die Bestimmung der logistischen Elektrifizierungsrate erreicht werden?**

Hieraus ergeben sich folgende sekundäre Forschungsfragen:

F2.1: Warum ist die Stückgutlogistik prädestiniert für eine ganzheitliche Betrachtung zur Elektrifizierung?

F2.2: Wie werden synthetische Stückgutaufträge, zusammengefasst in Auftragslisten, für einen Großraum auf Grundlage von öffentlichen Daten und einer geringen Menge an realen Daten von Speditionen erzeugt?

F2.3: Wie wird die Methodik auf ein anderes Logistiksegment oder einen anderen Großraum übertragen?

1.3 Aufbau der Arbeit

Im Eröffnungskapitel erfolgt eine Einführung in das Themenfeld. Die Problemstellung wird herausgearbeitet, wodurch das übergeordnete Ziel und die Forschungsfragen definiert und dargelegt werden. Im zweiten Kapitel werden die Begriffe Logistik, Verkehr und Transport erläutert. Auf Basis dieser Grundlagen und mit der Fokussierung der Stückgutlogistik wird der Stand der Technik des Straßengüterverkehrs mit den Strukturen, Formen und Systemelementen beschrieben und somit zur Stückgutlogistik hingeführt. Zur Einführung der Elektrifizierung im Straßengüterverkehr werden im dritten Kapitel ebenfalls der Stand der Technik und somit die verschiedenen elektrischen Antriebstechnologien und deren Ladeinfrastruktur sowie die Integration ins Stromnetz beschrieben. Abschließend werden die beiden Kapitel zusammengefasst.
Im vierten Kapitel wird die Methodik zur ganzheitlichen Betrachtung beschrieben und abgegrenzt. Die Methodik teilt sich in eine logistische und elektrotechnische Vorgehensweise. Das logistische Vorgehen ist Schwerpunkt dieser Arbeit und besteht aus der Auftragserzeugung, der Tourenplanung sowie der Analyse und Optimierung der Elektrifizierung. Die Entwicklung der Auftragserzeugung wird anhand des Wasserfallmodells im fünften Kapitel vorgestellt. Im sechsten Kapitel folgt die Durchführung der Tourenplanung und im siebten Kapitel die Analyse der Elektrifizierbarkeit sowie deren Optimierung. Am Beispiel des Stadtgebiets Stuttgart wird die logistische Vorgehensweise der Methodik im achten Kapitel erprobt und kritisch reflektiert. Zum Abschluss fasst das neunte Kapitel die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick zum weiteren Forschungsbedarf der Methodik.

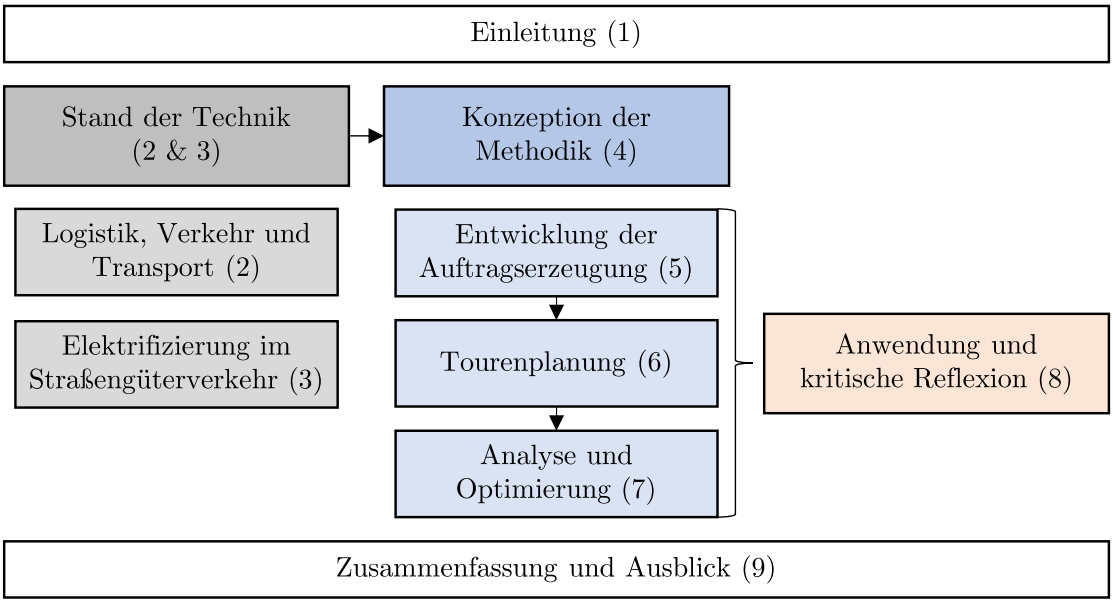


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit

2 Logistik, Verkehr und Transport

Das folgende Kapitel dient zum Einstieg in die Themenfelder Logistik, Verkehr und Transport. Zu Beginn werden diese Begriffe als Grundlage definiert. Zudem wird der Güterverkehr grundlegend erläutert. Da der Fokus der Methodik auf der Stückgutlogistik liegt, wird der Stand der Technik des Straßengüter- und Stückgutverkehrs beschrieben. Das Ziel des Kapitel ist somit die Hinführung zur Stückgutlogistik.

2.1 Grundlagen

Die Begriffe Logistik, Verkehr und Transport und deren Systeme sind drei aufeinander aufbauende Konzepte, welche anhand der erbrachten Leistungen abgegrenzt werden. Die Abbildung 2.1 stellt dies dar. Transporte sind Teilmengen von Verkehren und diese wiederum Teilmengen von logistischen Prozessen [Ihd01, S. XV].

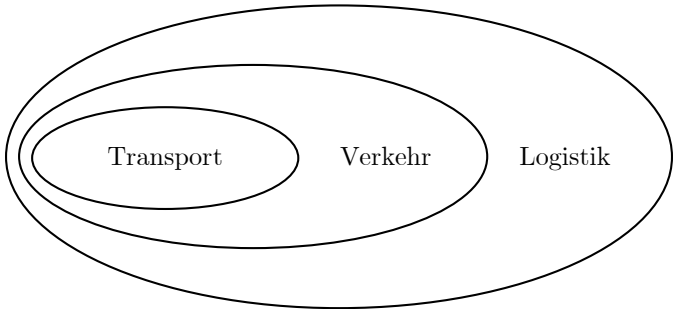


Abbildung 2.1: Verknüpfung der Bereiche Transport, Verkehr und Logistik (in Anlehnung an [Ihd01, S. 1; Kum10, S. 38])

Im Sprachgebrauch und im wissenschaftlichen Bereich werden die Begriffe Transport und Verkehr oftmals synonym genutzt. Im Folgenden werden sie differenziert betrachtet.
Transporte sind Abläufe mit geplanten induzierten Ortveränderungen von Gütern, Personen oder Nachrichten. Diese werden von einem Ort A zu einem Ort B bewegt (Veränderung der Raumkoordinaten). [Kum10, S. 36; Muc+21, S. 15]
Als **Verkehr** werden „*alle Aktivitäten, die in ihrer Gesamtheit den Prozess der Ortsveränderung von Personen, Gütern und Nachrichten bilden*“ [Kum10, S. 33; Pir49, S. 3], beschrieben. Die Überbrückung des Raums (Transport) wird somit durch art- und mengenmäßige, räumliche und zeitliche Merkmale definiert, wofür ein Verkehrsdienst notwendig ist. Folglich umfasst die Verkehrsleistung eine Transportleistung und andere Leistungsaspekte. [Ihd01, S. 6; Muc+21, S. 34]
Der Begriff **Logistik** stammt aus dem Militärwesen und beschreibt dort die Gesamtheit der Aufgaben zur Versorgung der Streitkräfte. Heutzutage gibt es eine Vielzahl an Definitionen mit Betrachtung einzelner oder aller relevanten Objektflüsse, dem Güter-, Informations- und Finanzfluss. Diese Arbeit fokussiert den Güterfluss, weshalb der Begriff mit der Definition von *Pfohl* dargelegt wird:

> *„Zur Logistik gehören alle Tätigkeiten, durch die die raumzeitliche Gütertransformation und die damit zusammenhängenden Transformationen hinsichtlich der Gütermengen und -sorten, der Güterhandhabungseigenschaften sowie der logistischen Determiniertheit der Güter geplant, gesteuert, realisiert oder kontrolliert werden. Durch das Zusammenwirken dieser Tätigkeiten soll ein Güterfluss in Gang gesetzt werden, der einen Lieferpunkt mit einem Empfangspunkt möglichst effzient verbindet.“* [Pfo18, S. 12]

Somit resultiert aus der Verkehrs- und Transportleistung sowie den darüber hinausgehenden Leistungen eine Logistikdienstleistung [Muc+21, S. 34]. Beispielsweise werden beim Transport von Waren, welche eine Kühlung benötigen und somit eine Steuerung der Temperatur erfordern, weitere Leistungen notwendig.
Vor dem Hintergrund der Zielsetzung der Arbeit liegt der Fokus im Folgenden auf Ortsveränderungen von Gütern.

2.1.1 Logistik

Die Logistikbranche erzielte 2021 in Deutschland mit 3,36 Mio. Erwerbstätigen ein Marktvolumen von 294 Mrd. Euro und übertrifft somit die Zahlen von 2019 und 2020, was das Wachstum dieser Branche bestätigt [PK22, S. 6]. Dieses Volumen wird differenziert in die Funktionsbereiche Transport, Umschlags-, Umordnungs- und Lagerungsaktivitäten, Beständewirtschaft und die zugehörigen administrativen Aktivitäten. Diese Verteilung der Funktionen verändert sich gegenüber den Vorjahren nicht wesentlich. Abbildung 2.2 (innen) stellt die aktuelle Verteilung nach dem Volumen dar. Es zeigt sich, dass 45 % des Volumens auf Transportleistungen (Bewegung von Gütern) fallen.
Ein Logistiksystem dient nach *Pfohl* der raumzeitlichen Gütertransformation - folglich der Raum- und Zeitüberbrückung [Pfo18, S. 3]. Hierzu verhelfen die „Transportieren, Umschlagen, Lagern (TUL)“-Prozesse, welche die Kernleistungen der Logistik bilden. Der Transport (zur Raumüberbrückung), Umschlags- (zur Mengenanpassung), Umordnungs- und Lagerungsaktivitäten (zur Zeitüberbrückung) zählen somit zu den operativen Funktionsbereichen der Logistik. Mit weiteren verbundenen Prozessen, wie das Kommissionieren (zur Auftragszusammenstellung), ergibt sich die Gesamtheit aller Logistikprozesse. Zusätzlich gibt es analytische Funktionen, wie die Beständewirtschaft und administrative Tätigkeiten. Sie entwickeln und organisieren die Prozesse, Strukturen und Systeme [Chr23, S. 26; Gud12, S. 1].
Mit der Aufteilung des Branchenumsatzes in spezifische Logistiksegmente ergibt sich aus Abbildung 2.2 (außen) ein interessantes Bild bezüglich der Bedeutung der Logistiksegmente, die mit dem Straßengüterverkehr assoziiert werden. Etwa 78 % des Branchenumsatzes entfallen auf Segmente, die hauptsächlich den Transport auf der Straße nutzen, während nur etwa 22 % des Branchenumsatzes auf Logistiksegmente entfallen, die nicht oder nur teilweise mit dem Straßengüterverkehr verbunden sind, wie standortbezogene Dienst-

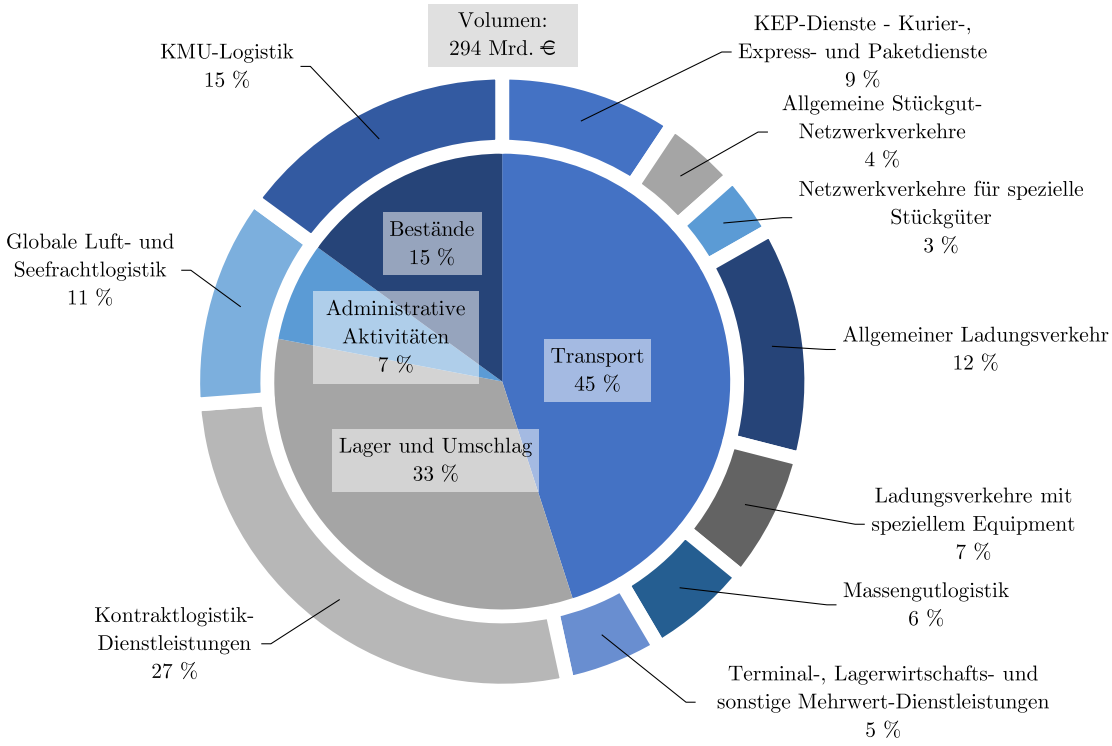


Abbildung 2.2: Logistikvolumen nach Leistungsart (innen) und Logistiksegmenten (außen) 2021 (beide prozentuale Aufteilungen sind voneinander unabhängig; in Anlehnung an [PK22, S. 7])

leistungen (z. B. Terminaldienstleistungen), Luft- und Seefracht oder Massengutlogistik (hauptsächlich mittels Eisenbahn und Binnenschiff). [Rol20, S. 22]
Die Logistiksegmente werden im Wesentlichen durch Gewichtsbereiche und das Volumen definiert, welche in Tabelle 2.1 nach der *TOP100 der Logistik* dargestellt werden. Die *TOP100 der Logistik*[2] bezeichnet die Stückgutlogistik als Stückgut-Netzwerkverkehr[3].

2.1.2 Verkehr und Güterverkehr

Verkehr

Ortsveränderungen resultieren gewöhnlich aus den Ortsabweichungen menschlicher Aktivitäten (Wohnen und Arbeiten) sowie dem Angebot und der Nachfrage eines Gutes [Rüh18, S. 4]. Folglich entsteht Verkehr durch die Gesamtheit aller beobachteten Bewegungen und den zugehörigen Merkmalen. Ortsveränderungen ohne Transporte sind Leerfahrten [Ihd01, S. 6]. Diese sind nicht zu vermeiden, jedoch dem Verkehr zuzuordnen. Durch Optimierung besteht die Möglichkeit, diese zu verringern. Eine weitere relevante Zuordnung

[2]Die TOP100 der Logistik ist eine Studie zum deutschen und europäischen Logistikmarkt, welche jährlich veröffentlicht wird. Im Jahr 2023 wird die Studie als digitale Daten- und Analyseplattform neu aufgesetzt.
[3]In der vorliegenden Arbeit werden vorrangig die Begriffe Stückgutlogistik und Stückgutverkehr verwendet.

Tabelle 2.1: Logistiksegmente und Gewichtsbereiche (in Anlehnung an [Pfl+20a, S. 81])

Gewichtsbereich	**Logistiksegmente**	
<32 kg	KEP-Dienste - Kurier-, Express- und Paketdienste	
32 - 3.500 kg	Allgemeine Stückgut-Netzwerkverkehre	
	Netzwerkverkehre für spezielle Stückgüter	
>3.500 kg	Allgemeine Ladungsverkehre	
	Spezielle Ladungsverk.	Tank- und Silotransporte
		Schwerguttransporte
		Ladungsverkehre spez. Equipment
hohes Volumen	Massengutlogistik	
divers	Terminal- und Lagerwirtschafts-Dienstleistungen	
	Kontraktlogistik-Dienstl.	Industrielle Kontraktlogistik
		Konsumgüterkontraktlogistik
Container/ hohes Volumen	Internat. Spedition	Seefracht
geringes Volumen		Luftfracht
divers	KMU-Logistik	

zum Verkehr ist, dass Ortsveränderungen von Personen und Gütern außerhäuslich oder zwischen- bzw. außerbetrieblich erfolgen [Abe09, S. X; Kum10, S. 33–35].
Die Durchführung von Ortsveränderungen wird durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst, denn das Verkehrssystem hat verschiedene Eigenschaften, welche für die Durchführung verwendet werden. Das Verkehrssystem ist ein integraler Bestandteil des Gesellschaftssystems und umfasst alle notwendigen Aspekte des Transportes von Gütern. Dazu gehören als technische Systeme Verkehrsmittel und -anlagen sowie die rechtlichen und institutionellen Rahmenbedingungen, welche das Verkehrsangebot bestimmen. Als Gesellschaftssystem vertritt es die Gesamtheit aller politischen, ökonomischen und sozialen Aktivitäten eines Bereiches. Entscheidungen im Gesellschaftssystem beeinflussen das Verkehrssystem und umgekehrt. Somit haben Veränderungen in der Gesellschaft ebenfalls Auswirkungen auf die Entscheidungen im Verkehrssystem. Zudem werden Verkehrssysteme durch äußere Faktoren beeinflusst, die sowohl auf die einzelnen Bestandteile des Systems als auch auf das Gesamtsystem Auswirkungen haben. Die Entstehung des Verkehrs durch die Wechselwirkung zwischen dem Verkehrssystem, den politischen, ökonomischen und sozialen Aktivitäten und den Verkehrsströmen verdeutlicht die Abbildung 2.3. [Rüh18, S. 4]
Eine begrenzte Betrachtung eines Verkehrssystems, ohne Berücksichtigung seiner Umgebung, kann zu inkorrekten Erkenntnissen über die zukünftigen Zustände des Systems führen [AH06, S. 37–38].
Ein Verkehrssystem beschreibt die Zusammenarbeit von technischen und organisatorischen Einrichtungen, die erforderlich sind, um die Ortsveränderung von Personen und Gütern zu ermöglichen [Kum10, S. 38]. Allgemein ist ein System eine Anordnung von Elementen, die in Beziehung stehen. Allerdings ist die Bezeichnung von Systemelementen

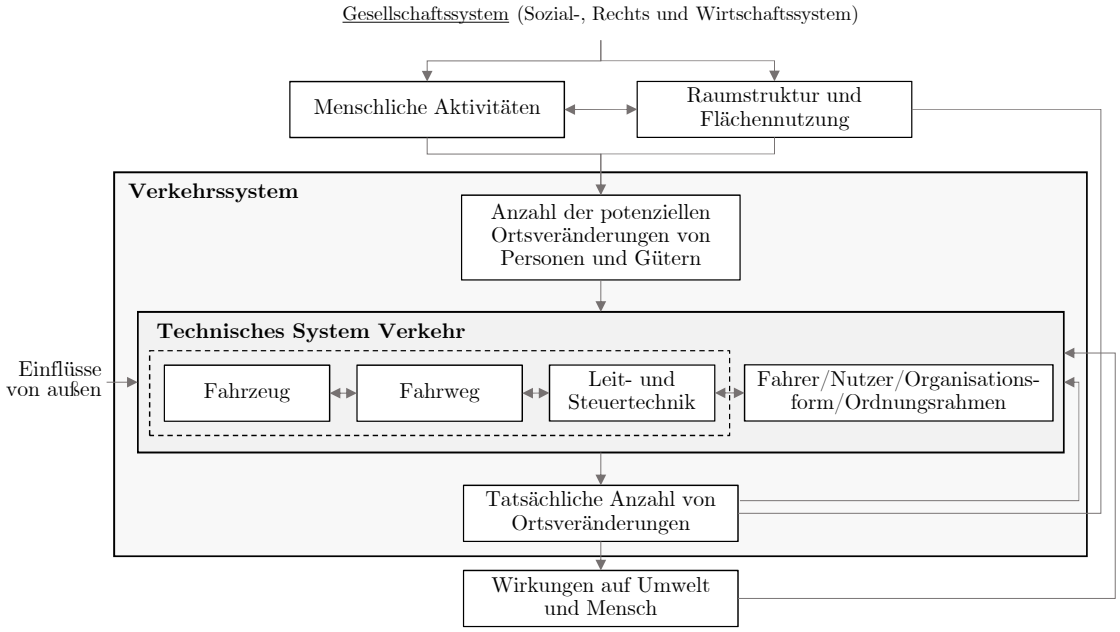


Abbildung 2.3: Entstehung von Ortsveränderungen (in Anlehnung an [Köh14, S. 18])

des Verkehrs nicht einheitlich, weshalb in dieser Arbeit auf die Definitionen von Kummer zurückgegriffen wird. Kummer stellt seine Definitionen und Beschreibungen als einheitliches Begriffssystem dar und berücksichtigt den Gebrauch in der Praxis.
Zur Realisierung von Verkehrsleistungen mit den Kernfunktionen Transport, Abfertigung, Wegsicherung, Vorhaltung, Disposition und weiteren Hilfsfunktionen wird eine Verkehrsinfrastruktur benötigt. Diese beinhaltet die ortsfesten Komponenten, wie die Verkehrswege (Kanten des Systems) und die Stationen (Knotenpunkte des Systems). Verkehrswege greifen auf Verkehrsmedien wie Land, Wasser und Luft zu und beinhalten Wege und technische Einrichtungen, die zur Durchführung von Transporten (und Leerfahren) relevant sind. Zum Transport und Umschlag von Verkehrsobjekten (Güter, Personen oder Nachrichten) werden technische oder natürliche Einrichtungen als Verkehrsmittel verwendet. Beispiele für Verkehrsmittel mit Antrieb sind Kraftwagen und Flugzeuge sowie ohne Antrieb sind Fahrräder oder Waggons. Zudem gibt es noch Sonderausführungen wie Schwertransporter. Die Zusammenfassung aller Verkehrsmittel, die dieselbe Art von Verkehrsinfrastruktur verwenden, wird als Verkehrsträger bezeichnet. Hierbei wird in acht Arten differenziert, welche in Abbildung 2.4 dargestellt sind. [Kum10, S. 38–40]
Eine weitere Unterscheidung von Verkehrssystemen wird anhand des Verkehrs- bzw. Transportobjektes getroffen [Abe09, S. 18–21]. Hierbei wird in Güterverkehr und Personenverkehr differenziert [Kum10, S. 53]. Ebenfalls ist eine Klassifizierung nach dem Verkehrsanlass möglich. *Wermuth* und *Wirth* unterscheiden die entstehende Ortsveränderung nach *„…erwerbswirtschaftlichen, gemeinwirtschaftlichen oder dienstlichen Zwecken“* [WW05, S. 296]. Folglich ist eine Abgrenzung des Wirtschaftsverkehrs von Privatverkehr und des Güterverkehrs von Personenverkehr möglich. Der Wirtschafts- und Privatverkehr ist nach Objekten aufgeteilt. Aus Ortsveränderungen von Gütern mit privaten Zwecken folgt der Güterprivatverkehr und mit gewerblichen Zwecken der Güterwirt-

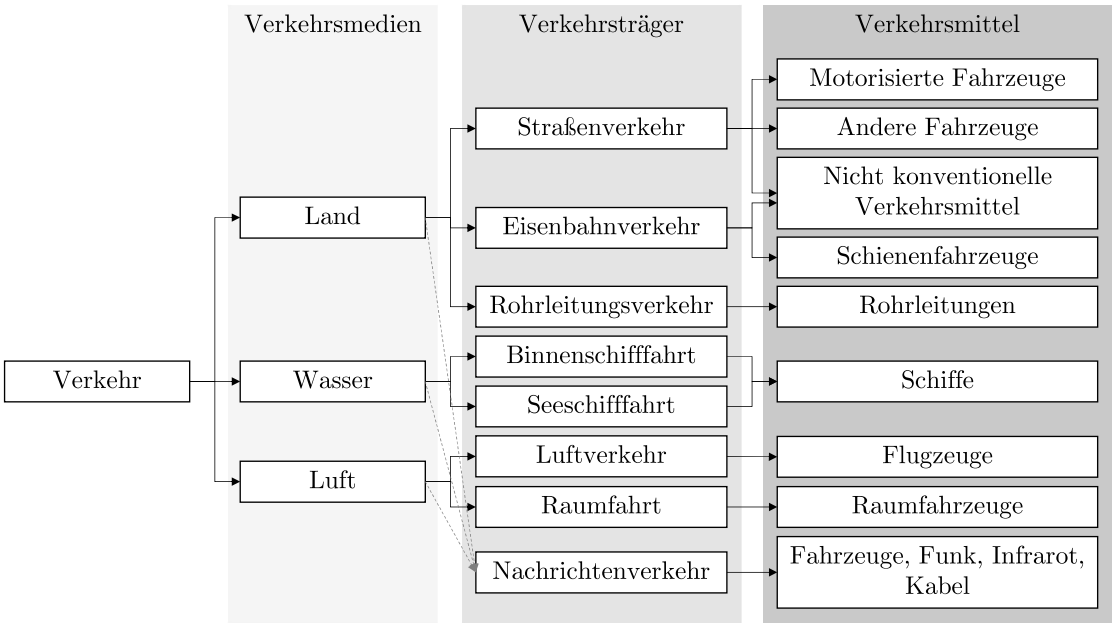


Abbildung 2.4: Verkehrsmedien, -träger und -mittel (in Anlehnung an [Kum10, S. 41])

schaftsverkehr. Bei Personenverkehr gilt der gleiche Zusammenhang (siehe obere Tabelle in Abbildung 2.5).
Nachfolgend wird ausschließlich der Güterwirtschaftsverkehr behandelt und wird synonym als Güterverkehr bezeichnet. Diese kürzere und gebräuchlichere Schreibweise wird im Folgenden vorwiegend verwendet. Dienstleistungsverkehre werden aufgrund der Überlegenheit des Personentransports und der schwierigen Identifizierung der transportierten Güter nicht betrachtet.

Güterverkehr

Als weitere Differenzierung des Güterverkehrs dienen die unterschiedlichen Verkehrsträger. Aufgrund der Fokussierung auf den Straßengüterverkehr wird in Abbildung 2.5 der Güterverkehr mit dem Verkehrsträger Straße in unterschiedliche Entfernungsbereiche unterteilt. Hierzu wird die statistische Klassifikation der Entfernungsbereiche des Kraftfahrt-Bundesamts herangezogen. Im Straßengüterverkehr gibt es drei Unterscheidungen von Verkehren: den Nahverkehr, den Regionalverkehr und den Fernverkehr. Der Nahverkehr bezieht sich auf Ortsveränderungen mit Wegstrecken, die weniger als 50 Kilometer betragen, während der Regionalverkehr Wegstrecken zwischen 50 und 150 Kilometern und der Fernverkehr Strecken über 150 Kilometer umfassen [Kra23].
Der Nahverkehr bzw. Regionalverkehr findet überwiegend mit Güterkraftfahrzeugen statt. Güterkraftfahrzeuge sind deutlich zeitüberlegener, da das Straßennetz eine höhere Dichte als das Schienen- und Wassernetz hat [Pfo18, S. 178]. Trotzdem kann die Verwendung einer Kombination aus Eisenbahn-, Binnenschiff- und Güterkraftfahrzeuge-Transport, auch als kombinierter Verkehr bekannt (siehe Kapitel 2.2.4), aufgrund seiner ökonomischen und ökologischen Vorteile gegenüber dem ausschließlichen Einsatz von Güterkraftfahrzeugen im Güterverkehr von Nutzen sein.

Verkehrsanlass	Güterverkehr		Personenverkehr
Privatverkehr	Güterprivatverkehr Einkaufsverkehr, Besorgungsverkehr, Umzugsverkehr, Entsorgungsverkehr		Personenprivatverkehr Arbeitsverkehr, Ausbildungsverkehr, Freizeitverkehr
Wirtschaftsverkehr (gewerblich)	Güterwirtschaftsverkehr Ver-/Entsorgung von Handel, Industrie, Gewerbe, öffentl. Einrichtungen, Baustellenverkehr	Dienstleistungsverkehr Wartungs-/Reparaturarbeiten, Handwerkerfahrten	Personenwirtschaftsverkehr (Dienstreisen, Dienstfahrten)

Entfernungsbereich	Verkehrsträger: Straße
Nah (< 50 km)	Straßengüternahverkehr
Regional (50 bis 150 km)	Straßengüterregionalverkehr
Fern (> 150 km)	Straßengüterfernverkehr

Abbildung 2.5: Einordnung des Wirtschaftsverkehrs zu anderen Verkehrsarten (in Anlehnung an [Arn10, S. 22; Rol20, S. 17; Rüh18, S. 6])

Im Fernverkehr hat die Eisenbahn durchschnittlich höhere Transportgeschwindigkeiten, die jedoch durch zusätzliche Übergangs- und Zustellungszeiten durch das Güterkraftfahrzeug ausgeglichen werden können. Zur Beförderung großer und gleichförmiger Mengen über längere Entfernungen zeichnet sich durch den Kostenvorteil die Binnenschifffahrt aus. Somit stehen die drei Verkehrsmittel im Wettbewerb. Folglich wird versucht, die Vorteile der jeweiligen Verkehrsmittel sinnvoll zu kombinieren. Außerdem ist die Anzahl der Umschlagsoperationen möglichst gering zu halten und zu automatisieren. Ein Beispiel für einen intermodalen Transport bzw. kombinierten Verkehr ist der Containerverkehr. Der Fernverkehr findet auf dem Land (Schiene und Straße), zu Wasser und in der Luft statt, wohingegen der Regional-/Nahverkehr vorwiegend auf der Straße durchgeführt wird. [Pfo18, S. 177–180]
Neben dieser Einteilung wird der Güterverkehr unter gewissen Voraussetzungen auch Werkverkehr bezeichnet. Der Werkverkehr bezieht sich auf den Transport von Gütern, der von Unternehmen zur Erfüllung ihrer eigenen Aufgaben durchgeführt wird, wobei der Transport nicht die Haupttätigkeit des Unternehmens sein darf [Bun23b].

Die Güterverkehrsnachfrage entwickelt sich durch die Interaktion unterschiedlicher Akteure (siehe Abbildung 2.6). Gegenteilig geschieht es im Personenverkehr. Schließlich entscheidet das Individuum selbst. Die Umsetzung der Ortsveränderung resultiert aus den Bereichen Produktion, Handel, Lagerung und Transport, die durch die wechselseitige Beeinflussung von Angebot und Nachfrage miteinander verknüpft sind. Es entsteht (Güter-)Verkehr auf der Infrastruktur. Die Güterverkehrsnachfrage wird durch Entscheidungen und Interessen von Akteuren, die an den Schnittstellen zwischen den güterverkehrsrelevanten Bereichen, wie Konsum, Produktion, Handel, Logistik und Verkehr, getätigt werden, beeinflusst. [Rüh18, S. 11]
Somit sind die Akteure mit direktem Einfluss auf den Güterverkehr - Versender, Empfänger, Transporteur und die öffentliche Hand (Ansatz von [Bal13, S. 52]) - die wichtigsten Entscheidungsträger für die Güterverkehrsnachfrage. Dies umfasst gewerbliche und priva-

te Empfänger bzw. Versender mit Bedarf an einer Ortsveränderung eines Gutes sowie Transportdienstleister, die diese Ortsveränderung ausführen. Die öffentliche Hand als gegenüberstehender Akteur stellt die dafür in Frage kommende Infrastruktur und regelt deren Nutzung. Zusätzlich gibt es Stakeholder mit indirektem Einfluss, wie beispielsweise Wirtschaftsverbände, Industrie- und Handelskammern, Nahverkehrsorganisationen und Anwohner. [Rüh18, S. 11–12]

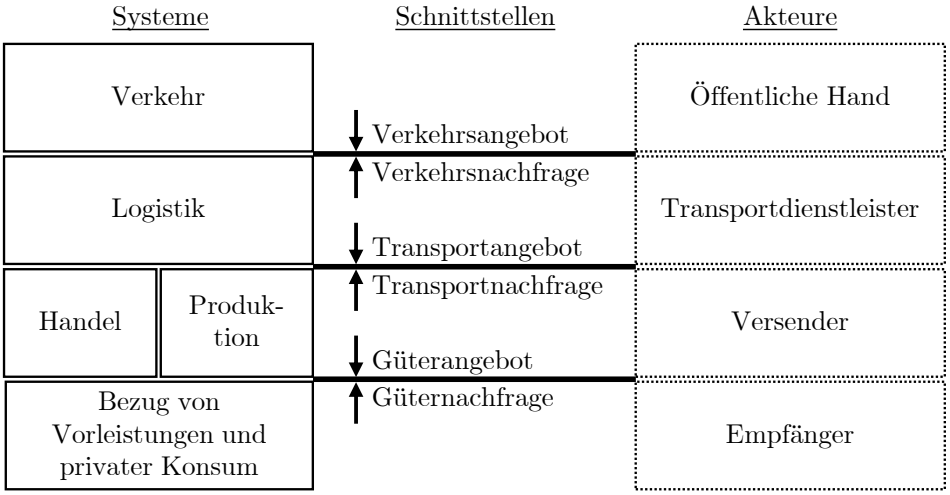


Abbildung 2.6: Zusammenhang zwischen Logistik- und Güterverkehrsnachfrage (in Anlehnung an [Rüh18, S. 12])

Die Ziele und Gestaltungsmöglichkeiten relevanter Akteure im Güterverkehr lassen sich wie folgt zusammenfassen [Rüh18, S. 13–14]:

- Der **Versender** gilt als Bezugsquelle der Ware und Auftragsgeber des Transporteurs. Es gilt der Anspruch, die Wünsche des Kunden zu erfüllen. Folglich resultiert eine bedarfsgerechte Lieferung zu minimalen Aufwendungen, welche die Lieferbedingungen des Transporteurs beeinflussen.
- Der **Empfänger** legt mit seinen Entscheidungen über den Warenkauf, den Ort und den Zeitpunkt der Zustellung die wesentlichen Rahmenbedingungen der Beförderung fest. Seine Bestrebung ist, die gewünschten Güter bedarfsgerecht zu minimalen Kosten zu beziehen.
- Der **Transportdienstleister** strebt die bestmögliche Realisierung der Wünsche von Empfänger und Versender an. Dies ist der hochqualitative Transport zu minimalen Kosten, für den er seine eigene logistische Infrastruktur (Transportmittel etc.) und die Verkehrsinfrastruktur benötigt.
- Die **öffentliche Hand** ist für die Bereitstellung der Verkehrsinfrastruktur und deren Regeln zuständig. Somit ist es das Ziel, ein leistungsfähiges Verkehrssystem unter Abwägung aller Interessen der Stakeholder (ökonomisch, ökologisch und sozial) zu garantieren. Eine Besonderheit ist die Privatisierung der Verkehrsinfrastruktur. Private Unternehmen werden von der öffentlichen Hand beauftragt, unter deren Regeln die Infrastruktur zu betreiben. Beispielsweise betreibt die DB InfraGO AG das Schienennetz in Deutschland.

2.2 Straßengüterverkehr

Der Straßengüterverkehr beschreibt sämtliche Transporte von Waren und Gütern über den Verkehrsträger Straße mithilfe der Verkehrsmittel Kraftfahrzeuge. Er bietet verschiedene Vorteile, wie eine hohe Flexibilität, direkte Transporte von Haus zu Haus sowie eine flächendeckende Güterverteilung [GF12, S. 65]. Trotz dieser Vorteile sind im Straßengüterverkehr Herausforderungen zu bewältigen. Beispiele sind Verkehrsengpässe, Umweltauswirkungen und die Einhaltung von Verkehrsregeln und Vorschriften. Zur effizienten und nachhaltigen Gestaltung werden verschiedene Maßnahmen ergriffen. Dies können beispielsweise die Förderung umweltfreundlicher Fahrzeuge, die Nutzung von Routenoptimierung und die Verbesserung der infrastrukturellen Rahmenbedingungen für den Straßengüterverkehr sein.
Der Straßengüterverkehr ist die bedeutendste Komponente des Güterverkehrssystems. Die Verkehrsleistung in Deutschland stieg jahrelang kontinuierlich an, bis die Corona-Pandemie 2020 zu einem Einbruch führte. Im Jahr 2022 lag die Verkehrsleistung mit 504,8 Mrd. Tonnenkilometer wieder über dem Niveau des Vorkrisenjahres 2020 [Sta23]. Ein ähnlicher Verlauf ist bei dem Eisenbahngüterverkehr zu beobachten (siehe Abbildung 2.7). Diese Leistung liegt bei einem Viertel des Wertes des Straßengüterverkehrs.

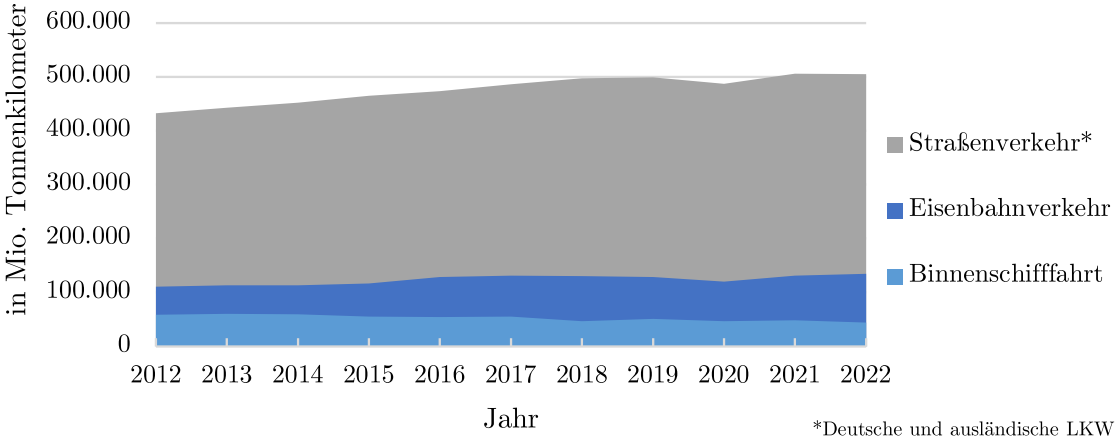


Abbildung 2.7: Beförderungsleistung Deutschlands nach Verkehrsträgern in Mio. Tonnenkilometern (in Anlehnung an [Sta23])

2.2.1 Systemelemente des Straßengüterverkehrs

Zu den Systemelementen des Straßengüterverkehrs zählen die Fahrzeuge und die Verkehrsinfrastruktur. Die beiden Elemente werden im Folgenden erläutert.

Fahrzeuge

Fahrzeuge sowie Fahrzeugkombinationen, die zur Durchführung des Straßengüterverkehrs notwendig sind, werden anhand einer Vielzahl von Merkmalen charakterisiert und klassifiziert. Dazu zählen die Größe, das Gewicht, die Geschwindigkeit, das Design,

die Antriebseigenschaften, das Fahrverhalten, der Komfort und die Fahrzeugflexibilität. Diese Merkmale resultieren aus den gesetzlichen Rahmenbedingungen und spezifischen Einsatzanforderungen. [Kum10, S. 191]
Die Fahrzeuge sind ein- und zweispurig sowie motorisiert und nicht motorisiert. Einspurige Fahrzeuge sind beispielsweise Fahrräder oder Lastenräder mit und ohne Motor, welche in den letzten Jahren in den Innenstädten vermehrt zum Einsatz gekommen sind. Zweispurige und motorisierte Fahrzeuge werden den Güterkraftfahrzeugen zugeordnet, als Beispiel Lastkraftwagen und Zugmaschinen. Bei beiden Fahrzeugen ist eine Kombination mit einem Anhänger (Anhängerzüge und Sattelzüge) möglich. Güterkraftfahrzeuge werden anhand der folgenden gesetzlich festgelegten Kriterien unterschieden: das zulässige Gesamtgewicht, die Achsenanzahl, die Abmessungen, die Aufbauart und der Anhänger-/Aufliegermitführung [Arn+08, S. 728]. Das bekannteste Klassifizierungsmerkmal bei diesen Fahrzeugen ist das Gewicht. Zur einheitlichen Klassifizierung gibt es die EU-Richtlinie 96/53/EG. Sie strukturiert die Fahrzeuge bis zu einem zulässigen Gesamtgewicht von 3,49 t als leichtes Güterkraftfahrzeug (N1), zwischen einem zulässigen Gesamtgewicht von 3,5 t bis 12 t als mittelschweres Güterkraftfahrzeug (N2) und darüber hinaus als schweres Güterkraftfahrzeug (N2) [Der96]. Zusätzlich werden die Fahrzeuge in folgende Gewichtsklassen eingeteilt:

Tabelle 2.2: Gewichtsklassen von LKW (in Anlehnung an [DL13, S. 141])

Bezeichnung	**zulässiges Gesamtgewicht**	**Achsenanzahl**
2,8 t	<2,8 t	2
3,5 t	<3,5 t	2
7,5 t	<7,5 t	2
12 t	<12 t	2
18 t	<18 t	2
26 t	<26 t	3
32 t	<32 t	4

Alle Fahrzeuge über 3,5 t werden vorwiegend kundenspezifisch sowie einsatzbezogen für die jeweiligen Unternehmen hergestellt [Arn+08, S. 729]. Je nach Einsatzzweck gibt es verschiedene Aufbauten, wie den Kofferaufbau, Pritschenaufbau mit Plane, Kipper, Tank, Müllabfuhr, Winterdienst oder Sonderanfertigungen für Rettungsdienste [Arn+08, S. 729]. Im Straßengüterverkehr werden vorwiegend Koffer, die gekühlt und ungekühlt betrieben werden können, und Pritschenaufbauten mit Plane verwendet, welche in Abbildung 2.8 dargestellt werden. Im Falle von Schüttgut oder Flüssigkeiten kommen Kipper- sowie Tankaufbauten zum Einsatz. Zur Trennung des Aufbaus und des Fahrzeugs werden austauschbare Ladehilfsmittel, wie ISO-Container und Wechselbrücken[4] genutzt.

[4]Wechselbrücken sind Ladehilfsmittel mit ausklappbaren Stützfüßen, welche sich unterfahren, am Fahrzeug fixieren und wieder trennen lassen (ähnlich zum ISO-Container).

(a) Koffer-Aufbau (b) Kühlkoffer-Aufbau (c) Pritschen-Aufbau mit Plane

Abbildung 2.8: Aufbauten von LKW (Quelle: [WH20, S. 755] und Daimler Truck AG)

Damit lässt sich die Auslastung kostspieliger Fahrzeuge effizienter gestalten und eine Unabhängigkeit der Be- und Entladung erreichen [Arn+08, S. 729]. Die Motorisierung der Fahrzeuge strukturiert sich in die folgenden drei Antriebstechnologien:

- Verbrennungsantrieb (mit Diesel, Erdgas oder anderen Kraftstoffen)
- Batterieelektrischer Antrieb
- Brennstoffzellenantrieb

Der Dieselantrieb ist die am häufigsten verwendete Antriebsart für LKW. Diese Motoren sind aufgrund ihrer Kraftstoffeffizienz und hohen Drehmomentwerten bei niedrigen Drehzahlen ideal für den Straßengüterverkehr. Beim Erdgasantrieb wird lediglich der Motor und Tank ausgetauscht. Diese Tankvorgänge ähneln dem Diesel-Tankvorgang. Bei beiden Kraftstoffen sind Reichweiten bis zu 1.000 km möglich. Durchschnittliche Laufleistungen von LKW liegen laut einer Fraunhofer-Studie zwischen 400-800 km [KUW19, S. 10]. In einer Studie des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) werden mithilfe der Fahrleistungserhebung von 2014 und des Verkehrsmodells von PTV Validate mittlere Tagesfahrweiten von drei Größenklassen ermittelt [Jöh+22, S. 23, 24]. In der Abbildung 2.9 ist das Ergebnis dargestellt. Fast die Hälfte aller LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht von unter 12 t legen zwischen 50 und 100 km pro Tag zurück (ohne Berücksichtigung von speziellen Ausnahmefällen). Im Gegensatz dazu variieren die täglichen Fahrleistungen von größeren Lastwagen erheblich. LKW mit einem Gewicht von mehr als 26 t fahren über die Hälfte ihrer Gesamtfahrleistung mit Tagesdistanzen von über 400 km. Somit sind die Fahrweiten stark vom Anwendungsfall abhängig, welche Chancen für neue Antriebe als nachhaltige Alternative zu den Verbrennungsmotoren bieten. In Kapitel 3.1 werden diese näher beschrieben.

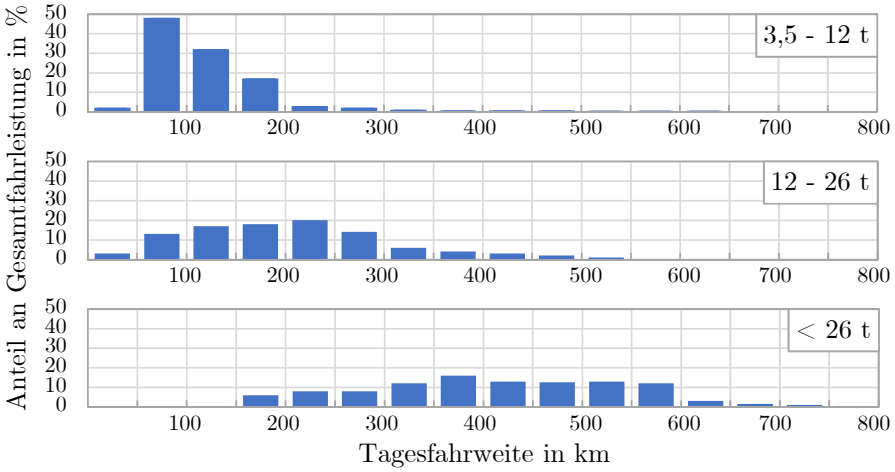


Abbildung 2.9: Verteilung der Tagesfahrweiten unterteilt in drei Größenklassen von LKW (in Anlehnung an [Jöh+22, S. 24])

Verkehrsinfrastruktur

Für die Ortsveränderungen im Straßengüterverkehr steht die von der öffentlichen Hand bereitgestellte Verkehrsinfrastruktur zur Verfügung. Die Infrastruktur besteht aus den Verkehrskanten Straßen. Der Großteil des Netzwerkes von Straßen ist für die Öffentlichkeit zugänglich. Im Vergleich zu Schifffahrtswegen bzw. Binnenschifffahrtsstraßen, die größtenteils durch die Natur gestaltet werden, müssen hierzu Investitionen für bauliche Maßnahmen und Sicherheitseinrichtungen erfolgen [Kum10, S. 174]. Zusätzlich entstehen Kosten für den Betrieb, Reparaturen und Instandhaltungsmaßnahmen. Nicht zugängliche Straßen sind Privatstraßen, die von einem privaten Betreiber bewirtschaftet werden. Straßennetze werden in die folgenden Kategorien strukturiert [Kum10, S. 174, 175]:

- Primäres Straßennetz (z. B. Autobahnen, Schnellstraßen)
- Sekundäres Straßennetz (z. B. Bundesstraßen, Landesstraßen)
- Tertiäres Straßennetz (z. B. Kreisstraßen, Gemeindestraßen)

Das primäre Straßennetz besteht aus mehrspurigen Straßen für den überregionalen, nationalen und internationalen Fernverkehr. Diese erfordern aufgrund ihrer kreuzungsfreien Anordnung und höheren Geschwindigkeiten eine aufwendige und kostspielige Planung. Das sekundäre Straßennetz umfasst alle sonstigen überregionalen Straßen, die vorwiegend dem regionalen Verkehr dienen und Regionen an das primäre Netz anbinden. Das tertiäre Straßennetz dient der Erschließung von Flächen und dem lokalen Verkehr. [Kum10, S. 175]
Die gesamte Verkehrsinfrastruktur in Deutschland bestand im Jahr 2023 aus 830.000 km Straßen, aufgegliedert in ca. 230.000 km für das überörtliche Netz (primäres und sekundäres Straßennetz + Kreisstraßen) und ca. 600.000 km für das kommunale Netz [Bun23d].

2.2.2 Transportmarkt

Auf dem Transportmarkt begegnen sich Angebot und Nachfrage von Transportdienstleistungen. Die Akteure auf diesem Markt umfassen einerseits die Anbieter von Transportleistungen, wie Transportunternehmen, Frachtführer und Spediteure. Auf der Nachfrageseite stehen Verlader, Versender oder Auftraggeber, darunter Industrie- und Handelsunternehmen sowie öffentliche Institutionen. [GF16, S. 67]
Des Weiteren beschreibt der Transportmarkt die Potentiale des Straßengüterverkehrs in der Logistik. Bestimmte Bereiche der Logistik haben unterschiedliche Perspektiven für Güterkraftfahrzeuge. Der Transportmarkt des Straßengüterverkehrs fundiert auf den Logistiksegmenten, welche bereits in Kapitel 2.1.1 und in Tabelle 2.1 vorgestellt werden. In jedem Segment werden Güterkraftfahrzeuge mit unterschiedlichen Gewichts- und Volumenkapazitäten sowie Einsatzhäufigkeiten benötigt [Jöh+23, S. 22]. Ebenso ist eine Kombination mit anderen Verkehrsträgern (z. B. Eisenbahn oder Schiff) möglich. Es resultiert der kombinierte Verkehr. Die unterschiedliche Ausprägung der verwendeten Fahrzeuge in den Logistiksegmenten wird in Abbildung 2.10 für das Jahr 2020 dargestellt. Über den Umsatzanteil in Prozent der jeweiligen Fahrzeugsgewichtsklasse vom Gesamtumsatz des Segments wird deren Nutzung und somit die Unterschiede zwischen den Segmenten verdeutlicht. Für KEP-Dienstleistungen und KMU-Logistik wurden die höchsten Umsätze für leichte Fahrzeuge im Nahtransport aufgewendet, was eine vorwiegende Nutzung von leichten Fahrzeugen bestätigt. Mittelschwere und schwere Fahrzeuge werden ebenfalls in geringem Ausmaß in diesen Segmenten genutzt. In der KMU-Logistik werden die Beförderungen meist intern durchgeführt [Jöh+23, S. 148]. Mittelschwere LKW kommen hauptsächlich in Stückgut-Netzwerkverkehren (allgemein und speziell) und bei Kontraktlogistik-Dienstleistungen zum Einsatz. Im Bereich des Stückguts werden die schweren LKW hauptsächlich für den Hauptlauf, der Überbrückung von langen Strecken, verwendet. Leichte Fahrzeuge unterstützen bei einzelnen und eiligen Sendungen. Bei Kontraktlogistik-Dienstleistungen finden Transporte in allen Volumen und Gewichten statt, weshalb alle Fahrzeuge zum Einsatz kommen. Im Ladungsverkehr (allgemein und speziell) werden vorwiegend schwere LKW zum Transport genutzt. Die Güter werden in Teil- oder Komplettladungen über große Strecken befördert, was zu großen Volumen und hohen Gewichten führt. Für Terminal-, Lagerwirtschafts- und sonstige Mehrwert-Dienstleistungen werden keine Umsätze im Nah- oder Fernverkehr aufgewendet. Hierbei finden lediglich innerbetriebliche Transporte (z. B. über Krane oder Spezialfahrzeuge) statt. Im Bereich der globalen Luft- und Seefracht werden die Haupttransporte mit dem Flugzeug und Schiff und kaum von Fahrzeugen durchgeführt.

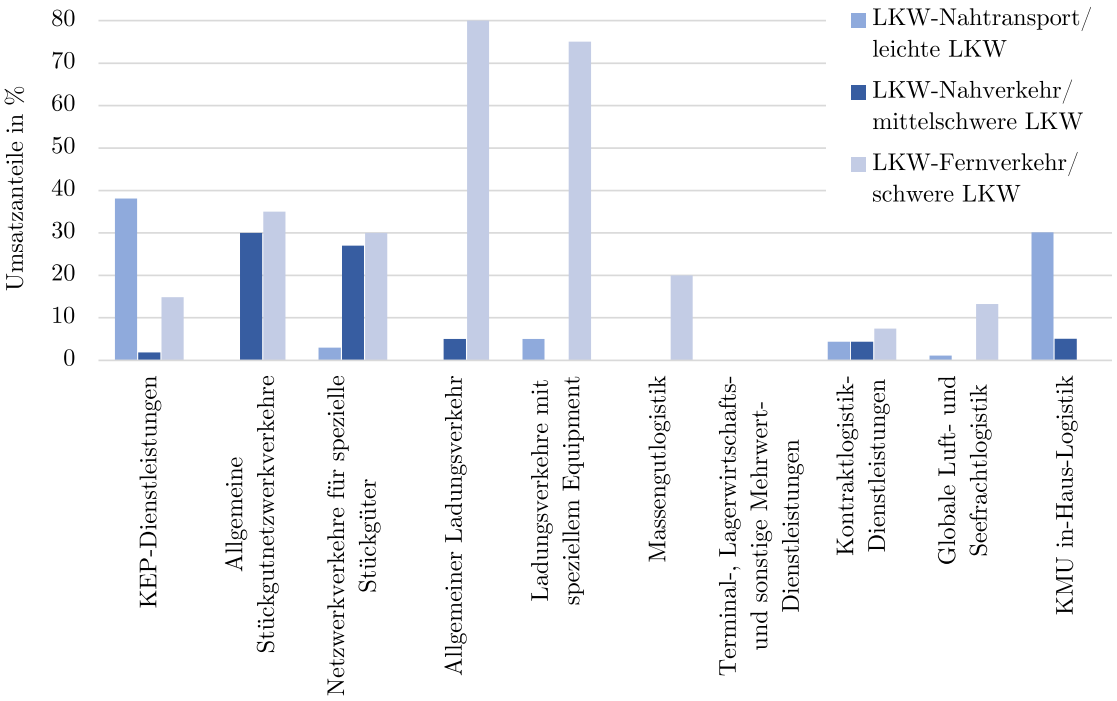


Abbildung 2.10: Umsätze der Logistiksegmente aufgeteilt auf die Gewichtsklassen der Güterkraftfahrzeuge (in Anlehnung an [Pfl+20a, S. 68])

2.2.3 Akteure im Straßengüterverkehr

Prinzipiell werden im Straßengüterverkehr die Akteure in drei Gruppen unterteilt: Versender bzw. Verlader, Transportdienstleister und Empfänger. Diese Teilnehmer werden in Kapitel 2.1.2 beschrieben. Transportdienstleister sind beispielsweise Spediteure, Frachtführer, Verkehrsgesellschaften, Paketdienstleister oder die Post. Der Spediteur verpflichtet sich laut Handelsgesetzbuch (HGB), die Versendung des Gutes zu organisieren (§ 453 HGB). Somit liegt seine Verantwortlichkeit im Rahmen der Dienstleistung in der Gestaltung der logistischen Abläufe und unterteilt sich in Planung, Optimierung, Durchführung und Steuerung. Für seine Tätigkeiten ist die Bildung von Netzwerken besonders relevant, was für die Qualität seiner Dienstleistung entscheidend ist. Zudem zählen die Auswahl des Verkehrsmittels, die Routenoptimierung, der Umschlag und die Lagerung dazu. Der Frachtführer hat laut HGB die Pflicht, die Beförderung eines Gutes vom Ausgangspunkt zum Zielort mit anschließender Übergabe an den Empfänger durchzuführen (§ 407 HGB). Ein Spediteur kann die Pflichten des Frachtführers übernehmen. Zudem ist der Spediteur und Frachtführer nicht auf ein spezifisches Transportgut beschränkt, wie das bei den anderen Transportdienstleistern der Fall ist. [ME13, S. 126, 127]
Ein indirekt am Transportprozess beteiligter und bereits genannter Akteur ist die öffentliche Hand, welche für den Staat, die Länder und Kommunen steht. Zusätzliche indirekte Teilnehmer sind Fahrzeughersteller, IT-Dienstleister, Bauunternehmen sowie die Presse und die Öffentlichkeit. Diese Beteiligten unterstützen die Transportdienstleister durch die Bereitstellung moderner Fahrzeuge, leistungsstarker Soft- und Hardwareprodukte (z. B.

Transportmanagementsoftware) und entsprechende Infrastruktureinrichtungen (Gebäude und Straßen). Dies sind grundlegende Bedingungen für eine effiziente Durchführung des Transportprozesses. Zudem beeinflussen staatliche Instanzen mit der Gesetzgebung und Entscheidungen für Investitionen die Entwicklung der Transportleistung. Ebenso stellen sie die Einhaltung von Gesetzen und Verordnungen sicher. Presse und Öffentlichkeit haben eine aufklärende und wegweisende Rolle. Damit haben sie maßgeblichen Einfluss auf gegenwärtige und zukünftige Entwicklungen in der Transportlogistik, wie beispielsweise die Einführung der Elektromobilität. Alle wesentlichen Akteure werden in der Abbildung 2.11 dargestellt. [ME13, S. 127]
Industrie und Handel haben die Option, eigenständig als Teilnehmer im Güterverkehr zu agieren oder die Verantwortung für den Transport an externe Dienstleister zu übertragen. Bei einer ausschließlichen Betrachtung dieser Dienstleister lässt sich eine Systematisierung basierend auf den bereitgestellten grundlegenden logistischen Dienstleistungen - Transport, Umschlag und Lagerung - vornehmen. [WH20, S. 774]

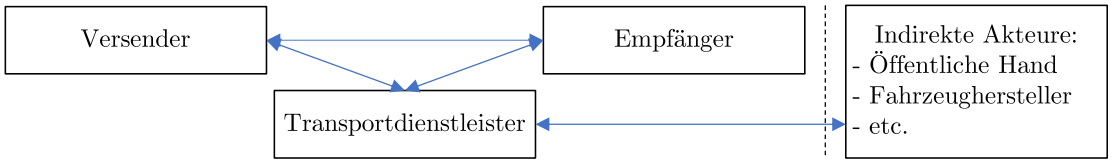


Abbildung 2.11: Akteure im Straßengüterverkehr

2.2.4 Transportformen und Netzwerkstrukturen des Straßengüterverkehrs

Im Straßengüterverkehr werden verschiedene Transportformen durch Unternehmen angeboten. Mithilfe dieser Transportformen und den daraus resultierenden Transportketten erfolgt der Transport von Gütern von der Quelle (Versender) zur Senke (Empfänger). Je nach Umfang und Art des zu transportierenden Auftrags, dem Gewicht, der Größe und der Dringlichkeit können unterschiedliche Transportketten und Netzwerkstrukturen genutzt werden [DL13, S. 145]. Die Transportkette wird durch die DIN 30781 definiert:

> „*Die Transportkette ist die Folge von technisch und organisatorisch miteinander verknüpften Vorgängen, bei denen Personen oder Güter von einer Quelle zu einem Ziel bewegt werden.*“ [DIN89, S. 3]

Transportketten

Bei der Ausgestaltung von Transportketten streben Unternehmen danach, Güter in einem optimalen Zeitrahmen, mit minimalen Kosten und unter größtmöglicher Schonung der transportierten Objekte zu befördern [Bra91, S. 22]. Transportketten können in eingliedrige und mehrgliedrige Strukturen unterteilt werden. Bei eingliedrigen Verkehren erfolgt der direkte Gütertransport ohne signifikante Zwischenstationen von einem Ausgangspunkt (Quelle) zum Ziel (Senke) (siehe Abbildung 2.12). Es findet kein Wechsel des Verkehrsmittels statt [Jün89, S. 238]. Beispielhaft hierfür ist der Teil- und Komplettla-

dungsverkehr, wie eine unmittelbare Versendung von Produkten durch einen Hersteller an den Endkunden.
Im Gegensatz dazu sind mehrgliedrige Transportketten durch eine erhöhte Komplexität gekennzeichnet, da sie durch einen Umschlagsprozess unterbrochen werden [Kum10, S. 56]. Im Falle der Nutzung von nur einem Verkehrsträger wird die Transportkette als unimodal bezeichnet. Diese Bezeichnung gilt auch für eingliedrige Verkehre [Kum10, S. 56]. Multimodale Transportketten entstehen durch den Wechsel zwischen zwei oder mehreren unterschiedlichen Verkehrsträgern. Die Wechsel von Verkehrsträgern können ohne (kombinierter Verkehr) oder mit (gebrochener Verkehr) dem Austausch des Transportbehälters, wie z. B. Container oder Wechselaufbauten, stattfinden. Eine Besonderheit der kombinierten Verkehre neben dem Behälterverkehr stellen der Huckepack-[5], Roll-On-/Roll-Off-[6] und der Trajekt-Verkehr[7] dar [GF16, S. 41]. Hierbei werden meist mehrere komplette Verkehrsmittel auf Trägerverkehrsmittel geladen und transportiert.

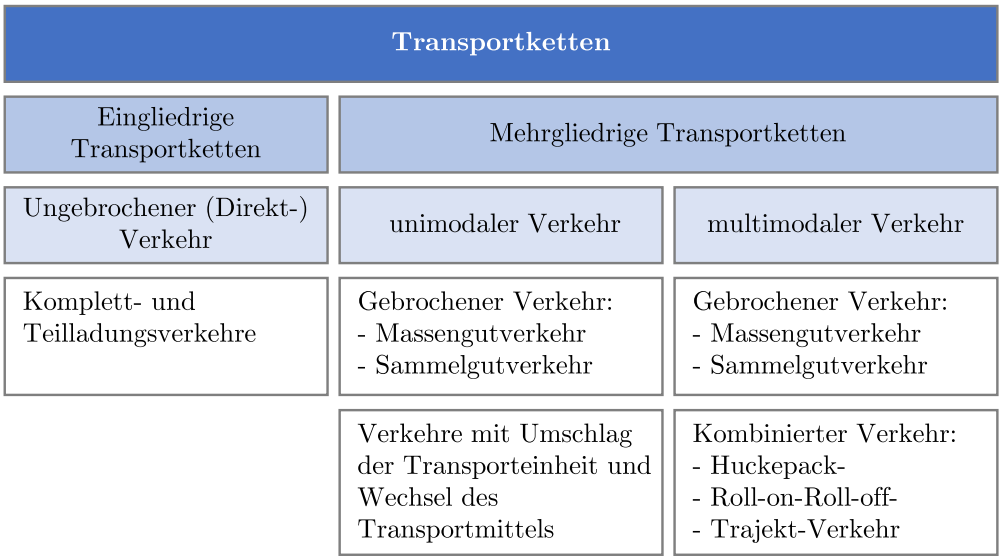


Abbildung 2.12: Unterteilung von Transportketten (in Anlehnung an [Jün89, S. 284; WH20, S. 745; Kum10, S. 57])

Eine weitere und grundlegende Unterteilung von mehrgliedrigen Transportketten ist die Gliederung in den Vor-, Haupt- und Nachlauf. Diese Art der Unterteilung findet vor allem in Stückgut- und Sammelladungsverkehren Anwendung und ist auf alle Arten von Transportmitteln übertragbar [GF16, S. 39]. Im Vorlauf werden die Güter zu einem Umschlagspunkt geliefert. Je nach Größe oder benötigtem Ladehilfsmittel werden entweder Sammeltouren (bei Stückgütern) oder Direktfahrten durchgeführt. Am Umschlagspunkt werden die Güter für den Hauptlauf konsolidiert. Durch den Hauptlauf

[5] Huckepack-Verkehr: LKW und Sattelanhänger werden auf spezielle Eisenbahnwaggons verladen, welche den Haupttransportabschnitt bis zum Zielgebiet abdecken. Danach erfolgt der Weitertransport zum endgültigen Bestimmungsort mittels LKW.
[6] Roll-On-/Roll-Off-Verkehr: LKW und Sattelanhänger werden auf spezielle Schiffe über eine Rampe gefahren.
[7] Trajekt-Verkehr: Güterwaggons werden auf spezielle Schiffe über eine Rampe gerollt.

entsteht eine regelmäßige Verbindung zwischen den Umschlagspunkten. Folglich resultiert die Überbrückung des größten Anteils der Wegstrecke zwischen Absender und Empfänger. Im anschließenden Nachlauf werden die Güter, bei denen sich die Senken in der Nähe des Umschlagpunktes befinden, in mehreren Touren fein verteilt. Die Organisation des Nachlaufs hängt von der Art des Gutes ab. Das Ziel der Aufteilung besteht darin, im Hauptlauf eine Komplettladung zu erreichen, die die vorhandenen Kapazitäten des ausgewählten Verkehrsmittels vollständig nutzt. In der Abbildung 2.13 wird der Aufbau von Transportketten für die jeweiligen Transportformen schematisch dargestellt. [ME13, S. 131]

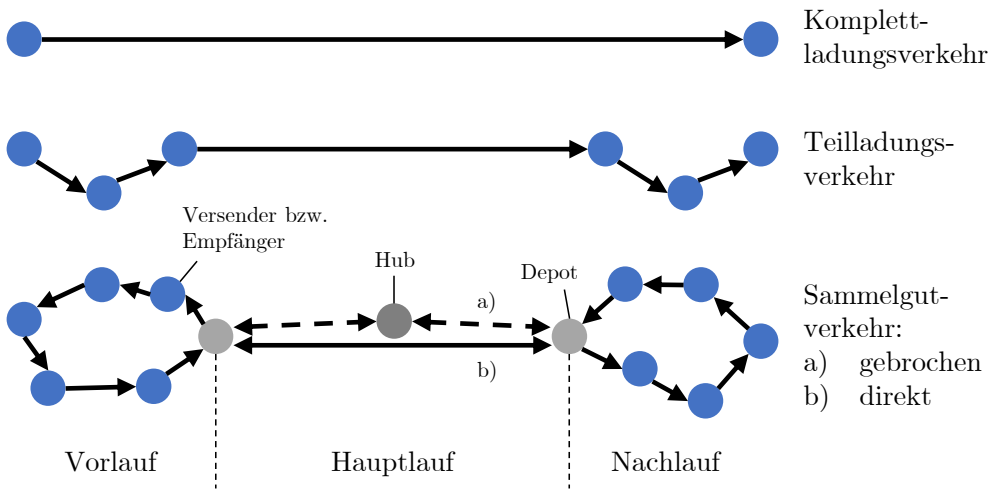


Abbildung 2.13: Aufbau von Transportketten (in Anlehnung an [Bre15, S. 197; ME13, S. 131])

Transportformen

Als Transportformen im Straßengüterverkehr werden Komplettladungs-, Teiladungs- und Sammelgutverkehre bezeichnet. Diese Transportformen sind in der Abbildung 2.13 aufgezeigt. Eine **Komplettladung** definiert sich als eine Menge von Gütern, die mittels eines einzigen Verkehrsmittels direkt von der Quelle zur Senke transportiert wird. Es sind keine zeit- und kostenaufwendige Sammel-, Verteil- oder Umschlagprozesse erforderlich. Dies wird auch als ungebrochener Verkehr bezeichnet. Die Transportkosten sind von der Entfernung abhängig, weshalb eine optimale Auslastung der Nutzlast bzw. des -volumens des gewählten Verkehrsmittels anzustreben ist [Arn+08, S. 13]. **Teilladungsverkehre** bezeichnen Transporte, bei denen mehrere Sendungen den verfügbaren Frachtraum des gewählten Verkehrsmittels ausnutzen. Es findet kein Umschlag statt. Die Sendungen werden über eine Sammlung im Quellgebiet vereint. Anschließend werden alle Teilladungen im Zielgebiet zugestellt. Die Abholung erfolgt normalerweise direkt beim Versender und die Zustellung direkt beim Empfänger. Es handelt sich hierbei um einen ungebrochenen Verkehrstyp, da nur ein einzelnes Verkehrsmittel eingesetzt wird und keine Umladungen vorgenommen werden. Zum wirtschaftlichen Transport von Stückgut, Paketen, Fässern, Langgut und nicht palettierter Ware mit einem Einzelgewicht bis 3 t [GF16, S. 75; Kum10,

S. 348] werden Sendungen durch Spediteure und KEP-Dienstleister in dem Quellgebiet eingesammelt (Vorlauf). Anschließend werden die Aufträge im Quell-Umschlagspunkt konsolidiert. Im Hauptlauf findet der Transport zum Ziel-Umschlagspunkt statt. Dort erfolgen die Auflösung und die erneute Konsolidierung. In zusammengestellten Touren werden die Sendungen zum jeweiligen Empfänger befördert (Nachlauf). Im Vor- und Nachlauf werden vorwiegend mittelschwere LKW und im Hauptlauf Anhänger- und Sattelzüge verwendet. Aufgrund des Umschlags und dem Transport mit mehreren Verkehrsmitteln handelt es sich beim **Sammelgutverkehr** um einen gebrochenen, mehrstufigen Transport. [DL13, S. 146, 147]

Netzwerkstrukturen

Zur optimalen und flächendeckenden Durchführung mehrgliedriger Transportketten von Unternehmen im Straßengüterverkehr werden Netzwerkstrukturen benötigt.
Industrie und Handel haben im Laufe der Zeit teilweise eigene Distributions- und Beschaffungsnetzwerke aufgebaut und an ihre spezifischen Anforderungen angepasst. Eine Zugänglichkeit für externe Verlader und Transportunternehmen ist nicht vorgesehen. Folglich sind dies **geschlossene Netze**. Ein Beispiel hierfür ist der Aufbau des eigenen Netzwerkes in Deutschland des US-amerikanischen Unternehmens Amazon.com. In **offenen Netzen** beteiligen sich KEP-Dienstleister und Sammel- bzw. Stückgutspediteure. Ein charakteristisches Merkmal besteht darin, dass die Transporteure im Allgemeinen nicht Eigentümer der beförderten Ware sind oder werden. Gelegentlich versenden Industrie und Handel ihre Waren von der Quelle zur Senke in offenen Netzen. Zusätzlich ist dieses Netzwerk auch für den Privat- bzw. Endkunden zugänglich. Die Dienstleistungen der KEP-Dienstleister und Sammelgutspediteure sind nicht spezifisch auf eine bestimmte Branche oder Zielgruppe ausgerichtet. Stattdessen garantieren sie eine flächendeckende Verteilung der Sendungen über verschiedene Branchen und Zielgruppen hinweg. Neben Direktsendungen durch Kuriere oder Expressdienstleister für einen schnellen Transport ermöglichen die KEP-Dienstleister und Stückgutspediteure über Sammelgutverkehre den nationalen Transport in der Regel innerhalb von zwei Tagen [Koe18, S. 99]. Zur Gewährleistung eines flächendeckenden Transports in kurzer Zeit ist der Einsatz geeigneter Transportnetzwerke von entscheidender Bedeutung. Zwei gängige Ansätze sind das Direktverkehrs- und Hub-and-Spoke-Netzwerk. Beide Netzwerke werden in Abbildung 2.14 dargestellt. [DL13, S. 149–151]
Ein **Direktverkehrsnetz** ist dadurch gekennzeichnet, dass die Anbieter die Sendungen direkt beim Geschäfts- oder Privatkunden einsammeln oder an Konsolidierungspunkten (z. B. Postfilialen und Paketshops) entgegennehmen. Die Sammeltour endet an einem Depot im Quellgebiet, welches mit einer Umschlagsanlage ausgestattet und in ein flächendeckendes Verteilnetz integriert ist. An diesem Standort werden die Waren nach dem Zielgebiet sortiert und im Hauptlauf zum entsprechenden Zieldepot transportiert. Es finden während des Transports keine Umschlagprozesse oder Wechsel des Verkehrsmittels statt. Diese Transport-Verbindung zwischen zwei Depots wird als Relation (auch Verkehrs-

kante) definiert. Nach der Ankunft im Zieldepot erfolgt die Verteilung der Sendungen auf individuelle Zustellrouten. Schließlich werden sie im Nahverkehr dem Empfänger zugestellt. In einem Direktverkehrsnetz mit n Depots sind daher (n(n - 1)) Relationen erforderlich, um alle Güter zu verteilen [Arn+08, S. 783]. Die Wirtschaftlichkeit eines solchen Transportnetzes setzt jedoch hohe Transportmengen auf den einzelnen Relationen voraus. Mit einer Mengenbündelung werden im Hauptlauf die Transportkosten für eine einzelne Sendung vergleichsweise niedrig gehalten. Somit wirken sich vorwiegend die vor- und nachgelagerten Sammel- und Verteilverkehre auf die Gesamttransportkosten aus [Koe18, S. 95]. [DL13, S. 151, 152]

In einem **Hub-and-Spoke-Netzwerk** (Nabe und Speiche) werden die Güter über Sammeltouren zum Quell-Depot befördert, dort gesammelt und unsortiert zu einem zentralen Hub transportiert (1. Hauptlauf) [Arn+08, S. 783]. In diesem Hub erfolgt die Konsolidierung nach dem Zielgebiet. Im zweiten Hauptlauf werden die konsolidierten Sendungen zum Ziel-Depot transportiert. Anschließend findet der Nachlauf wie beim Direktnetzwerk statt. Für den Betrieb eines Hub-and-Spoke-Netzwerks werden aufgrund der zwei Hauptläufe 2n Relationen benötigt [Wlč98]. Im Gegensatz zu einem Direktverkehrsnetzwerk erfordert das Hub-and-Spoke-Modell zur Verbindung der gleichen Anzahl an Logistikknoten eine reduzierte Anzahl von Relationen (siehe Abbildung 2.14). Dies geht jedoch mit längeren Transportwegen und -zeiten einher. Zusätzlich entsteht ein erhöhtes Risiko für eine potentielle Überlastung des Hauptumschlagsknotens sowie für fehlerhafte Verladungen [Rol20, S. 39].

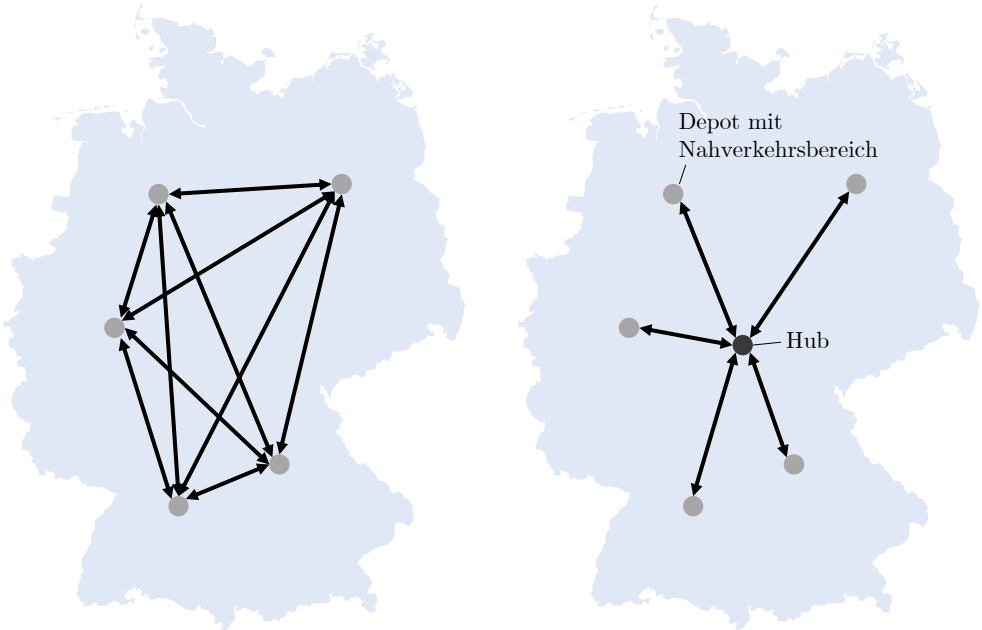


Abbildung 2.14: Direktverkehrsnetz und Hub-and-Spoke-Netz (in Anlehnung an [AF19, S. 244; DL13, S. 151])

Die Entscheidung zwischen einem Direktverkehrs- und einem Hub-and-Spoke-Netzwerk hängt vom Volumen des Netzverkehrs, den verfügbaren Zeitfenstern und den Betriebskosten des Netzwerks ab [BCV98, S. 188; DL13, S. 152].

- Bevorzugung von Direktverkehren bei stark frequentierten Strecken.
- Rentabilität eines Hubs: Die Betriebskosten sollten kleiner ausfallen als die Einsparungen, die durch die Reduzierung der Anzahl der Touren erzielt werden.
- Umschläge in Hubs erfordern zusätzliche Zeit. Folglich ist es notwendig, Aufträge mit engen Zeitfenstern direkt zu befördern.
- Mischformen sind möglich (häufig in der Praxis angewendet). Zum Hub-and-Spoke-Netzwerk werden Regionalhubs für die Konsolidierung intra-regionaler Verkehre und deren Verteilung sowie weitere Hauptumschlagsknoten hinzugefügt [Rol20, S. 39].

Logistische Knoten

Umschlagspunkte sind logistische Knoten in einem Transportnetz, die durch Industrie, Handel und Dienstleister betrieben werden. An einem Knoten befinden sich Umschlag- und Sortiereinrichtungen mit unterschiedlichen Funktionen, welche nachfolgend beschrieben werden [KKK12, S. 190; DL13, S. 153]:

- **Konsolidierungs- bzw. Zustellpunkte**
  Das Sammeln und Verteilen von Sendungen in einer bestimmten Region erfolgt über Konsolidierungs- bzw. Zustellpunkte, insbesondere in Transportnetzen mit erheblichem Sendungsaufkommen. Im KEP-Bereich sind dies z. B. Postfilialen und Paketshops.
- **Depots**
  Die Depots dienen als Schnittstelle zwischen Nah- und Fernverkehr, wo Sendungen aus dem Ursprungsgebiet für Fernverkehrsverbindungen gebündelt oder die Einzelsendungen aus dem Hauptlauf auf die Zustellrouten im Zielgebiet aufgeteilt werden.
- **Hubs**
  Während des Hauptlaufs erfolgt in zentralen Hubs die Sortierung und Konsolidierung der Sendungen unter Berücksichtigung ihres Zielgebiets.

Die Betriebszeiten eines Depots sind stark abhängig von den transportnetzbedingten Abläufen. Die Transportkette beginnt mit der Abholung der Güter beim Versender zwischen 12:00 und 18:00 Uhr und endet mit der Zustellung am nächsten Morgen zwischen 06:00 und 12:00 Uhr [Dey11, S. 8]. Die Güter werden während dieses Zeitrahmens entsprechend den Erfordernissen des jeweiligen Transportnetzes sortiert und von der Quellregion zur Zielregion befördert. In einem Direktverkehrsnetz existieren Depots mit zwei Hauptarbeitsphasen. Beginnend mit der Phase des Sammelgutausgangs werden die Sendungen eingesammelt, auf die Fernverkehrsrelationen konsolidiert und im Fernverkehr weiterbefördert. Mit der Ankunft des Sammelguts im Zieldepot beginnt die Phase des

Sammelguteingangs. Das Sammelgut wird ausgeladen und den Zustelltouren zugeordnet. In Abbildung 2.15 wird die Ankunftsverteilung der Fahrzeuge an einem Depot dargestellt. Aus diesen entstehenden Zeitfenstern resultieren die Hauptarbeitszeiten. [DL13, S. 153]

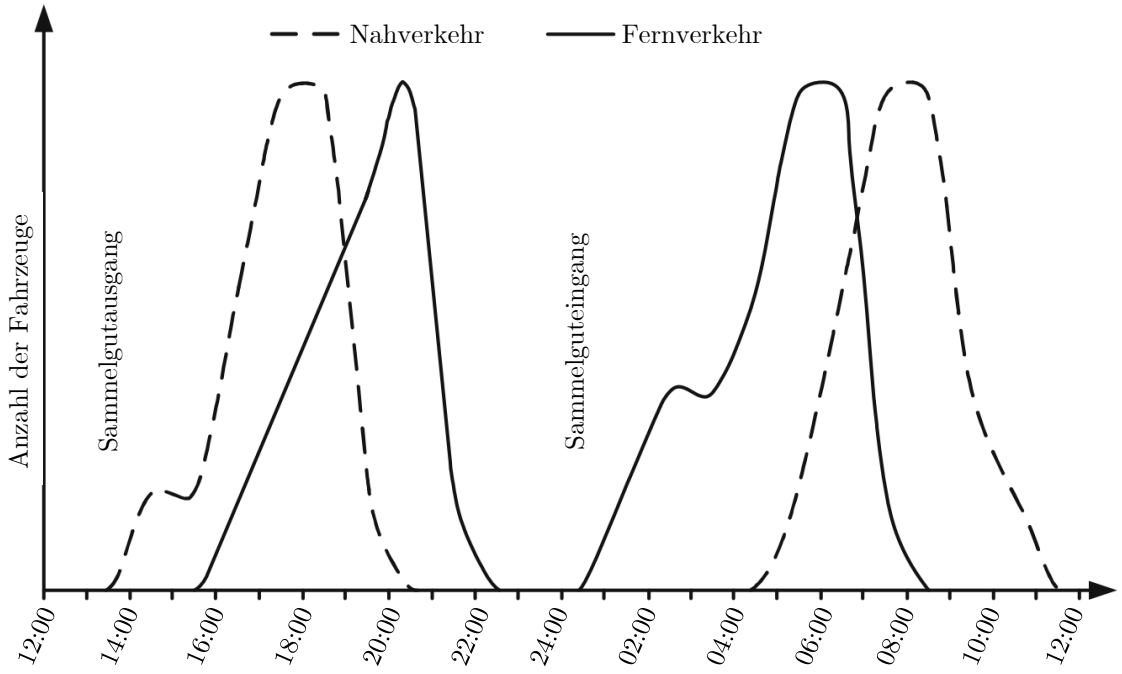


Abbildung 2.15: Fahrankunftsverteilung an einem Depot (in Anlehnung an [Lub96, S. 4–6; DL13, S. 155])

Im Hub-and-Spoke-Netz werden im Eingangsdepot lediglich die Aufträge für die Zustellung in der gleichen Region aussortiert und die übrigen Aufträge zum Hub transportiert. Dort findet der Hauptumschlag statt. Dies erfolgt in einer einzigen Arbeitsphase zwischen 21:00 und 02:00 Uhr [Dey11, S. 10].

2.2.5 Urbane Logistik

Die Senken bzw. Standorte von Empfängern liegen häufig in städtischen Gebieten, so dass sich die Lieferketten bis in den urbanen Raum, welcher ein Ort für Produktion, Distribution und Konsum ist, erstrecken [RB18, S. 3]. In diesem Zusammenhang spielt die urbane Logistik eine unterstützende Rolle, indem sie den Transport von Gütern, Materialien und Abfällen in urbane Umgebungen, sowohl innerhalb als auch zwischen städtischen Gebieten und dem Durchgangsverkehr koordiniert [Eur13, S. 2]. Weitere Bezeichnungen sind die urbane Supply Chain und Citylogistik [Sch23, S. 13].
Der urbane Transport findet vorwiegend über den Straßengüterverkehr statt. Teilweise kann dieser Transport auch auf anderen Verkehrsträgern stattfinden (Beispiel: Grachten in Amsterdam). Bei einer mehrgliedrigen Transportkette erfolgt der Vor- und Nachlauf zu großen Teilen in einem geografischen Großraum. Dies und unter anderem das kontinuierliche Städtewachstum sowie die dynamische Entwicklung des E-Commerce führen

dazu, dass der Wirtschaftsverkehr einen Anteil von 25 bis 30 % des Gesamtverkehrs mit steigender Tendenz in einer Großstadt aufweist [EW12, S. 5]. Dabei werden die Fahrten der Arbeitnehmer zu und von ihrem Arbeitsplatz nicht berücksichtigt.
Der urbane Transport schließt somit folgende Logistiksegmente ein:

- Stückgutlogistik (insbesondere Speditionen für den stationären Einzelhandel)
- Kontraktlogistik-Dienstleistungen (für Automobilindustrie und Konsumgüter: Getränke- und Gastronomielieferanten, Lebensmitteleinzelhandel)
- KEP-Dienste

Die urbane Logistik wird in erster Linie aufgrund der Flexibilität und der vorhandenen Infrastruktur mit konventionellen PKW, Lieferwagen (Vans) oder LKW durchgeführt [SKP23, S. 799]. Ein Teil der Fahrzeuge, welche vorwiegend der leichten Gewichtsklasse zugeordnet sind, fahren bereits elektrifiziert. Beispielsweise sind über 40 % der Flotte des KEP-Marktführers Deutsche Post bzw. DHL elektrisch angetrieben [DER23b]. Weiteres Elektrifizierungspotential liegt in den höheren Gewichtsklassen, weswegen dies in der vorliegenden Arbeit fokussiert und in Kapitel 3 untersucht wird. Zudem ist eine Zunahme der Nutzung von Microfahrzeugen, wie Lastenräder oder elektrisch betriebene Kleinsttransporter (z. B. RINSPEED CitySnap), festzustellen. Zur Verlagerung der Transporte auf diese nachhaltigen Transportmittel werden unter anderem Depots mit geringer Nähe zum Empfänger benötigt. Depots gelten in der urbanen Logistik als zentrales Element. Derzeit fehlt es jedoch an einer klaren Abgrenzung sowie einer einheitlichen Definition durch die Fachliteratur. Grundsätzlich erfolgt im städtischen Bereich eine Unterscheidung zwischen Mikro-Depots und lokalen Verteilzentren. Lokale Verteilzentren befinden sich am Stadtrand und dienen der detaillierten Sortierung für Zustellbezirke oder Mikro-Depot-Standorte. Fachverbände und Industrievereinigungen präzisieren diese Unterscheidung weiter, etwa durch die Einteilung in Mikro-Depots, Urban-Depots, City-Depots und Metropolitan-Depots. Diese differenzieren sich unter anderem hinsichtlich ihrer Lage im urbanen Zentrum, ihrer Anbindung an die Infrastruktur, ihres Aktionsradius und ihrer Nutzfläche [Pie21]. In Tabelle 2.3 wird eine Auswahl an möglichen Depottypen für die urbane Logistik dargestellt.

Tabelle 2.3: Übersicht von Depottypen (in Anlehnung an [Pie21])

	Micro-Depot	**Urban-Depot**	**City-Depot**	**Metropolitan-Depot**
Lage	Stadtzentrum	Stadtteile	Stadtring	Äußerer Ring
Infrastruktur	ÖPNV / Rad	ÖPNV / Rad	Straße	Straße
Aktionsradius	1 km	2 km	5 km	10 km
Nutzfläche	< 2.500 qm	<10.000 qm	< 20.000 qm	<25.000 qm

Das kleinste Format ist das Mikro-Depot, welches sowohl mobil (in Containern oder Wechselbrücken) als auch stationär (in Lagerräumen oder Parkhausabteilen) betrieben werden kann [DSH21, S. 551]. Das Urban-Depot ist ebenfalls sehr nah am Empfänger und meist stationär betrieben. Die Belieferung dieser Depots findet vorwiegend über den Straßengüterverkehr mit den konventionellen Verkehrsmitteln statt. Zukünftig können hierfür elektrifizierte LKW, unterirdische Transportmittel (Smart City Loop in Hamburg [Wes29]), Hochgeschwindigkeitsfördersysteme oder urbane Seilbahnen genutzt werden. Für die Verteilung der Waren kommen nach dem Umschlag verschiedene Transportmittel zum Einsatz, darunter Lastenräder, voll elektrische Klein- bzw. Kleinsttransporter, wie der Streetscooter, oder auch die Sackkarre. Die Auswahl des geeigneten Transportmittels hängt dabei von der Länge der Transportroute, dem Transportvolumen und der Erreichbarkeit des Kunden ab. Um den Zustellprozess zu standardisieren, ähnlich wie es bei Seecontainern der Fall ist, kann die Verwendung eines universellen Containers bzw. einer modularen Box sinnvoll sein [LEJ15], welcher auf verschiedenen Verkehrsmitteln eingesetzt werden kann. [SKP23, S. 805]
Durch die gemeinschaftliche Nutzung der in Tabelle 2.3 dargestellten Depots von mehreren Logistikdienstleister resultieren Multi-Use-Depots. Mithilfe derer werden zukünftig Sendungen unternehmens- und sortimentsübergreifend gesammelt und zugestellt. Es wird ein einheitliches Liefernetzwerk geschaffen. [Bip20, S. 597]
Diese und weitere Ansätze aus der Fachliteratur werden in Tabelle 2.4 aufgelistet. Eine detaillierte Beschreibung der Ansätze können aus [Wol+21; SKP23; SS21; Bip20; DSH21; GH19] entnommen werden.

Tabelle 2.4: Ansätze in der urbanen Logistik (in Anlehnung an [Wol+21, S. 10; SS21, S. 233])

Zustellkonzept	Quartiersbox (z. B. Packstation)
	Zustellebene
	Leise Logistik (Nachtbelieferung)
Urbaner Transport / Reorganisation von Transportabläufen	Unterirdisches Transportsystem
	Hochgeschwindigkeitsfördersystem
	Urbane Seilbahn
	Lastenrad
	E-Fahrzeuge
Warenumschlag / Infrastrukturmaßnahmen	Multi-Use-Logistikknoten
	Mikro-, Urban-, City- und Metropolitan-Depots
Organisation	Kooperationen zwischen Logistikdiensteistungen
	Lieferbündelung
	Ladezonenkonzept
	Logistikmanagement
	Regulierungen durch die öffentliche Hand (z. B. Citymaut)

2.2.6 Stückgutlogistik

Der Sammelgutverkehr wird meist durch Stückgutspediteure durchgeführt. Sammelgut bzw. Stückgut wird hinsichtlich des Gewichts, Volumens und deren Eilbedürftigkeit unterschieden [Dey11, S. 5]. Für einen wirtschaftlichen Transport wird das Gewicht von Aufträgen im Bereich von 31,5 kg bis 3 t[8] eingegrenzt [GF16, S. 75; Kum10, S. 348]. Aufträge unter 31,5 kg sind Briefe oder Pakete, welche durch KEP-Dienstleister bearbeitet werden. Ab 3 t wird der Transport als Teilladungsverkehr definiert. Allerdings ist eine Abgrenzung nicht immer möglich, da der Spediteur ab einer gewissen Anzahl an Paletten und Umschlägen keinen Stückgutauftrag zulässt [Dey11, S. 6]. Volumenbeschränkungen, welche in der Fachliteratur nicht angegeben sind, entstehen durch die kleinsten eingesetzten Fahrzeuge (Nutzlast 7,5 t). Vorrangig kommen Fahrzeuge der Gewichtsbereiche 7,5 t, 12 t und 18 t im Vor- und Nachlauf zum Einsatz. In seltenen Fällen werden noch kleinere Fahrzeuge, wie Transporter, für Einzelzustellungen oder -abholungen aufgrund der Eilbedürftigkeit genutzt. Der Hauptlauf wird durch Hängerzüge mit Wechselbrücken gestaltet. Allgemein sind Stückgüter verpackt, stapelbar und haben keine besonderen Ansprüche an den Transport oder Umschlag [Win13, S. 80]. Sie setzen sich aus einem oder mehreren Collis[9] sowie Versandeinheiten zusammen.
Der typische Prozess im Stückgutverkehr, wie bereits in Abbildung 2.13 dargestellt, läuft in folgenden Stufen ab [Pfl+20a, S. 94]:

1. Regionale Abholung mit leichten und mittelschweren Fahrzeugen
2. Umschlag und Konsolidierung im Abgangsdepot auf das für die jeweilige Sendung vorgesehene Zustelldepot
3. Hauptlauf-Transportvorgang im Fernverkehr mit Anhängerzügen von Depot zu Depot mit Fahrplan (Teilweise wird im Prozess ein Hub für einen zusätzlichen Bündelungsvorgang erweitert.)
4. Konsolidierung im Zustelldepot auf die jeweilige Zustelltour
5. Regionale und gebündelte Zustellung mit leichten und mittelschweren Fahrzeugen

Die erste und letzte Stufe werden häufig miteinander kombiniert. Zuerst werden die Güter ausgeliefert. Sobald der LKW keine oder kaum Beladung vorweist, werden die Abholungen eingesammelt. In seltenen Fällen können aufgrund der Eilbedürftigkeit oder Tourenplanung Abholungen während der Zustellungen eingeplant werden. Hierbei ist auf die Kapazität des LKW zu achten. Zudem sind diese beiden Stufen nicht planbar, da sich täglich Versender und Empfänger ändern.
Der jährliche Umsatz durch den Transport von Stückgutaufträgen beläuft sich derzeit auf 12 Mrd. € [Pfl+20a, S. 90]. Ein Wachstum von etwa 2-4 % pro Jahr wird im Einklang mit der Gesamtentwicklung der Logistik angenommen [Hel+22, S. 24]. Im Einsatz sind

[8] In der Fachliteratur wird die obere Grenze des Gewichtsbereich von 2,5 t bis 3 t angegeben. In dieser Arbeit wird durchgängig der Gesamtbereich von 31,5 kg bis 3 t verwendet.
[9] Ein Collo (Mehrzahl: Colli) bezeichnet die kleinsten individuellen Verpackungseinheiten einer Warensendung.

ca. 80.000 Beschäftigte (Vollzeit) und rund 47.000 Fahrzeuge, wovon 25.000 im Vor- und Nachlauf eingeplant sind. Der Markt mit etwa 500 Dienstleistern [Lau12] für die Stückgutlogistik in Deutschland zeigt eine weitgehend einheitliche Struktur. Einige dieser Netzwerke werden von großen, zentral gesteuerten Logistik-Dienstleistungsunternehmen geführt. Gleichzeitig haben sich erfolgreich kooperative Netzwerke zwischen unabhängigen, regional tätigen Dienstleistern etabliert, die in ähnlicher Weise, wie die Netzwerke großer Konzerne, am Markt agieren [Pfl+20a, S. 92]. In der Abbildung 2.16 werden die zehn erfolgreichsten Unternehmen und Netzwerke aufgelistet.

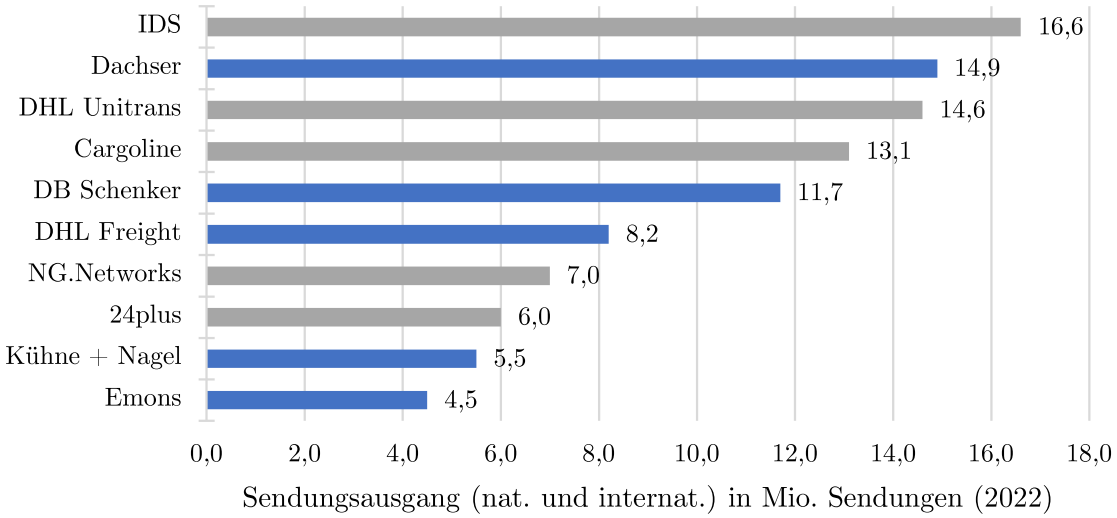


Abbildung 2.16: Stückgutspediteure (blau) und -kooperationen (grau) mit dem höchsten Stückgutaufkommen in Deutschland 2022 (in Anlehnung an [Lau12])

Neben den allgemeinen Stückgutnetzwerken haben sich in den letzten Jahren spezielle Transportnetzwerke entwickelt. Sie ermöglichen Herstellern, Händlern und Endkunden, sensible Produkte mit speziellen Anforderungen innerhalb der jeweiligen Lieferkette zu versenden. Als Produkte gelten beispielsweise Gefahrgüter, Güter mit besonderen Anforderungen an das Handling (wie hängende Kleidungsstücke), besonders sperrige/lange Güter sowie Güter mit Anforderungen an das Zustellpersonal (Zwei-Personen-Handling). Ähnlich wie beim allgemeinen Stückgut erfolgt der Transportprozess in mehreren Stufen mit der Einbindung von Hubs und regionalen Depots. Fahrzeug- und Umschlagtechnik sowie das eingesetzte Personal werden auf die speziellen Anforderungen abgestimmt. [Pfl+20a, S. 96]

3 Elektromobilität im Straßengüterverkehr

Der Straßengüterverkehr wird derzeit überwiegend von Nutzfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren und Dieselkraftstoff durchgeführt. Die Bemühungen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr konzentrieren sich vor allem auf alternative Kraftstoffkonzepte. Aus aktueller Perspektive reicht aufgrund der Verfügbarkeit das Potential der zugelassenen Bio-Kraftstoffe nicht aus [Feh19, S. 12]. Synthetische Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien sind derzeit nicht wettbewerbsfähig, da deren Herstellung für Transportunternehmen aufgrund ihrer komplexen und energieintensiven Prozesse nicht wirtschaftlich ist [Mat+21, S. 59]. In den letzten Jahren treiben daher politische und industrielle Strategien verstärkt die Elektrifizierung von Nutzfahrzeugflotten voran, analog der Entwicklung im PKW-Segment. Gesetzliche regulatorische Rahmenbedingungen sind z. B. die im Jahr 2023 vorgeschlagene Überarbeitung der CO_2-Emissionsstandards für schwere Nutzfahrzeuge, die Anpassungen an der Eurovignette-Richtlinie im Jahr 2022 sowie die im Jahr 2023 verabschiedete Verordnung zum Ausbau alternativer Energieinfrastrukturen [Göc+23, S. 31].
Das folgende Kapitel widmet sich dem Stand der Technik der Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Es werden die elektrischen Fahrzeugkonzepte und Antriebstechnologien sowie Ladetechnologien mit dem elektrischen Netz beschrieben. Anhand einer Stakeholder-Analyse werden die Akteure im elektrifizierten Straßengüterverkehr identifiziert. Abschließend werden die Grundlagen und der Stand der Technik mit dem Fokus auf die Forschungsfragen zusammengefasst. Folglich ist das Ziel, einen umfassenden Überblick zum Stand der Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs zu geben.

3.1 Elektrische Fahrzeugkonzepte und Antriebstechnologien

Elektrische Fahrzeugkonzepte haben die Gemeinsamkeit, dass der Antrieb mithilfe eines Elektromotors realisiert wird. Die Energiequellen sind allerdings unterschiedlich [Wal11, S. 71]. Als Konzepte werden im Folgenden die batterieelektrischen (battery electric vehicle, BEV), hybriden und brennstoffzellenbetriebenen (fuel-cell electric vehicle, FCEV) Fahrzeuge beschrieben und in Abbildung 3.1 mit deren Systemaufbau dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung kann in der folgenden Fachliteratur [Bau+21] oder [Kar20] nachgeschlagen werden.
Elektrische Fahrzeugantriebe zeichnen sich durch ihre hohe Effizienz aus, da sie Strom mit minimalen Verlusten in Antriebsenergie umwandeln. Im Gegensatz dazu verlieren Verbrennungsmotoren einen wesentlichen Anteil der Energie als Wärme. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass der Elektromotor während des Bremsvorgangs oder bei Abwärtsfahrten als Generator fungiert und Energie zurückgewinnt. Dadurch ergibt sich durch die sogenannte Rekuperation besonders im Nah- und Regionalverkehr ein zusätzliches Potential zur Einsparung von Energie. Als Nachteil erweisen sich die großen Gewichte

und Volumen der Energiespeichersysteme von elektrischen Fahrzeugen. Dies führt im Vergleich zu konventionellen Nutzfahrzeugen zu eingeschränkten Fahrzeugreichweiten und zur möglichen Reduzierung der Nutzlast oder des Transportvolumens. [Göc+23, S. 22]

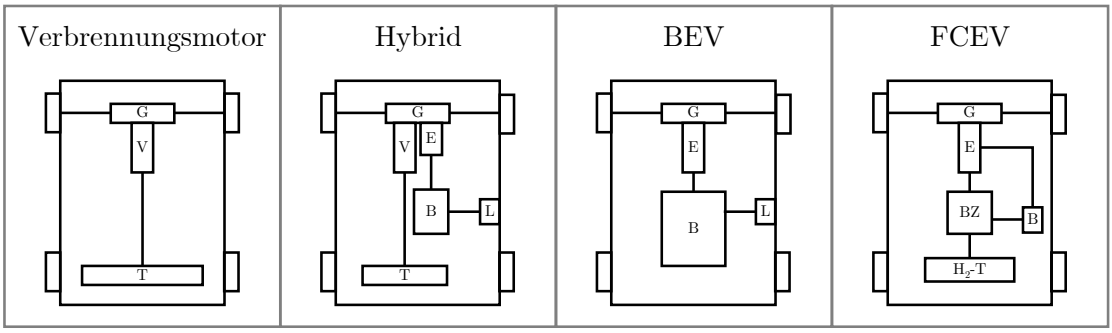


Abbildung 3.1: Systemaufbau von alternativen und konventionellen Antriebstechnologie (in Anlehnung an [Kre16, S. 31])

3.1.1 Batterieelektrische Fahrzeuge

Batterieelektrische Fahrzeuge existieren bereits seit den Anfängen der Fahrzeugentwicklung. In einigen Einsatzbereichen hatten sie sich bereits deutlich etabliert, beispielsweise bei der Verwendung als Postverteilfahrzeuge in städtischen Gebieten in den 1940er und 1950er Jahren [Wal11, S. 71]. Jedoch setzten sie sich langfristig im 20. Jahrhundert aufgrund der leistungsfähigeren Verbrennungsfahrzeuge nicht durch. Aktuell steht der Elektroantrieb wieder im Fokus aufgrund des unternehmerischen und politischen Interesses.

Der Antriebsstrang eines BEV besteht aus einem oder mehreren Elektromotoren, einer Batterie und der Leistungselektronik, wie in Abbildung 3.1 als Systemaufbau dargestellt [Wal11, S. 73]. Die Leistungselektronik dient neben der Steuerung und Regelung des Fahrbetriebs der Umwandlung des Gleichstroms aus der Batterie an die Anforderungen des Bordnetzes [Kar20, S. 89]. Andererseits erfüllt sie die Funktion eines Ladegeräts, um während des Ladevorgangs der Batterie die Energie aus dem Netz zu beziehen [Bau+21, S. 692]. Alternativ kann zum Antrieb des Fahrzeugs kontinuierlich Energie zugeführt werden [Kre16, S. 33], wie z. B. über Oberleitungen (siehe Kapitel 3.2.1). Zusätzlich müssen Nebenverbraucher wie Heizung, Klimatisierung sowie Lenk- und Bremsunterstützung versorgt werden [Kre16, S. 43].

Im technisch weniger komplexen Antriebsstrang des Elektrofahrzeugs entfallen im Vergleich zum Verbrennungsmotor zahlreiche bewegliche und wartungsintensive Komponenten. Beispielsweise werden Getriebe mit einer geringen Anzahl an Gängen (z. B. Ein-Gang- oder Zwei-Gang-Getriebe) verbaut, wodurch sich die Komplexität verringert. Es resultiert eine reduzierte Lärmentwicklung, geringerer Verschleiß und somit niedrigere Wartungskosten. Kombiniert mit der lokalen Emissionsfreiheit bedeutet das eine Entlas-

tung des städtischen Verkehrsumfeldes. [KHG18, S. 19]
Die Batterie ist der einzige Energiespeicher im Fahrzeug und stellt somit die zentrale Herausforderung dar. Die Einführung von rein batterieelektrischen Antrieben bei schweren Nutzfahrzeugen, mit erhöhtem Energiebedarf und umfangreichen Tagesfahrleistungen, ist problematisch aufgrund der erforderlichen Batteriekapazität. Eine ausreichend große Reichweite geht mit einem erheblichen Verlust der Nutzlast, einem sperrigen Batterievolumen, das schwierig im Zugfahrzeug untergebracht werden kann, und hohen Kosten einher, die den wirtschaftlichen Betrieb beeinträchtigen können. Zukünftig ist durch die aktuelle Batterieentwicklung eine Verbesserung bezüglich der Energiedichte und Batteriekosten zu erwarten. Darüber hinaus entstehen durch ausgedehnte Ladezeiten und die noch nicht flächendeckend ausgebaute Ladeinfrastruktur weitere Herausforderungen für flexible und zeitoptimierte Logistikkonzepte. [KHG18, S. 19, 29]
Folglich zeichnet sich bei Transportunternehmen vorerst eine zurückhaltende Implementierung von BEV in den Regelbetrieb ab. Es erfordert die Berücksichtigung der begrenzten Reichweite im Vergleich zu Diesel-LKW und der notwendigen Ladezeiten bei der Planung der Touren. Insbesondere im Langstreckenverkehr zeigen Transportunternehmen eine gewisse Zurückhaltung, die erst durch die tatsächliche Praxistauglichkeit der Fahrzeuge im täglichen Einsatz nachgewiesen werden kann. [Göc+22, S. 38]

3.1.2 Hybride Fahrzeuge

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit einer schrittweisen Elektrifizierung des Antriebs, angefangen mit der Hybridisierung eines herkömmlichen Dieselmotors ohne externe Stromversorgung über die Option zum externen Laden bis hin zu rein batterieelektrischen Fahrzeugen. Die erforderliche Batteriekapazität nimmt dabei mit fortschreitendem Grad der Elektrifizierung des Antriebs zu. [KHG18, S. 19] Der Antrieb eines Hybridfahrzeugs besteht aus zwei Energiewandlern, dem Verbrennungsmotor und dem Elektromotor, und zwei Energiespeichern, dem Kraftstofftank und der Batterie [Kre16, S. 40]. Fahrzeughersteller unterscheiden Hybride nach der Fahrzeugarchitektur in Parallel-Hybride, Seriell-Hybride und Misch-Hybride.
Parallel-Hybride erhalten ihren Antrieb parallel durch den Verbrennungs- und Elektromotor. Die Leistung lässt sich so addieren [Ger02, S. 76]. Der Antrieb ermöglicht ebenfalls die Einzelnutzung der Motoren. Zu den Mischhybriden zählen die Plug-In-Hybride, welche durch eine größere Batterie über eine Ladeeinheit extern geladen werden können (siehe Abbildung 3.1). Somit können größere Strecken rein batterieelektrisch gefahren werden. Zu den seriellen Hybriden sind die Range-Extender-Electric-Vehicles zuzuordnen, die ausschließlich den Elektromotor zum Antrieb verwenden. Der Verbrennungsmotor bewirkt mithilfe eines Generators die Beladung der Batterie. Dadurch kann eine größere Reichweite erreicht werden. [Kre16, S. 41–43]

Plug-in-Hybride werden beispielsweise von Scania oder DAF angeboten. Sie gelten aktuell als Brückentechnologie, bis die Verfügbarkeit leistungsfähiger Batterien gegeben ist. Jedoch haben sie sich aufgrund der fehlenden politischen Unterstützung (z. B. Subventionen) nicht durchgesetzt. Derzeit werden Konzepte mit Oberleitungen oder Solarzellen auf dem Anhänger in Forschungsprojekten (z. B. Lade-PV) [Fra21] praktisch getestet. Ebenso werden in vereinzelten Projekten E-LKW mit Range Extender untersucht (z. B. Realtest bei der Spedition LSU Schäberle) [Int22]. In der vorliegenden Arbeit werden die hybriden Fahrzeuge aufgrund des fehlenden zukünftigen Potentials und der fehlenden politischen Unterstützung nicht weiter berücksichtigt.

3.1.3 Brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge

Brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge lassen sich streng genommen als serielle Hybride mit zwei Energiewandlern und zwei Energiespeichern charakterisieren (siehe Abbildung 3.1). Die Energiespeicher bestehen jeweils aus dem Wasserstoff-Tank und der Batterie. Die Brennstoffzelle und der Elektromotor dienen als Energiewandler. In der Brennstoffzelle erfolgt durch eine mit Sauerstoff eingeleitete kalte Verbrennung die Umwandlung der chemischen Energie des Wasserstoffs in Wasser und elektrische Energie. Der mit der Brennstoffzelle erzeugte Gleichstrom wird direkt für den Antrieb des Elektromotors genutzt. Außerdem wird er für Nebenverbraucher, wie den Luftverdichter oder den Klimakompressor, und zur Aufladung der Batterie verwendet. Die Batterie dient zur Leistungsüberbrückung und kurzfristigen Deckung von Spitzenlastanforderungen des Elektromotors. Zudem dient die Batterie als Speicher der Rekuperationsenergie des Elektromotors, welche durch das Verzögern des Fahrzeugs erzeugt wird. In bestimmten Fahrphasen, wie z. B. beim Anfahren, wird diese gespeicherte Energie für die Traktion genutzt. Es führt zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs. Mit dieser Antriebsoption entsteht eine lokale Emissionsfreiheit. [Kre16, S. 44]
Die aktuell verfügbare Reichweite von schweren Nutzfahrzeugen mit Brennstoffzelle beläuft sich auf etwa 400 km, basierend auf einem 32 kg fassenden Wasserstofftank mit einem Speicherdruck von 350 bar. Eine Verdoppelung der Reichweite tritt auf, wenn der Speicherdruck auf 700 bar erhöht wird. Obwohl Unsicherheiten bezüglich des künftigen Aggregatzustands und des Drucks im Speichertank wegen unterschiedlicher Ankündigungen von Herstellern bestehen, scheinen nach aktuellem Kenntnisstand im Jahr 2030 Reichweiten von 800-1.000 km realistisch erreichbar. Aufgrund der großen möglichen Reichweiten richten zahlreiche Logistikunternehmen ihre Erwartungen auf brennstoffzellenbasierte Antriebe. Eine weitere Alternative zur Brennstoffzelle ist der Wasserstoffverbrennungsmotor, welcher als vielversprechende Technologie angesehen wird. Es ist jedoch zu beachten, dass der Betrieb nicht vollständig emissionsfrei ist. Stickoxide bilden sich durch den Verbrennungsprozess und aus der teilweise benötigten unterstützenden Verbrennung mit Dieselkraftstoff entstehen zusätzliche Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen. [Göc+23, S. 25]

Ähnlich wie bei der Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge steht auch die Wasserstoffinfrastruktur vor einem flächendeckenden Ausbau. Lediglich 91 Tankstellen standen 2023 in Deutschland zur Verfügung [Sta24]. Die Betankungszeit von Wasserstofftanks ist deutlich kürzer als der Batterieladevorgang und ähnelt der Betankung eines Kraftstofftanks.

3.1.4 Vergleich der Antriebstechnologien

Reichweiten und Energiespeicher

Die Weiterentwicklung von Batterien (vorwiegend Lithium-Ionen-Batterien) hat erhebliche Fortschritte gemacht. Dadurch sind bereits Reichweiten von etwa 300 km für mittelschwere und schwere Nutzfahrzeuge möglich, ohne dass die Nutzlast erheblich beeinträchtigt wird [Göc+23, S. 22]. Dabei ist zu beachten, dass bei Fahrzeugen mit alternativen Kraftstoffen oder bei emissionsfreien Fahrzeugen ein zusätzliches Gewicht von zwei Tonnen zugelassen ist [Eur19]. Zudem gibt es Einsparungen beim Antriebsstrang und beim Kraftstofftank von ein bis zwei Tonnen. Aktuell liegt die spezifische Energiedichte des Batteriesystems bei ungefähr 160 kWh/t und es ist bis zum Jahr 2030 die Erhöhung auf einen Bereich von 240-270 kWh/t geplant [Göc+20, S. 47]. Effizienzgewinne können zur Erhöhung der Reichweite durch aerodynamische Verbesserungen, elektrische Antriebsachsen oder elektrische Trailer erzielt werden [Göc+23, S. 22]. Das International Council of Clean Transportation stellt die Prognose auf, dass Sattelzüge im Jahr 2030 Reichweiten von 500 km erreichen können, ohne dabei signifikante Einbußen bei der Nutzlast zu verzeichnen [BBR21]. Auch Hersteller kündigen Elektrofahrzeuge mit verbesserten Reichweiten für Langstrecken an.

In Abbildung 3.2 werden die aktuell auf dem Markt verfügbaren E-LKW-Modelle mit den Batteriekapazitäten in Abhängigkeit der Motorleistung und der verschiedenen Grö-

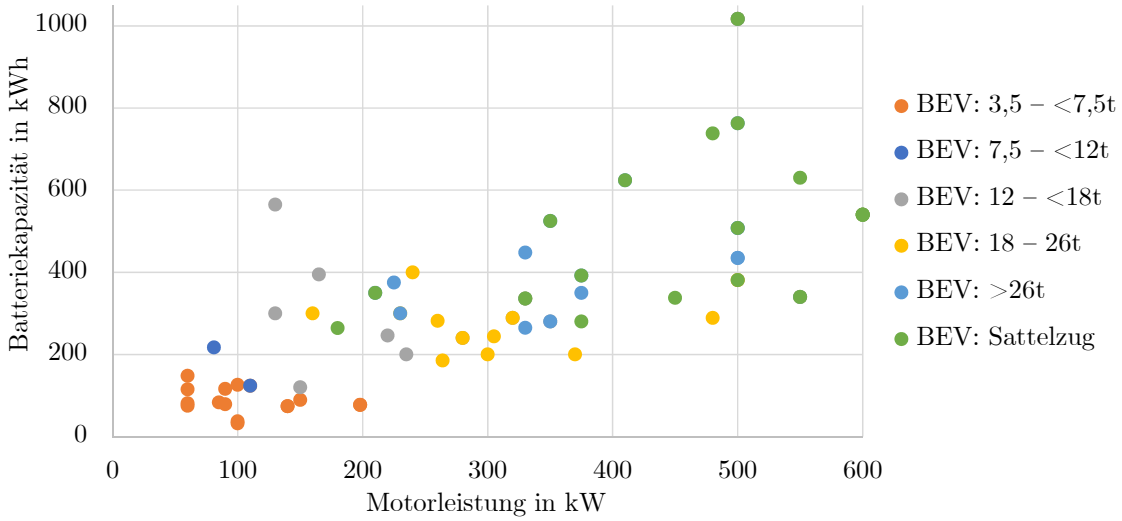


Abbildung 3.2: Batteriekapazitäten in Abhängigkeit der Motorleistung verfügbarer Güterkraftfahrzeugmodelle (eigene Darstellung; Werte aus LKW-Datenbank des ifeu [ife23])

ßenklassen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Motorleistung und zunehmendem Gesamtgewicht die Batteriekapazität steigt. Vorwiegend liegt diese unter 500 kWh. Die Fahrzeugmodelle erreichen größtenteils eine Reichweite bis zu 500 km Reichweite[10], welche den Tagesfahrweiten aus Abbildung 2.9 entsprechen.
Bei FCEV sind die Wasserstoff-Speicherkapazitäten vorwiegend für die Reichweite verantwortlich. Mit FCEV sind derzeit Reichweiten bis zu 400 km möglich [Sam+22, S. 19]. Für Nutzfahrzeuge im Nah- und Regionalverkehr ist dies ausreichend. Die täglichen Reichweiten des Langstreckenverkehrs können durch höhere Speicherkapazitäten (57-64 kg) oder einen höheren Speicherdruck (700 bar) erreicht werden [Sam+22, S. 19]. Dies wird bis zum Jahr 2030 angestrebt.

Wirkungsgrad

In der Abbildung 3.3 werden die vereinfachten Prozessketten von der elektrisch bereitgestellten Energie bis zum Endverbrauch mit dem Gesamtwirkungsgrad (Well-to-Wheel) für BEV, FCEV und Verbrenner dargestellt. Bei BEV kann von einem Gesamtwirkungsgrad zwischen 57 % und 63 % ausgegangen werden. Die Schwankungen der Effizienzwerte ergeben sich durch den Batterieladevorgang. Die Wirkungsgrade von FCEV bewegen sich im Bereich von 24 % bis 29 %. Bei der Einschätzung dieser vergleichsweise niedrigen Effizienzwerte werden zusätzliche Faktoren, wie Energiespeicher, Sektorenkopplung etc., nicht berücksichtigt [Sam+22, S. 17]. Die Integration dieser Faktoren kann die Gesamteffizienz steigern. Auf Basis dieser Werte sind bei BEV deutliche Effizienzsteigerungen zu erwarten, was durch den Vergleich mit Fahrzeugen mit synthetischen Energieträgern und Dieselkraftstoff hervorgehoben wird. Die Wirkungsgrade liegen bei Fahrzeugen mit synthetischen Energieträgern zwischen 17 % und 20 % und mit Dieselkraftstoff zwischen 38 % und 42 % [Sam+22, S. 17]. Es resultiert dadurch eine um 19 % bis 21 % höhere Effizienz gegenüber Dieselfahrzeugen und 33 % bis 34 % höhere Effizienz gegenüber FCEV.

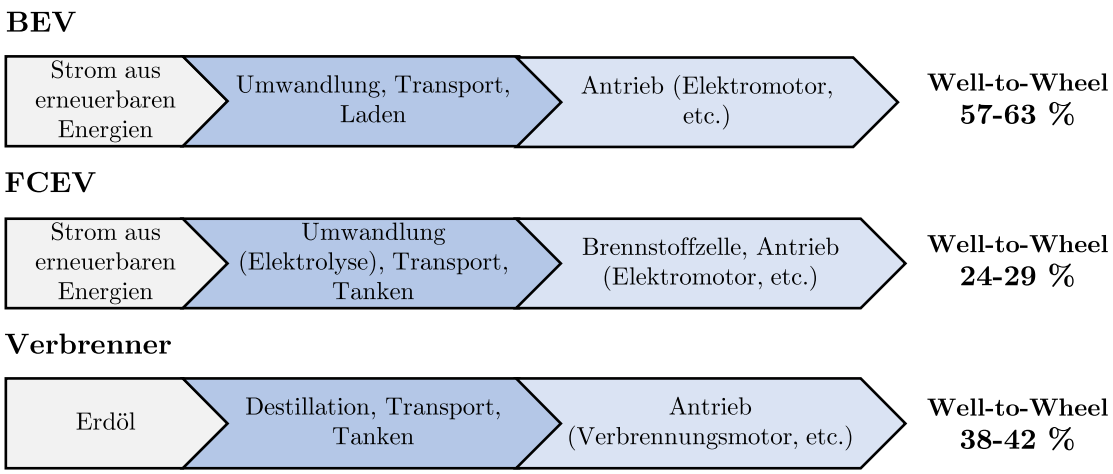


Abbildung 3.3: Wirkungsgrade der Antriebstechnologien (in Anlehnung an [Sch+20; Sam+22, S. 17]

[10] Die Hersteller der Fahrzeugmodelle stellen nur teilweise die Reichweiten zur Verfügung. Daher wird in Abbildung 3.2 die Batteriekapazität in Abhängigkeit der Motorleistung angegeben.

Betankung/-ladung

Der Beladungsvorgang bzw. die Beladungsdauer beim BEV ist abhängig von der jeweiligen Ladetechnologie sowie der verfügbaren Ladeleistung (siehe Kapitel 3.2.1). Im Nah- und Regionalverkehr ist der Ladevorgang über Nacht möglich. Für Tagesfahrleistungen von bis zu 1000 km im Fernverkehr wird ein Zwischenladen notwendig [Sam+22, S. 23]. Im Falle einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur ist es vorstellbar, den E-LKW in der gesetzlich vorgeschriebenen Lenkzeitunterbrechung[11] und täglichen Ruhezeit[12] des Fahrers zu laden. Dies ergibt einen Transportablauf entsprechend dem eines LKW mit Verbrennungsmotor.

Mit der aktuellen öffentlichen Ladeinfrastruktur, welche in Kapitel 3.2.1 beschrieben wird, ist ein Zwischenladen weitestgehend nicht realisierbar. Von den 105.579 Ladepunkten (85.072 Normalladepunkte und 20.507 Schnellladepunkte; Stand: 01.09.2023; [Bun23f]) in Deutschland sind nur wenige für E-LKW zugänglich oder geeignet. Der Großteil der Ladepunkte ist aufgrund der Leistungsanforderungen nicht für E-LKW geeignet oder durch Zufahrtseinschränkungen, wie Höhenbegrenzungssperren, nicht erreichbar.[13]

Der Tankvorgang des FCEV ist ähnlich zu dem des Dieselfahrzeugs. In der Studie vom VDI/VDE wird eine durchschnittliche Dauer von 15 Minuten angenommen. Das Wasserstoff-Tankstellennetz genügt gegenwärtig nicht den Anforderungen für LKW. Die bisherigen Tankstellen sind aufgrund der Mengenverfügbarkeit nur für PKW ausgelegt. Bis 2030 wird eine ausreichende Abdeckung an Autobahnen, Transitrouten und Industrieregionen erwartet. [Sam+22, S. 20]

Emissionen

Güterkraftfahrzeuge sind für eine Vielzahl von Emissionen verantwortlich. Dazu gehören Geräusche, CO_2, Stickoxide und Feinstaub[14]. Die Umstellung auf erneuerbare Energien als politische Zielsetzung bietet für BEV und FCEV die Grundlage. Es werden langfristig während des Betriebs dieser Fahrzeuge mit erneuerbaren Energien keine CO_2-Emissionen erwartet. Jedoch sind sie aufgrund des CO_2-Fußabdrucks in der (Batterie-)Herstellung und der hohen CO_2-Last im deutschen Strommix in der Kritik. Es bleiben mittelfristig während der Herstellung der Fahrzeugsysteme die CO_2-Emissionen bestehen. Sie entstehen insbesondere bei der Batterieproduktion. Untersuchungen zeigen, dass heutzutage bei der Herstellung von Batterien von einem Ausstoß von etwa 75 kg CO_2 pro kWh Batteriekapazität ausgegangen werden kann [HS20]. Ein 40 t-Diesel-LKW kann etwa 50.000 km zurücklegen, bevor er die CO_2-Emissionen erreicht, die bei der Herstellung eines entsprechenden batteriebetriebenen Fahrzeugs entstehen. Da die erwartete Lebensdauer von LKW jedoch deutlich länger ist, dürfte sich insgesamt ein positiver Effekt auf

[11] Die Lenkzeitunterbrechung erfolgt spätestens nach 4,5 Stunden für 45 Minuten. Sie kann in 15 und 30 Minuten in dieser Reihenfolge gesplittet werden. [Bun23c]

[12] Die tägliche Ruhezeit des Fahrer beträgt elf Stunden. Sie kann in mindestens drei und neun Stunden gesplittet werden. [Bun23c]

[13] Die Anzahl der Ladepunkte für E-LKW in Deutschland ist bisher nicht statistisch erhoben worden.

[14] Feinstaub entsteht neben der Verbrennung von Kraftstoff auch durch den Abrieb von Bremsen, Reifen und Fahrbahnoberflächen sowie durch das Aufwirbeln von Staub auf den Straßen [Umw18].

die CO_2-Emissionen ergeben. Trotzdem wird zukünftig bei der Herstellung von Batterien der vermehrte Einsatz von regenerativem Strom empfohlen. [Sam+22, S. 4]
Die CO_2-Emissionen können somit durch den CO_2-Fußabdruck des Strommixes, den Transport von Wasserstoff und weiteren Faktoren variieren.
Zudem ermöglicht die Einführung von BEV und FCEV eine nachhaltige Verringerung der Lärmbelastung, förderlich für die gesellschaftliche Akzeptanz (nächtliche Belieferung von Supermärkten). Ebenso ist eine Reduktion der Freisetzung von Feinstaub zu erwarten. [Sam+22, S. 30, 31]

Kostenparität

Ein weiteres Hemmnis zur Nutzung von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben ist die Wirtschaftlichkeit bzw. Kostenparität, welche über den Total Cost of Ownership (TCO) ermittelt wird. Er umfasst alle Kosten im Zusammenhang mit einem Produkt oder einer Dienstleistung über die gesamte Lebensdauer, einschließlich Anschaffung, Betrieb, Wartung und möglicher End-of-Life-Aufwendungen[15]. Die wesentlichen Einflussfaktoren bei Nutzfahrzeugen sind die Anschaffungskosten und die laufenden variablen Betriebskosten. In der Abbildung 3.4 werden die voraussichtlichen Nutzungskosten im Jahr 2025 dargestellt. Die Berechnung des Öko-Instituts gilt als beispielhaft für eine Sattelzugmaschine mit verschiedenen Antrieben, welche im Jahr 2025 und über einen Zeitraum von fünf Jahren mit einer durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung von 120.000 km in Betrieb genommen wird [KHG18, S. 61]). Es wird ersichtlich, dass der Dieselbetrieb durch steuerbedingt steigende Kosten auf einem ähnlichen Niveau liegt wie der Betrieb eines E-LKW. Sattelzugmaschinen mit kleineren Reichweiten (bis 400 km) liegen sogar unter den Nutzungskosten eines Verbrenners. Das FCEV liegt im Jahr 2025 aufgrund der hohen Energieverluste und dem daraus resultierenden Energieverbrauch über 500.000 €. Durch die Massenproduktion und Innovation wird bis 2030 bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben eine deutliche Reduktion der Kosten erwartet [Sam+22, S. 25].

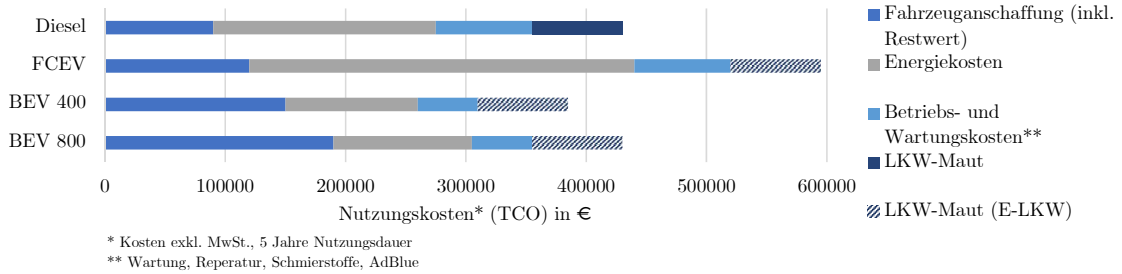


Abbildung 3.4: Antriebsabhängige Nutzungskosten (TCO) von Sattelzugmaschinen im Jahr 2025 (in Anlehnung an [KHG18, S. 61])

[15] End-of-Life steht nicht für das Ende der gesamten Lebensdauer, sondern bezeichnet vielmehr den Zeitpunkt, an dem die Nutzung oder der Betrieb in der spezifischen Anwendung endet. Bei Batterien kann das z. B. nach einem zehnprozentigen Leistungsverlust eintreten. Die Batterie kann dann für andere Anwendungen genutzt werden. Brennstoffzellen sind nach der mobilen Anwendung immer noch funktionsfähig und somit für andere Anwendungen einsetzbar. [e-m21, S. 34]

Verfügbarkeit

Aufgrund des ökonomischen sowie ökologischem Potentials prognostiziert die Unternehmensberatung PricewaterhouseCooper (PwC), dass bis zum Jahr 2035 voraussichtlich mindestens 50 % der LKW-Produktion in den Regionen Europa, Nordamerika und China BEV ausmachen werden [PwC22, S. 27]. Bei FCEV soll der Marktanteil 2035 bei 10-15 % liegen [PwC22, S. 27]. Zu Berücksichtigen ist dabei die starke Abhängigkeit von politischen Handlungen. Deutsche Fahrzeughersteller rechnen mit einem Anteil neuer Zulassungen im Jahr 2030 von etwa 60 % bei BEV und 17 % bei FCEV [NOW23, S. 10].

Sicherheit

Die Verwendung von Wasserstoff in Fahrzeugen wurde von Beginn an von Sicherheitsfragen begleitet. Es wurden verschiedene Richtlinien entwickelt, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Ausführliche Tests, Zulassungsprüfungen und praktische Erfahrungen bestätigen, dass das Gefährdungspotential nicht höher einzustufen ist als bei herkömmlichen Kraftstoffen. Für E-LKW ist dies ebenfalls anzunehmen. [Sam+22, S. 5]

Standardisierung

Ein reibungsloser und kundenorientierter Einsatz von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben erfordert derzeit einen vergleichbaren technologischen Standard, der gegenwärtig noch nicht vollständig erreicht ist [Sam+22, S. 22]. Standardisierungsbedarfe sind bei Ladepunkten, der Speicherung, der Bereitstellung und der Betankung von Wasserstoff notwendig.

Zusammenfassung

Durch den Technologievorsprung der Elektromobilität werden sich in den nächsten Jahren BEV neben den Verbrennern durchsetzen. Dies spiegelt sich ebenfalls in den Annahmen der deutschen Fahrzeughersteller wider. Das BEV hat eine um 33-34 % höhere Effizienz gegenüber dem FCEV. Bei Fahrzeugen mit kleineren täglichen Fahrleistungen (unter 400 km) ergeben sich in Zukunft geringere Nutzungskosten im Vergleich zu Dieselfahrzeugen und FCEV. In Bezug auf die Reichweite gibt es bei den BEV Entwicklungspotential durch den Einsatz von Lithium-Batterien auf Feststoffbasis [Sam+22, S. 18]. Jedoch können tägliche Lenkzeitunterbrechungen und Ruhezeiten als Batterieladezeiten genutzt werden und bei einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur einen kontinuierlichen Betrieb gewährleisten. Anwendungsszenarien für BEV sind derzeit vorwiegend im Nah- und Regionalverkehr umsetzbar. Für größere Strecken über 400 km im Regionalverkehr sowie für Strecken im Fernverkehr wird zukünftig der Einsatz von FCEV möglich. Ebenfalls werden sich Nutzfahrzeuge mit batterieelektrischen Antrieben auch auf langen Fahrstrecken etablieren. Die beschriebene, aktuelle Relevanz von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen gegenüber FCEV ist Grundlage der später folgenden Betrachtung von BEV und deren Ladeinfrastruktur.

3.1.5 Analyse des Fahrzeugmarktes

Derzeit ist der Nutzfahrzeugmarkt vorwiegend durch Dieselfahrzeuge geprägt. Im Jahr 2023 liegt der Bestand von E-LKW lediglich bei 1,8 % [e-m23, S. 6] und die Tendenz zeigt sich durch die Klimaziele steigend, was durch die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW)[16] und PwC bestätigt wird. Hersteller sind gezwungen, die CO_2-Emissionen durch LKW zu reduzieren. Die NOW gibt Absatzzahlen für 2030 von knapp 60 % für E-LKW in Deutschland an [NOW23, S. 10]. Dies sind Angaben der Hersteller. Laut PwC wird bis 2035 der Anteil bei den Neuzulassungen in Europa auf etwa 70 % steigen [PwC22, S. 27]. In der Abbildung 3.5 ist die Entwicklung der Absatzzahlen von BEV (Herstellerangaben) als Nutzfahrzeuge über 12 t in Deutschland gegenüber den Diesel-LKW und FCEV von 2023 bis 2030 dargestellt.

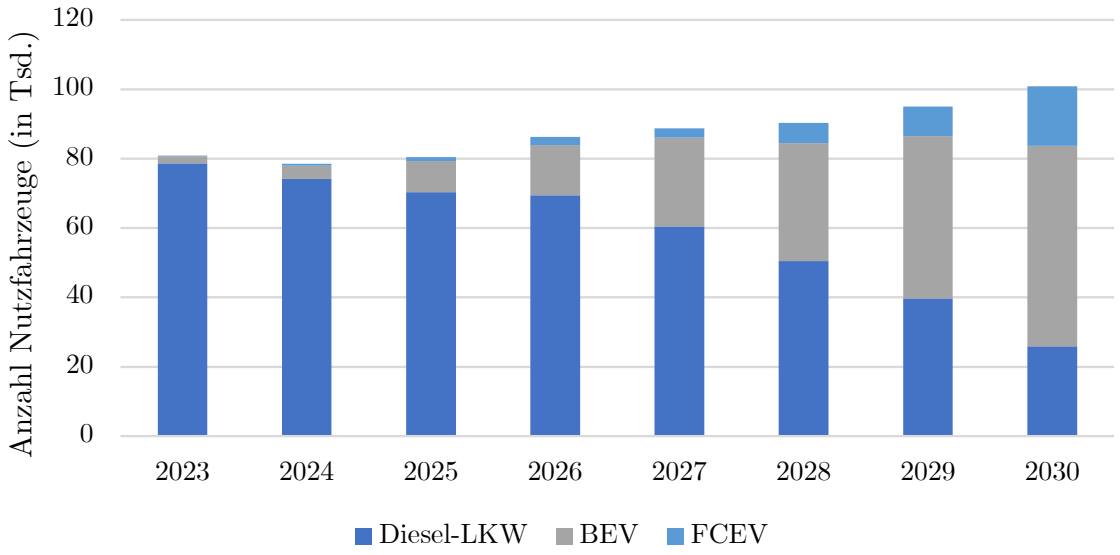


Abbildung 3.5: Prognostizierte Absatzzahlen schwerer Nutzfahrzeuge (>12t) in Deutschland laut Herstellerangaben (in Anlehnung an [NOW23, S. 10])

Das verfügbare Angebot an Fahrzeugen ist jedoch noch sehr begrenzt. Die Hälfte der Fahrzeuge wird durch Umrüster angeboten. Beispielsweise baut das Unternehmen Designwerk vorwiegend auf das Chassis von Volvo auf. Die jährlichen Produktionsmengen dieser Anbieter sind gering und die Fahrzeuge werden größtenteils nach den individuellen Anforderungen der Kunden gefertigt [ACE23, S. 8]. Neue Hersteller wie Nikola treten dem Markt bei. OEM, welche in den letzten Jahren Diesel-LKW anboten, starteten ebenfalls ihre Serienproduktion von E-LKW (z. B. Mercedes-Benz eActros). Des Weiteren haben die führenden europäischen Hersteller von LKW bekanntgegeben, dass sie ab dem Jahr 2040 ausschließlich Fahrzeuge produzieren werden, die durch elektrische Antriebe, Wasserstoff oder Biokraftstoffe angetrieben werden [ACE20].
In der Abbildung 3.6 wird die Anzahl der verfügbaren Güterkraftfahrzeuge nach den

[16] Die NOW koordiniert und steuert Programme für die Elektromobilität sowie die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.

Gewichtsklassen dargestellt. Zum Bereich 3,5 bis 7 t gehören auch Transporter. Lediglich sechs dieser 16 Fahrzeuge werden den LKW zugeordnet und haben eine Zuladung von über zwei Tonnen. Folglich sind mit den Gewichtsklassen 7,5 - <12 t und 12 - <18 t für die Stückgutlogistik lediglich 21 Fahrzeuge erhältlich. Im Vergleich zur Marktverfügbarkeit von 2021 [Jöh+23, S. 29] ist die Anzahl an E-LKW, besonders ab 12 t, deutlich gestiegen.

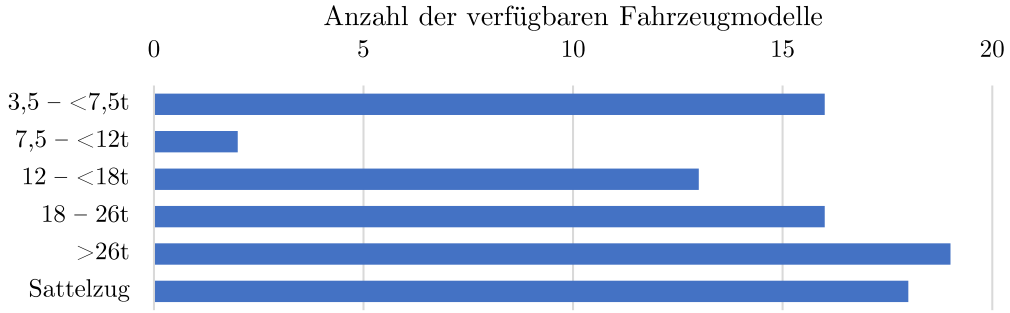


Abbildung 3.6: Marktverfügbarkeit von batterieelektrischen Güterkraftfahrzeuge nach Größenklasse (eigene Darstellung; Werte aus LKW-Datenbank des ifeu [ife23])

Die Mehrheit dieser E-LKW verfügt gemäß den aktuellen Herstellerangaben über Batteriekapazitäten von bis zu 500 kWh (siehe Abbildung 3.2), was in einigen Fällen maximale Reichweiten von bis zu 300 km ohne Zwischenladen ermöglicht. Aufgrund dieser Spezifikationen konzentriert sich der Einsatzbereich der bisherigen E-LKW hauptsächlich auf den Nah- und Regionalverkehr. Das bisherige Marktangebot umfasst kaum Fahrzeuge mit Reichweiten über 500 km ohne Zwischenladen. Daher ist der Fernverkehr mit dem bestehenden Fahrzeugportfolio in der Regel noch nicht ohne Unterbrechung für das Zwischenladen realisierbar. [Jöh+23, S. 30]

3.2 Lade- und Energieinfrastruktur

Der in dem vorherigen Kapitel identifizierte Hochlauf der Elektromobilität im LKW-Bereich erfordert eine synchrone Entwicklung der infrastrukturellen Voraussetzungen. Ein flächendeckender Aufbau von privater und öffentlicher Ladeinfrastruktur sowie die Integration in die entsprechende Spannungsebene[17] des Netzes wird benötigt. Zusätzlich muss sich das elektrische Netz auf die bevorstehende Energiewende mit weiteren Verbrauchern (z. B. Wärmepumpen) und neuen Energiequellen (z. B. erneuerbare Energien) vorbereiten. Im folgenden Unterkapitel werden die Lade- und Energieinfrastruktur in Bezug auf E-LKW beschrieben.

[17] Spannungsebenen finden ihre hauptsächliche Anwendung im Kontext von elektrischen Stromnetzen, die aufgrund ihrer variierenden Nennspannungen in verschiedene Ebenen gegliedert sind [Waw22, S. 72].

3.2.1 Ladeinfrastruktur

Der Großteil der Ladeinfrastruktur, aufgebaut durch Energie- und Mineralölwirtschaft und Automobilbranche, ist derzeit lediglich für PKW zugänglich und geeignet. Folglich existiert kaum öffentliche Ladeinfrastruktur für E-LKW. Aus diesem Grund werden durch die Transportunternehmen vorrangig die Ladepunkte an Umschlagspunkten (Depot-Laden, privates Laden) verwendet. Öffentliches Laden findet primär entlang der Hauptverkehrsachsen statt. Hierbei wird zwischendurch (während der Pausenzeit) und über Nacht (während der Ruhezeit) an bestehenden Rast- und Autohöfen oder neu entstehenden Ladehubs geladen. Teilweise erfolgt auch das Laden aufgrund von Wartezeiten vor Umschlagplätzen. Für öffentliches Laden sind hohe Ladeleistungen, eine ausreichende Anzahl an Ladepunkten und Stellplätzen erforderlich [Ger23]. Dadurch resultieren hohe Investitionskosten. Die Alternative zum öffentlichen Laden ist das Depot-Laden, welches vorwiegend auf Betriebshöfen (über Nacht und am Wochenende) und auf Umschlagplätzen (während Be-/Entladung und Wartezeit) stattfindet. Hierfür müssen ausreichend Flächen verfügbar sein. Die Ladezeiten sowie Energiebedarfe sind überwiegend planbar. Allerdings müssen an den meisten Standorten Netzanschlüsse ausgebaut werden, was ebenfalls hohe Investitionskosten verursacht. Die benötigten Ladeleistungen werden in Abbildung 3.7 dargestellt. Jedoch sind diese derzeit kaum verfügbar, da sie stark abhängig von der Netzanschlussleistung sind.

Depotladen		Öffentliches Laden		
Betriebshöfe (Laden über Nacht und am Wochenende)	Auf Umschlagplätzen (Laden während Be-/Entladung und Wartezeit)	Vor Umschlagplätzen (Laden während Wartezeit)	Übernacht-Laden (Laden während Ruhezeit)	Zwischendurch-Laden (Laden während und außerhalb Pausenzeit)
	Am (Zwischen-) Zielort		Primär entlang der Hauptverkehrsachsen	
Niedrige bis mittlere Ladeleistungen (100-500 kW)	Mittlere Ladeleistungen (350-500 kW)	Niedrige Ladeleistungen (150 kW)	Niedrige Ladeleistungen (100-150 kW) in Verbindung mit Lastmanagement	Hohe Ladeleistungen (750 kW – 1 MW)

Abbildung 3.7: Ladeszenarien mit empfohlener Ladeleistung (in Anlehnung an [Nat21, S. 11])

Als stationäre Lademöglichkeit dienen Ladestationen, welche an einem festen Ort installiert sind (siehe Abbildung 3.8). Der aktuelle Ladestandard für solche Stationen ist das Combined Charging System (CCS). Der Standard ermöglicht primär Ladeleistungen bis zu 350 kW (teilweise auch bis zu 500 kW) [Nat21, S. 12]. Für den PKW-Bereich ist dies ausreichend. Im LKW-Bereich ist der Leistungsbedarf entsprechend dem Batteriespeicher höher und anzupassen. Der Leistungsbedarf ist fünffach und perspektivisch zehnfach größer. Hierzu wurde von der Charging Interface Initiative CharIN der neue Standard Megawatt Charging System (MCS) mit Ladeleistungen bis zu einem Megawatt (zur Einführung; später bis zu 4,5 Megawatt möglich) entwickelt [Nat21, S. 12]. Bei diesen Hochleistungs-Ladepunkten wird eine Markteinführung 2024 geplant [IDT23]. Ebenso

planen drei Nutzfahrzeughersteller (Daimler Truck, Traton Group und Volvo Group) bis 2027 ca. 1.700 Hochleistungs-Ladepunkte in Europa zu installieren [Mil23].
Weitere Lademöglichkeiten sind Systeme zum Laden während der Fahrt bzw. die dynamische Energieversorgung. Hierbei werden elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge im Gegensatz zum punktuellen Aufladen während der Fahrt kontinuierlich mit Energie versorgt. Dies erfolgt über eine in den Fahrweg integrierte Infrastruktur, die als Electric Road Systems bezeichnet wird. Dadurch resultiert eine nahezu unbegrenzte Reichweite innerhalb des entsprechenden Infrastrukturnetzes und reduziert die Notwendigkeit einer großen Batterie an Bord, wodurch Kosten und Gewicht am Fahrzeug eingespart werden können. Die Batterie wird vorwiegend für Fahrten außerhalb des Netzes benötigt. Allerdings erfordert diese Technologie zusätzliche technische Komponenten am Fahrzeug zur Stromabnahme, deren Art von der spezifischen Infrastrukturtechnologie abhängt. Nachteile entstehen aus den initialen hohen Investitionskosten für den Aufbau der Infrastruktur sowie möglichen Schwierigkeiten, darunter aufwendige Bauprozesse mit Auswirkungen auf die Verfügbarkeit der Fahrbahn, komplexe Genehmigungsverfahren oder das mögliche Fehlen von Akzeptanz aufgrund landschaftlicher Eingriffe. [KHG18, S. 20]
Mögliche Konzepte sind die Oberleitung, die Stromschiene (konduktiv) und die Induktion (siehe Abbildung 3.8). Alle Konzepte befinden sich derzeit noch in der Entwicklung. Besonders die induktive Stromübertragung erweist sich im Vergleich zu den konduktiven Technologien aufgrund eines reduzierten Wirkungsgrads, bedingt durch Energieverluste während der Übertragung, als nachteilig. In Deutschland gibt es bisher nur Teststrecken mit Oberleitungen (z. B. das eHighway-System auf der Autobahn 5 zwischen Frankfurt am Main und Darmstadt). Hierfür benötigt der LKW als weiteren Anbau ein Pantograph, der über einen direkten Kontakt zu den Oberleitungsdrähten die Energieübertragung ermöglicht. Für eine Ausdehnung auf längere Abschnitte und die potentielle Implementierung eines Oberleitungs-Kernnetzes entlang der Hauptverkehrsachsen des Bundesautobahnnetzes ist weiterer Entwicklungsbedarf notwendig [Göc+23, S. 30]. Eine Nutzung der Konzepte während des Stillstands an Umschlagpunkten ist ebenfalls möglich, allerdings bisher nicht in Verwendung [Pfl+20b, S. 5].

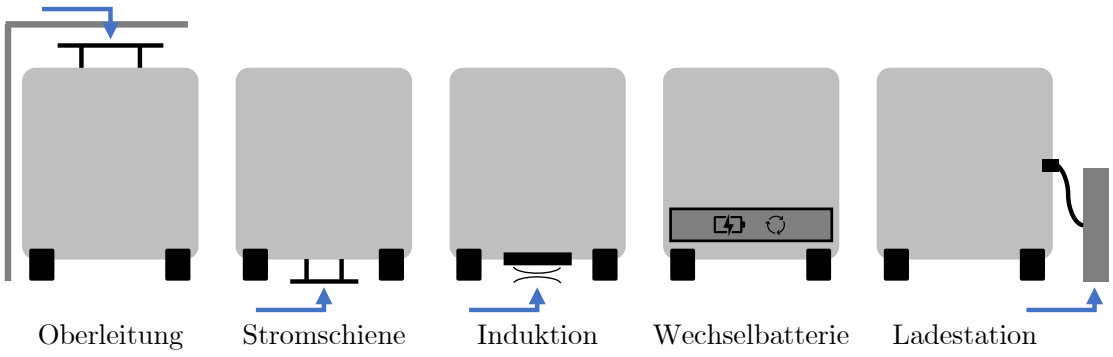


Abbildung 3.8: Ladekonzepte für einen E-LKW (in Anlehnung an [Pfl+20b, S. 5; KHG18, S. 20])

Ein weiteres Konzept, um die Standzeit beim Batterieladen zu verkürzen, ist die Wechselbatterie (siehe Abbildung 3.8). In diesem Ansatz werden austauschbare Batterien am E-LKW verwendet, die bei Bedarf im Logistikzentrum ausgetauscht werden können. Der Ladevorgang erfolgt unabhängig und läuft somit langsamer und schonender für die Batterie ab. [Pfl+20b, S. 5]

3.2.2 Energieinfrastruktur

Es besteht nicht nur Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation, sondern auch bei der Einbindung der Ladeinfrastruktur in die Energieinfrastruktur bzw. das Stromnetz. Während für öffentliche Lade-Hubs im PKW-Bereich bisher in der Regel eine Anbindung an das Mittelspannungsnetz ausreichend ist, prognostizieren Studien für Lade-Hubs im LKW-Bereich einen Anschlussbedarf an das Hochspannungsnetz [Kip+22, S. 8]. Die Spannungsebenen für das Laden von E-LKW sind somit die lokalen Verteilnetze (Niederspannung), die regionalen Verteilnetze (Mittelspannung) und überregionalen Verteilnetze (Hochspannung) [Nat20, S. 6].
Die zusätzliche elektrische Last, welche durch das Laden von E-LKW entsteht, muss in Abhängigkeit der verfügbaren Ladeinfrastruktur in die jeweilige Spannungsebene des Netzes eingebunden werden. Hierdurch ist ein Netzausbau oft nicht zu vermeiden. Jedoch ist ein Ausbau sehr zeit- und kostenintensiv, weshalb der Netzbetreiber frühzeitig Ladeenergiebedarfe von E-LKW quantifizieren und im Netzgebiet lokalisieren sollte [Pfl+24, S. 7, 9]. Eine Untersuchung von *Walz et al.* zeigt, dass in einem Logistikzentrum die Anschlussleistung in bestimmten Elektrifizierungsszenarien überschritten wird und es Alternativen zum Netzausbau, wie z. B. die Spitzenkappung oder lokale PV-Erzeugung, gibt [Wal+22]. Zudem kann anhand der in der Arbeit entwickelten Methodik der Netzausbaubedarf frühzeitig erkannt werden. Eine weitere Maßnahme ist mithilfe von Last- und Lademanagementsystemen die Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen zu reduzieren, um somit hohe Lastspitzen zu vermeiden. Hierbei sind ebenfalls zur effizienten Abfederung oder Vermeidung von Lastspitzen organisatorische Strategien notwendig.

3.3 Akteure des elektrifizierten Straßengüterverkehrs

Anhand einer Stakeholder[18]-Analyse werden die Akteure, welche am Prozess der Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs teilhaben, identifiziert. Die Analyse fördert ein besseres Verständnis zum System [GPL20]. Zudem lässt sich die Relevanz der einzelnen Stakeholder ermitteln. Bisher gibt es in der Fachliteratur keine Übersicht zu den Akteuren des elektrifizierten Straßengüterverkehrs. Unter Verwendung von Recherchen und Interviews mit Experten aus dem Logistik- und Energiesektor wird die Analyse durchgeführt. In der Abbildung 3.9 werden alle Akteure mit ihren Kommunikationswegen dargestellt.

[18] Als Stakeholder wird die Menge an Personen beschrieben, welche Einfluss auf das Projekt hat [DZ23, S. 265].

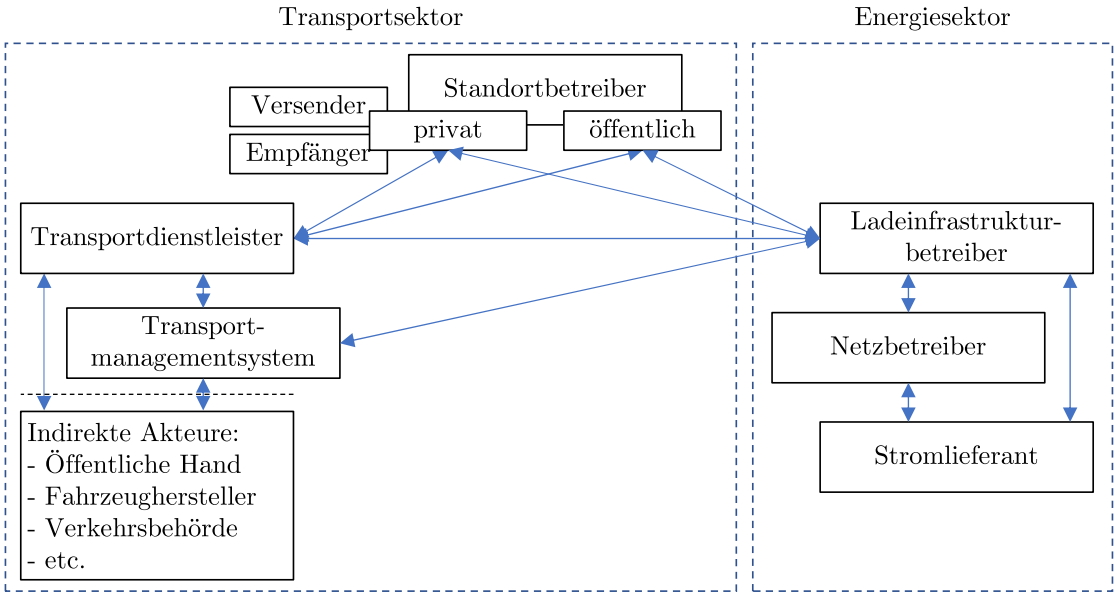


Abbildung 3.9: Akteure im Straßengüterverkehr mit Elektromobilität in Anlehnung an [Pfl+24, S. 4; Mau+24, S. 73]

Die wesentlichen Akteure im Straßengüterverkehr, beschrieben in Kapitel 2.2.3, sind das Transportunternehmen bzw. der Transportdienstleister, der Versender und Empfänger sowie indirekte Teilnehmer, wie z. B. die öffentliche Hand und der Fahrzeughersteller. Die drei erstgenannten Hauptakteure stehen im Rahmen eines Auftrags (Sendung) vorwiegend im Austausch. Versender und Empfänger sind private Standortbetreiber, die gewerblich oder als Privatperson handeln. Sie können verantwortlich sein für den Standort bzw. das Grundstück sein und Ladeinfrastruktur für den Straßengüterverkehr anbieten und reglementieren. Auch der Transportdienstleister kann ein Standortbetreiber sein (siehe Stückgutlogistik). Öffentliche Standortbetreiber sind z. B. Rast- und Autohöfe, Ladezonen an Straßen und in Gewerbegebieten sowie zukünftige Ladehubs, die beispielsweise in den Pausen- und Ruhezeiten angefahren werden können. An allen Standorten kann ein Ladepunkt zur Verfügung stehen, welcher von einem Ladeinfrastrukturbetreiber installiert und betreut wird. Ein Standortbetreiber hat die Möglichkeit, diese Funktion selbst zu übernehmen. Private Standortbetreiber können den Zugriff zu den Ladepunkten reglementieren. In der Kommunikation zwischen diesen Akteuren findet ein Datenaustausch zur Ankunft des Nutzfahrzeugs zum Be- und Entladen der Ware sowie zu einem möglichen Batterieladen statt. Die Informationen stammen aus dem Telematiksystem, welches durch den Fahrzeughersteller zur Verfügung gestellt werden kann, in Kombination mit einem Transportation Management System (TMS). Das TMS unterstützt die Planung, Ausführung und Optimierung der Transportprozesse und schließt somit die Disposition und Tourenplanung ein. Um den jeweiligen Verkehrsbedingungen gerecht zu werden, kommuniziert das TMS und das Transportunternehmen zum Austausch von Verkehrsinformationen aktiv mit der Verkehrsbehörde. Dies schafft die Voraussetzung für eine anpassungsfähige Tourenplanung, die flexibel auf aktuelle Gegebenheiten reagiert.

Neben dem Ladeinfrastrukturbetreiber treten weitere Akteure aus dem Energiesektor der Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs bei. Die Ladeinfrastrukturbetreiber, Netzbetreiber und Stromlieferanten stehen im aktiven Austausch bezüglich der Installation der Ladeinfrastruktur, der Abrechnung der Stromkosten und Netzentgelte sowie der Einhaltung der angemeldeten Spitzenleistung. Die durch die Installation der Ladeinfrastruktur angeforderte Leistung muss der Ladeinfrastrukturbetreiber beim Stromlieferanten melden und mit dem Netzbetreiber die Bereitstellung abstimmen [Mau+24, S. 72].
Neben dem Eintritt dieser neuen Akteure des Energiesektors nehmen die Stakeholder aus dem Logistiksektor eine zusätzliche neue Rolle ein. Die Kommunikation zwischen Transportunternehmen und Ladeinfrastrukturbetreiber (z. B. die Reservierung eines Ladepunkts) ist entscheidend, um einen reibungslosen Transportprozess zu garantieren. Es ermöglicht unter anderem die Einplanung von Reservierungen an Ladepunkten, bei Verkehrsstörungen die Umplanung der Route zur Gewährleistung der Batterieladung.
Zur Erleichterung und Förderung dieses sektorenübergreifenden Kommunikationsprozesses wird eine Austauschplattform in einem Forschungsprojekt (siehe [Mau+24]) untersucht. Wesentlicher Bestandteil der Plattform ist eine Clearingstelle, welche die Informationen (z. B. Fahrerdaten) anonymisiert, um den hohen Datenschutzanforderungen gerecht zu werden. Somit können die automatisierte Reservierung von Ladeinfrastruktur als zentrales Element und weitere Funktionen, wie z. B. Ladebedarfsprognosen oder die Zuweisung von Transportaufträgen basierend auf dem aktuellen Batterieladezustand und der Verfügbarkeit des Frachtraums des Fahrzeugs, realisiert werden [Mau+24, S. 72–74].

3.4 Zusammenfassung

Durch die Klimaziele der Europäischen Union und der Bundesregierung Deutschland wird eine CO_2-Neutralität angestrebt, weshalb die Abkehr von Nutzfahrzeugen mit Dieselverbrennungsantrieb unausweichlich ist. Eine forcierte Lösung im Straßengüterverkehr ist die Elektromobilität. Aufgrund der frühzeitigen Förderung hat sie einen Technologievorsprung gegenüber anderen Alternativen, wie FCEV. Es sind bereits über 60 E-LKW-Modelle verschiedener Hersteller verfügbar. Bei FCEV ist diese Verfügbarkeit nicht gegeben. Ein weiterer Vorteil von BEV ist der Wirkungsgrad, welcher eine höhere Effizienz gegenüber Verbrenner-Fahrzeugen und FCEV aufweist. Die größte Herausforderung der Elektromobilität ist der flächendeckende Ausbau der Ladeinfrastruktur. Es sind kaum öffentliche Ladepunkte für E-LKW vorhanden. Die Nutzer von E-LKW verwenden hauptsächlich ihre eigene Infrastruktur. Zudem ist für die benötigten Ladeleistungen ein Netzausbau erforderlich. Hierzu wird die in der Arbeit entwickelte Methodik eine Prognose zum Ausbau von Ladeinfrastruktur und Netz für einen Großraum und ein Logistiksegment an den Energiesektor geben.
Aufgrund der Entwicklung der Elektrifizierung und deren Herausforderungen wird eine Analyse des Straßengüterverkehrs für diese Arbeit in Kapitel 2.2 vorgenommen. Der

Transportprozess (siehe Abbildung 2.13) unterteilt sich in kurze und lange Fahrstrecken. Lange Strecken mit großen Transportdistanzen und -mengen im Hauptlauf werden vorwiegend mit schweren Nutzfahrzeugen und Hängerzügen durchgeführt. Zurzeit sind maximale Reichweiten bis 500 km mit E-LKW durchführbar, weshalb eine Einschränkung auf diesen Strecken besteht. Im Gegensatz dazu bieten kurze Strecken ein erhebliches Potential für E-LKW. Die Strecken bzw. Touren im Nah- und Regionalverkehr (vorrangig im Vor- und Nachlauf) liegen meist unter 200 km (siehe Abbildung 2.9), welche mit dem Großteil der verfügbaren E-LKW umsetzbar sind.
Der Stückgutverkehr unterteilt sich in Vor-, Haupt- und Nachlauf. Der Hauptlauf mit großen Transportdistanzen läuft nach einem Fahrplan mit Hängerzügen ab. Aufgrund des Fahrplans und der daraus resultierenden Planbarkeit ist eine Elektrifizierung deutlich einfacher zu gestalten, da die Fahrstrecke und somit die Distanzen bekannt sind. Batterieladestopps an öffentlicher Ladeinfrastruktur können fest eingeplant werden. Auch der Aufbau von privaten Ladepunkten auf einer Strecke ist vorstellbar. Der Vor- und Nachlauf ist dagegen nicht planbar, da Empfänger und Absender täglich wechseln. Voraussichtlich liegen die täglichen Fahrleistungen im Rahmen der Batteriereichweiten. Dies gilt jedoch zu prüfen. Zusätzlich ist zu untersuchen, wann die Fahrzeuge laden müssen und welche Ladeinfrastruktur (privat oder öffentlich) benötigt wird. Zudem sind bereits über 30 E-LKW-Modelle verschiedener Hersteller für den Nah- und Regionalverkehr und somit für den Vor- und Nachlauf dieses Segments verfügbar. Durch den heutigen Strommix können diese Modelle mit einer lokalen CO_2-Freiheit und einem deutlich geringerem Geräuschausstoß betrieben werden. Davon profitiert der urbane Raum, in welchem die größte Nachfrage nach Stückgut vorliegt.
Bisher sind in diesem Segment nur sehr wenige von ca. 47.000 Fahrzeugen, wovon ca. 25.000 für den Vor- und Nachlauf vorgesehen sind, [Pfl+20a] elektrifiziert. Folglich wird in dieser Arbeit die Elektrifizierung des Vor- und Nachlaufs der Stückgutlogistik anhand der ganzheitlichen Methodik untersucht. Eine detaillierte Analyse für jeden geografischen Großraum wird empfohlen, um alle Akteure und Regionen auf den Elektrifizierungsprozess vorzubereiten.
Anhand der Literaturrecherche zu den Grundlagen und dem aktuellen Stand der Technik in Kapitel 2 und 3 wird somit die Forschungsfrage F2.1 beantwortet:

> F2.1: Warum ist die Stückgutlogistik prädestiniert für eine ganzheitliche Betrachtung zur Elektrifizierung?

Die Analyse für andere Logistiksegmente ist nicht Bestandteil der Dissertation, da die Forschung und Entwicklung bereits weit fortgeschritten (z. B. KEP-Dienstleistungen) oder aufgrund der Planbarkeit in diesem Umfang nicht relevant (z. B. Kontraktlogistik) ist. Ladungsverkehre haben aufgrund der Entwicklung der Batterien und somit der Erhöhung der Reichweiten großes Potential. Eine Analyse ist mithilfe der Übertragbarkeit der Methodik ebenfalls möglich.

4 Konzeption der Methodik zur Betrachtung der Elektrifizierung der Stückgutlogistik

Im folgenden Kapitel wird die Methodik zur ganzheitlichen Betrachtung der Elektrifizierung der Stückgutlogistik sowie der Bestimmung der Elektrifizierungsrate beschrieben. Hierbei wird besonders auf die Zusammenarbeit des Logistik- und Energiesektors geachtet. Dazu werden zuerst das Ziel und die Anforderungen definiert. Nach der Abgrenzung zum Stand der Technik und der Definition der Systemgrenzen wird das Vorgehen der Methodik dargelegt. Als Ziel des Kapitels wird damit die Vorstellung der Methodik festgelegt.

4.1 Ziele und Anforderungen der Methodik

Die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs stellt die Logistik- und Energiewirtschaft vor neue Herausforderungen. Durch den Batterieladeprozess ändern sich logistische Prozesse und es treten neue Akteure aus der Energiebranche dem System bei. Die relevantesten sind der Ladeinfrastrukturbetreiber, Stromnetzbetreiber und Stromlieferant, welche nun mit den Spediteuren sowie Transportunternehmen in Kommunikation treten müssen. Alle Akteure sind bereits in Kapitel 3.3 beschrieben. Jedoch verfolgt derzeit keiner dieser Akteure gemeinsame Ziele und Ansätze, was durch Interviews mit den Akteuren bestätigt wird. Folglich existiert zurzeit kein ganzheitlicher Ansatz zur Einführung der Elektrifizierung im Straßengüterverkehr bzw. Stückgutverkehr. [Pfl+24, S. 4]
Um sich diesen Herausforderungen zu stellen und einen gemeinsamen Ansatz zu realisieren, wird eine Methodik mit folgendem Ziel konzipiert: die Bestimmung einer Elektrifizierungsrate von Nutzfahrzeugen im Stückgutverkehr hinsichtlich eines geografischen Großraums [Pfl+24, S. 4]. Beginnend mit einer Analyse der Stückgutlogistik und der Ermittlung der Elektrifizierungsrate in einem Gebiet wird anschließend unter Berücksichtigung der Logistik- und Energieaspekte deren Optimierung vorgenommen. Zur Analyse wird der gesamte Stückgutverkehr für einen Großraum synthetisch erzeugt, die Ladeenergiebedarfe der Touren bzw. E-LKW quantifiziert und die Integration der Bedarfe vorgenommen. Die Methodik bietet den Akteuren in Zukunft eine bessere Planbarkeit. Spediteure sowie Transportunternehmer können mithilfe der Methodik ihre Elektrifizierungsrate bestimmen. Die Energiebranche hat die Möglichkeit, den neuen Strombedarf rechtzeitig einzuplanen, sodass eine zuverlässige Stromversorgung für Elektromobilität gewährleistet wird. Letztendlich berücksichtigt die Methodik alle Akteure aus dem Logistik- und Energiesektor und verfolgt somit einen ganzheitlichen Ansatz. Hierbei wird die Berücksichtigung aller relevanten Faktoren und Interessen garantiert [Pfl+24, S. 4].
Die Methodik untersucht die Elektrifizierbarkeit in einem geografischen Großraum. Eine Analyse mehrerer Großräume ist sehr komplex und kann bei Bedarf nur nacheinander erfolgen. Jeder Großraum hat unterschiedliche Eigenschaften (Topografie, Siedlungs- und

Wirtschaftsstruktur etc.), weshalb lediglich die Einzelbetrachtung möglich ist. In einem Gebiet kann die Methodik für einzelne oder mehrere Speditionen angewandt werden. Je nach Interessengruppe, wie z. B. Logistik- und Energieunternehmen oder Behörden bzw. Kommunen, ist diese Auswahl von Relevanz. Energieunternehmen sowie Behörden sind vorwiegend an einem Gesamtergebnis mit allen Speditionen interessiert. Speditionen wiederum wollen ihre eigene Elektrifizierungsrate und deren Optimierung ermitteln. Daher ist eine Anforderung an die Methodik die Anwendung durch verschiedene Interessensgruppen [Pfl+24, S. 4]. Zur Sicherstellung der Anwendbarkeit verschiedener Akteure spielt die Verfügbarkeit der Eingangsdaten eine wichtige Rolle. Die Eingangsdaten werden in Kapitel 5.3 vorgestellt.
In der vorliegenden Arbeit wird die Methodik für den Vor- und Nachlauf der Stückgutlogistik im Stadtgebiet Stuttgart konzipiert. Daher wird beim Entwurf des Vorgehens die Anforderung Übertragbarkeit berücksichtigt. Hierbei soll die Methodik durch die Interessengruppen auf weitere Logistiksegmente, wie z. B. den Ladungsverkehr oder die KEP-Dienste, und auf andere geografische Gebiete, wie beispielsweise den Großraum München, übertragen werden können [Pfl+24, S. 4]. Die Übertragbarkeit ist von den Eingangsdaten abhängig, weshalb ein einfacher Austausch möglich sein muss. Die Methodik verschafft somit den Akteuren weiterer Logistiksegmente eine rechtzeitige Unterstützung, um den E-LKW-Einsatz frühzeitig einzuplanen. Ebenfalls ist die Untersuchung in anderen Gebieten für die ansässigen Akteure relevant. Es resultiert dadurch eine breitere Anwendbarkeit und eine ganzheitliche Herangehensweise zur Bewältigung der Herausforderungen im Zusammenhang mit der Elektrifizierung aller Logistiksegmente, welche den Straßengüterverkehr einsetzen.

4.2 Abgrenzung der Methodik

Zur Darstellung des Alleinstellungsmerkmals der Methodik wird diese zum Stand der Technik abgegrenzt. Hierfür werden signifikante Verkehrsnachfragemodelle der Straßenverkehrsplanung vorgestellt und mögliche Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede identifiziert. Zudem wird in diesem Unterkapitel die inhaltliche, zeitliche und räumliche Systemgrenze festgelegt.

4.2.1 Abgrenzung zum Stand der Technik

Zur Bestimmung der Elektrifizierungsrate wird als erstes Teilziel die Abbildung der gesamten Stückgutlogistik für einen Großraum definiert. Diese Abbildung wird synthetisch erzeugt. Hierfür gibt es bereits Ansätze in der Verkehrsplanung. Verkehre bzw. Verkehrsnachfragen[19] entstehen durch vielfältige individuelle Entscheidungsprozesse von Privat-

[19] Die Verkehrsnachfrage wird durch die Anzahl von Fahrten auf einer bestimmten Relation in einer bestimmten Zeit charakterisiert.

personen oder wirtschaftlichen Akteuren in Unternehmen [Fri+19, S. 15]. Wirtschaftliche Akteure treffen langfristige Entscheidungen hinsichtlich der Standortwahl für Arbeitsplätze und Produktionsstätten, gleichzeitig fällen sie kurz- und mittelfristige Entscheidungen über den Transport von Gütern [Fri+19, S. 15]. Die Entscheidungsprozesse können von Verkehrsmodellen bzw. Verkehrsnachfragemodellen als reale Verkehrssituation abgebildet werden [PM21, S. 274]. Somit dienen die Modelle in der konzeptionellen Straßenverkehrsplanung zur Analyse des Verkehrssektors, Vorhersage von zukünftigen Entwicklungen und Bewertung der Auswirkungen von Maßnahmen [PM21, S. 274]. Verkehrsnachfragemodelle quantifizieren die Anzahl der Ortsveränderungen, die von Teilnehmenden im Verkehrsnetz umgesetzt werden. Diese Modelle erfassen die Entscheidungsprozesse, wodurch Ortsveränderungen entstehen. Im Personenverkehr umfassen diese Entscheidungen die Auswahl von Aktivitäten, die Zielwahl, die Wahl des Verkehrsmittels (Moduswahl), die Festlegung der Abfahrtszeit und die Routenwahl. In Bezug auf den Güterverkehr quantifizieren diese Modelle das Gütervolumen und simulieren die Prozesse der logistischen Tourenplanung. Im Güterfernverkehr erfolgt, ähnlich wie im Personenverkehr, die Auswahl des geeigneten Transportmittels, während im regionalen Güterverkehr normalerweise eine feste Vorgabe bezüglich des Transportmittels besteht. [Fri+19, S. 16]
Voraussetzungen für Verkehrsnachfragemodelle sind der Zeitbezug, die räumlichen Abgrenzung und deren Gliederung sowie die Eingangsdatenbasis. Mit dem Zeitbezug wird vorab bestimmt, auf welche Zeiteinheit (z. B. einen Monat) sich das Modell bezieht. Zur räumlichen Abgrenzung wird ein Untersuchungsraum bzw. Territorium, beschränkt durch Grenzen (z. B. verwaltungspolitische Grenzen), festgelegt. Der Untersuchungsraum wird in Verkehrszellen gegliedert, welche durch die geografische Lage und die Art der Nutzung charakterisiert werden. Sie ergeben die Quellen und Senken von Ortsveränderungen. Zudem werden die Zellen durch die Eingangsdatenbasis mit den Struktur- (z. B. Einwohnerdaten und Status der Erwerbstätigkeit) und Verhaltensdaten (z. B. Mobilitätsbedürfnisse) beschrieben. [PM21, S. 282–295]
Des Weiteren unterscheiden sich Nachfragemodelle im Grad der Abstraktion [PM21, S. 298]. Makroskopische Modelle untersuchen Objekte im Aggregat [PM21, S. 298]. Beispielsweise werden Verkehrsteilnehmende als Personengruppen oder Segmente aggregiert. Mikroskopische Modelle betrachten hingegen einzelne Objekte [PM21, S. 298]. Hierbei werden einzelne Verkehrsakteure analysiert. Für die Methodik der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf mikroskopische Nachfragemodelle gelegt, da diese einzelne Verkehrsmittel betrachten.
Das grundlegende Vorgehen bei Verkehrsnachfragemodellen erfolgt nach dem Vier-Stufen-Modell, das in Abbildung 4.1 dargestellt wird.

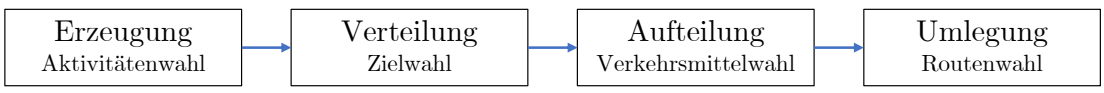


Abbildung 4.1: Vier-Stufen-Modell der Verkehrsplanung (in Anlehnung an [Boy02, S. 171][PM21, S. 311])

- **Verkehrserzeugung**
  Die Verkehrserzeugung dient zur Bestimmung des Verkehrsaufkommens bzw. der Verkehrsleistung. Es wird die Anzahl an Ortsveränderungen im Untersuchungsraum pro Zeiteinheit ermittelt, welche durch Privatpersonen oder Unternehmen umgesetzt werden. Hierfür werden die Struktur- und Verhaltensdaten herangezogen. Folglich ergibt sich, wie oft die Verkehrszelle[20] als Quelle oder Ziel dient. [PM21, S. 305]
- **Verkehrsverteilung**
  In der Verteilung werden den Ortsveränderungen Quell- und Zielzellen zugeordnet. Als Resultat der Stufe ergeben sich somit alle Ortsveränderungen zwischen zwei Verkehrszellen (Quelle-Ziel-Ströme) im Untersuchungsraum pro Zeiteinheit. [PM21, S. 306]
- **Verkehrsaufteilung**
  Innerhalb der Verkehrsaufteilung wird den Ortsveränderungen ein Verkehrsmodus im Personen- und Güterverkehr zugeordnet. Ein Verkehrsmodus kann mehrere Verkehrsmittel beinhalten (Modal Split). Eine Privatperson, welche den Modus öffentlichen Verkehr wählt, verkehrt auf Teilwegen beispielsweise zu Fuß, mit der Straßenbahn oder dem Bus. [PM21, S. 308]
- **Verkehrsumlegung**
  In der letzten Stufe werden die Ortsveränderungen mit dem Modus auf das Verkehrsnetz aufgeteilt. Es resultiert die Auslastung des Netzes. [PM21, S. 309]

Letztendlich lassen sich mithilfe des Vier-Stufen-Modells Ortsveränderungen von Verkehrsteilnehmern oder -gruppen analysieren und daraus Aussagen zu den Zielen, Verkehrsmitteln und Routen ableiten.
Zur Modellierung von Verkehren existiert eine Großzahl an Vorgehen. Europaweit wurden bis ca. 2005 222 Personen- und Wirtschaftsverkehrsmodelle entwickelt [JGW04, S. 104]. Davon werden 65 für Wirtschaftsverkehre und 29 in Kombination mit dem Personenverkehr genutzt [JGW04, S. 104]. Letztendlich ist der Großteil der Wirtschaftsverkehrsnachfragemodelle auf Personenverkehrsmodelle zurückzuführen [Bau+13, S. 389]. Wirtschaftsverkehrsnachfragemodelle (auch als Wirtschaftsverkehrsmodelle oder Güterverkehrsmodelle bezeichnet) dienen zur Modellierung des Wirtschaftsverkehrs. Sie modellieren Fahrten mit einem dienstlichen bzw. wirtschaftlichen Motiv und sind komplementär zu Personenverkehrsnachfragemodellen [Dah18, S. 27].
Im Folgenden werden drei Modelle vorgestellt, welche für die zu entwickelnde Methodik in der vorliegenden Arbeit von Relevanz sind. Es handelt sich um Ansätze, die in die Entwicklung von Modellen logistische Aspekte einbeziehen. Eine ausführliche Betrachtung der Wirtschaftsverkehrsmodelle in Europa bieten [HB08; JGW04; MEP02; Arn10; Mes11; TRD12].

[20] Verkehrszellen charakterisieren die Lage von Orten und deren Nutzung und zeigen die Quellen und Senken von Ortsveränderungen auf [PM21, S. 284].

Güterverkehrsmodell der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP-Modell)

Das großräumige Güterverkehrsmodell der Bundesverkehrswegeplanung prognostiziert für das gesamte Bundesgebiet und Grenzgebiet der Nachbarländer die Verkehrsnachfrage. Dafür wird das Gebiet in Verkehrszellen auf Basis der europäisch einheitlichen Gebietseinteilung NUTS (Nomenclature des Unités Territoriales Statistiques) eingeteilt. Mit dem modellierten Güterverkehrsaufkommen und den auf empirischen Grundlagen basierenden Verkehrsverflechtungen werden mit dem Verkehrsaufteilungsmodell die Anteile der Verkehrsträger (Straße, Schiene und Wasserstraße) zugeordnet. Abschließend erfolgt mit den jeweiligen Modellen der Verkehrsträger die Wahl des Fahrzeuges, die Bildung der Touren und die Routenwahl. Das BVWP-Modell ist somit für die Bundesverkehrswegeplanung ausgelegt. [Lee21, S. 368–369]

WiVSim-Modell

Das Wirtschaftsverkehrsmodell WiVSim ist ein gekoppeltes Wirtschafts- und Verkehrssimulationsmodell zur Analyse des zukünftigen Wirtschaftsverkehrs auf allen Verkehrsträgern. Es können Rückschlüsse auf die Entscheidungsprozesse von Versender und Empfänger abgeleitet werden. Das Modell basiert auf einem mikroskopischen und agentenbasierten Ansatz. Mithilfe einer für den Untersuchungsraum Deutschland erstellten synthetischen Wirtschaftsstruktur werden Versender und Empfänger festgelegt und kombiniert. Der entstehenden Ortsveränderung des Gutes wird daraufhin eine Losgröße, auf den jeweiligen Güterstrom und entsprechend einer der Logistiksegmente, zugewiesen. Abschließend findet die Verkehrsmittelwahl statt und es werden den Ortsveränderungen Tourenmuster zugewiesen. Die Tourenmuster basieren auf den Daten des Kraftfahrtbundesamtes. [Bau+13, S. 392–393]

Kleinräumiges Wirtschaftsverkehrsmodell (KWM)

Das kleinräumige Wirtschaftsverkehrsmodell bildet den Güter- und Personenwirtschaftsverkehr in städtischen Untersuchungsräumen ab. Es ist ein makroskopisches, disaggregiertes Modell und baut auf dem Vier-Stufen-Modell auf. Die Verkehrsnachfrage ist auf Struktur- und Verhaltensdaten für jede Verkehrszelle zurückzuführen. Hierfür wird vorwiegend die Studie *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD)* eingesetzt. Anhand der Eingangsdaten werden Start- und Zielpotentiale[21] ermittelt und zu Quelle-Ziel-Relationen vereint. Daraufhin werden den Relationen Touren zugeordnet. Das KWM-Modell berücksichtigt lediglich den Verkehrsträger Straße. [Bau+13, S. 393–394; Lee21, S. 369–370]

Die beschriebenen Modelle werden für unterschiedliche Einsatzszenarien vorwiegend in der Straßenverkehrsplanung genutzt. Für das Teilziel, die Abbildung des gesamten Stückgutverkehrs in einem Großraum, ist jedoch kein Modell anwendbar. In einem Großraum findet vorrangig der Vor- und Nachlauf des Stückgutverkehrs statt, welcher lediglich durch

[21] Als Start- und Stopppotential wird die Eintrittswahrscheinlichkeit, ob eine Zelle als Quelle oder Ziel ausgewählt wird, bezeichnet.

die Methodik dargestellt werden muss. Die vorgestellten Modelle betrachten hauptsächlich die gesamte Lieferkette. Aus diesem Grund analysieren das BVWP- und WiVSim-Modells den Untersuchungsraum Deutschland. Für die Methodik ist ein definierter Großraum als das zu untersuchende Territorium ausreichend. Ein weiterer Nachteil der Modelle ist, dass diese auf eine relativ alte Datenbasis, wie die Studie *KiD* aus den Jahren 2002 und 2010, zugreifen. Zudem haben im Allgemeinen die Verkehrsmodelle keine Verknüpfung zu Modellen aus dem Energiesektor, was ein Ziel der zu entwickelnden Methodik ist.
Das grundsätzliche Vorgehen von Verkehrsmodellen (Vier-Stufen) sowie auch im Einzelnen die Vorgehen der Wirtschaftsverkehrsmodelle dienen als Basis der Methodik. Zur Darstellung des realen Stückgutverkehrs in einem Großraum ist es notwendig, Ortsveränderungen mit den Start- und Zielpunkten zu erzeugen und anschließend diese einem Fahrzeug und einer Tour zuzuweisen. Das WiVSim-Modell und KWM haben einen ähnlichen Ansatz. Zudem kann die Aufteilung des zu untersuchenden Gebiets in Verkehrszellen, welche das Vier-Stufen-Modell, das BVWP-Modell und KWM nutzen, für die Entwicklung der Methodik genutzt werden. Einzelne Zellen erhalten über die Struktur- und Verhaltensdaten ihre Eigenschaften und Attraktivität, sogenannte Start- und Stopppotentiale. Beispielsweise kann durch Einwohner- und Erwerbstätigenzahlen eine Nachfrage nach einem Stückgutauftrag in einer Zelle mit einer Referenzadresse entstehen. Eine direkte Verwendung der Wirtschaftsverkehrsmodelle wird somit nicht empfohlen. Verkehrsmodelle dienen als Grundlage zur Entwicklung der Methodik, besonders zur Erreichung des Teilziels.

4.2.2 Systemgrenzen

Eine grundsätzliche Voraussetzung bei einer wissenschaftlichen Untersuchung, bei Verkehrsmodellen sowie zur Nutzung der Methodik ist die Definition von Systemgrenzen. Die Auswahl der Systemgrenzen erfordert eine Betrachtung von Abgrenzungen in Bezug auf den sachlichen, zeitlichen sowie räumlichen Aspekt, die im Folgenden jeweils einzeln erörtert werden.

Inhaltliche Systemgrenze

Die inhaltliche Systemgrenze bezieht sich auf die Abgrenzung eines Systems anhand deren Prozesse, Funktionen und Elemente. Zur Definition wird festgelegt, welche Prozesse, Funktionen und Elemente in die Untersuchung einbezogen werden. Eine Fokussierung auf das Wesentliche ist damit gegeben.
Die Methodik dient zur Untersuchung der Elektrifizierbarkeit des Straßengüterverkehrs in einem bestimmten Logistiksegment. Somit ist eine Auswahl zum untersuchenden Logistiksegmentes zu treffen. Im Segment können relevante Prozesse zur Untersuchung gewählt werden. Die vorliegende Arbeit betrachtet das Logistiksegment Stückgutlogistik, in dem der Vor- und Nachlauf Gegenstand der Untersuchung sind. Sortierprozesse, welche nach dem Vorlauf oder vor dem Nachlauf notwendig sind, werden nicht berücksichtigt. Die

Relevanz dieses inhaltlichen Untersuchungsraums wird in Kapitel 3.4 genauer beschrieben.

Zeitliche Systemgrenze

Die zeitliche Systemgrenze legt den Zeitraum für die Untersuchung fest. Sie richtet sich nach der Verfügbarkeit und zeitlichen Herkunft der Eingangsdaten (beschrieben in Kapitel 5.3). Somit basiert die Untersuchung grundsätzlich auf Vergangenheitsdaten. Für eine Prognose eines künftigen Zeitraums bzw. der künftigen Entwicklung müssen Annahmen getroffen werden.
In der vorliegenden Arbeit beziehen sich die Eingangsdaten, welche der methodischen Grundlage zugrunde liegen, vorrangig auf das Jahr 2022 [Pfl+24, S. 4]. Die jeweiligen verwendeten Datensätze stellen ein Jahr dar. Beispielsweise liegen die Einwohnerzahlen immer für ein bestimmtes Jahr vor. In Fällen, in denen statistische Daten für 2022 nicht verfügbar sind, werden Informationen aus den letzten verfügbaren Jahren herangezogen oder Annahmen festgelegt. Der Untersuchungszeitraum umfasst somit das Jahr 2022. Es kann auch ein kleinerer Zeitraum (z. B. ein bestimmter Tag oder eine bestimmte Woche) im Jahr 2022 gewählt werden. Z. B. kann eine bestimmte Woche untersucht werden, um spezifische Ereignisse oder Trends während dieses Zeitraums zu analysieren.

Räumliche Systemgrenze

Zur Definition der räumlichen Systemgrenze wird eine physische oder geografische Abgrenzung des Untersuchungsraums vorgenommen. Hierbei wird festgelegt, welche räumlichen Bereiche in die Betrachtung des Systems einbezogen und welche ausgeschlossen werden. Mithilfe dieser Grenze wird für den Untersuchungsraum klar definiert, welches Territorium oder welche räumlichen Elemente für die Methodik relevant sind.
Die Methodik wird für einen geografischen Großraum konzipiert. Der geografische Großraum ist ein Gebiet, das durch eine Vielzahl an Merkmalen (z. B. geografische Lage, Topografie, Klima, Siedlungs- und Wirtschaftsstruktur, kulturelle Identität oder politische Organisation) charakterisiert wird und oft mehrere Städte, Gemeinden oder Regionen umfasst [BT18, S. 38]. Ein solcher Großraum kann beispielsweise eine Metropolregion, ein Ballungsgebiet oder eine Agglomeration sein. Der Untersuchungsraum wird durch Grenzen beschränkt. Zur möglichst realitätsnahen Abbildung der Stückgutlogistik werden die Randgebiete des Großraums (Einflussbereich) einbezogen. Abholungen und Zustellungen einer Tour in der Stückgutlogistik können auch über die Grenze eines Großraums stattfinden und müssen berücksichtigt werden. Im Vordergrund steht die optimal geplante Tour. Somit gilt die reguläre Grenze des Großraums als *Innenkordon*. Die Grenze des Untersuchungsraums, der *Außenkordon*, ist so zu wählen, dass umliegende Ortschaften einbezogen werden. Im Untersuchungsraum gibt es verschiedene Verkehre, welche im Folgenden beschrieben werden [PM21, S. 283]:

- Binnenverkehr: Der Verkehr findet ausschließlich innerhalb des geografischen Großraums statt. Es sind Fahrten zwischen den Tourstopps oder An- oder Rückfahrten zum Depotstandort.

- Außenverkehr: Der Verkehr findet ausschließlich innerhalb des Einflussbereichs statt, falls sich dort Tourstopps befinden.
- Wechselverkehr: Der Verkehr findet zwischen dem geografischen Großraum und Einflussbereich statt, falls sich dort das Depot oder Tourstopps befinden.
- Quellverkehr: Der Verkehr findet von innerhalb nach außerhalb des Untersuchungsraums statt. Dies sind Rückfahrten von Touren zum Depotstandort, falls dieser außerhalb des Untersuchungsraums liegt.
- Zielverkehr: Der Verkehr findet von außerhalb nach innerhalb des Untersuchungsraums statt. Dies sind Anfahrten von Touren vom Depotstandort, falls dieser außerhalb des Untersuchungsraums liegt.
- Durchgangsverkehr: Der Verkehr durchquert den Untersuchungsraum und startet bzw. endet somit außerhalb dieses Raums.

In dieser Arbeit bilden das Stadtgebiet Stuttgart und verschiedene Randgebiete (Einflussbereich) den Untersuchungsraum. Hier gilt die Stadtgrenze als Innenkordon. An der Grenze liegende Ortschaften, wie z. B. Kornwestheim oder Fellbach, werden teilweise in die Betrachtung mit einbezogen, weshalb der Untersuchungsraum nicht durch die Stadtgrenze abgeschlossen wird. Angrenzende Waldgebiete sind für die Betrachtung nicht relevant, weshalb an manchen Bereichen der Innenkordon gleich dem Außenkordon ist. In der Abbildung 4.2 wird dies illustriert. Die Durchgangs- bzw. Transitverkehre durch das Untersuchungsgebiet werden nicht erfasst.

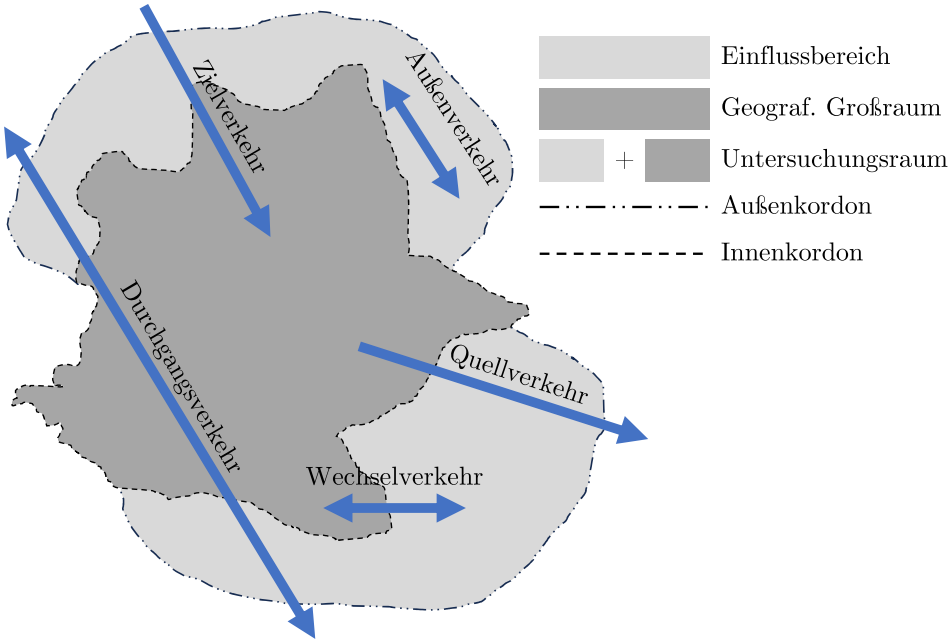


Abbildung 4.2: Räumliche Gliederung des Untersuchungsraumes am Beispiel des Stadtgebiets Stuttgart

4.3 Aufbau der Methodik

Zur Bestimmung der Elektrifizierungsrate des Vor- und Nachlaufs von dem Stückgutverkehr in einem geografischen Gebiet wird im Rahmen des Projekts REALIST mit dem Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik die in Abbildung 4.3 visualisierte Methodik entwickelt. Hierbei wird sichergestellt, dass das bereits beschriebene, angestrebte Ziel erreicht wird und die genannten Anforderungen und Systemgrenzen eingehalten werden. Die Methodik betrachtet die beiden Bereiche Logistik (Logistiksektor) und Stromnetz (Energiesektor), sodass die Verzahnung der beiden Sektoren gegeben ist. Erstes Teilziel der Methodik ist die Abbildung des gesamten oder eines ausgewählten Teils des Vor- und Nachlaufs der Stückgutlogistik in einem geografischen Gebiet. Hierzu werden in der Auftragserzeugung synthetische Stückgutaufträge in dem ausgewählten Gebiet erzeugt [Pfl+24, S. 6] und mithilfe der Tourenbildung die Aufträge auf Fahrzeuge und Touren zugeordnet. Anschließend findet die Analyse zur Bestimmung der Elektrifizierungsrate statt. Auf logistischer Seite wird die Darstellbarkeit der Touren mit E-LKW untersucht. Im Stromnetzbereich wird über die Ermittlung des Energiebedarfs, die Generierung der Lastkurven und die Netzintegration die Verfügbarkeit von Ladezeiten und -orten geprüft [Pfl+24, S. 6]. Auf Basis dieser Analyse wird die Elektrifizierungsrate ermittelt. In der Optimierung kann die Elektrifizierungsrate mithilfe verschiedener Maßnahmen verbessert werden. Diese Optimierungsmaßnahmen, wie z. B. die Nachtbelieferung, müssen durch Logistik und Stromnetz in enger Zusammenarbeit analysiert werden. Folglich wird die Verzahnung der beiden Sektoren durch die Methodik erforderlich [Pfl+24, S. 6].
Die einzelnen Schritte des Vorgehens mit dem Schwerpunkt Logistik werden in der vorliegenden Arbeit näher beleuchtet. Der Hauptfokus liegt auf der Auftragsgenerierung, welche in Kapitel 5 näher beschrieben wird.

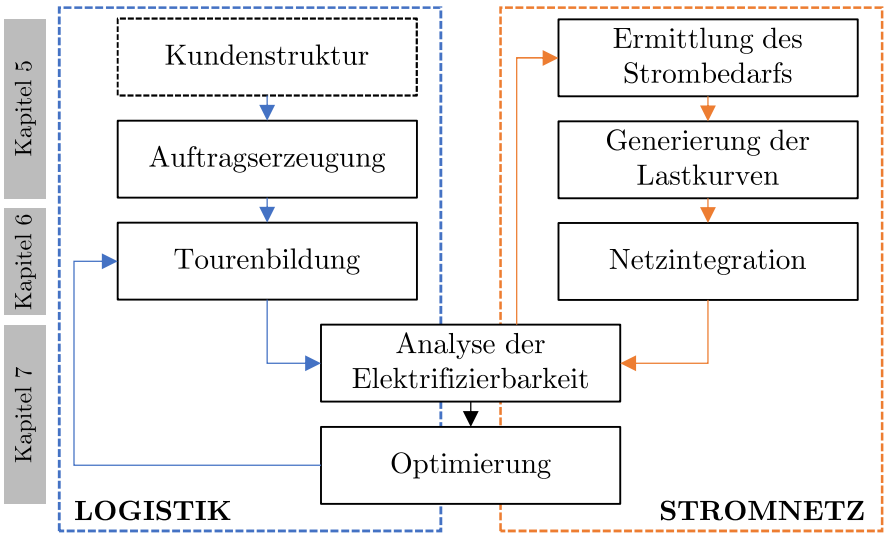


Abbildung 4.3: Methodik zur Bestimmung einer Elektrifizierungsrate von Nutzfahrzeugen in der Stückgutlogistik (in Anlehnung an [Pfl+24, S. 6])

4.3.1 Logistisches Vorgehen

Das logistische Vorgehen der Methodik hat das Ziel, den gesamten oder einen ausgewählten Teil des Vor- und Nachlaufs der Stückgutlogistik in einem geografischen Gebiet darzustellen. Die Abbildung des Status Quo der Stückgutlogistik dient als Grundlage der Analyse. Zusätzlich kann ohne die Betrachtung des Stromnetzes mit der Analyse der Elektrifizierung die logistische Elektrifizierungsrate ermittelt werden. Eine Datenbeschaffung zu Transportaufträgen und Touren von allen Speditionen, die im ausgewählten Gebiet operieren, gilt als unmöglich. Die Unternehmen sind beispielsweise aus Datenschutzgründen nicht bereit, diese Daten zu veröffentlichen. Folglich wird ein Programm entwickelt, mit dem sich synthetische (Transport-)Auftragslisten mit definierten Positionen für eine oder mehrere Speditionen in einem bestimmten Gebiet und einem frei wählbaren Zeitraum erzeugen lassen [Pfl+24, S. 7]. Anschließend werden die Aufträge mithilfe einer Tourenplanungssoftware auf Fahrzeuge bzw. Touren verteilt.
Das logistische Vorgehen basiert auf den vorgestellten Verkehrsnachfragemodellen [Pfl+24, S. 7]. Besonders aus dem WiVSim-Modell und KWM, welche beide auf dem Vier-Stufen-Modell beruhen, werden Bausteine entnommen, um eine eigene Methodik zur Erzeugung synthetischer Auftragsdaten aufzubauen. Gemeinsamkeiten werden in Abbildung 4.4 dargestellt. Im WiVSim-Modell wird eine synthetische Wirtschaftsstruktur erstellt und zwischen zwei synthetischen Unternehmen eine Ortsveränderung generiert. Der Ortsveränderung wird das Gut, die Sendungsgröße und die Zeit zugewiesen. Beim KWM werden in der Verkehrserzeugung die Start- und Stopppotentiale erzeugt und zu Quelle-Ziel-Relationen zusammengeführt. Anschließend werden bei beiden Modellen der Modus bzw. das Fahrzeug gewählt und die Tour zugewiesen.

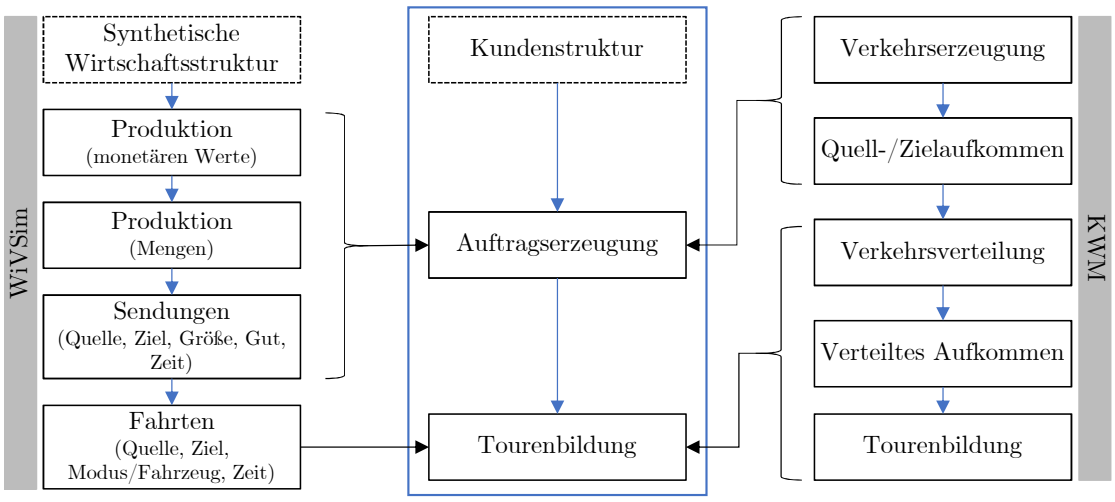


Abbildung 4.4: Ableitung des logistischen Vorgehens der Methodik (in Anlehnung an [MB07, S. 2; JV05, S. 54; Bau+13, S. 384, 393, 394])

Beim logistischen Vorgehen werden ebenfalls mithilfe einer erzeugten Kundenstruktur der Stückgutlogistik synthetische Auftragslisten pro Spedition erzeugt. Ein Auftrag dieser Listen besitzt folgende Struktur bzw. Eigenschaften [Pfl+24, S. 7]:

- Adresse
- Geo-Koordinaten (Angabe in Dezimalgraden)
- Datum
- Auftragsnummer
- Auftragstyp: Zustellung/Abholung
- Gewicht, Volumen, Packstückanzahl
- Servicezeitklasse (in Klassen eingeteilte Aufenthaltszeit des Fahrzeugs an der Auftragsadresse für das Be- oder Entladen der Ware)
- Zeitfenster (früheste und späteste zulässige Ankunftszeit des Fahrzeuges)

Jeder Auftrag hat, je nach Auftragstyp, Zustellung oder Abholung, eine Start- oder Zieladresse. Der Speditionsstandort ist ebenfalls je nach Auftragstyp ein Start- oder Zielpunkt. Somit entstehen Ortsveränderungen zwischen Speditionsstandorten und Auftragsadressen. Abschließend werden die Ortsveränderungen bzw. Aufträge auf Fahrzeuge aufgeteilt und umgelegt.
Die Kundenstruktur wird mithilfe der Aufteilung des Gebiets in Zellen, ähnlich zu der Verkehrszellaufteilung der Verkehrsmodelle, eingeteilt. Jede Zelle erhält über die Eingangsdatenbasis mit Struktur- und Verhaltensdaten eine Nachfrage an Aufträgen und es ergibt sich das Start- und Stopppotential. Die Datenbasis wird aus aktuellen Daten von Kommunen und Studien, wie z. B. *TOP100 der Logistik*, und einer geringen Menge an realen Auftragsdaten von Speditionen abgeleitet. Hierdurch kann die Verwendung von veralteten Daten, wie beispielsweise aus der Studie *KiD*, vermieden werden.

Die Zuteilung der Aufträge auf Fahrzeuge und Touren je Spedition erfolgt durch die Nutzung einer Tourenplanungssoftware. Eine Tour ist eine streckenoptimierte Abfolge der Anfahradressen unter Berücksichtigung von zeitlichen und mengenmäßigen Einschränkungen [VKS12, S. 223]. Die mengenmäßige Restriktion entsteht durch die Größe des Fahrzeugs, welches ein maximales Ladevolumen und -gewicht hat. Ein Fahrzeug kann somit mehrere Stückgutaufträge aufnehmen und ausliefern bzw. abholen. Folglich werden die Aufträge einer Liste jeweils für einen Tag auf ein oder mehrere Fahrzeuge bzw. Touren aufgeteilt. Für die Tour wird im Stückgutverkehr ein fester Start- und Endpunkt festgelegt, welcher der Standort bzw. das Depot der Spedition darstellt. Für jede Spedition ist somit der Standort und der Fuhrpark mit dessen Fahrzeugparameter, der für das ausgewählte Gebiet benötigt wird, relevant. Mit der Verwendung einer Tourenplanungssoftware erfolgt die Bildung der Touren. Die Ergebnisse der Tourenbildung liefern die Tourenpläne der Speditionen mit folgenden Eigenschaften pro Tour für die Analyse der virtuellen Elektrifizierung [Pfl+24, S. 8]:

- Adresse des Start- und Zielortes
- Adressen der Stopps
- Distanzen zwischen den Stopps
- Gesamtgewichtsveränderung zwischen den Stopps

- Servicezeit
- Betriebsparameter des Fahrzeugs

4.3.2 Stromnetzintegration

Zur Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs findet eine Analyse durch den Energiesektor statt. Es wird ermittelt, wo welche Ladeleistungen benötigt werden. Dies ist nur im Austausch mit dem logistischen Sektor möglich. Folglich wird nach der Erreichung des ersten Teilziels, der synthetischen Abbildung der Stückgutlogistik, ein weiteres Teilziel durch den Energiesektor aufgestellt. Das Ziel des Vorgehens zur Integration der neuen Last durch die Elektrifizierung der Stückgutlogistik in das Stromnetz ist die frühzeitige Quantifizierung der Ladeenergiebedarfe von E-LKW sowie deren Lokalisierung im Netzgebiet. Hierzu ist die neu entstehende Last, abhängig von der Lademöglichkeit, entsprechend in die verfügbare Spannungsebene des Netzes zu integrieren. [Pfl+24, S. 8–9]
Die Ladeinfrastruktur kann öffentlich oder privat für E-LKW betrieben werden (beschrieben in Kapitel 3.2.1). Je nach Anwendung muss eine entsprechende Ladeleistung verfügbar sein. Im Fall von öffentlichem Laden sind hohe Ladeleistungen anzustreben. Privates Laden kann je nach Standort auf dem Hof des Unternehmens mit niedrigen bis hohen Ladeleistungen erfolgen. Der Vor- und Nachlauf der Stückgutlogistik erfolgt vorwiegend über Tag, weshalb ein nächtliches Laden mit niedrigen Ladeleistungen möglich ist. Dies kann auch auf öffentlichen Flächen durchgeführt werden. Im Falle von Laden an der Rampe während eines Be- und Entladevorgangs wird ein schnelles Laden und somit hohe Ladeleistungen bevorzugt. Hierdurch kann die Verfügbarkeit der Rampe garantiert werden. Bei langsamen Laden an der Rampe wird der Be- und Entladevorgang von Waren für die erforderliche Batterieladung nicht ausreichen. Je nach Ladebetrieb und Anzahl der zu ladenden E-LKW kann sich sowohl an den öffentlichen sowie an den privaten Standorten die potentielle Spitzenlast beträchtlich steigern. Letztendlich ist die Vermeidung von Spitzenlasten, ohne die Leistungsfähigkeit der E-LKW zu beeinträchtigen, anzustreben. [Pfl+24, S. 9]
Nach der Erzeugung der Touren wird mit den Tourenplänen jede einzelne Tour virtuell elektrifiziert. Diese Ermittlung des Energiebedarfs erfolgt anhand der Bestimmung des elektrischen Verbrauchs durch den Antriebsstrang und zusätzlichen Aggregaten, wie z. B. Licht, Ladebordwand und Klimaanlage. Auf den Verbrauch des Antriebsstrangs haben viele Faktoren Einfluss. Beispielsweise bewirkt die Fahrstrecke (Stadtverkehr, Autobahn, Höhenlage), Beschleunigung, Gewicht und Ladung, Geschwindigkeit, Eigenschaften des Reifen, Wetter und Routenplanung beim Energiebedarf eine Änderung, welche berücksichtigt werden muss [Hel+22]. Zudem hat die fahrende Person mit dem Fahrverhalten einen Einfluss auf den Verbrauch, welcher aufgrund der Komplexität zur Ermittlung des Energiebedarfs nicht berücksichtigt wird. Alle benötigten Energiemengen werden pro Tour zusammengefasst und mit den Standorten und Zeitpunkten der Starts und Enden der Touren übergeben.

Mit der Annahme, dass die E-LKW nur nach Abschluss der Tour auf dem Speditionshof laden und eine maximal verfügbare Ladeleistung verfügbar ist, wird für jede Tour mit dem bestimmten Energieverbrauch eine Ladekurve nach *Walz et al.* [WCR20] prognostiziert. Die dafür benötigte Ladedauer wird über die Energiemenge und verfügbare Ladeleistung an der jeweiligen Lademöglichkeit ermittelt. Folglich resultiert aus allen Ladekurven von einem Standort die gesamte elektrische Last durch das Laden der E-LKW. Abschließend ist eine Integration in das bereits existierende Stromnetz zu analysieren. [Pfl+24, S. 10]

4.3.3 Analyse der Elektrifizierbarkeit

Das Ziel der Analyse ist die Ermittlung der Elektrifizierungsrate. Hierfür wird geprüft, welche Touren ohne Optimierungsmaßnahmen mit einem E-LKW durchgeführt werden können [Pfl+24, S. 10]. Für die Methodik werden folgende Kriterien festgelegt [Pfl+24, S. 10]:

1. Energiebedarf pro Tour vs. Batteriekapazität
   Den E-LKW werden abhängig von der Größenklasse die minimal und maximal verfügbaren Batteriekapazitäten zugewiesen. Wenn der Energiebedarf die jeweilige Batteriekapazität des E-LKW überschreitet, wird diese Tour vorerst als nicht elektrifizierbar betrachtet. Hieraus folgt die logistische Elektrifizierungsrate mit minimaler und maximaler Batteriekapazität.
2. Verfügbarkeit des Ladepunkts
   Den elektrifizierbaren Touren werden nach *Walz et al.* [WCR20] Ladekurven zugewiesen. Die Anzahl der gleichzeitigen Ladevorgänge darf nicht die verfügbaren Ladeanschlüsse überschreiten.
3. Ladedauer vs. Standzeit
   Die maximal möglichen Ladeanschlüsse werden vorab in Abhängigkeit der maximalen Anschlussleistung ermittelt. Die elektrische Ladezeit eines E-LKW kann je nach Modell und Ladesäule variieren. Die Standzeit des E-LKW muss der Ladezeit entsprechen. Ist dies nicht der Fall, gilt die Tour als nicht elektrifizierbar.
4. Auslastung am Netzanschlusspunkt
   Zu jedem Zeitpunkt muss die Einhaltung der maximalen Lastgrenze am Netzanschlusspunkt sichergestellt sein. Beispielsweise kann mithilfe des Einsatzes von Lademanagement die maximale Last optimiert werden. Ergänzend zum Laden der E-LKW beinhaltet die Gesamtlast des Unternehmensstandortes den elektrischen Energieverbrauch und die potentielle Einspeisung von Solarstrom aus einer Photovoltaikanlage mit Speichermedien. Diese Gesamtlast ist bei der Integration ins Stromnetz zu berücksichtigen.

Mithilfe dieser Kriterien werden zunächst alle Touren der Spedition mit Start und Ziel an einem Standort im ersten Durchlauf analysiert und somit die Elektrifizierungsrate abgeleitet. Alle Touren werden im anschließenden Optimierungsschritt weiter behandelt. Allerdings liegt der Fokus auf den als nicht elektrifizierbar eingestuften Touren. [Pfl+24, S. 10]

4.3.4 Optimierung der Elektrifizierbarkeit

Alle für das Gebiet geplante Touren werden in dieser Stufe optimiert. Im ersten Schritt werden die Touren, die nach den Kriterien aus dem Analyse-Schritt nicht für Elektrofahrzeuge geeignet sind, zur Elektrifizierbarkeit verbessert. Anschließend werden alle elektrifizierbaren Touren nochmals optimiert, sodass beispielsweise Anschlussleistungen nicht überdimensioniert werden. Folgende mögliche logistische Optimierungsmaßnahmen werden nach *Pfleger et al.* vorgeschlagen [Pfl+24, S. 11]:

- Optimierung der Auslastung der Fahrzeuge
- Anpassung der gesamten Distanz pro Tour
- Anpassung der Distanzen zwischen den Aufträgen
- Aufteilung der Tour auf mehrere Fahrzeuge
- Änderung des Zustellkonzepts: z. B. die Nutzung von Microdepots und Microfahrzeugen
- Prüfung auf Nachtzustellung aufgrund der reduzierten Lärmemissionen

Die logistische Anpassung jeder Tour kann mithilfe dieser Maßnahmen erfolgen. Somit wiederholt sich der Schritt Tourenbildung bzw. der Schritt wird aktualisiert. Daraufhin wird jede Tour erneut auf ihre Elektrifizierbarkeit analysiert. Gemäß der Methodik durchläuft jede Tour die Netzintegration. Beispielsweise kann aufgrund der unzureichenden Kapazität der Ladeinfrastruktur der Ladevorgang des E-LKW nicht bzw. nicht vollständig und somit die anschließende Tour nicht realisiert werden [Pfl+24, S. 11]. Daher ergeben sich nach *Pfleger et al.* zur effektiven Stromnetzintegration folgende Optimierungsschritte [Pfl+24, S. 11]:

- Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen der E-LKW vermeiden
- Temporäre Reduktion der maximalen Ladeleistung
- Verschiebung von Ladevorgängen in Schwachlastzeiten
- Nutzung von Netz-Flexibilitäten

Das Ziel der Maßnahmen ist die Integration aller Ladevorgänge in das bestehende Stromnetz. Eine mögliche Folge können Engpässe im gesamten Netzgebiet sein, wenn in Zukunft an mehreren Standorten von Speditionen in einem Gewerbegebiet E-LKW laden. Schließlich ist ein Ausbau des Stromnetzes zwingend erforderlich, was zeit- und kostenaufwendig ist. Daher ist die Anwendung der Optimierungsschritte wesentlich, um die Kapazität des bestehenden Netzes vollständig zu beanspruchen. Eine mögliche Herangehensweise besteht darin, die Flexibilität der zu ladenden E-LKW an einem Speditionsstandort zu identifizieren, zu einer Einheit zu bündeln und in ein Netzüberwachungssystem nach *Müller et al.* [Mül+22] zu integrieren. [Pfl+24, S. 11–12]
Die Touren lassen sich sowohl aus einer logistischen als auch aus einer netztechnischen Perspektive anpassen. Ein permanentes Gegenprüfen der Maßnahmen ist daher Voraussetzung. Trotzdem hat die Wahrung der Produktivität hierbei oberste Priorität. Ist eine

Tour durch die genannten Optimierungsschritte nicht durchführbar, gilt diese gemäß der Logik der Methodik als nicht elektrifizierbar und eine vollständige Elektrifizierungsrate ist nicht erreichbar. [Pfl+24, S. 12]

5 Entwicklung der Auftragserzeugung

Zur realitätsgetreuen Abbildung der Stückgutlogistik eines Großraums fehlen aufgrund der hohen Datenschutzanforderungen die originalen Auftragsdaten der Speditionen, welche im Untersuchungsraum Waren zustellen und abholen. Daher ist es zwingend notwendig, für die Methodik ein Programm zur Erstellung von synthetischen Auftragslisten auf Basis öffentlicher Daten und einer geringen Menge an realen Auftragsdaten zu entwickeln. Die Problemlösung bzw. die Entwicklung wird durch das methodische Vorgehen des Wasserfallmodells gestützt, welches zu Beginn dieses Kapitels erläutert wird. Mithilfe der Phasen des Wasserfallmodells wird der Entwicklungsprozess des Programms der Auftragserzeugung beschrieben. Abschließend werden in der Test- und Betriebsphase die Verifikation und Validierung durchgeführt. Die Beantwortung der Forschungsfrage 2.2 erfolgt durch die Programmentwicklung in der Zusammenfassung des Kapitels. Das Ziel des Abschnitts ist somit die Vorstellung der Auftragserzeugung.

5.1 Methodisches Vorgehen

Zur klassischen Problemlösung liegen vier aufeinander folgende Prozesse zugrunde: Problemanalyse – Lösungsentwurf – Realisierung – Validierung. Diese Prozesse werden kaskadenförmig und nacheinander dargestellt und stellen bildlich einen Wasserfall dar. [Jak21, S. 112]
In der Softwareentwicklung wird häufig eine ähnliche Vorgehensweise gewählt. Dies ist ein sequenzielles bzw. strukturiertes Vorgehensmodell, welches mit dem Begriff *Wasserfallmodell* bezeichnet wird. Es wurde in den späten 1970er Jahren entwickelt [Roy70, S. 329] und war eines der ersten Modelle, das systematische Schritte für die Entwicklung von Software definierte. In der ursprünglichen Form gibt das Modell einen strikt einzuhaltenden, linearen Ablauf von fünf Entwicklungsphasen vor und somit ist das Ergebnis einer Phase die Ausgangsbasis für die darauffolgende Phase [GG22, S. 588]. Eine Rückkopplung ist nicht vorgesehen. Diese starre Struktur kann jedoch in agilen Umgebungen als Nachteil betrachtet werden, da sich Anforderungen und Bedürfnisse im Laufe des Projekts ändern können. Diese Anforderungen und Bedürfnisse, wie Fehler, Änderungswünsche sowie Erkenntnisse zu einer besseren technischen Lösung, erfordern Rückführschleifen oder die Parallelisierung der Phasen [Gol11, S. 86]. Eine vollständige Parallelisierung ist nahezu unmöglich [Jak21, S. 113]. Folglich wird in einer Weiterentwicklung das Wasserfallmodell mit Rückführschleifen ergänzt. Dieses Modell wird in Abbildung 5.1 dargestellt. Es besteht aus den fünf aufeinanderfolgenden Phasen [GG22, 588f]:

- **Analyse:** Das Ziel der Analyse besteht darin, die Anforderungen der Anwender bzw. Kunden an das zu entwickelnde Anwendungssystem zu identifizieren. Dies beinhaltet die Untersuchung und Erfassung der Leistungen sowie der Funktionalität,

die das System erbringen soll. Im Wesentlichen konzentriert sich die Analyse auf die Bestimmung des „Was“.
Das Ergebnis ist eine Anforderungsliste.

- **Entwurf:** Der Entwurf befasst sich hingegen mit der grundlegenden Systemstruktur und bestimmt, wie die Systemleistungen durch die Anordnung von Komponenten, Modulen und Submodulen erbracht werden sollen. Dabei wird das „Wie“ festgelegt.
  Das Ergebnis ist die Struktur des Anwendungssystems.
- **Implementierung:** Die Implementierung beinhaltet die Realisierung des Systems in einer Programmiersprache. Somit werden in dieser Phase die geplanten Funktionen und Module basierend auf dem Entwurf in einen ausführbaren Code geschrieben.
  Das Ergebnis ist das ungetestete Anwendungssystem.
- **Testphase:** Der Zweck der Testphase besteht darin, eine umfangreiche Fehlererkennung in jedem komplexen Softwareprodukt zu ermöglichen. Dabei werden nicht nur Programmierfehler, sondern auch Fehler in der Analyse und im Entwurf erfasst. Letztere führen gegebenenfalls zu einem Systemverhalten, das nicht den Anforderungen der Anwender bzw. Kunden gleicht. Während Programmierfehler in der Regel unmittelbar korrigiert werden können, erfordern Analyse- und Designfehler eine iterative Durchführung des Phasenmodells.
  Das Ergebnis ist das geprüfte Anwendungssystem und die Freigabe für den Einsatz.
- **Betrieb:** Nach einer erfolgreichen Durchführung der Tests wird das Anwendungssystem in Betrieb genommen und in den produktiven Einsatz überführt. Sie wird den Anwendern bzw. Kunden zur Verfügung gestellt. Teilweise kommt es in dieser Phase zu unterschiedlichsten Ereignissen, die einen nachträglichen Eingriff erfordern. Dies sind beispielsweise im Betrieb identifizierte Fehler oder überarbeitete Anforderungen.
  Das Ergebnis ist das in Betrieb genommene Anwendungssystem.

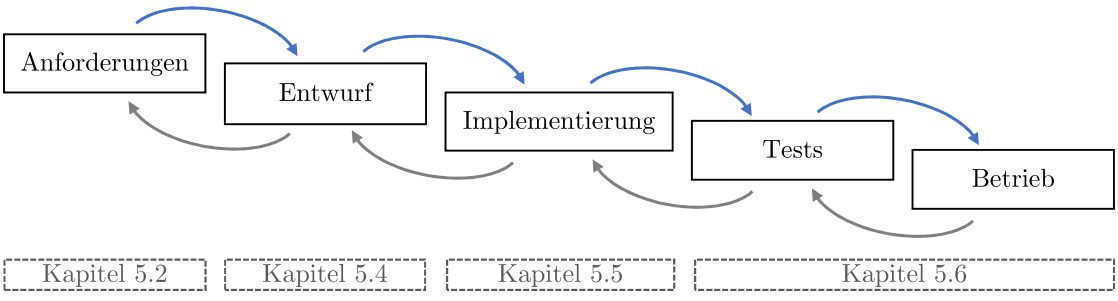


Abbildung 5.1: Wasserfallmodell mit Rückführschleifen (in Anlehnung an [Roy70, S. 329; GG22, S. 588; Gol11, S. 87])

Zur Auftragserzeugung wird ein Anwendungssystem benötigt, das synthetische Auftragsdaten für einen geografischen Großraum erzeugt. Daher wird als methodische Grundlage zur Entwicklung der Auftragserzeugung das Wasserfallmodell mit Rückführschleifen gewählt. Allgemein wird das Wasserfallmodell für Projekte mit einer guten Vorhersagbarkeit der Anforderungen und stabilen Einsatzbedingungen empfohlen [GG22, S. 589]. Dies

trifft bei diesem Vorhaben zu. Zur Vermeidung von Entwicklungsfehlern wird das Modell mit den Rückführschleifen ergänzt.

5.2 Anforderungen an die Auftragserzeugung

Das Ziel des Anwendungssystems zur Auftragserzeugung ist die Erzeugung einer synthetischen Auftragsliste mit definierten Eigenschaften je Spedition in einem frei wählbaren Zeitraum innerhalb eines Jahrs und einem definierten geografischen Großraum. Bei mehreren, gewählten Speditionen wird pro Spedition eine Liste erstellt. Diese Daten bzw. Auftragslisten werden zur Erstellung von Touren pro Spedition und Tag weiterverwendet. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, eine Heatmap für die Verteilung und Intensität der Aufträge in einer zweidimensionalen Fläche (Geografische Karte des Stadtgebiets) auszuarbeiten. Als Zielgruppe werden die Anwender der Methodik zur Analyse der Elektrifizierung identifiziert, welche vorwiegend die ermittelten Akteure aus Unterkapitel 3.3 sind.
Folglich ist die Grundfunktionalität des Programms die Auftragsgenerierung: die Erzeugung von synthetischen Aufträgen in Form einer Auftragsliste je Spedition. Zum Export dieser Listen soll eine Comma seperated values (CSV)[22]-Schnittstelle dienen. Ein Auftrag muss folgende Attribute enthalten:

- Adresse in Geo-Koordinaten[23] (Angabe in Dezimalgraden)
- Depot-ID
- Datum
- Auftragsnummer
- Auftragstyp: Zustellung/Abholung
- Gewicht, Volumen, Packstückanzahl
- Servicezeitklasse
- Zeitfenster

Voraussetzung zu dieser Aufgabe sind weitere Funktionalitäten, welche in Abbildung 5.2 mit der Grundfunktionalität dargestellt sind. Hierzu zählt die Erzeugung der Kundenstruktur und somit die Integration der Eingangsdaten. Diese Eingangsdatenbasis, welche vorgegeben ist und aus realen Daten stammt, ist zur Auftragsgenerierung zwingend notwendig. Zum Import dient die CSV-Schnittstelle. Als Eingangsdaten werden folgende Daten identifiziert, welche in Kapitel 5.3 näher beschrieben werden:

- Geografische Daten: Adressen, Industrie- und Gewerbegebiete, POI etc.
- Reale Auftragsdaten: Volumen / Gewicht / Packstücke

[22] Das CSV (Comma-Separated Values)-Format ist ein textbasiertes Dateiformat, bei dem die Daten in Zeilen und Spalten organisiert sind und die Werte durch Trennzeichen, normalerweise Kommas, voneinander getrennt sind. Es dient vorwiegend zum Datenaustausch. [FH10, S. 196]

[23] Geo-Koordinaten sind numerische Werte, die die geografische Position eines Punktes auf der Erdoberfläche angeben, bestehend aus Breitengrad und Längengrad.

- Speditionen & Auftragsvolumen
- Verteilung B2B & B2C
- Verteilung Aufträge innerhalb und außerhalb Stuttgarts
- Verteilung Zustellung & Abholung
- Verteilung Nachfragebranchen
- Erwerbstätigenzahlen
- Einwohnerzahlen
- Saisonalitätsdaten

Zum Start der Auftragsgenerierung und Eingabe der Parameter muss der anwendenden Person des Programms eine Eingabekonsole zur Konfiguration der zeitlichen Dimension und Speditionsauswahl zur Verfügung stehen. Die Person hat damit die Möglichkeit, einen Untersuchungszeitraum festzulegen. Hierzu können ein oder mehrere Tage des Jahres 2022 ausgewählt werden. Ebenso muss die Eingabekonsole der anwendenden Person die Auswahl von einer oder mehrerer Speditionen ermöglichen. Diese eingestellten Parameter mit der Erzeugung der Kundenstruktur dienen als Basis der Grundfunktionalität. Nach der Erstellung der synthetischen Daten ist der Export der Daten notwendig. Er dient zur Weiterverwendung der Aufträge. Durch den Export werden die Aufträge in der vorgegebenen Struktur in Tabellenform (CSV-Dateiformat) bereitgestellt.

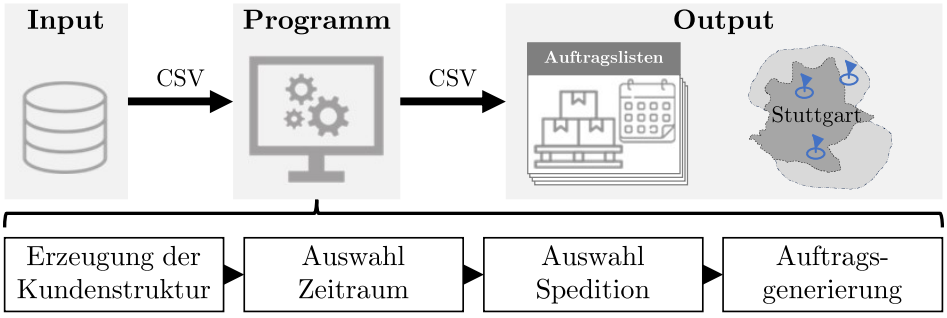


Abbildung 5.2: Funktionalitäten des Tools

Als eine weitere wichtige funktionale Anforderung lässt sich die Übertragbarkeit identifizieren, wie sie für die komplette Methodik gefordert wird. Hierzu soll ein einfacher Austausch der Eingangsdaten gegeben sein. Dies gewährleistet die Anwendbarkeit auf andere Zeiträume (Änderung des Betrachtungsjahrs/der zeitlichen Systemgrenze), Gebiete (Änderung des Betrachtungsraums/der räumlichen Systemgrenze) und Branchen (Änderung der Betrachtungsbranche/der inhaltlichen Systemgrenze; z. B. Kurier-, Express- und Paketdienst (KEP)).
Neben den funktionalen werden die nicht-funktionalen Anforderungen aufgestellt, welche dreigeteilt sind. Sie unterteilen sich in allgemeine, software-ergonomische und technische Anforderungen. Als allgemeine Prämissen werden beispielsweise die Leistung (Wartezeiten vermeiden) und die Stabilität (Ausfälle verhindern) des Programms festgelegt. Die Nutzung durch eine Einzelperson ist ausreichend. Für eine ergonomisches Programm wird

die deutsche Sprache, die Kennzeichnung von Schlüssel und Pflichtfeldern, die Nutzbarkeit mit PC-Grundkenntnissen und die Eindeutigkeit der Oberfläche gefordert. Des Weiteren wird im technischen Bereich die Schnittstelle bzw. der Datenaustausch durch das CSV nochmals definiert. Als weitere technische Anforderungen werden die Programmiersprache (offen), Datenbanken, Unabhängigkeit der Plattform (Betriebssystem offen) und die Dokumentation festgelegt. Alle bisher beschriebenen und weitere Anforderungen werden im folgenden Anhang A aufgelistet und definiert.
Zur Ermittlung der Informationen und Anforderungen werden verschiedene Methoden, wie Brainstorming, Recherche oder Interviews, genutzt. Zudem stammen die Attribute der Auftragsdaten aus realen Auftragsdatenstrukturen, welche im nächsten Schritt ebenfalls für die Tourenplanung verwendet werden. Diese werden von zwei Speditionen zur Verfügung gestellt.

5.3 Eingangsdaten für die Auftragserzeugung

Zur Erzeugung der synthetischen Aufträge ist die im folgenden beschriebene Datenbasis erforderlich. Hierzu dient die Aufteilung der Daten für Verkehrsmodelle, besonders der vorgestellten Güterverkehrsmodelle BVWP-Modell und KWM. Die Fachliteratur teilt die Eingangsdaten in *Raumstrukturgrößen* bzw. *Strukturdaten* und *Verhaltensdaten* ein [Lee21, S. 371; Bau+13, S. 394]. Strukturdaten charakterisieren die Raumstruktur sowie Art und Maß der Nutzungen und müssen für jede Zelle (Raumeinheit) aufgeführt sein [PM21, S. 285–286]. Die Verhaltensdaten beschreiben die Nachfrage an Aufträgen aller Speditionen und deren Art sowie den Einfluss der Saisonalität. Für die Auftragserzeugung wird eine weitere Unterteilung vorgenommen:

- Geografische Daten: beschreiben die geografischen Eigenschaften einer Zelle oder den Standort der Spedition
- Zelleneigenschaften: beschreiben die Nachfrage nach Stückgutzustellungen/-abholungen einer Zelle
- Auftragseigenschaften: beschreiben das Auftragsvolumen und die jeweiligen Auftragseigenschaften jeder Speditionen
- Saisonalität: beschreibt den saisonalen Einfluss auf das Auftragsvolumen

Diese Aufteilung wird in Abbildung 5.3 dargestellt und weiter aufgegliedert. Die jeweilige Unterteilung wird im folgenden Abschnitt allgemein und bezogen auf den Untersuchungsraum Stuttgart beschrieben. Je nach Verfügbarkeit können die Eingangsdaten für die Auftragserzeugung für andere Großräume ersetzt oder ergänzt werden. Abschließend ist die Herkunft der Daten in Tabelle 5.5 aufgelistet.

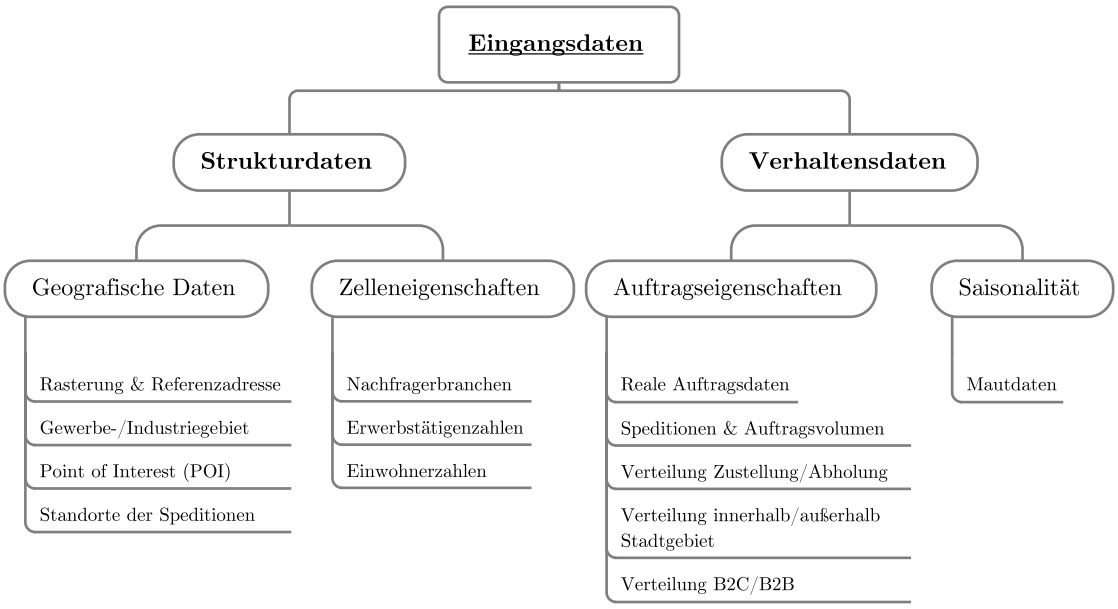


Abbildung 5.3: Übersicht zu den Eingangsdaten

5.3.1 Geografische Daten

Geografische Daten des Untersuchungsraums liefern eine umfassende Beschreibung der physischen Merkmale und Eigenschaften des Gebiets. Sie umfassen unter anderem folgende Informationen:

- Geografische Koordinaten (Breiten- und Längengrad)
- Topografie (Relief und Höhenlagen)
- Grenzen
- Landnutzung (z. B. Wohngebiete, Gewerbegebiete, Industriegebiete, Grünflächen oder landwirtschaftliche Flächen)
- Gewässer
- Infrastruktur (z. B. Straßen, Brücken, Schienenwege, Flughäfen, Häfen, Wasserversorgung, Abwassersysteme, Stromnetz und Kommunikationsnetzwerke)
- Natürliche Merkmale (z. B. Wälder, Parks, Naturschutzgebiete, Strände oder andere charakteristische Landschaftsmerkmale)
- Point of Interest (POI) (z. B. Sehenswürdigkeiten, kulturelle Einrichtungen, historische Stätten, Einkaufszentren, Restaurants, Schulen und Krankenhäuser innerhalb des Untersuchungsraums)

Diese geografischen Daten werden typischerweise in geografischen Informationssystemen (GIS) erfasst, organisiert und visualisiert. Sie dienen als Grundlage für die städtische Planung, Standortanalyse, Verkehrsplanung, Umweltmanagement, Krisenmanagement und andere Anwendungen zur effizienten Verwaltung und Entwicklung des Untersuchungsraums. Für die Auftragserzeugung sind mehrere dieser Informationen relevant und werden im Folgenden beschrieben. [Bri22, S. 13–15]

Raster mit Referenzadresse

Aufgrund der Nutzung einer Kundenstruktur und der Funktionsweise des Programms ist eine Rasterung des Untersuchungsraums erforderlich, wodurch die benötigte Zellaufteilung, wie bei den Verkehrsmodellen, entsteht. Es wird im Großraum ein Nullpunkt (x/y) gewählt sowie Anzahl und Abmessungen (in Koordinateneinheit) der Zellen angegeben. Anschließend wird jeder Zelle eine Referenzadresse zugeordnet, welche stellvertretend für alle Adressen in der Zelle steht. Hierzu wird der Mittelpunkt der Zelle ausgewählt und mithilfe eines Geocoders[24] eine Adresse mit Breiten- und Längengrad erzeugt. Für das Stadtgebiet Stuttgart ist die Rasterung in Abbildung 5.4 dargestellt. Insgesamt sind es 4270 Zellen, die Zellengröße beträgt 334 x 294 m. Dies entspricht 0,004 x 0,003 Dezimalgrad (Koordinateneinheit). Durch diese Größe ist jede Adresse in einer Zelle maximal 223 m zur Referenzadresse entfernt. Diese Abweichung kann im späteren Verlauf der Methodik vernachlässigt werden, da sie den Energieverbrauch eines E-LKW kaum beeinflusst. Im Programm bekommt jede Zelle verschiedene Eigenschaften bzw. Aktivitäten zugewiesen. Die Adresse wird einem Auftrag zugeordnet, da sie Bestandteil eines Auftrags ist. Die Nutzung aller amtlichen Gebäudeadressen Stuttgarts steigert die Komplexität und somit die Eigenschaftszuordnung bzw. die Zuordnung des Start- und Stopppotentials enorm, weshalb aufgrund eines beachtlichen Leistungsbedarfs davon abgesehen wird. Bei einer kleineren Rasterung tritt dies ebenfalls ein.

Grenzen

Neben der Stadtgrenze und somit der Außengrenze gibt es noch weitere Grenzen innerhalb des Gebiets. Diese entstehen durch die Einteilung von Stadtgebieten bzw. Städten in Strukturebenen[25]. Die Ebenen bauen aufeinander auf und stehen in Wechselbeziehungen. Sie reichen vom Stadtgebiet über Stadtteile bis hin zur Parzelle. Die dadurch neu entstehenden Grenzen bilden sich nicht nur durch die Struktur oder durch räumliche Brüche, sondern auch durch eine funktionale Gliederung. [Rei17, S. 42]
Das Stadtgebiet Stuttgart ist wie folgt aufgeteilt:

- 23 Stadtbezirke
- 152 Stadtteile
- 318 Stadtviertel
- 5378 Baublöcke[26]

Die Grenzen dienen zur Abgrenzung des Untersuchungsgebiets. Zudem besitzen die Strukturebenen verschiedene Eigenschaften, wie z. B. Einwohnerzahlen, welche den Zellen zugeordnet werden können.

[24] Ein Geocoder wandelt Adressen in Geo-Koordinaten (Längengrad, Breitengrad) um.
[25] Strukturebenen bezeichnen im Städtebau Ebenen mit grundlegenden Strukturen, welche einfache Raster als auch komplexere geometrische oder organische Muster sein können [Rei17, S. 215].
[26] Ein Baublock ist eine geografische Einheit innerhalb eines Stadtgebiets, die von Straßen begrenzt wird und in der Regel aus mehreren Grundstücken oder Parzellen besteht.

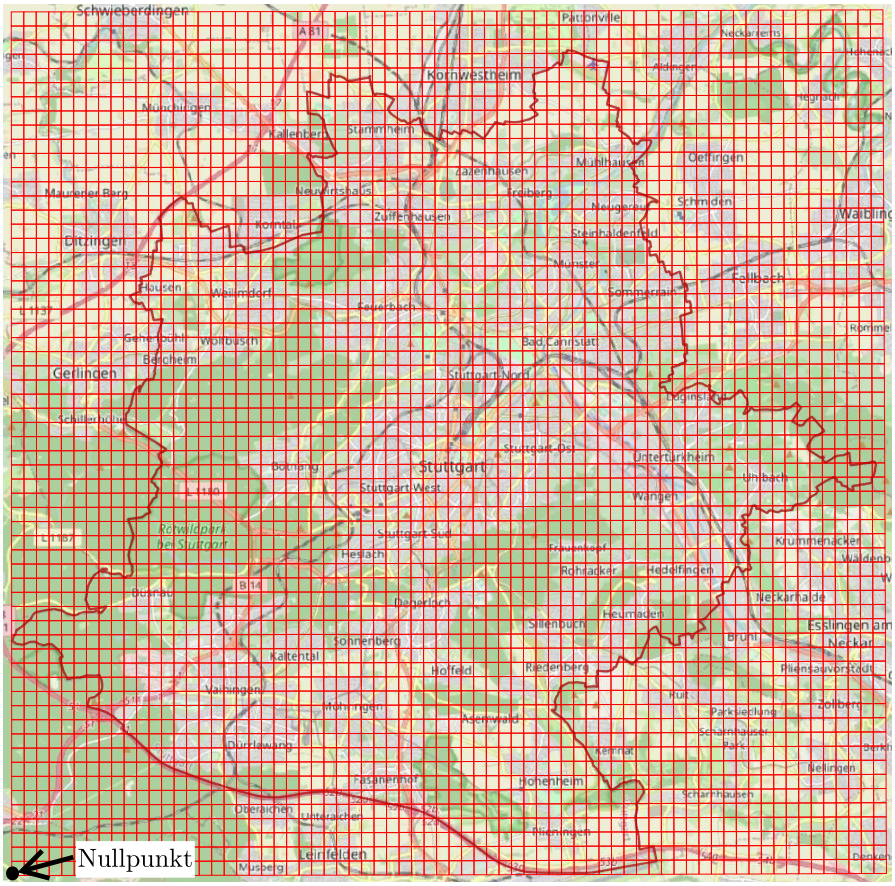


Abbildung 5.4: Rasterung des Stadtgebiets Stuttgart
(eigene Darstellung; Geodaten: © OSM (CC-BY-SA 2.0), © Landeshauptstadt Stuttgart, Stadtmessungsamt & Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme (GIS-AG))

Gewerbe- und Industriegebiete

Die Unterbringung von Gewerbetreibenden erfolgt vorwiegend in Gewerbe- und Industriegebieten. Diese sind für Gewerbebetriebe aller Art, Lagerhäuser, Lagerplätze und öffentliche Betriebe sowie Tankstellen vorgesehen. In Gewerbegebieten sind zusätzlich noch Geschäfts-, Büro- und Verwaltungsgebäude sowie Anlagen für sportliche Zwecke gestattet. In Ausnahmefällen kann eine weitere bauliche Nutzung, wie z. B. Vergnügungsstätten oder Anlagen für kirchliche, kulturelle, soziale und gesundheitliche Zwecke, genehmigt werden. Industriegebiete sind ausschließlich für Gewerbebetriebe vorgesehen, insbesondere für solche, die in anderen Baugebieten nicht zugelassen sind. [Bun17, §8-§9]
Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Gewerbe- und Industriegebiete zusammengefasst, da es sich allgemein um Bereiche für Gewerbebetriebe handelt und somit in der Logistik der B2B-Geschäftsbeziehung zugeordnet werden. Beide Gebiete werden somit der Einfachheit halber als *Gewerbegebiet* bezeichnet. Für das Programm wird mit diesen Informationen einer Zelle die Eigenschaft Gewerbegebiet zugeordnet.
Im Stadtgebiet Stuttgart nehmen diese Gebiete ca. 11 % der Fläche ein. Sie werden in Abbildung 5.5 dargestellt. Die Geodaten der Gebiete bzw. Flächen stellt das

OpenStreetMaps (OSM)-Projekt der Firma Geofabrik GmbH zur Verfügung. Hierzu wird aus der Kategorie *landuse* die Auswahl *industrial, commercial* und *retail* verwendet. Das Stadtmessungsamt und dessen Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme der Landeshauptstadt Stuttgart stellt die Daten ebenfalls zur Verfügung.

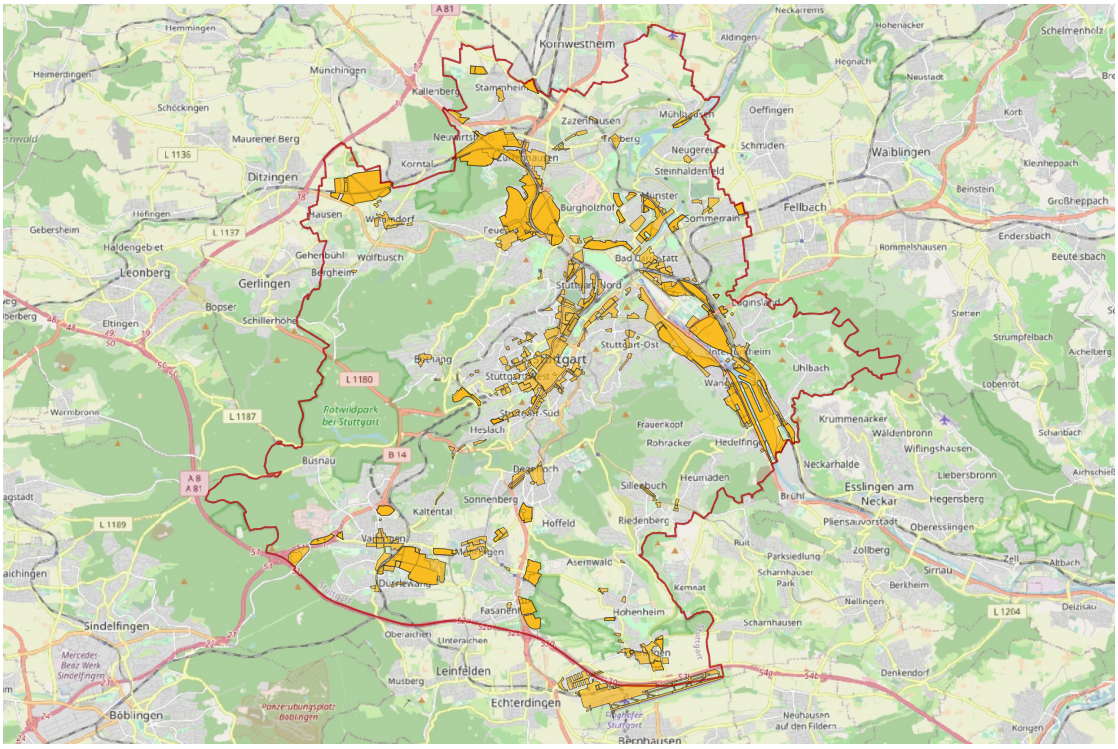


Abbildung 5.5: Gewerbegebiete im Stadtgebiet Stuttgart
(eigene Darstellung; Geodaten: © OSM (CC-BY-SA 2.0), © Landeshauptstadt Stuttgart, Stadtmessungsamt & Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme (GIS-AG))

Point of Interest (POI)

POI sind spezifische Orte oder Standorte, die von Interesse für die Öffentlichkeit sind. POI können sowohl natürliche als auch künstliche Merkmale umfassen und reichen von touristischen Attraktionen und historischen Stätten bis hin zu praktischen Einrichtungen und Dienstleistungen. Für die Auftragserzeugung werden die POI ausgewählt, welche den Nachfragerbranchen des Stückgutverkehrs (beschrieben in Kapitel 5.3.2) zuordenbar sind. Dies weist aufgrund der Gewerbeaktivität darauf hin, dass dem POI Stückgut geliefert wird oder er eine Versendung in Auftrag gibt. Hierbei werden vorwiegend die gewerblichen POI identifiziert, welche im Zusammenhang mit kommerziellen Aktivitäten stehen. Sie umfassen Unternehmen, Einzelhandelsgeschäfte, Gastronomie, Beherbergungsbetriebe, Dienstleistungs- und Unterhaltungseinrichtungen sowie andere gewerbliche Einrichtungen. Diese POI dienen dazu, Produkte oder Dienstleistungen anzubieten, um Kunden anzuziehen. Zusätzlich wird eine Auswahl von öffentlichen POI identifiziert. Dazu zählen unter anderem Museen, Bibliotheken, Theater, Konzerthallen, Sporteinrichtungen und

Bildungseinrichtungen. Die ausgewählten POI sind in einer Liste im Anhang B angegeben. Diese Liste basiert auf dem OSM-Projekt der Geofabrik. Neben der Eingruppierung des POI stellt das Projekt die Standortposition zur Verfügung.

Standorte von Speditionen

Zur Identifizierung der Speditionen, welche im Stückgutverkehr tätig sind, wird eine Internetrecherche durchgeführt. Dieser erzeugte Datensatz wird mit einem Auszug des Firmenregisters der Industrie- und Handelskammer (IHK) der Region Stuttgart abgeglichen und zusätzlich telefonisch verifiziert. Speditionen, welche weniger als eine Tour pro Woche oder lediglich zwei Aufträge pro Tour im Stadtgebiet Stuttgart durchführen, werden ausgeschlossen. Für die identifizierten Unternehmen wird das Programm für den ausgewählten Zeitraum Aufträge erstellen.
Die in das Stadtgebiet Stuttgart liefernden Speditionen werden in Abbildung 5.6 auf einer Karte dargestellt. Die durchschnittliche Entfernung der Speditionen liegt bei 25 km. Die weiteste Anfahrt nach Stuttgart (aus dem Ort Oberkochen) beträgt 87 km.

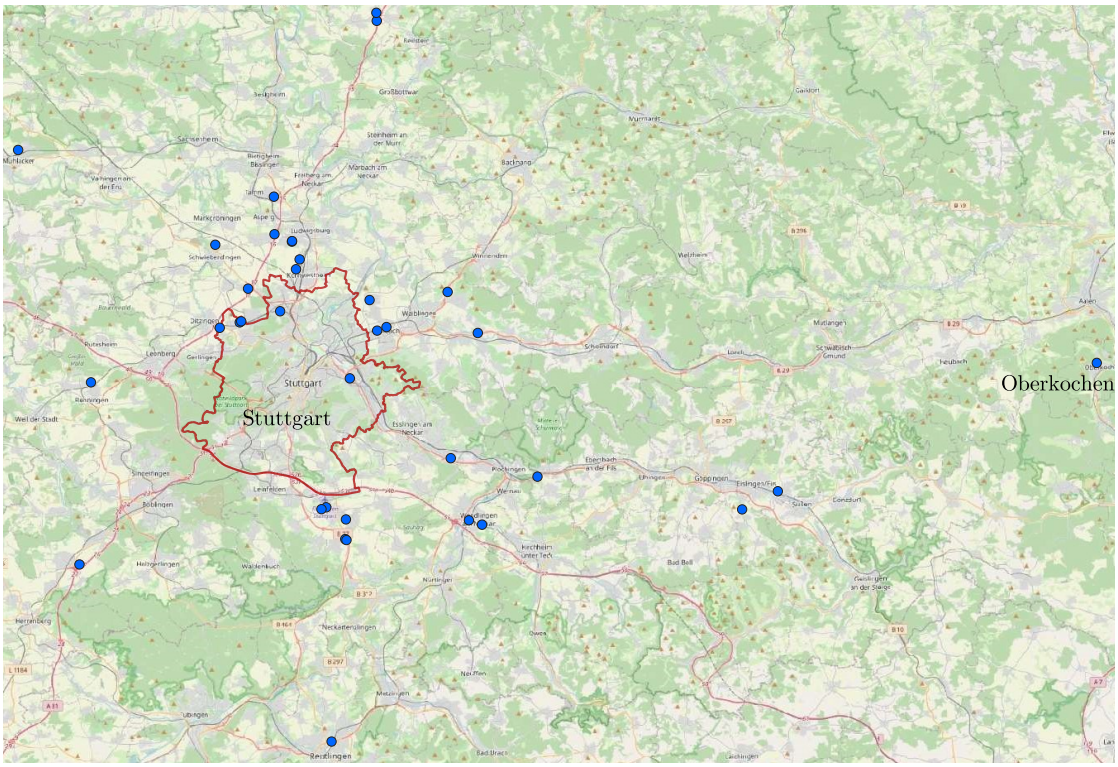


Abbildung 5.6: Standorte der Stückgutspeditionen, welche im Stadtgebiet Stuttgart operieren (blaue Punkte)
(eigene Darstellung; Geodaten: © OSM (CC-BY-SA 2.0), © Landeshauptstadt Stuttgart, Stadtmessungsamt & Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme (GIS-AG))

5.3.2 Zelleneigenschaften

Die Zelleneigenschaften beschreiben die Nachfrage nach Stückgutzustellungen/-abholungen einer Zelle. Die Nachfrage wird aus unterschiedlichen Datensätzen und Quellen interpretiert.

Nachfragerbranchen

Die Studie *TOP100 der Logistik* stellt die Verteilungen der Nachfrage für jedes der zehn Logistiksegmente (siehe Kapitel 2.1.1) in Deutschland auf die relevantesten Nachfragerbranchen zur Verfügung. Als Nachfragerbranchen identifizieren die TOP100-Studien 16 Branchen mit 72 Unterbranchen im Logistikmarkt (mit spezifischen logistischen Aktivitäten), welche aus 800 Wirtschaftszweigen (volkswirtschaftliche Sichtweise mit amtlichen Statistiken) verdichtet werden [Pfl+20a, S. 60]. Für die Auftragserzeugung wird die Verteilung der Segmente *Allgemeine Stückgut-Netzwerkverkehre* und *Netzwerkverkehre für spezielle Stückgüter* herangezogen. Zusammengefasst sind diese in Abbildung 5.7 dargestellt. Die anderen Segmente können für eine Übertragung der Auftragserzeugung von Nutzen sein. Mithilfe dieser Verteilungen und den Unterbranchen wird die Gewerbeaktivität von POI und den Gewerbegebieten gewichtet. Es wird den Branchen die POI und die Gewerbegebiete zugeordnet. Die Nachfrager Kleinbetriebe werden entfernt, da diese laut den Autoren[27] der *TOP100 der Logistik* Unternehmen enthalten, die nicht umsatzsteuerpflichtig sind, sowie auch in größerem Maße Privathaushalte. Privathaushalte werden durch die B2B/B2C-Verteilung (siehe Unterkapitel 5.3.3) aufgenommen. Eine ausführliche Auflistung der Branchen und Unterbranchen mit der Gewichtung und Zuordnung der POI und Gewerbegebiete wird tabellarisch in Anhang B dargestellt.

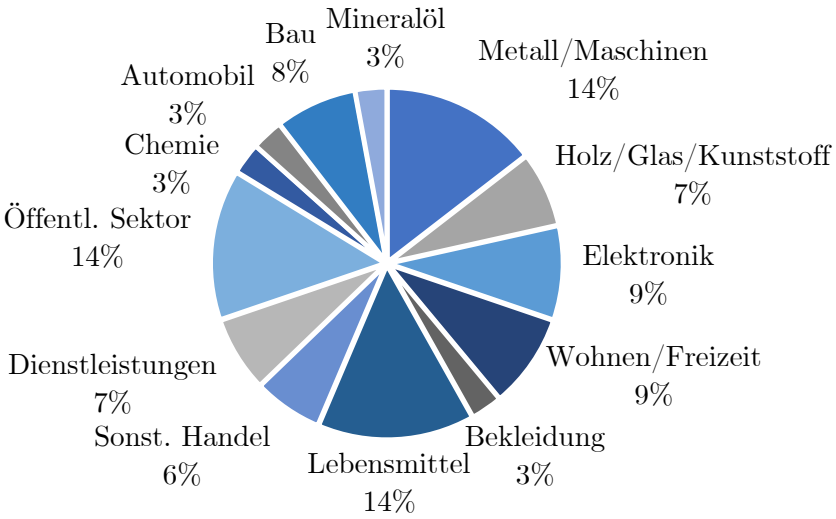


Abbildung 5.7: B2B-Anteil von Stückgutaufträgen (in Anlehnung an [Pfl+20a, S. 91, 97])

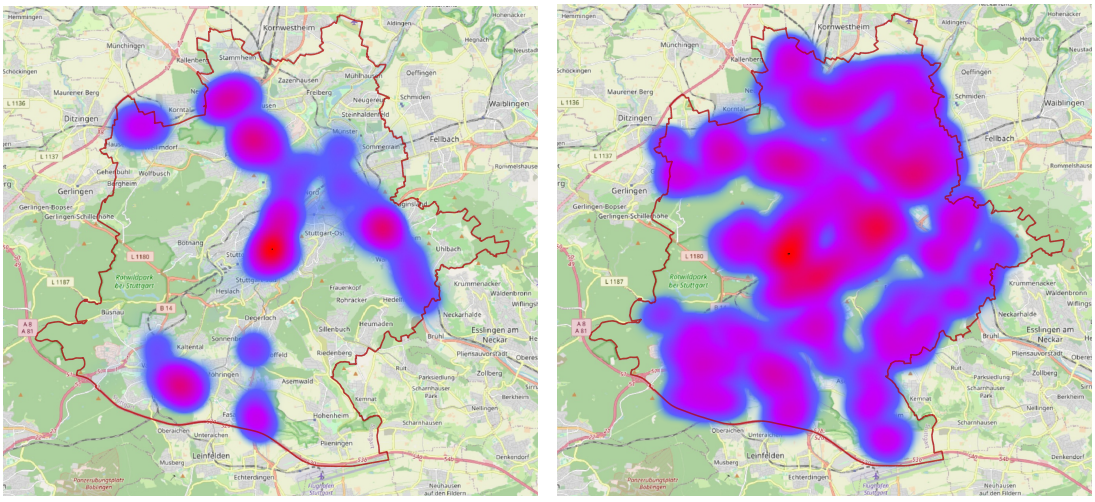
[27] Diese Informationen stammen aus einer Email-Konversation mit den Autoren der TOP100 der Logistik.

Erwerbstätigenzahlen

Bisher kann einer Zelle nur die Eigenschaft Gewerbegebiet zugeordnet werden. Zur Gewichtung dieser Eigenschaft werden feingranulierte Erwerbstätigenzahlen herangezogen. Diese werden auf Stadtteil-Ebene (sozialversicherungspflichtige Beschäftigte pro Stadtteil) von dem statistischen Landesamt Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt. Der Datensatz ist aus dem Jahr 2020. Die Erwerbstätigenzahlen pro Stadtteil werden auf alle Zellen, die in den Gewerbegebieten des Stadtteils sind, gleichermaßen aufgeteilt. Es ist anzunehmen, dass der Großteil der Beschäftigten dem Gewerbegebiet zuzuordnen ist. Daher wird die Aufteilung außerhalb der Gewerbegebiete vernachlässigt. Folglich wird jeder Zelle über die Erwerbstätigenzahl ein Gewicht für die Eigenschaft Gewerbegebiet zugeordnet. Die Verteilung der Erwerbstätigenzahlen auf Gewerbegebiete ist in Abbildung 5.8 als Heatmap dargestellt.

Einwohnerzahlen

Im Fall der B2C-Zustellung, benötigt die Zelle eine Eigenschaft zur Gewichtung des Privatkundenanteils. B2C-Abholungen werden nicht berücksichtigt, da der Anteil sehr gering ist und vernachlässigt wird. Diese Zuordnung erfolgt über die Einwohnerzahlen. Ähnlich der Erwerbstätigenzahlen werden die Einwohnerzahlen auf die Zellen aufgeteilt. Je granulierter die Daten, desto genauer wird die Gewichtung. Für die Auftragserzeugung im Stadtgebiet Stuttgart werden die Einwohnerzahlen auf Baublockebene aus dem Jahr 2022 verwendet. Die Daten werden vom statistischen Amt der Landeshauptstadt zur Verfügung gestellt und sind in Abbildung 5.8 dargestellt.



(a) Erwerbstätigenzahlen (b) Einwohnerzahlen

Abbildung 5.8: Verteilung der Erwerbstätigenzahlen und Einwohnerzahlen in Stuttgart (eigene Darstellung; Geodaten: © OSM (CC-BY-SA 2.0), © Landeshauptstadt Stuttgart, Stadtmessungsamt & Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme (GIS-AG))

5.3.3 Auftragseigenschaften

Zur Erzeugung von Aufträgen für Speditionen werden das Auftragsvolumen und verschiedenste Auftragseigenschaften benötigt. Diese werden im Folgenden beschrieben.

Reale Auftragsdaten

Die realen Auftragsdaten sind von zwei Speditionen aus dem Raum Stuttgart in tabellarischer Form zur Verfügung gestellt worden. Sie bilden die Touren von den Fahrzeugen im Stückgutverkehr mit mindestens drei Aufträgen im Stadtgebiet Stuttgart ab. Die Touren beinhalten somit auch Aufträge im Grenzgebiet Stuttgarts. Zum Einsatz kamen 3,5 t bis 18 t Fahrzeuge. Der Zeitraum der Daten umfasst das Jahr 2022. Die einzelnen Aufträge haben zu folgenden Attributen Einträge (Spalten in der Tabelle):

- Zustell-/Abholdatum
- Zustell-/Abholuhrzeit
- Kundenname
- Kundenadresse: Straße, Nummer, PLZ, Ort, Länderkennzeichen
- Produktschlüssel: beschreibt beispielsweise das Zeitfenster (z. B. Zustellung bis 12:00 Uhr)
- Fahrzeugnummer: Zuordnung des eingesetzten LKW und dessen Eigenschaften, wie Gewichtsklasse etc. (für die Tourenplanung zur Identifizierung des Fuhrparks relevant)
- Auftragsgewicht: Angabe in kg
- Auftragsvolumen: Angabe in m^3
- Packstückanzahl des Auftrags
- Abholung/Zustellung

Im Datensatz gibt es Auftragsgewichte bis 20 t. In der Stückgutlogistik liegt das Maximalgewicht bei 3 t, weshalb für die Auftragserzeugung alle Aufträge oberhalb dieses Gewichts ausgeschlossen werden.
Durch die Analyse der Daten werden für die Auftragserzeugung weitere Informationen abgeleitet. Neben verschiedenen Verteilungen, die im Folgenden beschrieben werden, lässt sich das Auftragsvolumen für die zwei Speditionen erfassen, welche die Daten zur Verfügung gestellt haben. Zudem werden den synthetischen Aufträgen die Ladungsdaten, welche durch das Auftragsgewicht, das Auftragsvolumen und die Packstückanzahl pro Auftrag beschrieben werden, zufällig zugeordnet (Gleichverteilung). Diese Eigenschaften sind voneinander abhängig und werden somit dem Auftrag immer zusammen zugewiesen. In der realen Stückgutlogistik entstehen täglich ebenfalls zufällige Aufträge mit unterschiedlichsten Ladungsdaten durch.
Zur Tourenplanung wird die Stand- bzw. Servicezeit benötigt. Hierzu gibt es im Datensatz keine Angaben, weshalb mithilfe von Expertenangaben eine Klassifizierung erstellt wird. Die Servicezeiten werden in vier Klassen angegeben. Eine Klasse steht für einen

bestimmten Zeitbereich und ist abhängig von Gewicht und Anzahl der Packstücke. In der Tourenplanung wird der Serviceklasse der jeweilige Zeitbereich hinterlegt und für jeden Auftrag in Abhängigkeit des Gewichts eine Servicezeit gewählt. Folglich verlangsamt sich die Aufenthaltszeit an der Auftragsadresse mit zunehmender Verlademenge. Die Aufteilung ist in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1: Klassifizierung der Servicezeiten

Serviceklasse	**Servicezeit**	**Gewichtsbereich**	**Packstückanzahl**
1	3 - 5 min	bis 31,5 kg	< 5
2	6 - 9 min	bis 31,5 kg	> 5
		31,5 - 150 kg	< 5
3	10 - 14 min	31,5 - 150 kg	> 5
		150 - 1000 kg	< 4
4	15 - 20 min	150 - 1000 kg	> 4
		1000 - 3000 kg	beliebig

Das Zeitfenster ist davon unabhängig und wird zu jedem Auftrag einzeln und zufällig eingefügt. Aus dem Datensatz wird die in Tabelle 5.2 dargestellte Aufteilung der Zeitfenster ermittelt. Es ist zu erkennen, dass nur ein geringer Anteil zu einer bestimmten Uhrzeit zugestellt werden muss. Allerdings wirkt sich beispielsweise ein Auftrag mit einer Zustell- bzw. Abholzeit vor 12:00 Uhr deutlich auf die Tourenplanung aus, weshalb die Berücksichtigung notwendig ist. Aufträge ohne zeitliche Begrenzung können auch an den nächsten Werktagen zugestellt bzw. abgeholt werden.

Tabelle 5.2: Häufigkeitsverteilung der Kundenanforderung Zeitfenster

Zeitfenster	**Häufigkeitsverteilung**
keine zeitliche Begrenzung	94 %
bis 12:00 Uhr	4,76 %
bis 10:00 Uhr	1,12 %
bis 08:00 Uhr	0,12 %

Speditionen und Auftragsvolumen

In Kapitel 5.3.1 sind bereits die identifizierten Speditionen mit den Adressinformationen beschrieben. Zur Auftragserzeugung werden weitere Informationen von diesen Unternehmen benötigt, um deren Auftragsvolumen abzuschätzen. Mithilfe einer E-Mail- und Telefonumfrage und realer Auftragsdaten von Speditionen (siehe folgender Absatz) wird die durchschnittliche Anzahl der täglichen Touren und der Aufträge pro Tour für jedes identifizierte Unternehmen ermittelt.

Verteilungen

Zur Zuordnung verschiedener Auftragseigenschaften werden unterschiedliche Verteilungen benötigt. Sie werden durch die Analyse der realen Auftragsdaten ermittelt und im Folgenden erläutert.

a) Zustellung und Abholung

Die Verteilung, ob eine Spedition ein Stückgut abholt oder zustellt, wird ebenfalls mithilfe des Datensatzes ermittelt. Hierbei unterscheiden sich die Werte der einzelnen Speditionen bis zu 7 %, weshalb der Mittelwert verwendet wird. Dieser liegt für die Zustellung bei 67,5 % und für die Abholung bei 32,5 %.

Tabelle 5.3: Eintrittswahrscheinlichkeiten von Aufträgen mit Zustellungen und Abholungen

Zustellung	**Abholung**
67,5 %	32,5 %

b) Aufträge innerhalb und außerhalb Stuttgarts

Die Information, ob ein Auftrag außerhalb Stuttgarts liegt, ist zur Auftragserzeugung ebenfalls relevant. Touren im Stadtgebiet Stuttgart beinhalten teilweise Aufträge im Grenzgebiet. Hierfür wird die Eintrittswahrscheinlichkeit für Aufträge innerhalb und außerhalb bestimmt. Diese unterscheidet sich bei Abholungen und Zustellungen, weswegen dies im Programm berücksichtigt wird. Bei der Zustellung variieren die Werte in geringem Ausmaß (bis 2 %). Es wird der Mittelwert der Eintrittswahrscheinlichkeit von 81,2 % für Aufträge innerhalb und von 18,8 % außerhalb genutzt. Bei den Abholungen entsteht eine Varianz zwischen den Speditionen von ca. 26 %. Daher werden hierzu die Eintrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Speditionen, welche die Datensätze zur Verfügung gestellt haben, verwendet und zusätzlich über die Anzahl an Abhol-Aufträgen je Spedition gewichtet. Von der Gesamtanzahl der Abhol-Aufträge beider Speditionen sind 70 % der Spedition 1 und 30 % der Spedition 2 zuzuordnen. Diese Werte werden in Tabelle 5.4 aufgelistet.

Tabelle 5.4: Eintrittswahrscheinlichkeiten von Aufträgen innerhalb und außerhalb Stuttgarts

	Zustellung	**Abholung**	
Spedition	alle	Spedition 1	Spedition 2
Gewichtung	100 %	70 %	30 %
innerhalb	81,2 %	90,5 %	64,1 %
außerhalb	18,8 %	9,5 %	35,9 %

c) B2C & B2B-Verteilung

Für eine Zuordnung, ob ein Auftrag an einen Gewerbe- oder Privatkunden zugestellt oder abgeholt wird, dient die digitale Umfrage unter Stückgutspediteuren im Durchführungszeitraum 22.08. bis 04.09.22 der deutschen Verkehrszeitung (DVZ) [Lau28]. Sie beschreibt den prozentualen Anteil von Lieferungen an Gewerbekunden. Die Größe der Stichprobe liegt bei 72 Teilnehmern. In der Abbildung 5.9 ist links das Ergebnis der Umfrage als Balkendiagramm dargestellt. Aus dem Balkendiagramm wird ein Histogramm erstellt, welches rechts daneben abgebildet ist. Das Histogramm stellt die Häufigkeitsverteilung mit der Häufigkeitsdichte dar. Die Häufigkeitsdichte berechnet sich durch den

Quotient: *Klassenhäufigkeit/Klassenbreite*. Folglich gibt das Diagramm an, mit welcher Wahrscheinlichkeit der jeweilige B2C-Anteil (zwischen 0 und 100 %) erreicht wird. In der Auftragserzeugung ist somit die Häufigkeitsverteilung erforderlich, um einem Auftrag die Eigenschaft B2C zuzuweisen. Wird dem Auftrag die Eigenschaft B2C nicht zugeordnet, resultiert daraus ein B2B-Auftrag.

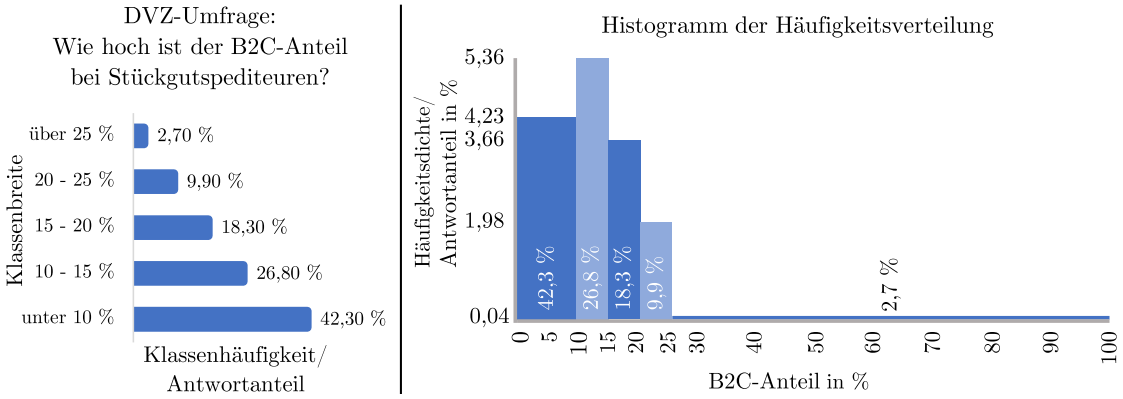


Abbildung 5.9: B2C-Anteil von Stückgutaufträgen (in Anlehnung an [Lau28])

5.3.4 Saisonalitätsdaten

Das Auftragsvolumen von Speditionen variiert täglich, was durch eine Analyse der realen Auftragsdaten bestätigt wird. Es gibt zufällige Schwankungen, welche z. B. durch Maschinen- oder Konsumproduktverschleiß und den daraus resultierenden Ersatzbestellungen entstehen. Zudem gibt es saisonale Schwankungen, die häufig beim Einzelhandel vorkommen. Vor Weihnachten ist mit einem Anstieg an Käufen zu rechnen und in den Sommerferien eher mit einem Rückgang. Dies betrifft auch die Stückgutlogistik, da sie den Einzelhandel sowie Betriebe, welche z. B. Sommerpausen einlegen, versorgt. Somit werden die Schwankungen des Auftragsvolumen pro Tag der jeweiligen Spedition über Saisonalitätsdaten ermittelt. Hierzu stehen verschiedene Daten, wie Umsatz des Einzelhandels oder Mautdaten, zur Verfügung. Für die Auftragserzeugung werden Mautdaten eingesetzt, da diese Daten über den LKW-Verkehr in einem Großraum täglich zur Verfügung stehen. Der Umsatz des Einzelhandels stellt nur eine Nachfragerbranche des Stückgutverkehrs dar und vertritt somit nur einen kleinen Teil der Nachfrager.

Mautdaten

LKW und Fahrzeugkombinationen ab einem zulässigen Gesamtgewicht von 7,5 t sind auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen mautpflichtig. Zur Berechnung der Maut für eine Strecke wird an jedem Knotenpunkt[28] das Fahrzeugkennzeichen aufgenommen und der Tarif über die durch die Knotenpunkte entstehende Streckenlänge (Abschnitt) berechnet. [Bun23a]

[28] Ein Knotenpunkt kann eine Anschlussstelle einer Bundesautobahn, eine Kreuzung, Einmündung oder Zufahrt auf eine mautpflichtige oder Abfahrt von einer Bundesstraße oder die Bundesgrenze sein [Bun23a].

Das Bundesamt für Logistik und Mobilität (BALM) stellt die monatlichen Mautdaten je Abschnitt in Tabellenform (Gebührensumme Ist, Summe mautpflichtige Kilometer, Anzahl Abrechnungssätze) und auf Anfrage detaillierter (z. B. täglich) zur Verfügung. Der Stückgutverkehr findet vorwiegend mit leichten und mittelschweren LKW statt, weswegen tägliche Mautdaten bzw. die Anzahl der Abrechnungssätze zur Berücksichtigung der Saisonalität herangezogen werden. Die Zufahrt eines LKW in einen Großraum wird vorwiegend über eine Bundesstraße führen und somit über die Maut identifiziert. Für die Auftragserzeugung werden alle Haupteinfahrten bzw. -abschnitte in den Großraum ausgewählt. Am Beispiel des Großraums Stuttgart werden die Abschnitte am Rand des Talkessels gewählt (siehe Anhang C). Einfahrten am Wochenende und an Feiertagen werden annulliert, da der Stückgutverkehr nur werktags stattfindet[29]. Einfahrten am Wochenende, vorwiegend samstags, entstehen z. B. durch die Lebensmittel- oder Baustellenlogistik. Anschließend wird die Gesamtanzahl aller ausgewählten Abschnittsbefahrungen summiert und indexiert.
Dieser indexierte Verlauf für die Einfahrten von LKW in den Talkessel Stuttgarts wird für den Zeitraum des Jahres 2022 in Abbildung 5.10 aufgezeigt. Zu besseren Übersichtlichkeit sind die Feiertage und Wochenenden ausgeblendet.

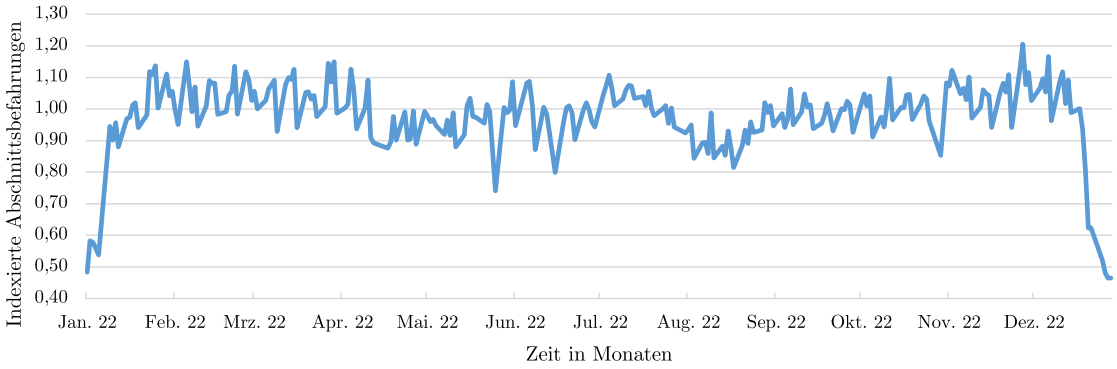


Abbildung 5.10: Indexierte Abschnittsbefahrungen in den Talkessel Stuttgarts für das Jahr 2022 über Mautdaten des BALM (ohne Feiertage und Wochenende)

Abschließend werden zur Übersicht alle Daten tabellarisch mit ihrer jeweiligen Herkunft in Tabelle 5.5 dargestellt. Bei einer Übertragung der Methodik auf einen anderen Zeitraum, ein anderes Logistiksegment oder einen anderen geografischen Großraum können die Daten über jeweiligen Quellen (Behörden, Studien etc.) beschafft und ausgetauscht werden.

[29] Diese Information wird von zwei Speditionen bestätigt.

Tabelle 5.5: Herkunft der Daten

Unterteilung	Daten	Herkunft
Geografische Daten	Rasterung & Referenzadressen	Geocoder
	Gewerbe-/Industriegebiet	Geofabrik und kommunale Behörde (Stadtmessungsamt)
	POI	Geofabrik
	Standorte der Speditionen	Internetrecherche und IHK
Zelleneigenschaften	Nachfragerbranchen	TOP100 der Logistik
	Erwerbstätigenzahlen	Landesbehörde (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg)
	Einwohnerzahlen	Kommunale Behörde
Auftragseigenschaften	Reale Auftragsdaten	Speditionen
	Speditionen & Auftragsvolumen	Telefonumfrage und reale Auftragsdaten
	Verteilung Zustellung/Abholung	Reale Auftragsdaten
	Verteilung innerhalb/außerhalb	Reale Auftragsdaten
	Verteilung B2C/B2B	Jährliche Umfrage der DVZ
Saisonalität	Mautdaten	BALM

5.4 Entwurf der Auftragserzeugung

Der grundsätzliche Aufbau der Auftragserzeugung basiert auf den bereits beschriebenen Funktionalitäten des Programms (siehe Abbildung 5.2). Hierbei findet der erste Schritt, die Erzeugung der Kundenstruktur und somit die Integration der Daten, unabhängig von der Auftragsgenerierung statt. Im zweiten Schritt folgt die Auftragsgenerierung, in welche die Zeit- und Speditionsauswahl integriert ist. Sie durchläuft verschiedene Abfragen und wählt mit der Kundenstruktur eine Zelle als Nachfrager und somit die Adresse aus. Weitere Eigenschaften werden dem Auftrag zugeordnet. Dieser Schritt wiederholt sich, bis das Auftragsvolumen je Spedition im gewählten Zeitraum erreicht ist.

1. Erzeugung der Kundenstruktur

In einem Großraum gibt es zahlreiche Gebäude, die stellvertretend für einen Nachfrager im Stückgutverkehr stehen. Gebäude besitzen eigene Adressen und weisen verschiedene Nutzungsarten vor. Relevante Nutzungsarten für den Stückgutverkehr sind die Wohn-, Einzelhandels-, Industrie- bzw. Gewerbenutzung und die öffentliche Nutzung. Jedes Gebäude zu klassifizieren ist mit einem hohen Aufwand versehen. Daher wird der Großraum für die Auftragserzeugung in Zellen aufgeteilt. Im geografischen Bereich wird ebenfalls eine Einteilung von der Stadtbezirksebene bis auf die Baublockebene (siehe Kapitel 5.3.1) vorgenommen. Bei Wirtschaftsverkehrsmodellen werden die zu untersuchenden Gebiete ebenfalls in Zellen aufgegliedert. Jeder Zelle werden verkehrserzeugende Kenngrößen, wie

z. B. Einwohner- und Erwerbstätigenzahlen und Fahrtenaufkommen, und somit Start- und Stopppotentiale zugeordnet [Lee21, S. 371].
Eine Zelle steht stellvertretend für einen Bereich im Untersuchungsraum und eine Nachfrage. Sie erhält eine Adresse mit Längen- und Breitengrad, die Nachfrage wird durch verschiedene Kenngrößen beschrieben. Diese Kenngrößen geben die Nutzungsart und die Lage (außerhalb oder innerhalb des Stadtgebiets bzw. des geografischen Großraums) an. Folgende Kenngrößen (Nachfragen) einer Zelle werden in Abbildung 5.11 dargestellt und anschließend beschrieben:

Nachfrage außerhalb des Stadtgebiets:
Zudem zeigt eine Kenngröße, ob die Zelle inner- oder außerhalb des Großraums liegt. Stückguttouren verlaufen teilweise durch Randgebiete des Großraums, weswegen diese einbezogen werden. Die Nachfrage der Zelle außerhalb des Großraums bzw. die Gewichtung (Auswahlwahrscheinlichkeit) wird über die Anzahl der Aufträge in einer Zelle auf Basis von realen Auftragsdaten ermittelt. Da der Fokus der Untersuchung innerhalb des Innenkordons liegt, wird die Auswahl und somit die Gewichtung der Zellen außerhalb des Gebiets vereinfacht durchgeführt. Eine Bewertung dieser Zellen nach ihren Nutzungsarten erzwingt eine weitere Datenanalyse für den Einflussbereich (außerhalb des Innenkordons).

Nachfrage im B2C-Bereich (Wohnnutzung):
Über die Wohnnutzung werden die Aufträge bzw. die Nachfrage im B2C-Bereich gewichtet. Das Verhalten von Privatpersonen in Bezug auf Konsum und Investition wird als vielfältig angesehen, da es durch Faktoren wie dem Einkommen und der individuellen Einstellung beeinflusst wird. Dennoch zeigt sich im Durchschnitt, dass die Konsummenge mit der Anzahl der betrachteten Konsumenten zunimmt. Die Bevölkerungsdichte in einem Großgebiet weist keine gleichmäßige Verteilung auf. Unterschiede entstehen durch Abstände zwischen Häusern, Anzahl der Stockwerke und Wohnfläche pro Bewohner. Hierzu werden Einwohnerzahlen, eingeteilt in verschiedene geografische Ebenen (Baublock), durch Behörden zur Verfügung gestellt. Für die Auftragserzeugung wird eine Gleichverteilung der Stückgutnachfrage pro Bereich (Baublock) angenommen. Somit wird über die gleichverteilte Einwohneranzahl pro kleinstmöglichstem geografischen Bereich die Gewichtung der Zelle bestimmt.

Nachfrage im B2B-Bereich in Gewerbegebiete:
In Gewerbegebieten sind Unternehmen in unterschiedlichster Größe und der daraus resultierenden Erwerbstätigenzahl angesiedelt. Zur Ermittlung der genauen Stückgutnachfrage der einzelnen Unternehmen können Befragungen angewandt werden. Für einen Großraum ist dies aufgrund der hohen Anzahl an Unternehmen sehr aufwendig und es ist nicht garantiert, dass eine repräsentative Anzahl ausreichend Informationen herausgibt. Daher wird, wie bei der Wohnnutzung, eine gleichverteilte Stückgutnachfrage in einem Gewerbegebiet angenommen. Mithilfe möglichst fein granulierter Erwerbstätigenzahlen (hier: auf Stadtteilebene) wird dem Gewerbegebiet eine Erwerbstätigenzahl zugewiesen.

Diese wird über alle Zellen in dem Gewerbegebiet gleich verteilt und damit deren Gewichtung bestimmt. Die Informationen zur Flächennutzung, einschließlich Gewerbe- und Wohngebieten, werden über Kartendienste wie OSM ermittelt.

Nachfrage im B2B-Bereich POI (Einzelhandelsnutzung und öffentliche Nutzung): Kartendienste liefern ebenfalls Informationen über POI. Für die Erstellung eines Auftrags kann beispielsweise ein solcher POI direkt als Ort ausgewählt werden. Allerdings werden für die Auftragserzeugung aufgrund der Zellaufteilung die relevanten POI den Nachfragerbranchen zugeordnet und anschließend die Anzahl in einer Zelle pro Branche ermittelt. Daraus resultiert die Gewichtung von Aufträgen an POI pro Zelle.

Zur Ermittlung der Gewichtung bzw. Auswahlwahrscheinlichkeiten werden die Eingangsdaten, insbesondere die Strukturdaten (siehe Kapitel 5.3), herangezogen. Das Programm wird die Eingangsdaten im CSV-Format einlesen. Daraus resultiert die Kundenstruktur in Form einer Matrix, welche die Kundenstruktur darstellt und im CSV-Format ausgegeben wird. Sie ist die Grundlage der Auftragsgenerierung.

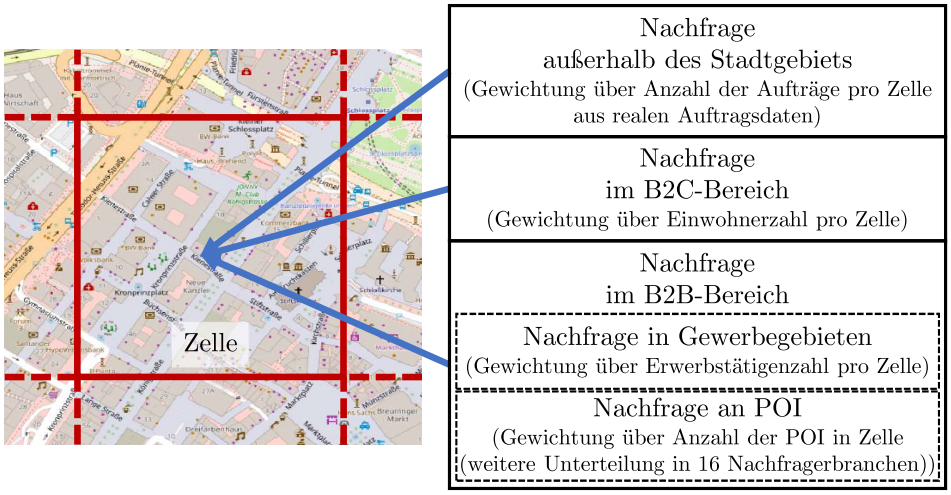


Abbildung 5.11: Nachfrager bzw. Kenngrößen einer Zelle

2. Auftragsgenerierung

Die Hauptfunktion des Programms, die Auftragsgenerierung, basiert auf der Kundenstruktur des Untersuchungsraums. Die Auftragsgenerierung erstellt eine Liste mit synthetischen Aufträgen und deren definierten Eigenschaften je Spedition für einen vorher im Programm eingestellten Zeitraum. Als Auftragseigenschaften werden Folgende festgelegt [Pfl+24, S. 8]:

- Adresse
- Datum
- Auftragsnummer (laufende Nummer)
- Zustellung / Abholung
- Gewicht, Volumen, Packstückanzahl (werden zufällig über Gleichverteilung zusammen vergeben)

Zudem werden folgende Eigenschaften, die in einem anderen Format oder nicht in den realen Daten angegeben werden, für die Tourenplanung benötigt:

- Geo-Koordinaten (Angabe in Dezimalgraden; genauere Adresszuordnung)
- Depot-ID (Name der Spedition zur Zuordnung des Auftrags)
- Servicezeitklasse (wird in Abhängigkeit von Gewicht und Packstückanzahl vergeben)
- Zeitfenster (wird über eine Häufigkeitsverteilung der Produktschlüssel vergeben)

Die Auftragsgenerierung startet mit der Auswahl des Zeitraums und der Speditionen. Es besteht die Möglichkeit, ein oder mehrere Unternehmen auszuwählen. Mit dieser Auswahl wird für jeden Tag und für jede ausgewählte Spedition das Auftragsvolumen mit Berücksichtigung der Saisonalität ermittelt. Dazu wird das Auftragsvolumen pro Tag mit dem für den Tag festgelegten Saisonalitätsindex multipliziert. Um das Volumen zu erreichen, erstellt das Programm nacheinander Aufträge. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis alle Auftragslisten für jede ausgewählte Spedition entstanden sind. Die Auftragslisten werden im CSV-Format ausgegeben.
Zur Erzeugung eines Auftrags werden verschiedene Entscheidungsvorgänge, wie die Zell- und Adresszuteilung über die Kundenstruktur und die Zuteilung der Auftragseigenschaften, durchlaufen. Der komplette Vorgang ist in einem Ablaufdiagramm in Abbildung 5.12 dargestellt. Im Folgenden wird der Ablauf schrittweise dokumentiert.

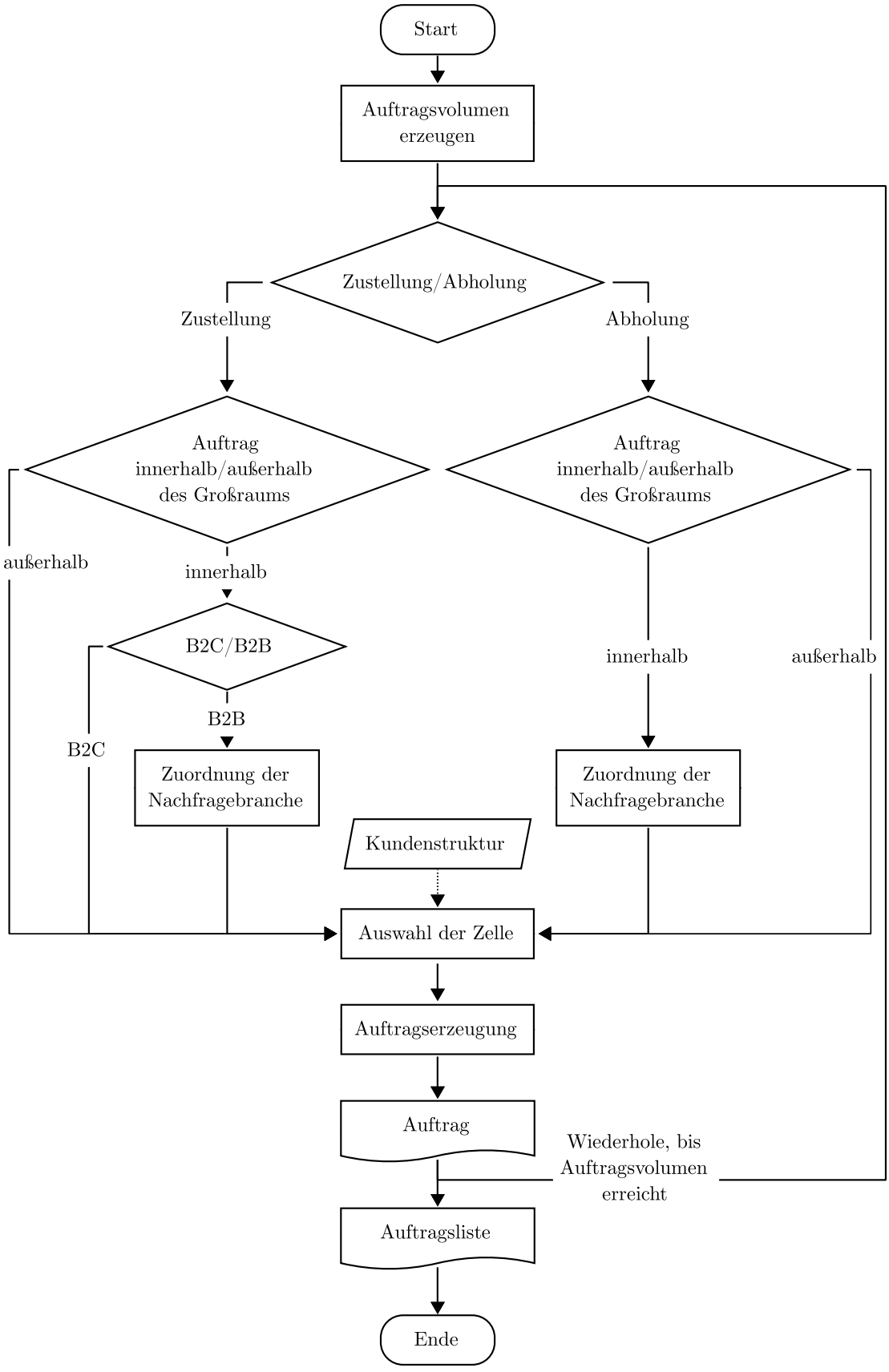


Abbildung 5.12: Ablaufdiagramm der Auftragsgenerierung

1. Entscheidung: Zustellung oder Abholung
   In diesem Schritt wird einem Auftrag die Eigenschaft, ob eine Zustellung oder Abholung vorliegt, zugeordnet. Für das Beispiel Stuttgart liegt die Wahrscheinlichkeit für eine Zustellung bei 67,5 % und für eine Abholung bei 32,5 %. Von dieser Zuordnung sind die nachfolgenden Entscheidungen abhängig. Im Folgenden wird der Ablauf von Aufträgen mit Zustellung beschrieben. Aufträge mit Abholungen unterscheiden sich nur geringfügig und die Unterschiede werden abschließend erklärt.
2. Entscheidung: Auftrag innerhalb oder außerhalb des Großraums
   Der Auftrag erhält in diesem Vorgang die Zuordnung, ob dieser innerhalb oder außerhalb des Großraums bzw. im Randgebiet zugestellt wird. Bei einer Zustellung liegen diese im Beispiel Stuttgart für innerhalb bei 81 % und für außerhalb bei 19 %.
   a) Auftrag außerhalb des Stadtgebiets
      In der Kundenstruktur gibt es eine Kenngröße für Aufträge außerhalb des Stadtgebiets und deren Auswahlwahrscheinlichkeit für die jeweilige Zelle. Die Kundenstruktur dient somit als eine Quell- und Gewichtsmatrix mit den dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten. Zur Auswahl der Zelle wählt eine Funktion (in MATLAB®: randscr) eine Zufallszahl aus der Quellmatrix, indem sie die Wahrscheinlichkeiten in der Gewichtsmatrix berücksichtigt. Diese Funktion wird bei allen folgenden Zellzuordnungen verwendet. Der Ablauf ist beendet und weitere Eigenschaften werden dem Auftrag zugeordnet.
   b) Auftrag innerhalb des Stadtgebiets
      Der Ablauf wird im dritten Schritt fortgesetzt.
3. Entscheidung: B2C oder B2B
   Bei dieser Entscheidung wird dem Auftrag eine B2C- oder B2B-Beziehung zugeordnet. Sie erfolgt über die Funktion, die den B2C-Anteil von Stückgutaufträgen angibt (siehe Abbildung 5.9).
   a) Auftrag mit B2C-Beziehung
      In der Kundenstruktur gibt es eine Kenngröße für Aufträge an Privatpersonen. Mit dieser Kenngröße und deren Auswahlwahrscheinlichkeiten wird eine Zelle gewählt (siehe Auftrag außerhalb des Stadtgebiets). Der Ablauf ist beendet und weitere Eigenschaften werden dem Auftrag zugeordnet.
   b) Auftrag mit B2B-Beziehung
      Der Ablauf wird im vierten Schritt fortgesetzt.
4. Zuordnung der Nachfragerbranche
   Im vierten Schritt wird dem Auftrag eine Nachfragerbranche über die Wahrscheinlichkeitsverteilung in Anhang B zugeordnet. In der Kundenstruktur gibt es eine Kenngröße für jede Branche für Aufträge im B2B-Bereich. Mit dieser Kenngröße und deren Auswahlwahrscheinlichkeiten wird eine Zelle gewählt (siehe Auftrag außerhalb des Stadtgebiets). Der Ablauf ist beendet und weitere Eigenschaften werden dem Auftrag zugeordnet. Im Folgenden sind die Nachfrager aufgelistet.

a) Gewerbegebiet
b) Nachfragerbranche mit POI
   i. Einzelhandel Bücher, Zeitschriften
   ii. Einzelhandel elektrische Haushaltsgeräte
   iii. Einzelhandel Möbel, Spielwaren
   iv. Einzelhandel Textil, Bekleidung, Schuhe
   v. Einzelhandel Nahrung, Getränke, Tabakwaren
   vi. Einzelhandel Non-Food
   vii. Einzelhandel Bau und Heimwerker
   viii. Einzelhandel Pharma, Apotheken
   ix. Facheinzelhandel Kosmetik, Drogerien
   x. Kfz-Handel
   xi. Kfz-Reparatur und sonstiges
   xii. Gastgewerbe
   xiii. Banken, Versicherungen
   xiv. sonstige privatwirtschaftliche Dienstleistungen
   xv. sonstige öffentliche Dienstleistungen
   xvi. öffentlicher Sektor ohne Umsatzsteuer-Ausweisung, wie Bundeswehr, Krankenhaus, kommunale Entsorgungswirtschaft

Nach Beendigung des Ablaufs hat jeder Auftrag eine Zelle mit Adresse zugeordnet bekommen. Dem Auftrag werden die restlichen Eigenschaften (siehe Aufzählung Auftragseigenschaften) zugeordnet.
Tritt der Fall ein, dass einem Auftrag die Abholung zugewiesen wird, durchläuft der Auftrag denselben Ablauf mit unterschiedlichen Gewichtungen der einzelnen Entscheidungen. Der Anteil an Aufträgen innerhalb zu außerhalb des Stadtgebiets unterscheidet sich deutlich, weshalb eine doppelte Gewichtung verwendet wird (siehe Kapitel 5.3.3). Bei anderen Großräumen werden nicht dieselben prozentualen Aufteilungen auftreten. Eventuell kann es auch dem Gewicht der Zustellung gleichen. Die Werte sind aufgrund der Übertragbarkeit austauschbar. Eine Zuordnung zu einer B2C- oder B2B-Beziehung ist nicht notwendig. Durch die geringe Nachfrage nach Abholungen bei Privatpersonen[30] wird die B2C-Abholung vernachlässigt. Alle Aufträge mit Abholung werden lediglich bei Kunden des Gewerbes und öffentlichen Sektors durchgeführt. Die Zuteilung der Nachfragerbranche und Zelle gleicht dem Ablauf von Zustellungen.

5.5 Implementierung der Auftragserzeugung

In der Implementierung wird das Anwendungssystem der Auftragserzeugung realisiert. Das Programm ist in folgende Module unterteilt: Erzeugung der Kundenstruktur und

[30] Diese Information wird von mehreren Speditionen in Gesprächen bestätigt.

Auftragsgenerierung. Im Gesamten ist es als ein Programm zu betrachten und beide Module werden nacheinander ausgeführt. Somit basiert die Programmierung auf dem Entwurf in Kapitel 5.4. Die Codierung bzw. Programmierung wird mithilfe der Programmierumgebung MATLAB®[31] durchgeführt.
MATLAB®, eine Abkürzung für MATrix LABoratory, ist ein Softwarepaket, welches vorwiegend zur numerischen Berechnung und Visualisierung, besonders in den Mathematik- und Ingenieurwissenschaften, genutzt wird. Die kommerzielle Software des Unternehmens MathWorks mit einer interaktiven Bedienoberfläche wird neben der Berechnungs- und Simulationsumgebung auch zum Erstellen von selbst geschriebenen Anwendungen inklusive grafischer Bedienoberfläche eingesetzt. Zu den Alternativen von MATLAB® zählen kostenfrei verfügbare Softwarepakete, wie Octave, Scilab und FreeMat, oder die Programmiersprache Python. [PG21, S. 1; Ste23, S. 2]
Die Auswahl dieser Programmierumgebung erfolgt aufgrund der Weiterverarbeitbarkeit der Daten in der Analyse und Optimierung des Stromnetzes der Methodik durch das Institut für Hochspannungstechnik und Energieübertragung. Hierfür wird ebenfalls MATLAB® genutzt. Zudem ist eine stetige Weiterentwicklung des Programms anhand der Lizenzierung zu erwarten. Ebenso stehen eine ausführliche Dokumentation und angebotene Lernkurse zur schnellen Einarbeitung und zum Lösen von Problemen zur Verfügung. Während der Implementierung finden regelmäßige Fehleranalysen und erste Funktionstests statt. Somit können rechtzeitig Änderungen in der Struktur und Programmierung integriert werden. Beispielsweise ist ursprünglich für jede Spedition ein Profil mit gewissen Eigenschaften, wie z. B. die B2C/B2B-Verteilung, vorgesehen. Die Beschaffung dieser Eigenschaften pro Spedition ist allerdings sehr aufwendig, weswegen die allgemeine Gewichtung dieser Eigenschaften fokussiert wird.
Neben der Programmierung der beiden Module wird in der Implementierung das Design der Bedienoberfläche festgelegt. Die Oberfläche wird eindeutig, widerspruchsfrei und in deutscher Sprache gestaltet. Alle Eingabefelder sind ersichtlich, wodurch die Anwendbarkeit einfach wird. Die Oberfläche besitzt vier wechselbare Programmfenster: Ablauf bzw. Vorgehen im Programm, Erzeugung der Kundenstruktur, Generierung der Aufträge und Anleitung, außerdem die Übersicht zu den Verzeichnissen der Inputdaten. Der Ablauf gestaltet sich nach den zwei Hauptfunktionalitäten:

1. Erzeugung der Kundenstruktur
    a) Integration der Eingangsdaten
    b) Erzeugung der Kundenstruktur als Matrix
2. Durchführen der Auftragsgenerierung

Die Eingangsdaten werden über das Fenster *Übersicht zu den Verzeichnissen der Inputdaten* integriert. Hierbei öffnet sich direkt der richtige Dateipfad im Dateiexplorer, worüber die jeweiligen Daten im CSV-Format eingefügt oder getauscht werden. Aufgrund der

[31] MATLAB® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Firma „The MathWorks, Inc.“ `www.mathworks.com`, bzw. `www.mathworks.de`.

Austauschbarkeit besteht die Möglichkeit, das Programm jederzeit für andere Großräume und Logistiksegmente anzuwenden. Die Erzeugung der Kundenstruktur wird über den Start-Button *Go* durchgeführt. Bei jeder neuen Erzeugung der Kundenstruktur (zur Übertragbarkeit) ist die Angabe des Großraums und des Logistiksegments zur Dokumentation verpflichtend. Die Kundenstruktur wird als CSV-Datei abgespeichert. Zur Auftragsgenerierung ist der Wechsel zum Fenster *Generierung der Aufträge* erforderlich. Die Generierung erfolgt ebenfalls über einen Start-Button mit der Bezeichnung *Go*. Zuvor ist die Auswahl des Zeitraums und der Speditionen erforderlich. Es können eine Spedition oder mehrere Speditionen, ebenso ein Tag oder mehrere Tage gewählt werden. Das Fenster der Auftragsgenerierung ist in Abbildung 5.13 dargestellt. In der rechten Tabelle werden nach dem Durchlauf die Aufträge je Spedition aufgelistet. Alternativ kann der Pfad im Dateiexplorer über den Output-Button *Auftragslisten* geöffnet werden. Dort befindet sich für jede ausgewählte Spedition eine Auftragsliste im CSV-Format.

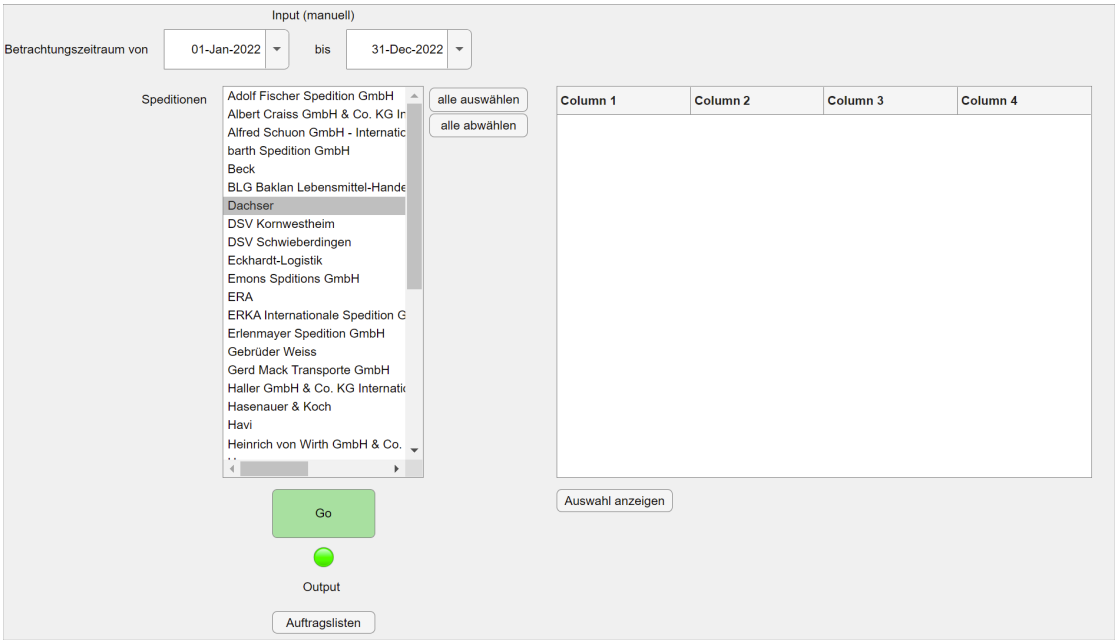


Abbildung 5.13: Bedienoberfläche zur Auswahl des Zeitraums und der Speditionen

5.6 Test und Betrieb der Auftragserzeugung

Die Tests zur Prüfung der Funktionstüchtigkeit der Auftragserzeugung werden bereits während der Implementierungsphase durchgeführt. Dadurch werden rechtzeitig Fehler erkannt und korrigiert. Ein Beispiel für aufgetretene Fehler sind falsche Pfade zur Integration der Input-Dateien. Zudem werden Änderungen, wie z. B. weitere Auftragsmerkmale (z. B. die Servicezeitklasse), integriert. Dieser iterative Prozess begünstigt somit die gesamte Entwicklung, um zum Ende hin ein funktionierendes Programm zu erhalten. In

jeder aufeinanderfolgenden Iteration erfolgt eine fortschreitende Optimierung und Verfeinerung des Programms, basierend auf den Erkenntnissen, die aus den vorangegangenen Iterationen gewonnen werden.

Nach der Implementierungsphase findet der Abschlusstest statt. Abschließend können je nach Bedarf Fehlerkorrekturen und Änderungen vorgenommen werden. Bei der Auftragserzeugung wird beispielsweise nach den Tests eine weitere Aufteilung vorgenommen. Anfänglich werden die POI nicht in die Unterbranchen aufgeteilt, sondern eine Gewichtung für Aufträge an POI gewählt (siehe Abbildung 5.14). Somit findet im vierten Schritt der Auftragsgenerierung lediglich die Zuordnung zu Gewerbegebiet oder POI statt. Ebenso wird die Zellengewichtung für die gesamte Anzahl aller POI pro Zelle vorgenommen. Aus dieser Gesamtanzahl der POI pro Zelle ergibt sich die Kenngröße zur Ermittlung der Auswahlwahrscheinlichkeit. Zur Präzisierung des Ergebnisses des Programms werden die POI den Unterbranchen zugeteilt und im Entwurf des Programms geändert. Die Zuteilung wird bereits im Rahmen der Verteilung der Nachfragerbranchen durchgeführt und direkt übernommen (siehe Tabelle in Anhang B). Zudem werden in der Phase Implementierung Programmierinhalte geändert. Durch diese Änderung werden nun die POI auf 16 Unterbranchen aufgeteilt und in der Kundenstruktur mit den Auswahlwahrscheinlichkeiten angegeben. Somit wird im vierten Schritt neben dem Gewerbegebiet die Auswahl auf die Unterbranchen ermöglicht.

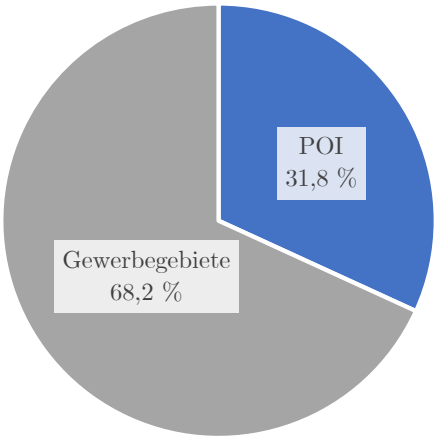


Abbildung 5.14: Aufteilung von POI und Gewerbegebiete

Nach dem Testing wird noch der Abgleich mit dem Anforderungskatalog vorgenommen. Die funktionalen Anforderungen werden in der finalen Version des Programms eingehalten. Alle Daten werden integriert und vorwiegend in der Kundenstruktur zusammengefasst. Die zeitliche Dimension und die Speditionen lassen sich vor dem Start der Auftragsgenerierung auswählen. Nach Abschluss werden die Daten, wie gefordert, im CSV-Format zur Verfügung gestellt. Die Übertragbarkeit auf einen anderen Zeitraum, ein anderes Gebiet oder eine Branche bzw. ein Logistiksegment ist ebenfalls durch den Austausch der Inputdaten und der Neuerstellung der Kundenstruktur möglich. Die nicht-funktionalen Anforderungen werden ebenfalls in der Auftragserzeugung realisiert. Das Programm ist leistungsfähig, plattformunabhängig, in deutscher Sprache verfügbar sowie einfach und mit Grundkenntnissen anwendbar. Die Leistungsfähigkeit wird über die Laufzeit eines Durchlaufs beschrieben. Ein Auftrag benötigt 0,1 Sekunden und der Durchlauf zur Erzeugung von Stückgutaufträgen im Stadtgebiet Stuttgart für alle aufgelisteten Speditionen und den Zeitraum von fünf Werktagen (eine Woche) braucht durchschnittlich acht Minuten. Dies ist stark abhängig vom Auftragsvolumen und Leistung bzw. Auslastung des Computers. Die Dokumentation ist direkt über die Bedienoberfläche aufrufbar.

Der Betrieb des Programms wird nach einer erfolgreichen Durchführung der Tests freigegeben und in den produktiven Einsatz für die Methodik überführt. Für den weiteren Ablauf der Methodik werden Auftragslisten für alle Speditionen und einen bestimmten Zeitraum generiert. Anhand dieser wird die Tourenplanung durchgeführt und die Elektrifizierbarkeit analysiert und optimiert. Bei Bedarf kann das Programm anderen Anwendern zur Verfügung gestellt werden.

5.7 Ergebnis und Validierung der Auftragserzeugung

Abschließend werden die Ergebnisse der Auftragserzeugung validiert sowie deren Reproduzierbarkeit untersucht. Die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen bezieht sich darauf, wie gut der Prozess des Programms (Starten - Erzeugung der Kundenstruktur oder Starten - Auftragsgenerierung) wiederholt werden kann, um ähnliche Ergebnisse zu erzielen. Die Validierung bestätigt, dass die festgelegten Anforderungen für eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt werden [DIN15]. Es ist ein Grundsatz in der wissenschaftlichen Forschung, da es ermöglicht, die Gültigkeit und Verlässlichkeit von neuen Erkenntnissen zu überprüfen und sicherzustellen. Im Folgenden werden die Untersuchungen beschrieben:

a) Reproduzierbarkeit der Kundenstruktur:
Die Kundenstruktur wird zehnmal mit gleichen Eingangsdaten erzeugt und die einzelnen Kenngrößen werden miteinander verglichen. Der Vergleich ergibt die exakte Übereinstimmung der zehn Strukturen. Alle Kundenstrukturen weisen keine Änderungen in den einzelnen Zellen auf. Zur Gegenprüfung werden die Eingangsdaten geändert und eine neue Kundenstruktur erstellt. Die Werte in den Zellen ändern sich dementsprechend. Folglich ist das Ergebnis der Erzeugung der Kundenstruktur reproduzierbar.

b) Reproduzierbarkeit der Auftragslisten und Abgleich zur Vorgabe:
Zur Untersuchung der Auftragslisten wird das Programm zehnmal mit gleicher Speditionsauswahl, Matrix und dem gleichen Zeitraum (Kalenderwoche KW19) durchgeführt. Die erzeugten Auftragslisten werden miteinander verglichen. Bei allen erzeugten Listen erstellt das Programm immer die gleiche Anzahl an Aufträgen pro Woche und Tag. Durch die unterschiedliche Aufteilung an Aufträgen pro Tag und die Abweichung von der vorgegebenen Auftragsanzahl pro Woche wird bestätigt, dass das Programm über den Saisonalitätsindex eine Variation in der Auftragsanzahl erzeugt (siehe Kapitel 5.3.4).
Bei der Aufteilung von Aufträgen innerhalb und außerhalb des Stadtgebiets ergibt sich eine Standardabweichung von 2,2 %. Der Mittelwert des Anteils mit Aufträgen innerhalb des Gebiets liegt bei 84,5 % und außerhalb bei 15,5 %. Im Vergleich mit dem Durchschnitt der vorgegebenen Eintrittswahrscheinlichkeiten zu dieser Verteilung (Vorgabewert; siehe Kapitel 5.3.3) ergibt sich eine Abweichung von 2,8 % (siehe Abbildung 5.15). Der Vorgabewert wird aus den verfügbaren realen Daten eines Jahres gemittelt.

Der Anteil an Zustellungen sowie Abholungen weicht ebenfalls um einen geringen Anteil von 0,5 % vom Vorgabewert ab (siehe Kapitel 5.3.3). Der Mittelwert dieser Verteilung beläuft sich bei Zustellungen auf 68 % und bei Abholungen auf 32 % (siehe Kapitel 5.3.4). Die Standardabweichung beträgt 3%. Zusätzlich wird die Anzahl an Aufträgen der synthetischen Daten in jedem Postleitzahlenbereich ermittelt und überprüft. Hierdurch wird die geografische Verteilung der Aufträge analysiert. Die Mittelwerte und die dazugehörigen Standardabweichungen sind in Abbildung 5.16 dargestellt. Der niedrigste Mittelwert liegt bei 2 und der höchste bei 19 Aufträgen. Es ergeben sich Standardabweichungen bis zu 8,9 %. In Anhang D werden die detaillierten Ergebnisse der Untersuchung tabellarisch und die zu den Auftragslisten gehörenden Heatmaps von vier Auftragslisten nebeneinander dargestellt. Die Heatmaps für das Stadtgebiet Stuttgart zeigen, dass die Gewerbegebiete und die Hauptgeschäftsstraße (Königstraße) am stärksten frequentiert sind. Zusätzlich entsteht in den Wohngebieten eine variierende Nachfrage nach Stückgut. In Waldbereichen befinden sich keine Aufträge.

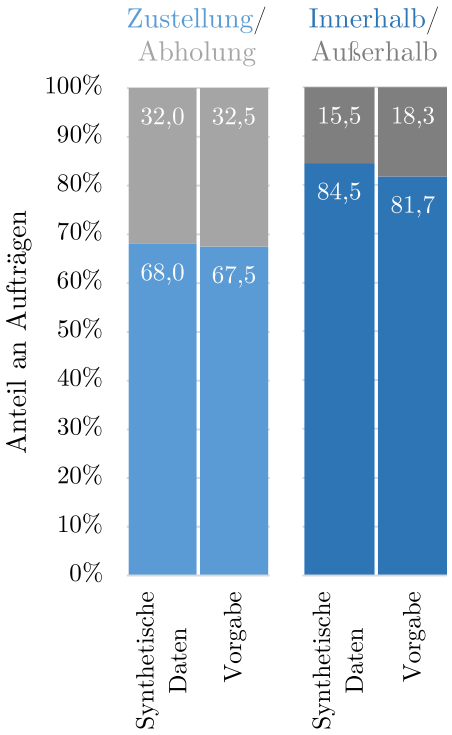


Abbildung 5.15: Mittelwert des Verhältnisses der Zustellungen/Abholungen und Innerhalb/Außerhalb mehrerer synthetischer Auftragslisten

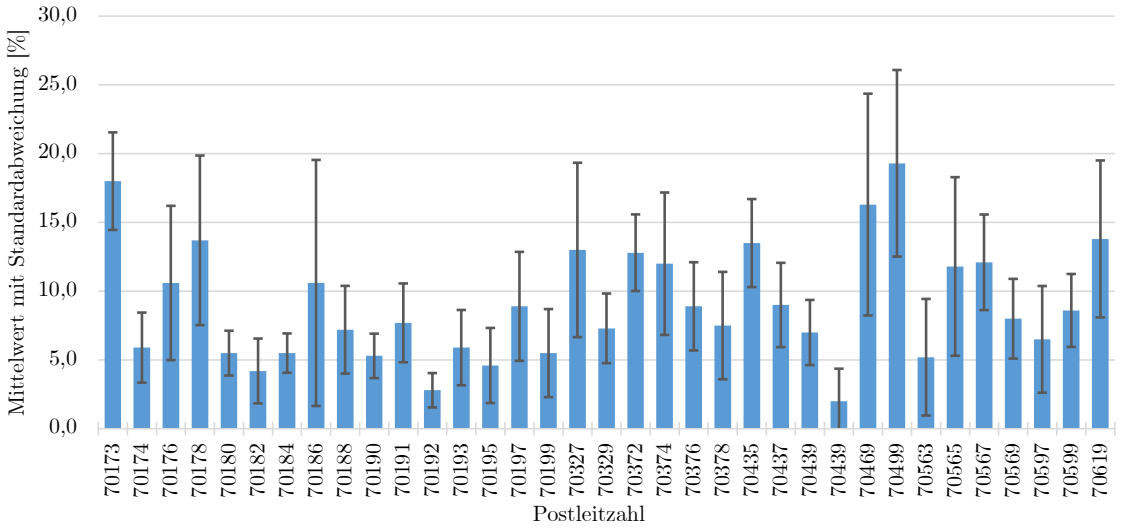


Abbildung 5.16: Durchschnittliche Anzahl der Aufträge mehrere synthetischer Auftragslisten in allen PLZ-Bereichen im Stadtgebiet Stuttgart

c) Abgleich der synthetischen mit realen Auftragslisten:

Des Weiteren werden die synthetischen Auftragslisten einer Spedition, von welcher reale Auftragsdaten vorliegen, mit gleicher Kundenstruktur in vier Zeiträumen bzw. Kalenderwochen erzeugt und mit dem realen Datensatz abgeglichen. Dieser Datensatz ist vertraulich und unterliegt einer Geheimhaltungsvereinbarung, weshalb in dieser Arbeit im PLZ-Vergleich nur die Abweichungen von den synthetischen zu den realen Daten analysiert werden. Ebenso wie beim Vergleich mehrerer synthetischer Auftragslisten wird bei diesem Vergleich die Gesamtauftragsanzahl, das Verhältnis Zustellungen/Abholungen und Innerhalb/Außerhalb sowie die Anzahl an Aufträgen in den PLZ-Bereichen untersucht. Bei den realen Daten liegt die Gesamtauftragsanzahl lediglich 2,5 % höher. Die durchschnittliche Abweichung der Zustellungen bzw. Abholungen liegt bei 8,7 % und die der Aufträge innerhalb bzw. außerhalb bei 5,1 %. In der Abbildung 5.17 werden die Mittelwerte aus den vier Zeiträumen der synthetischen sowie realen Daten dargestellt.

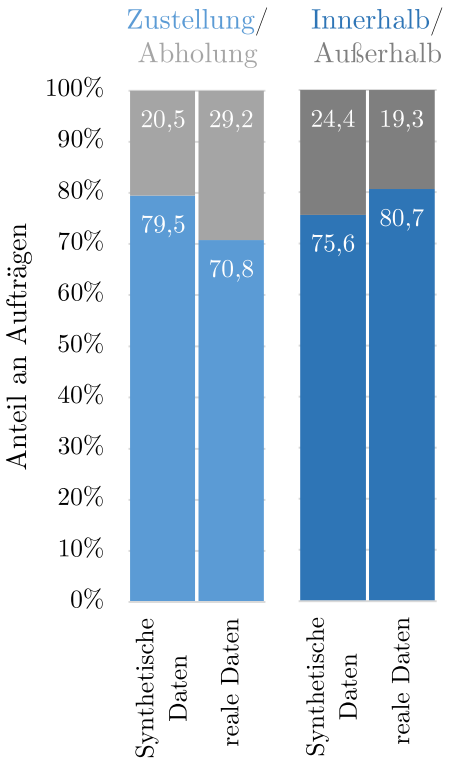


Abbildung 5.17: Mittelwert des Verhältnisses der Zustellungen/Abholungen und Innerhalb/Außerhalb mehrerer synthetischer und realer Auftragslisten

Zur Untersuchung der PLZ-Bereiche wird zu jedem Untersuchungszeitraum die Abweichung an Aufträgen pro PLZ zu den realen Daten ermittelt. Zusätzlich werden die Mittelwerte aller Kalenderwochen berechnet, die in Abbildung 5.18 dargestellt sind. Der niedrigste Wert liegt bei 0,6 und der höchste bei 22,2 Aufträgen. Vorwiegend liegen die Abweichungen unter fünf Aufträgen. Als Auffälligkeit zeigt sich, dass in wenigen PLZ-Bereichen der realen Daten eine sehr hohe Anzahl an Aufträgen gegenüber den synthetischen Daten besteht. Eine große Regelmäßigkeit wird in der PLZ 70499 (Stuttgart-Weilimdorf) festgestellt. Dies ergibt sich durch eine sehr hohe Auftragsanzahl bei einem einzelnen Gewerbekunden. Es ist anzunehmen, dass dies täglich mehrere und immer wiederkehrende Aufträge eines Stammkunden sind. Die Spedition fährt im realen Fall den Kunden je nach Gewicht und Volumen der Aufträge mit einer oder mehreren Touren am Tag an. Die Tourenlänge ist abhängig von der Entfernung des Kunden. Im synthetischen Fall verteilen sich die Aufträge auf andere Zellen bzw. Postleitzahlen, da sich die Gesamtauftragsanzahl nur geringfügig unterscheidet. Die Aufträge werden ebenfalls in Touren eingeplant. Die Tourenlängen sind abhängig von der Lage der Aufträge. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit an realen Auftragsdaten und der daraus resultierenden Unkenntnis über mögliche Stammkunden der Speditionen wird eine Stammkunden-Funktion in der Auftragserzeugung nicht abgebildet. Des Weiteren ist mit

einer Standardabweichung von bis zu 8,9 % eine Variation der Auftragsanzahl gegeben. Im Anhang E werden jeweils eine Heatmap mit synthetischen und eine mit realen Aufträgen nebeneinander dargestellt. Die grafische Übereinstimmung ist aufgrund der Variation der Auftragsadressen nicht vollständig gegeben. Zudem zeigt sich der Stammkunde in der PLZ 70499 (Weilimdorf) durch die hohe Anzahl an Aufträgen in einen bestimmten Bereich.

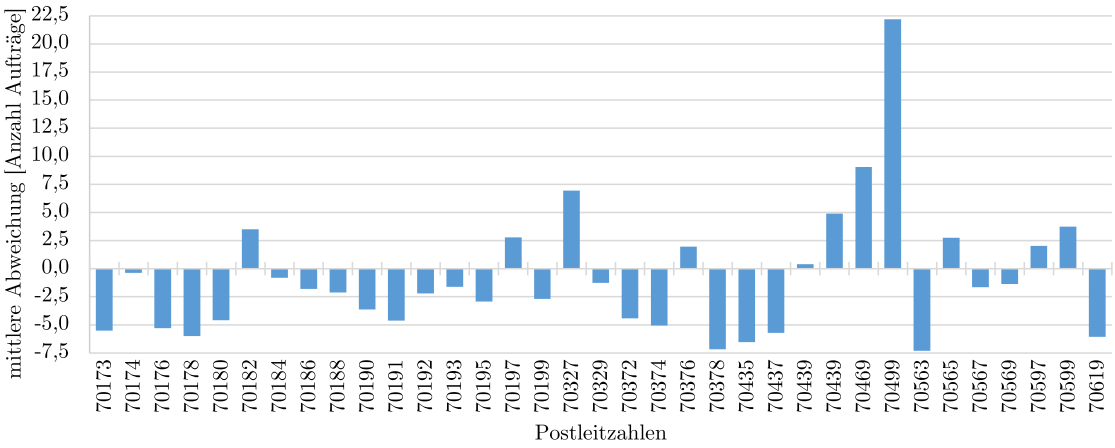


Abbildung 5.18: Mittlere Abweichung der Anzahl an Aufträgen synthetischer zu realen Auftragslisten in den PLZ-Bereichen im Stadtgebiet Stuttgart

Die Variation der Verteilungen innerhalb der untersuchten Datensätze erweist sich als tolerierbar. Zusammenfassend werden die Variationen in der folgenden Auflistung zusammengefasst:

a) Reproduzierbarkeit der Kundenstruktur: keine Variation
b) Reproduzierbarkeit der Auftragslisten und Abgleich zur Vorgabe:
   - Variation beim Vergleich von mehreren Auftragslisten: unter 9 %
   - Variation beim Vergleich zum Vorgabewert: unter 2,9 %
c) Abgleich der synthetischen mit realen Auftragslisten: Variation unter 8,8 %

Es ist eine gewisse Variation erforderlich, da die Stückgutlogistik nicht oder gering prognostizierbar und somit unberechenbar ist. Die Gründe hierfür sind die Vielfalt der Fracht (wechselnde Gewichte, Formen und Volumen), unregelmäßige Versandmuster (wechselnde Eilbedürftigkeit und Mengen), die Verkehrsbedingungen (entstehende Verzögerungen), saisonale Schwankungen und die täglich wechselnden Kundenadressen. Folglich ist das Ergebnis der Auftragserzeugung erfolgreich validiert, verifiziert und reproduzierbar. Es wird die Freigabe für den nächsten Schritt der Methodik, der Tourenplanung, erteilt.

Abschließend wird die Entwicklung der Auftragserzeugung im Folgenden zusammengefasst und die Forschungsfrage F2.2 beantwortet.

> F2.2: Wie werden synthetische Stückgutaufträge, zusammengefasst in Auftragslisten, für einen Großraum auf Grundlage von öffentlichen Daten und einer geringen Menge an realen Daten von Speditionen erzeugt?

Das Anwendungssystem Auftragserzeugung ist ein Programm zur Generierung von synthetischen Auftragslisten mit Stückgutaufträgen für eine Anzahl von frei wählbaren Speditionen und einen beliebigen Zeitraum innerhalb des vorgegebenen Untersuchungsjahrs. Die Auftragslisten können für eine beliebige Anzahl an Speditionen auf der Basis von öffentlichen Daten und einer geringen Menge an realen Daten von Speditionen erstellt werden. Im Anwendungsbeispiel Stuttgart werden mithilfe von realen Daten zweier Speditionen synthetische Datensätze für 36 Speditionen erzeugt. Die Auftragslisten entsprechen den realen Daten und den Anforderungen für die Durchführung der Tourenplanung. Zur Initialisierung wird der geografische Großraum in Zellen eingeteilt, wodurch ein Raster entsteht. Dieses Raster ist die Kundenstruktur und jede Zelle erhält durch das Modul *Erzeugung der Kundenstruktur* eine Nachfrage nach Stückgutzustellungen/-abholungen (z. B. durch Privat- oder Gewerbekunden). Anschließend wird mit dem Modul *Auftragsgenerierung* zur Erstellung eines Auftrags die Nachfragerzelle und Adresse gewählt und die Auftragseigenschaften hinzugefügt. Dies wird wiederholt, bis das Auftragsvolumen erreicht ist. Das Ergebnis zeigt eine gewisse Variation in den Auftragslisten, was für die geringe Prognostizierbarkeit von Stückgut erforderlich ist. Die Validierung ist somit erfolgreich.

5.8 Übertragbarkeit

Alle Daten und die in der Datenintegration entstehende Kundenstruktur sind austauschbar, weshalb eine Übertragbarkeit auf andere Zeiträume, Logistiksegmente und Großräume ermöglicht wird. Der Zeitraum ist abhängig von der Datenverfügbarkeit. Die Übertragbarkeit gilt als Anforderung der Entwicklung, um der Forschungsfrage F2.3 nachzukommen.

> F2.3: Wie wird die Methodik auf ein anderes Logistiksegment oder einen anderen Großraum übertragen?

Als Datengrundlagen dienen öffentliche Daten, die frei verfügbar sind oder auf Beantragung durch Bundes-, Landes- und kommunale Behörden zur Verfügung gestellt werden, und realen Auftragsdaten von Speditionen. Für den Anwendungsfall Stuttgart werden Datensätze von zwei Speditionen verwendet. In Abbildung 5.19 sind die Daten aufgezeigt, welche beim Wechsel des Logistiksegments (blauer Punkt) und/oder geografischen Großraums (grauer Punkt) ausgetauscht werden müssen.

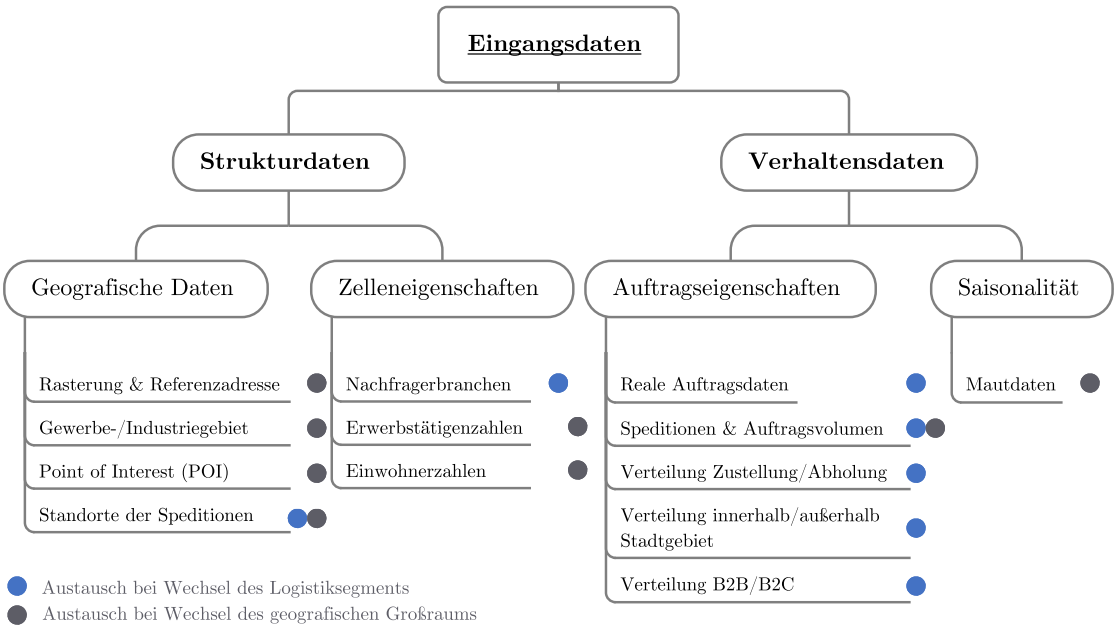


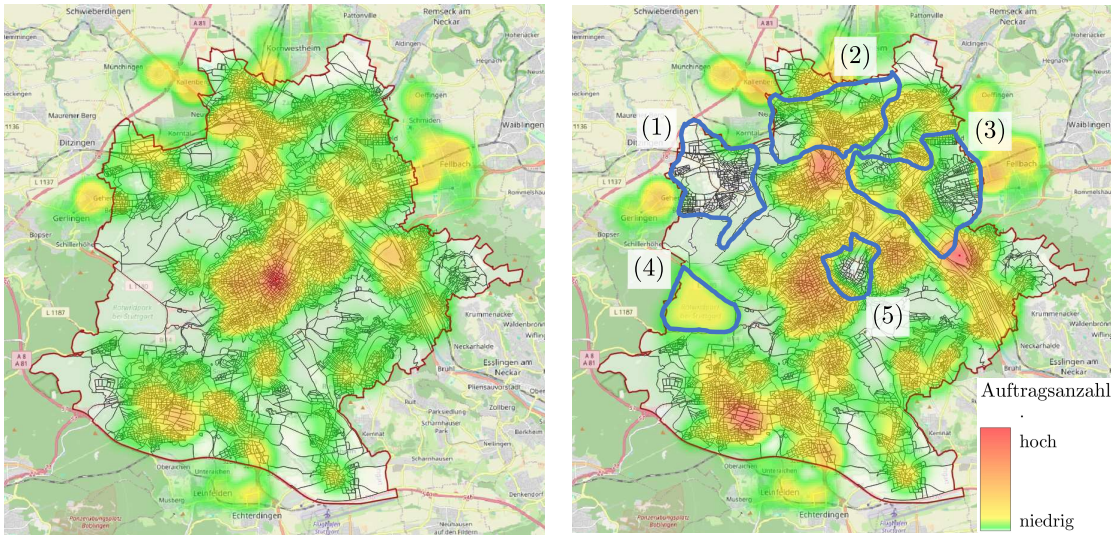
Abbildung 5.19: Datenaustausch bei Wechsel des Logistiksegments und/oder geografischen Großraums

Zur **Änderung des Logistiksegments** (Übersicht der Segmente siehe Abbildung 2.2) sind vorwiegend Auftragseigenschaften auszutauschen. Dies resultiert durch andere Güter, Kunden sowie Speditionen. Folglich sind die realen Auftragsdaten, das Auftragsvolumen der neu zugeordneten Speditionen und die Verteilungen (Abholung/Zustellung, innerhalb/außerhalb, B2B/B2C) zu wechseln. Zusätzlich ist der Tausch der Speditionsstandorte sowie der Nachfragerbranchen und deren prozentuale Verteilung notwendig. Die Verteilung der Nachfragerbranchen für das jeweilige Segment ist aus der *TOP100 der Logistik* [Pfl+20a] zu entnehmen.
Beim **Wechsel des geografischen Großraums** ist vorrangig der Austausch von Strukturdaten erforderlich. Dies ist im Vergleich zum Wechsel des Segments aufwendiger, da eine neue Kundenstruktur erzeugt werden muss und somit die geografischen Daten neu angelegt werden müssen. Hierfür wird ein neues, an den Großraum angepasstes Raster mit den jeweiligen Referenzadressen gebildet. Das Vorgehen ist in Kapitel 5.3.1 beschrieben. Den entstehenden Zellen werden die Eigenschaft Gewerbe-/Industriegebiete und die Anzahl der POI hinterlegt. Die Zuordnung der Erwerbstätigen- und Einwohnerzahlen pro Zelle zur Erzeugung einer Nachfrage ist ebenfalls notwendig. Des Weiteren ändern sich die Speditionen, weshalb deren Standorte und Auftragsvolumen ausgetauscht werden müssen. Für einen anderen geografischen Großraum gelten ebenfalls neue Saisonalitäts- bzw. Mautdaten, weshalb der Austausch empfohlen wird. Mit der Auswahl der Mautabschnitte mit den Haupteinfahrten von LKW kann die Anzahl der Abschnittsbefahrungen über das BALM angefordert werden. Damit kann der Saisonalitätsindex pro Tag neu bestimmt werden.
Aufgrund des zeitlichen Bezugs der Daten auf ein Jahr (hier: 2022) wird somit der Untersuchungszeitraum auf das Jahr begrenzt. Es besteht die Möglichkeit, die **Untersuchung**

in einem anderen Zeitraum bzw. Jahr durchzuführen. Hierfür muss die Verfügbarkeit von allen Struktur- und Verhaltensdaten überprüft werden. Liegen Daten für diesen Zeitraum vor, ist ein Austausch vorzunehmen. Bei einer Nichtverfügbarkeit sind die bisherigen Daten oder Annahmen zu verwenden.
Mit jeder Änderung der Strukturdaten ist eine neue Erstellung der Kundenstruktur erforderlich. Anschließend kann die Auftragsgenerierung durchgeführt werden.
Das Anwendungssystem Auftragserzeugung wird auf die Übertragbarkeit und somit auf das Verhalten des Programms analysiert. Zur Untersuchung des Wechsels eines Großraums wird die Rasterung des Stadtgebiets Stuttgart beibehalten, da eine Neuanlage für ein anderes Gebiet aufgrund der Datenbeschaffung im Rahmen dieser Arbeit zu aufwendig ist. Es werden hierfür folgende Daten deutlich verändert und die Auftragslisten analysiert.

- Industrie-/Gewerbegebiete
- POI
- Erwerbstätigenzahlen
- Einwohnerzahlen

Das Ergebnis wird in der Heatmap von Abbildung 5.20 dargestellt. In den Bezirken Weilimdorf (1) und Mitte (5) entstehen im Vergleich zu dem zuvor verwendeten Datensatz zum Stadtgebiet Stuttgart keine Aufträge. Es wird die komplette B2C- und B2B-Aktivität in diesen Gebieten entfernt, indem alle Gewerbegebiete, POI, Erwerbstätigen- und Ein-



(a) mit Datensätzen zum Stadtgebiet Stuttgart (b) mit geänderten Datensätzen zum Stadtgebiet Stuttgart

Abbildung 5.20: Verteilung der Aufträge und deren Änderung durch den Austausch der Daten von Gewerbe-/Industriegebiet, POI, Einwohner- und Erwerbstätigenzahlen
(eigene Darstellung; Geodaten: © OSM (CC-BY-SA 2.0), © Landeshauptstadt Stuttgart, Stadtmessungsamt & Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme (GIS-AG))

wohnerzahlen verändert bzw. auf null gesetzt werden. In Zuffenhausen (2) wird die B2B-Aktivität (Gewerbegebiete, POI und Erwerbstätigenzahlen) und Bad Cannstatt (3) die B2C-Aktivität (Einwohnerzahlen) entfernt. In der Heatmap wird ersichtlich, dass in Zuffenhausen in den Gewerbegebieten (z. B. bei Porsche) keine bzw. kaum Aufträge generiert werden. Teilweise sind dort auch Wohnhäuser, weshalb Aufträge in Gewerbegebieten durch die B2C-Aktivität entstehen. In Bad Cannstatt gibt es Gebiete ohne Aufträge in Wohngebieten. Infolgedessen hat sich die Auftragsanzahl in diesen beiden Gebieten um ca. 40 % reduziert. Dies ist abhängig von der jeweiligen Aktivität. In einem Waldgebiet im Westen von Stuttgart (4) wird die Einwohnerzahl auf 20.000 gesetzt. Das vorher nicht frequentierte Gebiet weist eine gleichmäßige Aufteilung an Aufträgen auf. Die gleichmäßige Verteilung auf die Zellen entsteht durch den sehr großflächigen Baublock. In stark bewohnten Gebieten sind die Baublöcke normalerweise kleiner angelegt und somit entsteht eine heterogene Verteilung (siehe Abbildung 5.20a).
Mit diesen Ergebnissen wird nachgewiesen, dass mit der Auftragserzeugung ein Wechsel auf einen anderen geografischen Großraum erfolgen kann. Ebenso bestätigt es die Untersuchung der Übertragbarkeit auf ein anderes Logistiksegment, da hier vorrangig nur die Auftragseigenschaften ausgetauscht werden müssen.

6 Tourenplanung

Der Begriff Tourenplanung ist ein Synonym zu Tourenbildung. Tourenbildung findet häufig im Kontext der Verkehrsmodelle Gebrauch. Die Tourenplanung ist in der Logistik verbreiteter. Allgemein haben die Bildung sowie Planung das Ziel, die vorhandenen Lieferaufträge effizient mit einem Fuhrpark zu koordinieren, um eine vordefinierte Zielsetzung zu erreichen [Zie88, S. 11; Arn+08, S. 49; FK18, S. 72; Las23, S. 157]. Dies kann beispielsweise die Minimierung der Gesamtfahrstrecke sein. Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen zu diesem Thema beschrieben und anschließend das Vorgehen zur Tourenbildung der Methodik erläutert. Hierzu wird die Tourenplanungssoftware PTV Route Optimiser ST (RO-ST) der PTV Logistics GmbH verwendet, welches auf den in den Grundlagen vorgestellten Problemen und Verfahren basiert. Bei der Nutzung anderer Software kann das Vorgehen abweichen. Das Ziel ist die Beschreibung der Vorgehensweise des Schritts Tourenbildung der Methodik.

6.1 Grundlagen der Tourenplanung

Die Grundaufgabe der Tourenplanung ist die Verteilung vorgegebener Lieferaufträge auf die Fahrzeuge eines Fuhrparks unter Beachtung aller Restriktionen (z. B. zeitliche Vorgaben). Neben der Minimierung der Gesamtfahrstrecke gibt es weitere Zielsetzungen, wie z. B. die Minimierung der variablen Kosten, der Fahrzeit oder der Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge. Jedes einzusetzende Fahrzeug erfordert die Festlegung einer Tour mit einer definierten Anzahl auszuführender Aufträge und deren optimale Reihenfolge. Die Herausforderung liegt dabei in der Bestimmung der optimalen Reihenfolge der Aufträge innerhalb jeder Tour. Es resultiert ein knoten- oder kantenorientiertes Rundreiseproblem bzw. Travelling Salesman Problem[32]. Tourenplanungsprobleme erscheinen beim Transport von Menschen und Gütern (knotenorientiert; Einzelkundenversorgung) sowie bei der Durchführung von Straßenreinigung oder Winterdienstfahrten (kantenorientiert; Versorgung ganzer Straßenzüge). Die vorliegende Arbeit fokussiert die knotenorientierten Rundreiseprobleme, da die Stückgutlogistik bei Einzelkunden Ware zustellt oder abholt. [Las23, S. 157]

Das Rundreiseproblem bietet lediglich eine begrenzte Übertragbarkeit auf die realen Anforderungen der Tourenplanung, weshalb eine Erweiterung der Problemstellung der Tourenplanung nötig ist [MV14, S. 276]. In der Praxis hat sich hierfür vorwiegend das Standardproblem der Tourenplanung mit dem heuristischen Eröffnungsverfahren *Savings-Verfahren* durchgesetzt, welches im Folgenden näher erläutert wird.

[32] Das Rundreiseproblem ist ein logistisches Optimierungsproblem zur effizienten Planung einer geschlossenen Tour für eine Gruppe von Zielpunkten oder Kunden unter Berücksichtigung von Entfernungen, Reihenfolgen und Einschränkungen [Las23, S. 109].

Das Standardproblem der Tourenplanung

Das Standardproblem der Tourenplanung (kapazitätsbeschränkt; Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP) entsteht durch die Belieferung von mehreren definierten Kunden von einem Depot. Die vorliegenden Entfernungen zwischen den Kunden sowie zwischen dem Depot und den Kunden sind bekannt und richtungsunabhängig (symmetrische Entfernungen). Zur Erfüllung der Aufgabe stehen eine variable Anzahl identischer Fahrzeuge mit der gleichen Kapazität zur Verfügung. Diese Fahrzeuge starten und enden ihre Touren am Depot, wobei jedes Fahrzeug höchstens eine Tour realisieren kann. Die Nachfragemengen der Kunden sind bekannt und müssen vollständig von einem Fahrzeug geliefert werden. Eine Tour wird als eine geordnete Menge von Kunden definiert, die auf einer Fahrt abgewickelt wird. Sie beginnt und endet am Depot. Die Anordnung der Kunden in den Touren resultiert aus der vorgegebenen Belieferungsfolge. Das Resultat dieser Tourenplanung, repräsentiert durch den Tourenplan, umfasst die Menge aller notwendigen Touren zur Abdeckung der gesamten Nachfrage. [FK18, S. 83]
Eine Optimierung der Tourenpläne wird durch folgende Zielsetzungen erreicht [MV14, S. 277; Las23, S. 158]:

- Minimale Gesamtlänge
- Minimale Fahrzeit
- Minimale Anzahl der Touren
- Gleichmäßige Auslastung der Fahrzeuge
- Minimale variable Kosten

Alle Ziele bis auf die Minimierung der variablen Kosten wirken sich auf die Elektrifizierung der Stückgutverkehrs aus, weshalb diese priorisiert werden.

Das Problem der Tourenplanung wird in zwei Teilprobleme, das Zuordnungsproblem und das Reihenfolgeproblem, aufgeteilt. Beim Zuordnungsproblem wird jedem Kunden genau eine Tour zugewiesen. Das Reihenfolgeproblem legt die optimale Reihenfolge der zu bedienenden Kunden in einer Tour fest. Mit der bereits genannten Zielsetzung weist das Reihenfolgeproblem ein Rundreiseproblem auf. [Las23, S. 159]
Zur Lösung dieser Teilprobleme werden vorwiegend heuristische Lösungsverfahren verwendet. In der Praxis wird am häufigsten das Savings-Verfahren genutzt. Es dient als Basis für die meisten Tourenplanungssoftwares [Gie94, S. 26] und somit für den RO-ST. Exakte Lösungsverfahren sind sehr komplex, berechnen nur kleine Problemgrößen und benötigen hohe Rechenzeiten. Somit sind sie lediglich vereinzelt in der Literatur und Praxis vertreten. [Las23, S. 166, 167]
Das Savings-Verfahren wird als Parallelverfahren betrachtet, da sowohl die Zuordnung der Kunden auf die Touren als auch die Festlegung der Reihenfolge simultan ablaufen. Zur Lösung wird eine symmetrische Entfernungsmatrix vorausgesetzt. Zu Beginn bekommt jeder Kunde eine Einzeltour (von Depot zum Kunden und wieder zurück) zugeordnet, wodurch Pendeltouren entstehen (Anfangslösung). Die Tourenanzahl stimmt mit der

Kundenanzahl überein. Im Verlauf des Verfahrens wird die oft ungünstige Anfangslösung iterativ verbessert, indem zwei Touren schrittweise zusammengeführt werden. Dabei werden die Kapazitäts- als auch die Zeitrestriktionen berücksichtigt. Die Zusammenlegung von Touren wird vorgenommen, wenn die daraus resultierende Entfernung zwischen dem ersten und dem letzten Kunden kürzer ist als die Summe der Abstände der beiden Kunden zum Depot. Dies wird über den Savingswert beurteilt. Der Savingswert steigt, je geringer die Entfernung zwischen den Kunden ist und je größer ihre Entfernung vom Depot ist. Bei kombinierten Touren darf in weiteren Iterationsschritten die Reihenfolge der Kunden nicht geändert werden. Um die maximale Ersparnis in jeder Iteration zu erzielen, wird die Auswahl der zu kombinierenden Touren basierend auf dem höchsten Savingswert (≥ 0) getroffen. [MV14, S. 284–287; Las23, S. 169]
Aus der Praxis resultieren weitere Anforderungen, wodurch Tourenplanungsprobleme komplizierter werden. Das Verfahren ist sehr anpassungsfähig gegenüber Erweiterungen. Daher kann das Verfahren um folgende Probleme ergänzt werden, welche vor allem in den gängigen Tourenplanungssoftwares und somit auch im RO-ST vertreten sind [Las23, S. 163–166]:

- Heterogener Fuhrpark
- Mehrfacheinsatz von Fahrzeugen
- Zeitfenster
- Mehrdepot Tourenplanungsprobleme (Kundenbelieferung durch mehrere Depots)
- Kombinierte Abhol- und Auslieferтouren
- Offene Touren (Start- und Endpunkt der Tour nicht identisch)

Für eine detaillierte Beschreibung und weitere Lösungsverfahren, wie die lokalen Verbesserungsverfahren, wird auf die Literatur [MV14; Tem18; Las23] verwiesen.

6.2 Rechnergestützte Tourenplanung

In der Logistik bzw. bei Speditionen werden vorwiegend kommerzielle Systeme zur Tourenplanung verwendet. Mithilfe dieser Softwarelösungen ist es möglich, verschiedene Planungsalternativen zu erstellen, um eine optimale Tour auszuwählen [Las23, S. 189]. Mittels Schnittstellen erfolgt der Austausch von Daten mit anderen Systemen innerhalb der Unternehmens-IT. Externe Computersysteme werden somit angebunden, wie z. B. das Enterprise Resource Planning (ERP), Customer Relationship Management (CRM), Warehouse Management System (WMS), Transportation Management System (TMS) und die Telematik. In betrieblichen Abläufen werden oft mobile Komponenten integriert, die die Interaktion mit der fahrenden Person verbessern und die Navigation der Fahrzeuge unterstützen. Klassische Bausteine einer Tourenplanungssoftware sind [FK18, S. 93, 94]:

- Schnittstellen zum automatischen Import und Export der Daten
- Grafische Bedienoberfläche, wie digitalisierte Straßenkarte, tabellarische und dia-

grammgestützte Darstellungen
- Planungsfunktionen (automatisch, interaktiv und manuell)
- Restriktionen: Berücksichtigung aller wichtigen praktischen Nebenbedingungen (siehe Abschnitt 6.1)
- Ergebnisausgabe als Statistiken, Drucklisten und Archivierung

Die rechnergestützte Tourenplanung basiert auf einer umfassenden Datengrundlage, den Informationen über Kunden bzw. Aufträge, Fahrzeuge, das Straßennetz und geltende Restriktionen. Die genaue Position innerhalb des Straßennetzes wird mittels der Lieferadresse eines Kunden ermittelt und automatisch geocodiert. Bei Bedarf werden unvollständige oder fehlerhaft geschriebene Adressen mit dem Orts- und Straßendatenbanken des Systems abgeglichen. Hierzu werden digitale Straßenkarten von bekannten Anbietern, wie z. B. TomTom eingesetzt. Zusätzlich sind Informationen über die Auftragsmenge, die voraussichtliche Dauer der Auftragsdurchführung sowie mögliche Restriktionen, wie Zeitfenster oder Einschränkungen hinsichtlich der Zusammenladung, erforderlich. Die Mengenangaben müssen die Berechnung der benötigten Fahrzeugkapazität ermöglichen. Neben Gewichtsangaben sind vor allem Volumenkennzahlen, wie Paletten, Stellplätze und Kubikmeter, äußerst hilfreich. Allerdings fehlt häufig die Bereitstellung durch den Kunden. [FK18, S. 94]
Bei der Planung sind alle zeitlichen Angaben lediglich Schätzungen. In der Praxis beeinflusst somit ihre Genauigkeit die Umsetzbarkeit der Planungsergebnisse. Besonders bei den vereinbarten Zeitfenstern zur Auftragsausführung muss zwischen den vereinbarten Zeiten mit den Kunden und den tatsächlich akzeptierten Zeiten durch die Kunden unterschieden werden. Fahrzeiten können auf Basis digitalisierter Straßenkarten unter Berücksichtigung zufälliger Einflüsse, wie Staus und Unfälle, relativ präzise prognostiziert werden. Die Unsicherheit entsteht bei den Standzeiten, welche branchenabhängig und je nach Art der Güter (Gewicht, Größe etc.) variiert. [FK18, S. 94]
Die Komplexität des Programmes (Optimierungsprobleme) wird durch eine Bedienoberfläche mit intuitiver Bedienbarkeit und individuellen Anpassungsfunktionen vereinfacht. Zur Darstellung der Daten, besonders der Ergebnisse, haben sich Karten und Listenformen durchgesetzt (siehe Abbildung 6.1). [FK18, S. 94]
Die Tourenplanung verläuft im Hintergrund. Dazu werden vorwiegend die klassischen heuristischen Verfahren (siehe Kapitel 6.1) und in Zukunft moderne Metaheuristiken sowie künstliche Intelligenz eingesetzt [Las23, S. 189]. Die dynamische Tourenplanung ist aufgrund der Komplexität nur bei einer geringen Anzahl von Anbietern verfügbar [Las23, S. 189].

Neben den allgemeinen und bereits genannten Vorteilen durch die Tourenplanung kann sich durch die rechnergestützte Planung der Zeitaufwand für Planungsaktivitäten verringern. Zusätzlich ergibt sich eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch verbesserte Kontrollen des Disponenten und die Echtzeit-Interaktion. Ebenso steigert sich die Qualität des Kundenservices durch die Mitteilung des Bearbeitungsstands der Aufträge an die

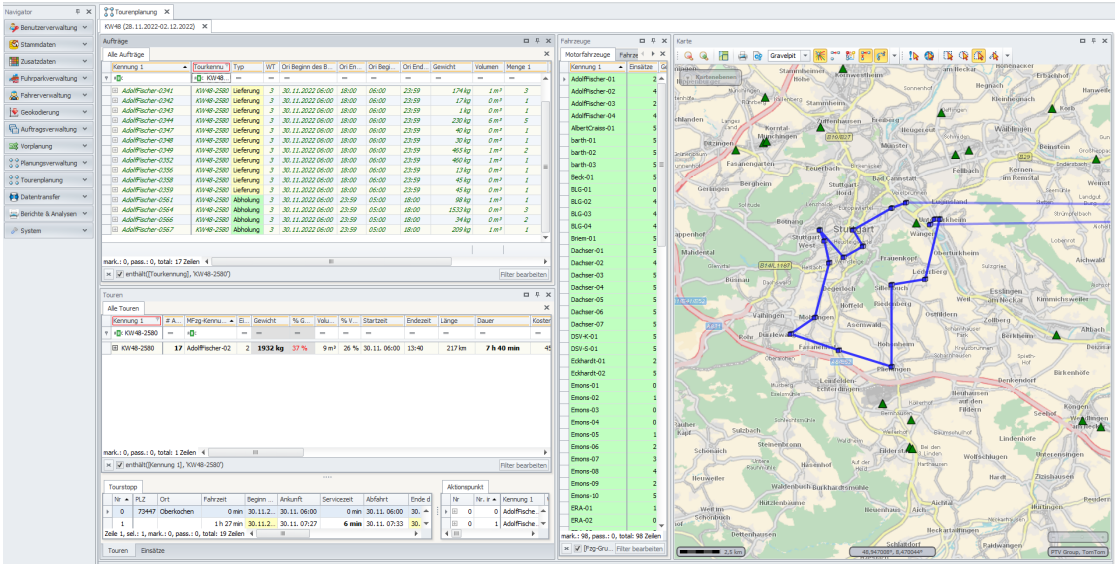


Abbildung 6.1: Oberfläche der Tourenplanungssoftware PTV Route Optimiser ST

Kunden. Nachteilig ist, dass die Standardsoftware nicht ausreichend mit den spezifischen Anforderungen der Anwender vereinbar ist. Somit entstehen hohe Kosten und Aufwände für Installation, Einrichtung sowie Schulungen und dem Customizing der Software. [Las23, S. 189]
Klassische Tourenplanungssysteme sind im Folgenden aufgelistet.

- PTV Route Optimiser ST von PTV Logistics GmbH
- TransIT von GTS Systems & Consulting GmbH
- TRAMPAS von Städtler Logistik GmbH
- Greenplan von Greenplan GmbH
- Tourenplanung von AIS alfaplan GmbH
- Tourenplanung von Opheo Solutions GmbH

PTV Route Optimiser ST

Der RO-ST[33] ist eine automatische Tourenplanungssoftware der PTV Logistics GmbH, welche zur PTV Group gehört. Die PTV Group ist Marktführer für Mobilitäts- und Logistiksoftware. Die Software ist sehr individuell gestaltet und anpassbar an Prozessanforderungen, an die Systemlandschaft sowie an komplexe Planungsaufgaben [PTV23b, S. 8]. Aufgrund dieser Eigenschaften wird für die vorliegende Arbeit diese Software ausgewählt. Zur Geokodierung, Distanzmatrixberechnung und für das Routing greift die Software auf die Standardkarten von TomTom zurück [PTV23b, S. 8]. Als Schnittstellen dienen für den Import von Auftragsdaten, Fahrzeugdaten und Depotinformationen sowie für den Export von Tourenplänen das Excel-Format und die PTV Transfer-Datendank. Zusätzlich ist eine SAP-Schnittstelle möglich [PTV23b, S. 8].

[33] Zur Einfachheit wird im Rahmen der Arbeit der Softwarename abgekürzt.

6.3 Vorgehen zur Tourenplanung

Nach der erfolgreichen Generierung der synthetischen Auftragsdaten werden zur Durchführung der Methodik für jede Spedition die Tourenpläne mit einer Tourenplanungssoftware (hier: RO-ST) erstellt. Basierend auf den Bausteinen und dem klassischen Vorgehen der softwaregestützten Tourenplanung wird in dieser Arbeit nach dem Schema in Abbildung 6.2 verfahren. Zuerst wird über die Excel-Schnittstelle die Datengrundlage erzeugt. Auftragsdaten, Fahrzeugdaten (Informationen über den Fuhrpark) und Depotinformationen je Spedition werden importiert. Mithilfe dieser Grundlage, den Planungsanforderungen und Restriktionen findet die Tourenbildung statt. Anschließend werden über die Excel-Schnittstelle die Tourenpläne der jeweiligen Speditionen exportiert.

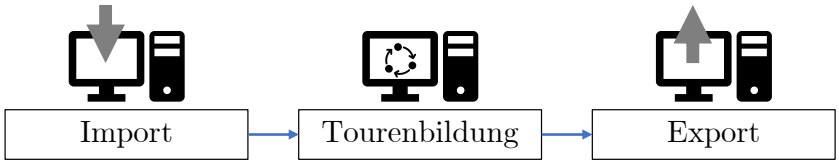


Abbildung 6.2: Vorgehen in der Tourenbildung

Das Vorgehen kann bei anderer Tourenplanungssoftware abweichen. Beispielsweise bietet das Unternehmen Greenplan GmbH aufgrund des Softwarenutzungsmodell Software-as-a-Service eine Tourenplanung als komplette Dienstleistung an.

6.3.1 Import der Daten

Vor der Planung findet eine Datenaufbereitung und die Anlage der Stammdaten statt. Diese Vorarbeiten sind bei der Nutzung einer Softwarelösung zur Planung erforderlich. Der einfache Import von den Ergebnisdaten der Auftragserzeugung ist nicht ausreichend, da sie hinsichtlich der Planungsinformationen unvollständig oder inkonsistent sind. Teilweise müssen die Daten ergänzt werden. Bei Speditionen sind die Daten üblicherweise im vorgelagerten System, beispielsweise einem ERP-System, gespeichert und müssen über eine Schnittstelle integriert werden. Zur Anwendung der Methodik werden diese Daten über die Excel-Schnittstelle direkt in die Tourenplanungssoftware eingebunden. Dafür werden beim RO-ST die folgenden Daten nacheinander importiert:

1. Depotdaten
2. Fahrzeugdaten
3. Auftragsdaten

Diese Reihenfolge ist zwingend einzuhalten. Bei Nicht-Einhaltung wird der Import aufgrund von Abhängigkeiten fehlerhaft, da beispielsweise Fahrzeuge und Aufträge meist einem Depot zugeordnet sind. Bei Änderung der Reihenfolge kann diese Zuordnung nicht stattfinden.

1. Depot-Import

Die Informationen zu den Depots werden in eine durch PTV vorliegende Excel-Datei *DepotImport* eingetragen und anschließend über die Datentransfer-Funktion importiert. Die für die Auftragserzeugung erstellte Liste *Standorte von Speditionen* aus Abschnitt 5.3.1 wird hierfür herangezogen. Folgende Pflichtangaben sind in der Datei einzutragen:

- Depot-ID
  Zur Zuordnung der Fahrzeuge und Aufträge zum Depot muss die gleiche ID je Depot bzw. Spedition in den Auftragsdaten und Fahrzeugdaten zwangsläufig enthalten sein.
- Adresse
  Die Adressdaten können in Straße, PLZ und Stadt oder in Geokoordinaten angegeben werden. Die Software verarbeitet beide Adressformate.
- Öffnungszeiten
  Als Restriktionen sind die Öffnungszeiten ausreichend. Hierzu sind die Startzeit, Endzeit und Öffnungstage in der Woche anzugeben. Für das Beispiel Stuttgart gelten für alle Depots die Öffnungszeiten von 05:00 Uhr bis 18:00 Uhr an den Tagen montags bis freitags.

2. Fahrzeug-Import

Jedem Depot bzw. Standort der jeweiligen Spedition werden für die Zustellung und Abholung von Gütern unterschiedliche Fahrzeuge zugewiesen, die durch spezifische LKW-Typen und Betriebszeiten charakterisiert sind. Daraus ergibt sich der Fuhrpark des Unternehmens. Im Logistiksegment Stückgut werden vorwiegend Fahrzeuge mit den Gewichtsklassen in Tabelle 6.1 verwendet. Jedem Gewichtsbereich wird stellvertretend ein Fahrzeugtyp zugeordnet. In Tabelle 6.1 wird neben der Gewichtsklasse und dem Fahrzeugtyp das dazugehörige Gesamtgewicht, die Zuladung und das Volumen aufgelistet.

Tabelle 6.1: Fahrzeug-Gewichtsklassen mit stellvertretenden Fahrzeugen

Gewichtsklasse	**Fahrzeugtyp**	**Gesamtgewicht**	**Zuladung**	**Volumen**
bis 3,5 t	Transporter	3,5 t	1.250 kg	14,4 m^3
ab 3,5 bis 7,5 t	7,5 t-LKW	7,5 t	2.050 kg	35,87 m^3
ab 7,5 bis 12 t	12 t-LKW	12 t	5.200 kg	36,96 m^3
ab 12 bis 18 t	18 t-LKW	18 t	10.000 kg	42,63 m^3

Aufgrund der Datenverfügbarkeit wird auf Basis der Telefonumfrage (siehe Abschnitt 5.3.3) und dem daraus resultierenden Auftragsvolumen eine Anzahl an Fahrzeugtypen jeder Spedition zugeordnet. Vorwiegend besitzen die Unternehmen 7,5 t- und 12 t-LKW. Bei großen Auftragsvolumen werden Transporter und 18 t-LKW dem Fuhrpark hinzugefügt. Diese Verteilung basiert auf Fuhrparkdatensätzen von zwei Speditionen. Der Fuhrpark aller Speditionen und deren Zuordnung durch die Depot-ID wird in der durch PTV vorliegenden Excel-Datei *RessourceImport* eingetragen. Folgende Pflichtangaben sind notwendig:

- Fahrzeug-ID
- Routing Profil (vorgegeben durch RO-ST)
- Zuladungsgewicht
- Volumen
- Ladeplätze
- Depot-ID als Start- und Zielort
- allgemeine Fahrzeugverfügbarkeit
- Verfügbarkeit pro Wochentag

Zusätzlich können weitere Restriktionen zum Allgemeinen (z. B. Kühltransporter oder Gabelstapler an Bord), zur Kapazität (z. B. die maximale Ladehöhe) oder zur Tour (z. B. die maximale Anzahl an Stopps) angegeben werden. Ebenso ist es möglich, Daten zu den fahrenden Personen (z. B. Arbeitszeiten, Qualifikationen und Gebiete) im RO-ST einzutragen. Als Arbeitszeit wird für jeden Fahrer maximal zehn Stunden exklusive Pausenzeit festgelegt.

3. Auftrags-Import

Für den Auftragsimport werden die Auftragslisten der Auftragserzeugung benötigt. Die jeweiligen Angaben in diesen Listen werden vollständig in die durch PTV vorgegebene Excel-Datei *OrderImport* übertragen. Zur Übersichtlichkeit erhält jede Spedition eine eigene OrderImport-Datei. Die Nutzung einer einzigen Excel-Datei für alle Speditionen ist ebenfalls möglich. Mit dem Übertrag bekommt jeder Auftrag eine eigene ID und die jeweilige Depot-ID als Start- und Zielort (abhängig vom Auftragstyp) der Spedition zugewiesen. Folgende Daten werden importiert:

- Auftrags-ID
- Adresse in Geo-Koordinaten
- Depot-ID
- Datum
- Auftragstyp: Zustellung/Abholung
- Gewicht, Volumen, Packstückanzahl
- Servicezeitklasse
- Zeitfenster

6.3.2 Tourenbildung

Nach dem Datenimport findet die automatische Geocodierung durch den RO-ST statt. Als Geokodierung wird die lagerichtige Zuweisung einer postalischen Adresse zu einem Punkt in der Karte definiert. Dies erfolgt nur bei den Depotadressen, da diese ohne Geokoordinaten importiert werden. Falls die automatische Zuordnung nicht möglich ist, kann eine manuelle Nachgeokodierung durch den Nutzer stattfinden. Abschließend bietet der RO-ST die Prüfung der Geokodierungsqualität an.

Der nächste Schritt ist die Vorplanung. In dieser Phase werden Aufträge gemäß festgelegter Vorgaben entweder zu konsolidierten Sammelaufträgen gebündelt oder in Teilaufträge aufgespalten (z. B. durch Wegesplits oder Mengensplits). Zudem wird eine Zuordnung zu unterschiedlichen Aufgabenbereichen oder Depots, entsprechend den vorher definierten Regelvorgaben, ermöglicht. Für die Methodik ist nur die Aufteilung der Aufträge relevant. Es gibt Aufträge, welche aufgrund des hohen Gewichts oder Volumens die Kapazität des LKW überschreiten. Meist sind sie auf mehrere Packstücke aufgeteilt und somit teilbar. Es werden daher in der Vorplanung Regeln zum Splitten des Gewichts und des Volumens erstellt. Ab einem Gewicht von 2400 kg wird der Auftrag in einen Teilauftrag mit 2400 kg und einen mit dem Restgewicht segmentiert. Beim Volumensplit wird der Auftrag ab 35,87 m^3 aufgeteilt. Das angegebene Gewicht und Volumen sind die maximale Kapazität eines 7,5 t-LKW. LKW dieses Typs sind Teil eines Fuhrparks fast jeder Spedition und werden vorwiegend verwendet.
Anschließend findet das Bilden und Optimieren von Touren statt. Hierbei werden folgende Ziele, welche im RO-ST unterschiedlich gewichtet werden können, verfolgt:

- Gesamte Tourfahrzeit optimieren
- Gesamte Tourkilometer optimieren
- Touranzahl optimieren
- Gesamte Einsatzdauer optimieren
- Gesamte Tourdauer optimieren
- Fahrzeuganzahl optimieren
- Unverplante Aufträge einplanen

Das vorrangige Ziel für die Arbeit besteht darin, die Fahrstrecken und -zeiten zu minimieren. Ebenfalls wird im Optimierungsschritt auf die Integration der unverplanten Aufträge geachtet. Im Ergebnis der Tourenplanung müssen alle Aufträge verplant sein. Zur Verfolgung aller Ziele ist es notwendig, die dafür relevanten Grenzwerte anzugeben. Diese und weitere Restriktionen sind im RO-ST die Planungsparameter. Deren Festlegung ist vor dem Start der Planung notwendig. Beispielhafte Parameter werden im Folgenden beschrieben. Zudem ist eine gesamte Auflistung in Anhang F aufgeführt.
Zur Definition der Grenzwerte ist die Angabe der maximalen Tourendauer, Tourenfahrzeit, Tourenlänge, Entfernung vom ersten zum letzten Tourstopp, Entfernung zwischen aufeinanderfolgenden Tourstopps, Anzahl der Stopps pro Tour und Anzahl der Fahrzeugeinsätze erforderlich. Zusätzlich ist festzulegen, welche Kapazitätsrestriktionen zu prüfen sind. Hierzu zählen Gewicht, Volumen, Lademeter und Mengen. Für eine Flexibilität und Schnelligkeit beim Be- und Entladen des Stückguts ist der Anhänger eher als Hindernis zu sehen. Weitere Restriktionen sind die Öffnungszeiten, sofern diese bekannt sind, sowie durch den Auftrag festgelegte Lieferzeiten am Tourstopp. Zur Kontrolle wird die exakte Prüfung (Berücksichtigung der angegebenen Öffnungszeiten) ausgewählt. Alternativ stehen die tolerante (Definition der Öffnungszeiten über Regeln für die Öffnungszeit-Toleranz) oder entfallende Prüfung (ganzer Tag gilt als Öffnungszeit) zur Auswahl. Weitere beispiel-

hafte Zeiteinschränkungen, wofür eine Angabe notwendig ist, sind die Arbeits-, Lenk- und Ruhezeiten des Fahrers. Im regulären Betrieb von Speditionen sind die Einhaltung dieser Zeiten zwingend erforderlich und werden von den gesetzlichen Vorgaben übernommen. Weitere zeitliche Parameter sind z. B. die Servicezeit, die Wendezeit zwischen Touren und die Angabe, ob die Fahrzeuge vorgeladen sind. Die Servicezeit am Tourstopp sowie am Depot errechnet der RO-ST mit der in den Auftragsdaten erhaltene bzw. dem Depot zugeordnete Servicezeitklasse und dem angegebenen Zeitbestandteil, welcher in Tabelle 6.2 aufgelistet ist. Sie resultiert somit aus einem fixen und einem vom Gewicht abhängigen (variablen) Zeitanteil, welcher mit einem Maximalwert begrenzt ist. Der variable Anteil ändert sich mit dem steigenden Auftragsgewicht bzw. der Verlademenge. Dies führt zu folgender linearen Gleichung:

$$Servicezeit(s) = FixerZeitanteil(s) + Veränderungsrate(\frac{s}{kg}) * Verladegewicht(kg) \tag{6.1}$$

Die Veränderungsrate ist die Dauer in Sekunden, die pro Mengeneinheit der gewählten Bezugsmenge (hier: Kilogramm) zur Verladung des Verladegewichts benötigt wird. Die Rate wird mithilfe des Gewichtsbereichs und des maximalen variablen Anteils bestimmt. Die fünfte Servicezeitklasse ist lediglich für Be- und Entladung der LKW am Depot vorgesehen, da diese nicht vorgeladen sind. Die fahrende Person des LKW ist in der Arbeitszeit für diesen Prozess zuständig. Fährt der LKW mehrere Touren am Tag, wird eine Wendezeit von 15 min hinzugerechnet. Diese Zeit dient dem Fahrer zur Ausführung administrativer Aufgaben (wie z. B. Dokumentation, Check-In- und Check-Out-Prozesse) sowie der Pausenzeit. Zur Angabe von realitätsgetreuen Planungsparametern werden diese vor Beginn der Planung mit einer Spedition und den Beratern des Unternehmens PTV abgesprochen und validiert.

Tabelle 6.2: Servicezeitklassen und deren Zeitanteile (Screenshot der Tabelle im RO-ST in Anhang F)

Klasse	**Gewichtsbereich**	**Fixer Zeitanteil**	**Veränderungsrate**	**Maximum**
1	0-31,5 kg	3 min	4 s/kg	5 min
2	31,5-150 kg	6 min	2 s/kg	9 min
3	150-1000 kg	10 min	0,3 s/kg	14 min
4	1000-3000 kg	15 min	0,15 s/kg	20 min
5	Be- und Entladung am Depot	15 min	0,4 s/kg	45 min

Nach der Fixierung der Parameter und unter deren Einhaltung werden alle Aufträge jeweils für eine Spedition und den gewählten Zeitraum verplant. Anschließend findet eine automatische Nach- und Reihenfolgeoptimierung statt. Bei der Nachoptimierung werden die Touren durch den Tausch von Aufträgen zwischen den gebildeten Touren

optimiert. Die Reihenfolge der Aufträge innerhalb der erzeugten Touren wird mit dem Wechsel von Tourstopps verbessert. Hierbei werden alle Wege zwischen den Aufträgen sowie die Depotwege betrachtet. Für ein ideales Planungsergebnis wird im Rahmen der Methodik die Rechenzeit *hoch* eingestellt, da sich die Ergebnisse mit der Rechenzeit verbessern. Der RO-ST ermöglicht die Einstellung von einer Minute bis ins Unendliche. Bei niedrigen Rechenzeiten entstehen jedoch Qualitätsverluste. Im alltäglichen Gebrauch von Speditionen werden Qualitätsverluste hingenommen, um eine lange Planungszeit für Touren zu vermeiden.
Gelegentlich wird bei manchen Speditionen eine geringe Anzahl an Aufträgen nicht verplant. Die Gründe hierfür sind folgende Restriktionsverletzungen:

- Nichteinhaltung der Öffnungszeiten
- Überschneidung der Einsätze
- Überschreitung des Einsatzintervalls
- Überschreitung der Fahrzeugkapazität (z. B. Volumen und Zuladungsgewicht)
- Überschreitung der Grenzwerte der Planungsparameter
- Missachtung der Lenk- und Ruhezeiten bzw. Arbeitszeiten

Über verschiedene Maßnahmen wird der Rest der Aufträge verplant. Beispielsweise entsteht die Restriktionsverletzung *Überschreitung der Fahrzeugkapazität* häufig durch Aufträge mit einem Gewicht bzw. Volumen, welches höher als das Zuladungsgewicht bzw. -volumen des Fahrzeugs ist. Mit dem bereits beschriebenen Mengensplit können Restriktionsverletzungen vermieden und die Anzahl von unverplanten Aufträgen verringert werden. Zudem reduziert eine erneute Bildung und Optimierung der Touren der betreffenden Spedition die Anzahl der Touren. Die restlichen unverplanten Aufträge werden manuell oder mit einer erneuten Reihenfolgeoptimierung den Touren hinzugefügt.

6.3.3 Export der Daten

Mit der Verplanung aller Aufträge und folglich der erfolgreichen Durchführung der Tourenplanung entstehen für jede Spedition und für den ausgewählten Zeitraum die Tourenpläne. Neben der Ansicht der Pläne in der Bedienoberfläche bietet der RO-ST die Möglichkeit zum Export. Hierzu gibt es drei Möglichkeiten: Export von ausgewählten Touren mit und ohne Auflistung der Tourenstopps bzw. Aufträgen sowie der Export von Tourenstopps bzw. Aufträgen ohne Angaben zur Gesamttour. Die Varianten werden in Form einer Excel-Tabelle mit einer ausgewählten Tabellen-Konfiguration erstellt. Folgende Tabellenkonfiguration für Touren wird für die Analyse der Elektrifizierung gewählt:

- Tourkennung (laufende Nummer)
- Anzahl der Aufträge pro Tour
- Fahrzeugkennung
- Einsatzanzahl (Anzahl der Touren) des Fahrzeugs im Planungszeitraum

- Gewicht in kg und prozentual zum Zuladungsgewicht
- Volumen in m^3 prozentual zum Zuladungsvolumen
- Zeitangaben: Startzeit, Endzeit, Dauer, Fahrzeit, Pausenzeit, Ruhezeit
- Länge der Tour in km

Bei einem Export mit zusätzlichen Angaben zu den Tourenstopps oder nur von Tourenstopps werden folgende Parametern für die Analyse gesetzt:

- Reihenfolgenummer des Stopps
- Tourkennung (laufende Nummer)
- Stellenname: z. B. Kundenname
- Ankunftszeit
- Abfahrtszeit
- Anzahl der Aufträge pro Kunde
- Gewichtsangaben
- Strecke ab Vorgänger in km
- Zeitangaben: Fahrzeit, Servicezeit, Pausenzeiten am Tourstopp und unterwegs, Zeitfensterbeginn und -ende
- Adressangaben

Diese Tabellenkonfigurationen sind individuell einstellbar. Weitere Parameter, wie z. B. Lademeter, CO_2-Emissionen und verschiedene Zeitangaben, können hinzugefügt werden. Die beiden gezeigten Konfigurationen sind für den Export von ausgewählten Touren mit der Auflistung der Tourenstopps bzw. Aufträge sind für die Methodik zusammengestellt. Hierbei stehen die Parameter für die Berechnung des Energieverbrauchs des Fahrzeugs im Fokus. Im Anhang G ist ein Auszug einer exportierten Tourenliste dargestellt.

6.4 Ergebnis und Validierung der Tourenplanung

Das Ergebnis der Tourenplanung sind die exportierten Tourenpläne im Excelformat. Diese werden einer Validierung unterzogen. Die Validierung der Ergebnisse ist entscheidend, um eine Zielerreichung der Methodik sicherzustellen. Vor der eigentlichen Verwendung der Tourenplanungssoftware für die Methodik werden im RO-ST Touren in einer ausgewählten Woche mit realen Auftragslisten einer Spedition geplant und optimiert. Diese werden mit den von den Speditionen erstellten Tourenplänen (reale Daten) abgeglichen. Mit den anfänglich eingestellten Parametern ergibt sich durch den RO-ST eine deutlich höhere Anzahl an Touren im Vergleich zur Realplanung der Spedition. Im Untersuchungszeitraum von einer Woche bildet der RO-ST eine höhere Anzahl an Touren gegenüber den real durchgeführten Touren. Nach einer Analyse ist dies auf die geringe Zuladung der 7,5 t-LKW (2050 kg; Angabe einer Spedition) zurückzuführen. Die realen Daten weisen Zuladungswerte bis 2400 kg auf, weshalb dies als neue Grenze übernommen wird. Bei den

restlichen Gewichtsklassen stimmt der Wert der Zuladung überein. Nach einem erneuten Durchlauf folgt die gleiche Tourenanzahl mit einer ähnlichen Auftragsanzahl und einem ähnlichen Gesamtgewicht. Lediglich die Reihenfolge der Tour unterscheidet sich, was auf die unterschiedliche Nutzung von Tourenplanungsprogrammen zurückzuführen ist. Da sich durch den Streckenvergleich ähnliche Gesamtfahrleistungen (Länge der einzelnen Touren) ergeben, ist dies vernachlässigbar.
Des Weiteren werden alle Touren je Speditionen mit dem Auftragsvolumen (siehe Kapitel 5.3.3), welches als Vorgabe für die Auftragserzeugung dient, abgeglichen. Zum Vergleich wird das Gesamtauftragsvolumen, die Tourenanzahl und der Mittelwert der Tourenstopps ermittelt. Das Ergebnis ist in der Tabelle im Anhang G dargestellt.
Die jeweilige Gesamtanzahl der Aufträge entspricht dem Ergebnis der Auftragserzeugung. Dies bestätigt die vollständige Verplanung aller Aufträge. Im Vergleich zur Vorgabe (Auftragsvolumen: tägliche Touren und Aufträge pro Tour, siehe Kapitel 5.3.3) unterscheidet sich die Gesamtanzahl, was auf den Saisonalitätsindex zurückzuführen ist.
Bei der Hälfte der Speditionen zeigen sich kaum Abweichungen zur vorgegeben Tourenanzahl und zu den vorgegebenen Tourenstopps. Die Anzahl der Tourenstopps weicht lediglich um einen Stopp ab. Bei der anderen Hälfte der Speditionen ergeben sich Abweichungen von bis zu fünf Touren und bis zu sieben Stopps. Dies ist Großteils auf die Vielfalt der Fracht, besonders auf das unterschiedliche bzw. hohe Gewicht, zurückzuführen. Aufgrund hoher Auftragsgewichte kommt es teilweise zu Touren mit einer niedrigen Anzahl an Stopps und somit zu einer höheren Tourenmenge.
Es ergibt sich insgesamt eine mittlere Abweichung der Tourenanzahl von 19 % und der Tourenstopps von 14 %. Die Variation gilt als tolerierbar bzw. ist erforderlich und resultiert durch die geringe Prognostizierbarkeit der Stückgutlogistik sowie die Nutzung von unterschiedlichen Tourenplanungssoftwares.

7 Analyse und Optimierung der Methodik

Mit der erfolgreichen Tourenplanung erfolgt die Analyse der Elektrifizierbarkeit. Es wird die logistische Elektrifizierungsrate. Abschließend werden in diesem Kapitel Empfehlungen zur logistischen Optimierung vorgestellt. Das Ziel des Kapitels ist die Darstellung der Phasen *Analyse und Optimierung der Elektrifizierbarkeit* der Methodik.

7.1 Analyse der Elektrifizierbarkeit

Nach der Erzeugung aller Tourenpläne werden diese auf die Elektrifizierbarkeit geprüft. Hierzu wird zu jeder Tour der Energiebedarf berechnet und mit der jeweiligen Batteriekapazität der LKW-Größenklasse abgeglichen. Damit wird eine erste Aussage anhand der logistischen Vorgehensweise über die Elektrifizierbarkeit getroffen. Mit der Betrachtung der Ladeinfrastruktur und des Stromnetzes, was Teil des Projekts REALIST ist, wird sich die Elektrifizierungsrate nochmals ändern, da beispielsweise Netzanschlussleistungen möglicherweise nicht ausreichen. Folglich wird in dieser Arbeit die logistische Elektrifizierungsrate bestimmt.
Zur Berechnung der Energiebedarfe gibt es eine geringe Anzahl an kommerziellen und frei verfügbaren Programmen. Von dem Unternehmen PTV wird das Online-Tool EV Truck Route Planner angeboten, das als freie Demo zur Verfügung gestellt wird. Das Tool ist nicht in die Tourenplanungssoftware RO-ST integriert. Es errechnet den Energiebedarf und somit die elektrifizierte Durchführbarkeit einer manuell eingegebenen Tour für einen ausgewählten E-LKW, welcher derzeit auf dem Markt verfügbar ist. Dabei werden Faktoren, wie die Batteriekapazität, das Batteriealter, die Nutzlast und die Wetterbedingungen, einbezogen [PTV23a]. Zur Untersuchung einer Tour müssen Eingaben, wie z. B. Tourstart, Tourstopp und Gewichtsveränderung, manuell durchgeführt werden. Somit können Nutzende lediglich erste Erkenntnisse zur Elektrifizierung ihrer Flotte gewinnen. Eine ganzheitliche Analyse der Elektrifizierbarkeit der Flotte eines Unternehmens ist nicht möglich, weshalb diese Anwendung im Rahmen der Methodik nicht verwendet wird. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit sowie der divergenten Auslegung (Fokus: Untersuchung einer Tour) solcher Berechnungsprogramme wird im Rahmen des Projekts REALIST ein Berechnungsprogramm für die Methodik entwickelt und in dieser Arbeit verwendet. Die Entwicklung ist nicht Bestandteil dieser Arbeit (siehe Abbildung 4.3), weshalb vom Programm lediglich die Funktionsweise und die Einflussfaktoren auf den Energiebedarf beschrieben werden.
Ähnlich wie bei der Auftragserzeugung und Tourenplanung werden Daten auf Basis von Excel-Dateien importiert, berechnet und exportiert. Die erzeugten Tourenpläne werden komplett durch das Programm eingelesen. In den Tourenplänen ist zu jeder Tour die Fahrzeugidentifikation angegeben. Über diese ID werden mithilfe der Importdatei *RessourceImport* der Tourenplanung die jeweiligen Gewichtsklassen der Fahrzeuge zugeordnet,

aufgelistet in Tabelle 6.1. Somit ist die Zuordnung der einzelnen LKW-spezifischen Parameter für die Tour und dem dazugehörigen E-LKW möglich. Daraufhin berechnet das Programm den Gesamtenergiebedarf E_{Gesamt} der Tour unter Betrachtung der Wirkkette Tank-to-Wheel[34] mit folgender Formel:

$$E_{Gesamt} = E_{Fahren} + E_{Temperatur} + E_{Ladung}\ (in\ kWh) \tag{7.1}$$

Der Energiebedarf setzt sich aus dem Bedarf durch das Fahren E_{Fahren}, den Temperatureinfluss $E_{Temperatur}$ und die Be- und Entladung E_{Ladung} zusammen. Diese werden für die einzelnen Abschnitte der Tour ermittelt und addiert.
Die Berechnung des Energiebedarfs **während der Fahrt** E_{Fahren} von E-Lkw basiert auf den Fahrwiderständen. Es wird zwischen zwei Fahrzuständen unterschieden: der stationären und der instationären Fahrt. In Situationen mit konstanter Geschwindigkeit, der stationären Fahrt, treten Roll-[35], Steigungs-[36] und Luftwiderstände[37] auf. Bei instationären Fahrten ergeben sich zusätzlich noch Beschleunigungswiderstände[38] aufgrund der Massenträgheiten des Fahrzeugs. Der Gesamtfahrwiderstand folgt durch die Addition der einzelnen Fahrwiderstände. [Ers+17, S. 55]
Das Programm betrachtet ausschließlich die drei Widerstände (Roll-, Steigungs- und Luftwiderstände) stationär und den Beschleunigungswiderstand als instationär. Es resultiert eine Vereinfachung der Formeln. Der Leistungsbedarf, benötigt zum Überwinden der Fahrwiderstände, wird über die Fahrgeschwindigkeit ermittelt [Ers+17, S. 74]. Zusätzlich ist der Wirkungsrad des Motors und die Rekuperationsenergie zu berücksichtigen.
Der Energiebedarf durch den **Temperatureinfluss** $E_{Temperatur}$ entsteht durch das Kühlen oder Heizen der Fahrerkabine sowie das Kühlen des Aufbaus eines E-LKW. Letzteres wird nicht berücksichtigt, da im Stückgutverkehr keine Güter mit Kühlbedarf transportiert werden. Zur Temperierung der Fahrkabine wird eine konstante Innentemperatur von 20 Grad Celsius in der Fahrkabine angenommen und die benötigte Energie dafür ermittelt. Die Temperatur entspricht den Arbeitsrichtlinien für leichtes Arbeiten in Deutschland [Bun04].
Während des **Be- und Entladens** entsteht durch die Nutzung der Ladebordwand der Energiebedarf E_{Ladung}. Je nach Gewichtsklasse des E-LKW wird dem Fahrzeug eine

[34] Bei der Berechnung des Energiebedarfs beschreibt die Wirkkette Tank-to-Wheel die Energiekette vom der Fahrzeugbatterie zum Rad-Fahrbahnkontakt [Dop20, S. XX].
[35] Der Rollwiderstand beschreibt die Formänderungsarbeit, die durch die Reifen während des Abrollens auf der Fahrbahn verursacht wird. Dieser Widerstand hängt von dem Gesamtgewicht des Fahrzeugs und dem Rollwiderstandsbeiwert ab. Der Rollwiderstandsbeiwert variiert je nach Reifentyp, Straßenoberfläche und den Umgebungsbedingungen. [MAN16, S. 31]
[36] Der Steigungswiderstand stellt die erforderliche Kraft dar, die vom Antriebsstrang des Fahrzeugs überwunden werden muss, um eine Steigung zu bewältigen. [Ers+17, S. 67]
[37] Als Luftwiderstand wird die Kraft bezeichnet, welche zur Durchdringung der Luft mit einer bestimmten Geschwindigkeit benötigt wird. Dieser Widerstand ist abhängig von der Luftdichte, Geschwindigkeit des Fahrzeugs, Windgeschwindigkeit in Bezug zur Fahrtrichtung sowie der Frontfläche und dem spezifischen Luftwiderstandsbeiwert des Fahrzeugs. [Ers+17, S. 66]
[38] Der Beschleunigungswiderstand beschreibt die benötigte Kraft während der Beschleunigung oder Verzögerung eines Fahrzeugs. Dieser Widerstand resultiert aus Massenträgheit des Fahrzeugs. [MAN16, S. 32]

passende Ladebordwand zugeordnet und mithilfe der Leistungsdaten sowie dem Ladungsgewicht der Bedarf berechnet.
Der Gesamtenergiebedarf wird um einen Sicherheitsfaktor erhöht. In dieser Arbeit berücksichtigt der Faktor lediglich Störungen während einer Tour, wie z. B. einen Stau. Es wird ein Wert von 10 % angenommen. Im weiteren Verlauf des Projekts REALIST ist mithilfe der Praxisphase und den daraus resultierenden realen Daten mehrerer E-LKW dieser Faktor anzupassen. Beispielsweise bewirkt die Außentemperatur eine geringere Batteriekapazität, welche durch den Sicherheitsfaktor in die Berechnung einbezogen werden kann.
Der um den Sicherheitsfaktor erhöhte Gesamtenergiebedarf wird mit der minimalen, maximalen und einer dem Fahrzeug zufällig zugeordneten Batteriekapazität verglichen (siehe Gleichung 7.2). Die Werte der Batteriekapazitäten von verfügbaren Fahrzeugen mit Angabe der Größenklasse stammen aus der LKW-Datenbank des ifeu [ife23]. Im Anhang H befindet sich die Auflistung der verfügbaren Batteriekapazitäten pro Gewichtsklasse.

$$E_{Batterie} > E_{Gesamt} \cdot 1{,}1 \tag{7.2}$$

Dieser Vorgang wird wiederholt, bis alle Energiebedarfe der importierten Touren ermittelt und verglichen sind. Zum Abschluss gibt die Anwendung eine Excel-Datei mit folgenden Angaben pro Tour aus:

- Tour-ID
- Spedition
- LKW-Gewichtsklasse
- Gesamtenergiebedarf
- Batteriekapazität
- Tour durchführbar: Wahr oder Falsch

Die Validierung der Anwendung wird durch Abgleich mit realen Verbrauchswerten von einem E-LKW vorgenommen. Da diese Daten derzeit nicht zur Verfügung stehen, erfolgt diese nach dem Start eines Praxistests im Projekt REALIST. Während dieser Praxisphase werden drei verschiedene E-LKW (7,5 t) durch drei Speditionen im Stückgut-Netzwerkverkehr des Stadtgebiets Stuttgart betrieben.
Anhand der Energiebedarfe der Touren und dem Abgleich der Batteriekapazität für den untersuchten Zeitraum wird die logistische Elektrifizierungsrate (siehe Gleichung 7.3) ermittelt. Sie gibt an, wie viel Prozent der Touren elektrisch durchführbar sind.

$$Logisitsche\ Elektrifizierungsrate = \frac{Tourenanzahl_{elektrifizierbar}}{Tourenanzahl_{gesamt}} \tag{7.3}$$

In Kapitel 8.2 wird die logistische Elektrifizierungsrate anhand des Anwendungsbeispiels Stuttgart bestimmt. Zusätzlich werden die Energiebedarfe für den weiteren Verlauf der Methodik verwendet. Hierzu werden auf Basis der Bedarfe die Lastkurven generiert und anschließend die Stromnetzintegration untersucht. Dies wird in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

7.2 Optimierung der Elektrifizierbarkeit

Nach der Analyse des Energiesektors folgt die logistische Optimierung der ermittelten Elektrifizierungsrate, welche sehr stark an die energetische Optimierung gekoppelt ist. Hierzu werden die nach *Pfleger et al.* [Pfl+24, S. 11] und in Kapitel 4.3.4 vorgeschlagenen Maßnahmen empfohlen. Aus diesen Maßnahmen werden in der Arbeit qualitative Optimierungskonzepte empfohlen, die im Folgenden beschrieben werden.

Optimierung der Auslastung der Fahrzeuge

Im Datensatz des Auftragsvolumens der Speditionen werden die durchschnittlichen Aufträge bzw. Stopps pro Tour angegeben. Dieser Wert wird bei der Tourenplanung berücksichtigt. Jedem Fahrzeug wird dieser Wert als maximale Anzahl an Stopps pro Tour zugewiesen. Somit zeigte sich im Ergebnis, dass die LKW zum Großteil keine volle Auslastung aufweisen. Daher wird die Optimierung der Auslastung empfohlen. Die Angabe der Stopps pro Tour und Fahrzeug kann auf den maximalen Wert gesetzt werden, sodass die Tourenplanungssoftware die Gewichts- und Volumengrenzen als Restriktion verwendet. Als Ergebnis wird eine deutlich geringere Anzahl an Touren pro Tag und eine Reduzierung der Kilometerleistung pro Fahrzeug erwartet. Allerdings ist es möglich, dass sich bei diesen Einzeltouren ein deutlich höherer Energiebedarf als bei den Einzeltouren mit einer begrenzten Anzahl an Stopps ergibt. Dies gilt es zu prüfen und gegebenenfalls sind diese Touren zu splitten bzw. neu aufzuteilen.
Durch dieses Konzept wird am Beispiel Stuttgart die Tourenplanung optimiert. Somit findet in Kapitel 8.2 eine quantitative Betrachtung statt.

Zwischenladen der Batterie

Falls eine Tour nicht elektrifizierbar ist, empfiehlt es sich, während der Tour einen Stopp für einen Batterieladevorgang an öffentlicher Ladeinfrastruktur oder bei einem Kunden einzuplanen. Der Stopp kann manuell in der Tourenplanung eingefügt werden. Hierbei darf die Arbeitszeit des Fahrers nicht überschritten werden. Vorzugsweise empfiehlt es sich, den Ladevorgang in die Pausenzeit des Fahrers zu legen. Zusätzlich ist zu prüfen, welche Ladepunkte im geografischen Großraum den Anforderungen eines E-LKW entsprechen. Mit dieser Optimierungsmaßnahme kann eine Tour vollständig elektrifiziert werden. Zusätzlich resultiert dadurch ein geringerer Ladebedarf in den Rand- und Nachtzeiten.

Multi-User-Depots

Multi-User-Depots funktionieren nach dem White-Label-Konzept für die letzte Meile. Für einen bestimmten Stadtbereich werden alle Aufträge von mehreren oder allen Speditionen in einem Depot gebündelt und bereitgestellt [Umu20, S. 158]. Hierbei bietet sich eine Lage des Depots in der Nähe des ausgewählten Gebiets an. Die Feinverteilung sowie Abholungen werden durch eine neutrale Spedition durchgeführt. Daraus resultiert eine Effizienzsteigerung sowie die positive Auswirkung auf die Emissionsbilanz und den Verkehrsfluss [Uni24].

Zur Optimierung kann ein Stadtgebiet in mehrere Zustell- bzw. Abholbezirke (z. B. nach Stadtbezirken) eingeteilt werden. Ein Multi-User-Depot ist einem oder mehreren Bezirken zugeordnet und in der Nähe angesiedelt. Dadurch können lange Anfahrten vermieden werden. Bei kleineren Speditionen, welche täglich nur eine Tour durch das ganze Stadtgebiet durchführen, resultiert eine bessere Tourenaufteilung. Letztendlich folgt dadurch eine effizientere Tourenplanung, wodurch die Gesamttourenlänge reduziert wird.

Änderung des Zustellkonzepts

Das klassische Zustellkonzept in der Stückgutlogistik nach dem Hauptlauf ist die Konsolidierung im Zustelldepot auf die jeweilige Zustelltour, welche anschließend mit leichten und mittelschweren Fahrzeugen im Regional- und Nahverkehr durchgeführt wird (siehe Kapitel 2.2.6). Ein neuartiges Konzept der Zustellung ist die Nutzung von Micro-Depots und Micro-Fahrzeugen (siehe Kapitel 2.2.5).
In einem städtischen Bereich mit einer hohen Konzentration an Aufträgen (in Stuttgart: Innenstadtgebiet und bestimmte Gewerbegebiete) über einen längeren Zeitraum ist die Einrichtung eines Micro-Depots zielführend. Der Transport der Güter zwischen dem Depot an der Stadtgrenze und dem Micro-Depot erfolgt über LKW bzw. E-LKW. Für die Feinzustellung können Microfahrzeuge, wie Lastenräder, eingesetzt werden. Abholungen sind ebenfalls auf diese Art und Weise möglich. Zudem kann ein Micro-Depot als Multi-User-Depot genutzt werden. Für die Stückgutlogistik ist dies mit hoher Wahrscheinlichkeit profitabel, da in diesem System kleingewichtige und -volumige Aufträge hohe Stoppkosten haben. Diese entstehen durch die Größe der Fahrzeuge, den Anforderungen an den Fahrer (z. B. Besitz des LKW-Führerscheins) und Zufahrtsbeschränkungen in urbanen Räumen [Alb20]. Allerdings entstehen durch den zusätzlichen Umschlag auch zusätzliche Kosten. Daher wird eine Berechnung der Wirtschaftlichkeit empfohlen. Durch die Nutzung dieses Konzepts reduziert sich die Anzahl sowie die Gesamtfahrlänge der Touren deutlich.

Zustellungen und Abholungen in Rand- und Nachtzeiten

Ein weiteres Konzept der urbanen Logistik ist die Nachtlogistik. Hierbei erfolgen die Zustellung und Abholung in den Rand- und Nachtzeiten. Es resultiert dadurch eine Vermeidung der Hauptverkehrszeiten, in welchen meist längere Fahrzeiten und niedrigere Fahrgeschwindigkeiten zu erwarten sind [Bin19]. Folglich entwickelt sich eine Entzerrung des Verkehrs. Zudem wird mit den E-LKW eine Reduzierung der Lärm- und Luftschadstoffemissionen erwartet, was wiederum die Voraussetzung der Nachtlogistik ist. Der Einsatz von E-LKW mit einer geräuschminimierten Ausstattung (z. B. Kühlaggregat, Rollcontainer) ist dafür eine Grundlage. Weitere Voraussetzungen sind die Erreichbarkeit der Kunden, eine Rahmengesetzgebung zur Zulassung von Nachtfahrten und der Abbau von Widerständen in den Kommunen [FL20, S. 185–195]. Gemäß einer Studie des Fraunhofer Instituts IML ist eine Nachtlogistik unter den gesetzlichen Bestimmungen in Deutschland möglich [Vas+17].
Zur Optimierung ist eine Analyse notwendig, welche Kundengruppen bzw. Aufträge in

den Rand- und Nachtzeiten angefahren werden können. Aufträge mit Eilbedürftigkeit sind auszuschließen. Für die ermittelten Aufträge sind die Zustellzeiten anzupassen, neue Touren zu planen und auf Elektrifizierbarkeit zu prüfen. Das Ergebnis hat besondere Relevanz für die Netzintegration, da dadurch Ladevorgänge entzerrt werden können. Die vorwiegend in der Nacht stattfindenden Ladephasen können auch über Tag durchgeführt werden.

8 Anwendung und kritische Reflexion

In diesem Kapitel wird die logistische Vorgehensweise der ganzheitlichen Methodik am Beispiel des Stadtgebiets Stuttgarts angewandt. Die Ergebnisse der folgenden Phasen werden beschrieben. Abschließend wird die Methodik kritisch reflektiert. Das Ziel des Kapitels ist der Nachweis der Verwendbarkeit der logistischen Vorgehensweise der Methodik.

1. Auftragserzeugung
2. Tourenbildung
3. Analyse der Elektrifizierbarkeit
4. Optimierung

8.1 Ausgangssituation des Anwendungsbeispiels

Die Methodik wird am Beispiel des Stadtgebiets Stuttgarts aufgebaut, weshalb dies den Untersuchungsraum darstellt. In Abbildung 4.2 ist der Untersuchungsraum skizziert. Das Randgebiet wird ebenso berücksichtigt, weshalb neben dem Stadtgebiet bzw. Großraum das Einflussgebiet zum Untersuchungsgebiet zählt. Der Durchgangsverkehr[39] wird vernachlässigt. Somit werden alle Speditionen, die mehr als zwei Aufträge pro Tour im Untersuchungsraum haben, durch die Methodik berücksichtigt. Insgesamt werden 36 Speditionen mit unterschiedlichen Entfernungen zu Stuttgart (siehe Abbildung 5.6) identifiziert. Bisher betreibt lediglich eine Spedition im Stadtgebiet Stuttgart E-LKW. Das Unternehmen Dachser fährt bereits seit dem Jahr 2017 einen batterieelektrischen FUSO eCanter (7,5 t) [Dac17] und seit 2019 ein Mercedes-Benz eActros (18 t) [Dac19]. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten und weiterer Hürden (siehe Kapitel 1.1) sind die Speditionen sowie Transportdienstleister mit dem Kauf oder Leasing eines E-LKW sehr zurückhaltend. Zudem ist die Förderung der Bundesregierung vorwiegend für E-LKW mit höheren Laufleistungen vorgesehen. Im Projekt REALIST werden zukünftig im Rahmen der Praxisphase weitere E-LKW durch drei neu hinzukommende Speditionen betrieben. Damit kann die Methodik mit einem Realeinsatz verglichen werden.
Daneben ist das Stadtgebiet Stuttgart mit besonderen geografischen Eigenschaften für eine Analyse bedeutend. Die Kessellage und die dadurch resultierenden Steigungen der Straßen können die Elektrifizierbarkeit beeinflussen.
Das Vorgehen wird für die Kalenderwoche KW19 durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Phasen beschrieben.

[39] Im Anwendungsbeispiel zählen Speditionen mit zwei Aufträgen pro Tour, welche im Stadtgebiet Stuttgart adressiert sind, zum Durchgangsverkehr und werden somit ausgeschlossen.

8.2 Anwendung und Ergebnisse

Zur Anwendung werden die vier folgenden Phasen der logistischen Vorgehensweise der Methodik durchlaufen.

1. Auftragserzeugung

Als Basis werden die synthetischen Auftragslisten für alle Speditionen in den genannten Zeiträumen erstellt. Die Auftragsadressen werden mithilfe der Geoinformationssystemsoftware QGIS[40] in Abbildung 8.1 als Heatmap dargestellt. Zusätzlich ist die Unterteilung Stuttgarts in Baublöcke hinterlegt. Durch diese Ansicht werden dicht besiedelte Gebiete durch eine kleinere Einteilung kenntlich. Das Programm erzeugt in KW19 4516 Aufträge (Summe der Auftragsvolumen der Speditionen), wovon 83,2 % innerhalb des Stadtgebiets liegen. Die Abweichung zum Vorgabewert liegt somit unter 2,5 %. Der Anteil an Zustellungen liegt bei 66 % und an Abholungen bei 34 %. Im Vergleich mit der vorgegebenen Eintrittswahrscheinlichkeit ergibt sich eine Abweichung von 1,5 %.

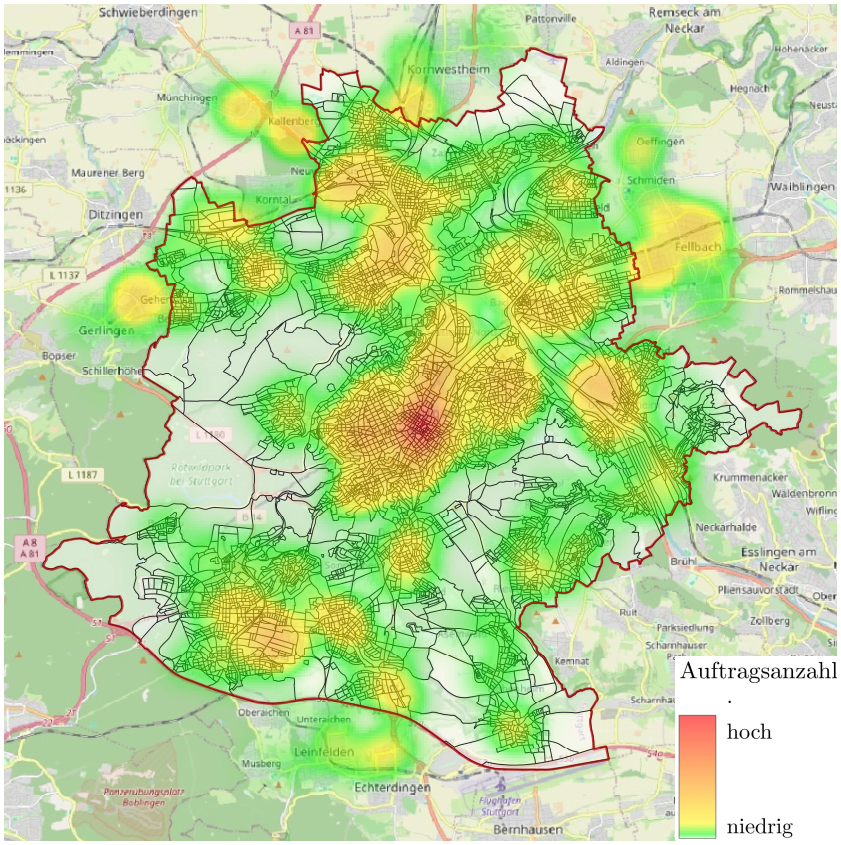


Abbildung 8.1: Heatmap zu allen synthetisch erzeugten Aufträgen der Speditionen im Stadtgebiet Stuttgart in KW19
(eigene Darstellung; Geodaten: © OSM (CC-BY-SA 2.0), © Landeshauptstadt Stuttgart, Stadtmessungsamt & Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme (GIS-AG))

[40] QGIS dient zur Erstellung, Bearbeitung, Analyse und zum Anzeigen räumlicher Informationen [QGI24].

Die höchste Konzentration an Aufträgen liegt im Stuttgarter Zentrum vor. Dies resultiert aus den hohen Einwohner- und Erwerbstätigenzahlen sowie der Anzahl an POI. Die Zelle mit der höchsten Auftragsanzahl (48) liegt direkt an der Königstraße, welche die Hauptgeschäftsstraße Stuttgarts ist (siehe Heatmap-Ausschnitt im Anhang I). Weitere Zellen um die Königstraße weisen eine Auftragsanzahl zwischen 18 und 42 auf. Ähnlich hoch frequentierte Bereiche sind die Gewerbegebiete in Feuerbach, Weilimdorf, Möhringen/Vaihingen, Zuffenhausen und Bad Cannstatt/Untertürkheim. Dies ergibt sich aus dem hohen vorgegebenen Anteil an B2B-Kunden. Waldgebiete bzw. nicht besiedelte Gebiete werden von der Auftragserzeugung nicht berücksichtigt. In Abbildung 8.2 wird die Auftragsanzahl pro Stadtbezirk in einem Balkendiagramm dargestellt.

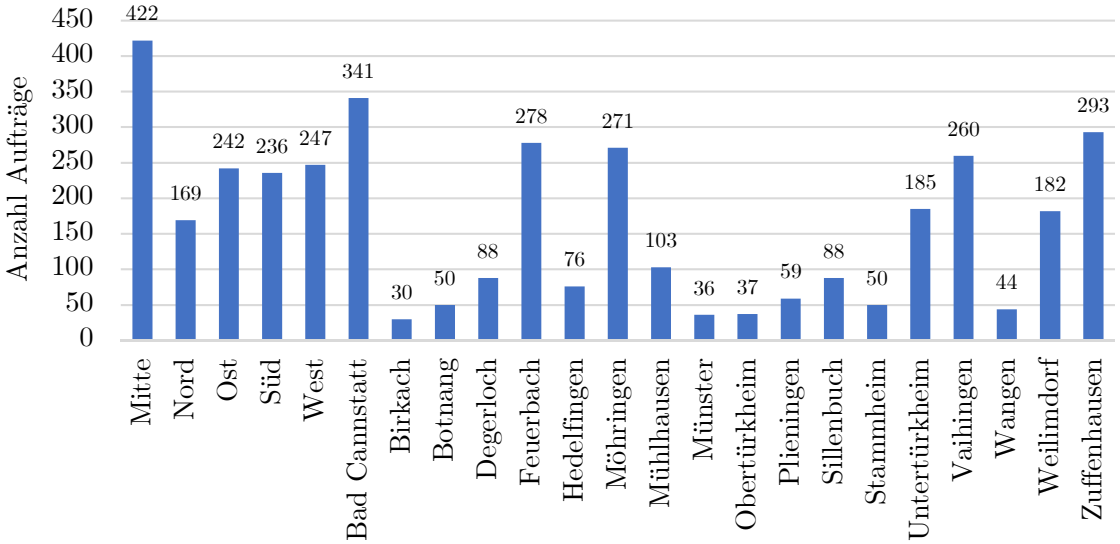


Abbildung 8.2: Anzahl an Aufträgen in KW19, aufgeteilt auf die Stadtbezirke Stuttgarts

2. Tourenbildung

Die erzeugten Auftragslisten werden inklusive Fuhrpark[41] und den Depotinformationen in die Tourenplanungssoftware importiert. Für jede Spedition werden für den genannten Zeitraum die Touren geplant und optimiert. Es gilt die maximale Auftragsanzahl pro Tour laut Umfrage aus Kapitel 5.3.3 als Vorgabe. Das Ergebnis sind die Tourenpläne aller Speditionen.

Im Untersuchungszeitraum werden insgesamt 434 Touren mit durchschnittlich elf Aufträgen geplant und optimiert (siehe Tabelle 8.1). Somit ist die Auftragsanzahl vorrangig die Restriktion einer Tour. Die mittlere Tourenlänge liegt bei 75 km. Die längste Tour einer Spedition liegt bei 220 km, wobei davon die Hin- und Rückfahrt zum Depot 177 km beträgt. Lediglich diese Spedition erreicht durch die Länge der Hin- und Rückfahrten Tourenlängen von über 200 km. Die restlichen Touren liegen unter 160 km. Als Beispiel werden in Abbildung 8.3 alle Touren der KW19 einer Spedition (Depotstandort: Ditzingen) dargestellt. Die gewählte Spedition fährt 35 Touren mit einem Mittelwert von elf Aufträgen in der Kalenderwoche. Die Auslastung der Fahrzeuge liegt für das Gewicht

[41] Die Informationen stammen aus der Telefonumfrage und Internetrecherche des Kapitels 5.3.3.

durchschnittlich bei 56 % und für das Volumen durchschnittlich bei 20 %. Der Mittelwert der Tourenlänge liegt bei 45 km (längste Tour: 72 km), wofür eine Dauer von 1,5 bis 5,5 Stunden benötigt wird. Die Spedition liegt direkt an der Stadtgrenze, weshalb keine langen Anfahrtswege entstehen. Es werden alle Gewichtsklassen der Fahrzeuge (3,5 t, 7,5 t, 12 t, 18 t) benötigt.

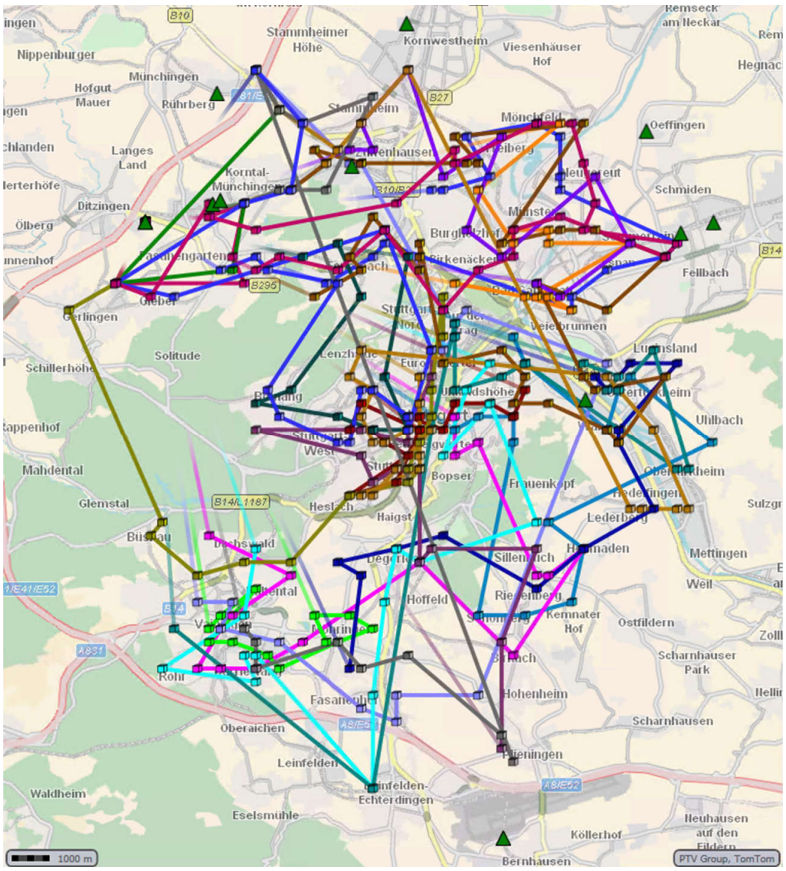


Abbildung 8.3: Synthetisch erzeugte Touren einer Spedition in KW19

3. Analyse der Elektrifizierbarkeit

Mit den Tourenplänen ermittelt das vorgestellte Programm den Energiebedarf jeder Tour. Anschließend findet der Abgleich mit der Batteriekapazität der jeweiligen Gewichtsklasse des E-LKW statt und die logistische Elektrifizierungsrate wird bestimmt. Die Batteriekapazitäten sind in Anhang H aufgelistet.

Mit der Annahme, dass alle E-LKW die maximale Batteriekapazität der jeweiligen Gewichtsklasse besitzen, ergibt sich eine logistische Elektrifizierungsrate von 98,8 %. Folglich können 429 von 434 Touren ohne Berücksichtigung der Ladeinfrastruktur und des Stromnetzes elektrifiziert werden. Wird die minimale Kapazität der jeweiligen Gewichtsklasse angenommen, resultiert daraus eine Rate von 89 %. Der höchste Energiebedarf einer Tour liegt bei 171 kWh. Diese Tour wird durch einen 7,5 t-LKW bedient. Die maximal verfügbare Kapazität in dieser Größenklasse mit 126 kWh ist für diese Tour nicht ausreichend. Aufgrund der niedrigen Kapazität der 7,5 t-LKW erschwert sich deren Elektrifizierung. Touren mit über 200 km und 7,5 t-LKW lassen sich meist nicht elektrifizieren. Es wird eine

Umstellung auf eine höhere Gewichtsklasse und eine optimierte Auslastung empfohlen. Zudem beeinträchtigt die lange Anfahrt vom Depot zum ersten Stopp und die Rückfahrt zum Depot die Elektrifizierung. Hierbei bietet sich ein Depot in der Nähe der Stadtgrenze, ein Multi-User-Depot oder ein Microdepot in Gebieten mit hohem Auftragsvolumen an.

4. Optimierung

Zur logistischen Optimierung wird als erste Maßnahme die Optimierung der Auslastung der Fahrzeuge durchgeführt. Hierbei wird die maximale Auftragsanzahl pro Tour in der Tourenplanung auf unendlich gesetzt. Die Tourenbildung und -optimierung wird erneut durchgeführt. Das Ergebnis der Tourenplanung wird im Vergleich mit der Ursprungsplanung in Tabelle 8.1 dargestellt. Zusätzlich wird in Tabelle 8.2 die Elektrifzierungsrate in realem und optimiertem Zustand aufgelistet.

Tabelle 8.1: Auswertung der Tourenplanung

		Mittelwerte					
		Touren-anzahl	**Aufträge pro Tour**	**Touren-länge**	**Touren-dauer**	**Auslastung Gewicht**	**Auslastung Volumen**
Alle Speditionen	**Tourenplanung**	434	11	75 km	4,5 h	61 %	22 %
	Optimierte Tourenplanung	298	15	87 km	6 h	70 %	30 %
Beispiel-spedition	**Tourenplanung**	35	11	45 km	4 h	56 %	20 %
	Optimierte Tourenplanung	19	20	62 km	6 h	71 %	32 %

Im Vergleich bestätigt sich die Optimierung der Tourenplanung. Die Anzahl der Touren reduziert sich im Untersuchungszeitraum um über 30 %, wodurch sich gleichzeitig die durchschnittliche Auftragsanzahl pro Tour auf 15 erhöht. Ebenso steigt die Tourenlänge um 16 %, die Tourendauer um 30 %, die Gewichtsauslastung um 9 % und die Volumenauslastung um 8 %. Dies ist auch bei der Beispielspedition zu beobachten. Die Tourenanzahl reduziert sich um 46 % und die anderen Werte steigen. Die Touren werden hauptsächlich durch das maximale Zuladungsgewicht des Fahrzeugs begrenzt. Zudem stellt sich heraus, dass teilweise auch die Gesamtdauer der Arbeitszeit des Fahrers erreicht wird, welche inklusive der Pausenzeit bei 10:45 Stunden liegt.
Mit der Optimierung kann bei maximaler Batteriekapazität eine vollständige logistische Elektrifizierbarkeit erreicht werden. Es entsteht eine Verbesserung um 1,2 %. Bei dem Abgleich mit der minimalen Kapazität ergibt sich eine Rate von 85,5 %. Diese hat sich um 3,5 % verschlechtert. Vorwiegend werden für die Touren 12 t-Fahrzeuge mit einer Kapazität von 120-289 kWh eingesetzt. Dies resultiert aus der höheren Zuladung gegenüber 7,5 t-Fahrzeugen und der Verfügbarkeit im Fuhrpark. Mit der unbegrenzten Auftragsanzahl und daraus entstehenden höheren Auslastung ergeben sich längere Touren (bis 255 km), wodurch der Energiebedarf (höchster Wert bei 206 kWh) steigt. Dieser kann nicht mit der minimalen Kapazität abgefangen werden.

Tabelle 8.2: Logistische Elektrifizierungsrate im realen und optimierten Zustand

	Logistische Elektrifizierungsrate	**Optimierte logistische Elektrifizierungsrate**
Minimale Batteriekapazität je E-LKW-Gewichtsklasse	89 %	85,5 %
Maximale Batteriekapazität je E-LKW-Gewichtsklasse	98,8 %	100 %

Es ist anzunehmen, dass die Rate durch die Analyse des Energiesektors sinken wird. Daher sind weitere Optimierungsmaßnahmen durchzuführen, welche in Kapitel 7.2 empfohlen werden. Die Änderung des Zustellkonzepts kann in Kombination mit den Multi-User-Depots durchgeführt werden.

8.3 Kritische Reflexion

Mit der kritischen Reflexion wird die Anwendung der Methodik widerspiegelt und die nachstehende primäre Forschungsfrage beantwortet.

> F1: Kann eine Abbildung der Stückgutlogistik eines geografischen Großraums und die Bestimmung der logistischen Elektrifizierungsrate erreicht werden?

Die Anwendung am Beispiel des Stadtgebiets Stuttgart bestätigt die erfolgreiche Durchführung der logistischen Vorgehensweise der Methodik zur ganzheitlichen Betrachtung der Elektrifizierbarkeit der Stückgutlogistik in einem urbanen Raum. Das synthetische Abbild wird erzeugt und die logistische Elektrifizierungsrate im gegenwärtigen und einem ersten optimierten Zustand ermittelt. Zudem werden Auftragserzeugung und Tourenplanung validiert. Die Ergebnisse der Auftragserzeugung sind variabel, was durch die geringe Prognostizierbarkeit von Stückgutaufträgen ein erforderlicher Faktor ist. Stückgutaufträge sind aufgrund der Vielfalt der Fracht, der Verkehrsbedingungen und der unterschiedlichen Nachfrage durch den Kunden nicht planbar.

In der folgenden Reflexion werden verschiedene Aspekte des methodischen Vorgehens fokussiert. Zusätzlich sind diese in der Tabelle 8.3 mit der bisherigen und der empfohlenen Umsetzung aufgelistet.

Auftragserzeugung - Einflussbereich bzw. Randgebiete des Untersuchungsraums:
Zur Auftragsgeneration in den Randgebieten greift das Programm auf die Kundenadressen der realen Speditionsdaten zu. Auf Basis der Anzahl an realen Aufträgen in einer Zelle wird die Zelle gewichtet. Dadurch resultiert eine ungleichmäßige Verteilung. Es entsteht eine höhere Frequentierung an Aufträgen in bestimmten Bereichen des Randgebiets (siehe Heatmap in Abbildung 8.1). Für eine gleichmäßigere Verteilung dient die Kundenstruktur mit der B2C- und B2B-Nachfrage (wie im Stadtgebiet). Es werden ebenso für die Randgebiete die geografischen Daten und Zelleneigenschaften des Einflussgebiets benötigt.

Auftragserzeugung - Übertragbarkeit:
Die Verwendung der Auftragserzeugung für ein anderes Logistiksegment ist mit einem einfachen Datenaustausch möglich. Für einen anderen geografischen Großraum ist die Anwendung komplexer. Hierfür muss eine neue Kundenstruktur und somit eine neue Zelleinteilung bzw. Rasterung mit den entsprechenden geografischen Eigenschaften und Referenzadressen erzeugt werden. Zusätzlich sind die entsprechenden Daten (siehe Abbildung 5.19) als CSV-Dateien einzubinden. Zudem wird für ein neues Gebiet eine Vergrößerung des Randbereichs empfohlen, um eine größere Fläche und bessere Verteilung von Aufträgen einbeziehen zu können. Am Beispiel Stuttgart wird dies durch die realen Auftragsdaten begrenzt. Die Übertragbarkeit der Auftragserzeugung wird durch die Veränderung verschiedener Daten am Beispiel Stuttgart bewiesen. Der Bezug von Daten für andere Großräume wird in dieser Arbeit nicht vorgenommen.

Tourenplanung - Software:
Die Tourenplanung entspricht den Vorgabewerten (Tourenanzahl und Stopps je Spedition). Im Rahmen der Arbeit wird lediglich die Software Route Optimiser ST von PTV verwendet, da die Beschaffungs- bzw. Abonnement-Kosten sehr hoch sind. Vergleiche mit weiteren Tourenplanungssoftwares sind empfehlenswert, um gegebenenfalls eine Optimierung der Tourenplanung zu erreichen.

Analyse der Elektrifizierung - Elektrifizierungsrate:
Zur Analyse der Elektrifizierung wird mit einem im Projekt REALIST entwickelten Programm (siehe Kapitel 7.1) die Ermittlung des Energiebedarfs pro Tour durchgeführt und mit den Batteriekapazitäten von E-LKW-Modellen abgeglichen. Mit den Ergebnissen wird die logistische Elektrifizierungsrate ermittelt. Es resultiert dadurch ein präziser Vergleich, da der Abgleich des Energiebedarfs mit der Batteriekapazität exakter ist als der Abgleich der Tourenlänge mit der Batteriereichweite. Die Angaben zur Batteriereichweite durch die Hersteller können ungenau sein. Zudem werden Faktoren, wie z. B. die Steigung oder Beschleunigung, im Reichweitenabgleich nicht berücksichtigt.
Durch die Tourenplanung entstehen für ein Fahrzeug mehrere Touren am Tag, welche nacheinander absolviert werden. Das Programm zur Bestimmung des Energiebedarfs berücksichtigt bei der Berechnung eine Tour pro E-LKW am Tag. Es wird empfohlen, die Elektrifizierungsrate zu korrigieren, indem das Programm den Energiebedarf mehrerer Touren, die an einem Tag mit einem E-LKW durchgeführt werden, summiert und anschließend mit der Batteriekapazität abgleicht.

Analyse der Elektrifizierung - Ladeinfrastruktur und Stromnetzintegration:
In der Arbeit wird der Energiebedarf zur Bestimmung der logistischen Elektrifizierungsrate bestimmt. Für die Berechnung der kompletten Elektrifizierungsrate ist die zusätzliche Betrachtung der Ladeinfrastruktur und des Stromnetzes (siehe Kapitel 4.3.2 und 4.3.3) erforderlich. Es werden für jeden LKW mit einer oder mehreren Touren am Tag die Ladekurven, -zeiten und somit die Ladeleistung ermittelt, außerdem die Integration ins

Stromnetz geprüft. Dabei wird analysiert, ob ausreichend Ladepunkte verfügbar sind und die Netzanschlussleistung nicht überschritten wird. Zusätzlich darf die Ladedauer die Standzeit des E-LKW nicht übersteigen. Gegebenenfalls können die Batterien der E-LKW dadurch nicht ausreichend und rechtzeitig für die nächste Tour geladen werden. Folglich ist die Elektrifizierungsrate anzupassen. Bei einer Verschlechterung kann sie über die Optimierungsmaßnahmen (siehe Kapitel 4.3.4) verbessert werden.

Validierung der Methodik:
Die Auftragserzeugung und Tourenplanung werden in dieser Arbeit erfolgreich validiert. Zur (erneuten) Überprüfung der Validität, besonders des Programms zur Bestimmung des Energiebedarfs, dient die Praxisphase des Projekts REALIST.

Untersuchungszeitraum:
Die logistische Vorgehensweise wird im Anwendungsbeispiel dieser Arbeit in einem Zeitraum von einer Woche durchgeführt und getestet. Für die komplette Methodik mit der Analyse der Ladeinfrastruktur und des Stromnetzes wird empfohlen, mehrere Zeiträume zu analysieren. Es werden unterschiedliche Szenarien mit niedrigen, mittleren und hohen Auftragsvolumen, ebenso verschiedene Wetterlagen (Temperaturen) berücksichtigt. Zusammengefasst ergibt sich eine durchschnittliche Elektrifizierungsrate für den geografischen Großraum und das Logistiksegment.

Tabelle 8.3: Aspekte der Reflexion

Fokus der Reflexion	**Umsetzung in der Arbeit**	**Empfehlungen für weitere Umsetzung**
Auftragserzeugung Einflussbereich/ Randgebiete des Untersuchungsraums	Zuordnung von Aufträgen in Randgebieten mithilfe von realen Daten bzw. Adressen	Zuordnung von Aufträgen in Randgebieten mithilfe der B2C- und B2B-Nachfrage
Auftragserzeugung Übertragung auf anderen Großraum	Analyse der Übertragbarkeit durch Veränderung der Daten von Stuttgart	Analyse der Übertragbarkeit mit den Daten anderer Großräume
Tourenplanung Software	Nutzung von einer Software	Nutzung weiterer Software zur Analyse
Analyse der Elektrifizierung Elektrifizierungsrate	Berücksichtigung einer Tour pro LKW am Tag	Berücksichtigung mehrere Touren pro LKW am Tag
Analyse der Elektrifizierung Ladeinfrastruktur und Stromnetzintegration	Keine Betrachtung der Ladeinfrastruktur und Stromnetzintegration	Betrachtung der Ladeinfrastruktur und Stromnetzintegration
Validierung der Methodik	Vergleich mit realen Datensätzen von Verbrenner-LKW	Vergleich mit realen Datensätzen von E-LKW der Praxisphase des Projekts REALIST
Untersuchungszeitraum	Berücksichtigung eines einzelnen Zeitraums	Berücksichtigung mehrerer Zeiträume

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im letzten Kapitel dieser Arbeit werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst . Darüber hinaus beschreibt der Ausblick zum Abschluss die weitere Vorgehensweise zur Methodik und mögliche neue Einsatzzwecke.

9.1 Zusammenfassung

Der Straßengüterverkehr steht durch die Vorgaben der deutschen Bundesregierung und de EU zur Klimaneutralität vor einem großen Wandel. Knapp drei Viertel des Güterverkehrs, Tendenz steigend, wird über die Straße abgewickelt [Sta23]. Dieser Anteil entspricht etwa sechs Prozent der Gesamtemissionen von Treibhausgasen [Eur23]. Zur Erreichung der Klimaneutralität ist die Umstellung auf alternative Antriebe, vorrangig auf batterieelektrische Antriebe, die Schlüsselkomponente auf dem Weg zum nachhaltigen Güterverkehr. Die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs entwickelt sich trotz der verfügbaren Nutzfahrzeuge sehr langsam. Dies resultiert primär aus der fehlenden flächendeckenden Ladeinfrastruktur. Für deren Ausbau kommen neue Akteure aus dem Energiesektor hinzu. Um diese Akteure frühzeitig in den Elektrifizierungsprozess einzubinden und sich weiteren Herausforderungen, wie z. B. den Prozessänderungen, der Kostenparität und der Stromnetzintegration, zu stellen, bedarf es einer einheitlichen Vorgehensweise zur ganzheitlichen Betrachtung der Elektrifizierung eines Logistiksegments in einem geografischen Großraum. Bisher gibt es keinen Ansatz, der die Einbindung aller Akteure berücksichtigt. Im Projekt REALIST wird eine ganzheitliche Methodik für den Vor- und Nachlauf der Stückgutlogistik entwickelt (siehe Abbildung 4.3) und im Laufe des Projekts anhand einer Praxisphase mit E-LKW validiert wird. Die Methodik baut auf einer logistischen Vorgehensweise zur Abbildung des Vor- und Nachlaufs der Stückgutlogistik in einem gewählten Gebiet, der Stromnetzintegration und Analyse der Elektrifizierung sowie deren Optimierung auf. Die logistische Vorgehensweise bildet den Schwerpunkt der Arbeit. Hierzu wird ein Programm zur Generierung von synthetischen Auftragslisten konzipiert, das vorwiegend auf öffentlich zugänglichen Daten basiert. Mit den erzeugten Auftragslisten werden mithilfe einer kommerziellen Tourenplanungssoftware die Touren gebildet. Anschließend findet die Analyse der Elektrifizierbarkeit statt, um eine logistische Elektrifizierungsrate zu bestimmen. Die Rate kann in enger Abstimmung mit dem Energiesektor optimiert werden. Das logistische Vorgehen besteht aus vier aufeinander folgenden Schritten:

1. Auftragserzeugung
2. Tourenbildung
3. Analyse der Elektrifizierbarkeit
4. Optimierung

Durch die erfolgreiche Entwicklung der Methodik wird in der Arbeit auf die folgenden Forschungsfragen eingegangen. Beginnend mit den sekundären Fragen wird zusammengefasst die übergeordnete Forschungsfrage beantwortet.

F2.2: **Warum ist die Stückgutlogistik prädestiniert für eine ganzheitliche Betrachtung zur Elektrifizierung?**
Die Elektromobilität hat sich im Bereich der PKW sowie LKW gegenüber alternativen Antriebsformen als führende Technologie etabliert. Es sind bereits über 60 E-LKW-Modelle für alle Größenklassen verfügbar. Die Stückgutlogistik mit Vor-, Haupt- und Nachlauf weist Strecken auf, die mit den aktuellen Batteriereichweiten fahrbar sind. Besonders im Vor- und Nachlauf werden vorwiegend Touren unter 200 km geplant, welche mit der richtigen Wahl der Batteriekapazität elektrifizierbar sind (siehe Kapitel 8.2). Dadurch sind keine Zwischenstopps zum Laden der Batterie notwendig und es kann auf das Depotladen bzw. auf private Ladepunkte zurückgegriffen werden. Öffentliche Ladeinfrastruktur ist derzeit kaum für E-LKW verfügbar. Des Weiteren resultiert durch die Elektrifizierung des Vor- und Nachlaufs eine CO_2-Freiheit und ein geringerer Geräuschausstoß im urbanen Raum. Daher wird die Analyse der Elektrifizierung des Vor- und Nachlaufs der Stückgutlogistik anhand der ganzheitlichen Methodik beabsichtigt. In anderen Logistiksegmenten ist die Forschung bereits weit fortgeschritten oder aufgrund der Planbarkeit in diesem Umfang nicht relevant (z. B. Kontraktlogistik).

F2.2: **Wie werden synthetische Stückgutaufträge, zusammengefasst in Auftragslisten, für einen Großraum auf Grundlage von öffentlichen Daten und einer geringen Menge an realen Daten von Speditionen erzeugt?**
Das Anwendungssystem Auftragserzeugung ist ein Programm zur Generierung von synthetischen Auftragslisten mit Stückgutaufträgen für eine Anzahl von frei wählbaren Speditionen und einen beliebigen Zeitraum innerhalb des vorgegebenen Untersuchungsjahres. Die Auftragslisten können für eine beliebige Anzahl an Speditionen aus Basis von öffentlichen Daten und einer geringen Menge an realen Daten von Speditionen erstellt werden. Im Anwendungsbeispiel Stuttgart werden mithilfe von realen Daten von zwei Speditionen synthetische Datensätze für 36 Speditionen erzeugt. Die Auftragslisten entsprechen den realen Daten und den Anforderungen für die Durchführung der Tourenplanung. Zur Initialisierung wird der geografische Großraum in Zellen eingeteilt, die ein Raster bilden. Dieses Raster entspricht der Kundenstruktur und jede Zelle erhält durch die Erzeugung der Kundenstruktur eine Nachfrage nach Stückgutzustellungen/-abholungen (z. B. durch Privat- oder Gewerbekunden). Anschließend wird mit der Auftragsgenerierung zur Erstellung eines Auftrags die Nachfragerzelle und Adresse gewählt und die Auftragseigenschaften hinzugefügt. Dies wird wiederholt, bis das Auftragsvolumen erreicht ist. Das Ergebnis zeigt eine gewisse Variation in den Auftragslisten, was für die geringe Prognostizierbarkeit von Stückgut erforderlich ist.

F2.3: **Wie wird die Methodik auf ein anderes Logistiksegment oder einen anderen Großraum übertragen?**
Alle Daten und die in der Datenintegration entstehende Kundenstruktur sind austauschbar, weshalb eine Übertragbarkeit auf andere Zeiträume, Logistiksegmente und Großräume ermöglicht wird. Der Zeitraum ist abhängig von der Datenverfügbarkeit. Als Datengrundlagen dienen zum einen reale Auftragsdaten von Speditionen. Für den Anwendungsfall Stuttgart werden Datensätze von zwei Speditionen verwendet. Zum anderen werden öffentliche Daten verwendet, die frei verfügbar sind oder auf Beantragung durch Bundes-, Landes- und kommunale Behörden zur Verfügung gestellt werden.

F1: Kann eine Abbildung der Stückgutlogistik eines geografischen Großraums und die Bestimmung der logistischen Elektrifizierungsrate erreicht werden?
Das Ergebnis der Arbeit ist die Abbildung des Vor- und Nachlaufs des Stückgutverkehrs im Stadtgebiet Stuttgart. Die logistische Elektrifizierungsrate liegt mit der Auswahl der maximalen Batteriekapazität bei 98,8 %. Im optimierten Zustand wird eine volle Elektrifizierung erreicht.
Dieses Ergebnis wird mit der logistischen Vorgehensweise der ganzheitlichen Methodik erzielt und mit dem Abgleich der realen Speditionsdaten verifiziert und validiert. Das Kernelement ist die Auftragserzeugung zur Generierung von synthetischen Auftragslisten. Durch den einfachen Austausch der Datenbasis sowie der Kundenstruktur wird die Verwendung für einen anderen Großraum sowie Logistiksegmente ermöglicht.

Das logistische Vorgehen und die beantworteten Fragen bilden den Grundstein für die ganzheitliche Methodik. Zur Analyse des Energiesektors ist die realitätsgetreue Abbildung eines Logistiksegments in einem geografischen Großraum erforderlich.

9.2 Ausblick

Mit dem synthetischen Abbild der Stückgutlogistik in einem Großraum folgt die Analyse der Elektrifizierung. Diese beginnt mit der Ermittlung des Energiebedarfs, was bereits zur Bestimmung der logistischen Elektrifizierungsrate am Beispiel Stuttgart durchgeführt wird. Es empfiehlt sich die Validierung mit den realen Energieverbräuchen der E-LKW aus der Praxisphase des Projekts REALIST. Anhand der festgestellten Energiebedarfe werden die Ladebedarfe identifiziert und Lastkurven generiert. Hiermit kann eine Verfügbarkeit der Ladepunkte und ein Überschreiten der Standzeit aufgrund der Ladedauer überprüft werden. Abschließend wird die Integration der Last ins Stromnetz analysiert. Mit diesem Vorgehen des Energiesektors wird die ganzheitliche Elektrifizierungsrate bestimmt.
Zur Optimierung dieser Rate werden die aufgeführten logistischen Maßnahmen empfohlen.

Hierbei ist ein Austausch mit dem Energiesektor erforderlich. Gleichzeitig kann eine energetische Optimierung vorgenommen werden.

- Zwischenladen der Batterie während der Tour
- Einführung von Multi-User-Depots
- Änderung des Zustellkonzepts (z. B. die Einführung von Micro-Depots mit Micro-Fahrzeugen)
- Einführung von Zustellungen und Abholungen in den Rand- und Nachtzeiten

Bei diesen Maßnahmen gilt es, die Veränderung der Elektrifizierbarkeit zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen. Daraus folgt die optimierte Elektrifizierungsrate. Die Optimierungsmaßnahmen können auch in der Praxisphase getestet werden. Zudem empfiehlt sich die Anwendung der Methodik auf ein anderes Logistiksegment oder einen anderen geografischen Großraum.

Des Weiteren ist es vorstellbar, die Methodik für andere Einsatzzwecke zu verwenden. Das Abbild des Vor- und Nachlaufs der Stückgutlogistik oder eines anderen Segments in einem Gebiet dient zur Analyse von logistischen Optimierungsmaßnahmen (z. B. Änderung des Zustellkonzepts). Neben den vorgestellten Empfehlungen kann beispielsweise mit dem Ergebnis eine Untersuchung zu autonomem oder automatisiertem Fahren erfolgen. Hierzu müssen die mithilfe der Methodik ermittelten Touren bzw. Tourenabschnitte auf eine Teil- (LKW-Fahrer gibt teilweise die Steuerung ab) bzw. Vollautomatisierung (LKW-Fahrer gibt die Steuerung ab) oder Autonomisierung (kein Fahrer im LKW) analysiert werden.

Literaturverzeichnis

[Abe09] Aberle, G.: *Transportwirtschaft: Einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen*. 5., überarbeitete und ergänzte Aufl. Wolls Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München: De Gruyter, 2009.

[ACE20] ACEA - European Automobile Manufacturers' Association: *Joint- Statement - The transition to zero-emission road freight transport*. 2020. URL: https://www.acea.auto/files/acea-pik-joint-statement-the-transition-to-zero-emission-road-freight-trans.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[ACE23] ACEA - European Automobile Manufacturers' Association: *Report – Vehicles in use Europe 2023*. 2023. URL: https://www.acea.auto/files/ACEA-report-vehicles-in-use-europe-2023.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Alb20] Albeck, W.: *White-Label-Hubs lösen die Probleme nicht*. Hrsg. von Deutsche Verkehrs-Zeitung. 2020. URL: https://www.dvz.de/unternehmen/kep/detail/news/white-label-hubs-loesen-die-probleme-nicht.html (besucht am 10. 04. 2024).

[AH06] Ammoser, H., Hoppe, M.: *Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften: Definitionen und Erläuterungen zu Befriffen des Transport- und Nachrichtenwesens*. Bd. 2. 2006. URL: https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivw/ressourcen/dateien/diskuss/2006_2_diskusbtr_iwv.pdf?lang=de (besucht am 10. 04. 2024).

[Arn10] Arndt, W.-H.: „Optimierungspotenziale im Wirtschaftsverkehr durch bestellerseitige Kooperation: Untersuchung des Ansatzes einer Beschaffungs-/ Bestellerkooperation als ein Instrument für eine effiziente und stadtverträgliche Gestaltung des Wirtschaftsverkehrs". Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin, 2010. URL: https://depositonce.tu-berlin.de/items/db760fe3-ea37-4465-8187-8b87a97aa070 (besucht am 17. 01. 2023).

[AF19] Arnold, D., Furmans, K.: *Materialfluss in Logistiksystemen*. 7. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2019.

[Arn+08] Arnold, D. et al.: *Handbuch Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

[Bal13] Ballantyne, E. E. F.: „The benefit of integrating freight logistics into urban transport demand management measures and policies". Dissertation. Leeds: The University of Leeds, 2013. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/19742547.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[BBR21] Basma, H., Beys, Y., Rodrigues, F.: *Battery electric tractor-trailers in the European Union: A vehicle technology analysis*. 2021. URL: https://theicct.org/sites/default/files/publications/eu-tractor-trailers-analysis-aug21-2.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Bau+13] Baudach, J. et al.: „Modellentwicklung“. In: *Verkehrs- und Transportlogistik*. Hrsg. von U. Clausen, C. Geiger. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 327–403.

[Bau+21] Baumgarten, H. et al.: „Antriebe“. In: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Hrsg. von S. Pischinger, U. Seiffert. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2021, S. 461–860.

[BT18] Bentlage, M., Thierstein, A.: „Agglomeration, Agglomerationsraum“. In: *Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung*. Hrsg. von Akademie für Raumforschung und Landesplanung. Hannover, 2018, S. 37–48.

[Bin19] Binnebößel, U.: *Geräuscharme Nachtlogistik - Eine Lösung für den innerstädtischen Lieferverkehr – Handelsverband Deutschland (HDE)*. Hrsg. von Handelsverband Deutschland - HDE e.V. 2019. URL: https://einzelhandel.de/?option=com_content&view=article&id=12293&Itemid=-1 (besucht am 10. 04. 2024).

[Bip20] Bippus, H.: „Eine Alternative im öffentlichen Warennahverkehr: elektronische Lastenräder und Hub-Lösungen“. In: *Smart City - Made in Germany*. Hrsg. von C. Etezadzadeh. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2020, S. 593–603.

[Boy02] Boyce, D.: „Is the Sequential Travel Forecasting Paradigm Counterproductive?“ In: *Journal of Urban Planning and Development* 128.4 (2002), S. 169–183.

[Bra91] Brauer, K. M.: *Tätigkeitsbedingungen der Verkehrsbetriebe*. Unveränd. Nachdr. der 1. Aufl. von 1979. Bd. Teil 1. Schriften zur Betriebswirtschaftslehre des Verkehrs. Berlin: Duncker & Humblot, 1991.

[Bre15] Bretzke, W.-R.: *Logistische Netzwerke*. 3., Auflage. Berlin: Springer Science and Business Media, 2015.

[Bri22] Brinkhoff, T.: *Geodatenbanksysteme in Theorie und Praxis: Einführung unter besonderer Berücksichtigung von PostGIS und Oracle*. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin und Offenbach: Wichmann, 2022.

[BCV98] Buchholz, J., Clausen, U., Vastag, A.: *Handbuch der Verkehrslogistik*. Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungen Ser. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 1998.

[Bun23a] Bundesamt für Logistik und Mobilität: *LKW-Maut - Mauttabelle*. 2023. URL: https://www.balm.bund.de/DE/Themen/Lkw-Maut/Mauttabelle/mauttabelle_node.html (besucht am 10. 04. 2024).

[Bun04] Bundesministerium der Justiz: *Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung): ArbStättV*. 2004.

[Bun17] Bundesministerium der Justiz: *Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (Baunutzungsverordnung): BauNVO*. 2017.

[Bun23b] Bundesministerium der Justiz: *Güterkraftverkehrsgesetz: GüKG*. 2023.

[Bun23c] Bundesministerium der Justiz: *Verordnung zur Durchführung des Fahrpersonalgesetzes (Fahrpersonalverordnung): FPersV*. 2023.

[Bun23d] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: *Infrastruktur: Straßennetz*. 2023. URL: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/infrastruktur-statistik.html (besucht am 10. 04. 2024).

[Bun23e] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: *Wissing: „Verkehr in Deutschland wird zunehmen"*. 2023. URL: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2023/017-wissing-pk-verkehrsentwicklung-deutschland.html (besucht am 10. 04. 2024).

[Bun23f] Bundesnetzagentur: *Elektromobilität: Öffentliche Ladeinfrastruktur*. 2023. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/start.html (besucht am 10. 04. 2024).

[Bun23g] Bundesnetzagentur: „Tätigkeitsbericht Eisenbahnen 2021/2022: Bericht gemäß §71 Eisenbahnregulierungsgesetz". In: (2023). URL: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/TaetigkeitsB2021u22.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (besucht am 10. 04. 2024).

[Bur21] Burgert, T.: *Binnenhäfen stoßen an Kapazitätsgrenzen*. Hrsg. von Verkehrs-Rundschau. 2021. URL: https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/transport-logistik/binnenhaefen-stossen-an-kapazitaetsgrenzen-2970649 (besucht am 10. 04. 2024).

[Chr23] Christopher, M.: *Logistics & supply chain management*. Sixth edition. Harlow, England: Pearson, 2023.

[DL13] Dabidian, P., Langkau, S.: „Straßengüterverkehr". In: *Verkehrs- und Transportlogistik*. Hrsg. von U. Clausen, C. Geiger. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 137–159.

[Dac17] Dachser: *DACHSER liefert mit Elektro-Lkw*. 2017. URL: https://www.dachser.de/de/mediaroom/DACHSER-liefert-mit-Elektro-Lkw-795 (besucht am 10. 04. 2024).

[Dac19] Dachser: *DACHSER erhält den Mercedes-Benz eActros*. 2019. URL: https://www.dachser.de/de/mediaroom/DACHSER-erhaelt-den-Mercedes-Benz-eActros-1590 (besucht am 10. 04. 2024).

[Dah18] Dahmen, B.: „Kopplung makroskopischer Wirtschaftsverkehrsmodelle mit System Dynamics“. Dissertation. 2018.

[DSH21] Deckert, C., Stodick, K., Hertz-Eichenrode, D.: „Nachhaltige Paketauslieferung mit Mikro-Depots“. In: *Making Connected Mobility Work*. Hrsg. von H. Proff. Wiesbaden: SpringerGabler, 2021, S. 549–561.

[Der96] Der Rat der Europäischen Union: *Richtlinie 96/53/EG*. 1996.

[DER23a] DER SPIEGEL: *Null-Emissions-Zone: Teile der Stockholmer City sind für Verbrenner bald tabu*. 2023. URL: https://www.spiegel.de/auto/teil-der-stockholmer-city-ist-fuer-verbrenner-bald-tabu-a-381287f5-986b-446d-ab4e-bab92a266e3a (besucht am 10. 04. 2024).

[DER23b] DER SPIEGEL: *Zusteller und Klimaschutz: Elektrische Paketwagen könnten 632.000 Tonnen CO_2 pro Jahr sparen*. 2023. URL: https://www.spiegel.de/wirtschaft/paketdienste-elektrische-transporter-koennten-632-000-tonnen-co-pro-jahr-sparen-a-c4c76753-c8cb-45e1-b540-d54ff9f41fe2 (besucht am 10. 04. 2024).

[Dey11] Deymann, S.: „Entwicklung eines Vorgehens zur Groblayoutplanung von Stückgutspeditionsanlagen“. Dissertation. Dortmund: Technische Universität Dortmund, 2011.

[DIN89] DIN - Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN30781 Transportkette: Grundbegriffe*. Berlin, 1989.

[DIN15] DIN - Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN ISO 9000:2015, Qualitätsmanagementsysteme- Grundlagen und Begriffe*. Berlin, 2015.

[DZ23] Dittmann, K., Zaeri Esfahani, M.: *Hybrides Projektdesign: Modernes Projektmanagement abseits von Königreichen*. 1. Auflage. Freiburg, München und Stuttgart: Haufe Group, 2023.

[Dop20] Doppelbauer, M.: *Grundlagen der Elektromobilität: Technik, Praxis, Energie und Umwelt*. Lehrbuch. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2020.

[e-m21] e-mobil BW - Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg: *Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug: Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte*. 2021. URL: https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-Systemvergleich.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[e-m23] e-mobil BW - Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg: *e-mobil BW Datenmonitor Oktober 2023*. 2023. URL: https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Datenmonitor_Oktober_2023_01.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[EW12] Eichhorn, C., Waßmuth, V.: *Innenstadtlogistik mit Zukunft: Maßnahmen für einen funktionierenden Wirtschaftsverkehr in der Stadt Stuttgart*. Hrsg. von Industrie- und Handelskammer Region Stuttgart. Stuttgart, 2012. URL: https://www.ihk.de/blueprint/servlet/resource/blob/669346/3faea0610f6fb56755585a8b935f8f52/innerstaedtischer-wirtschaftsverkehr-internet-data.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Ers+17] Ersoy, M. et al.: „Fahrdynamik". In: *Fahrwerkhandbuch*. Hrsg. von M. Ersoy, S. Gies. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, S. 51–169.

[Eur13] Europäische Kommission: *A call to action on urban logistics*. Brüssel, 2013. URL: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ffac1877-67ca-11e3-a7e4-01aa75ed71a1 (besucht am 10. 04. 2024).

[Eur23] Europäische Kommission - Vertretung in Deutschland: *Kommissions-Vorschlag: Neue CO2–Standards für Lkw, emissionsfreie Stadtbusse ab 2030*. 2023. URL: https://germany.representation.ec.europa.eu/news/kommissions-vorschlag-neue-co2-standards-fur-lkw-emissionsfreie-stadtbusse-ab-2030-2023-02-14_de (besucht am 10. 04. 2024).

[Eur19] European Parliament and Council: *Regulation (EU) 2019/1242 setting CO2 emission performance standards for new heavy-duty vehicles*. 2019. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242&from=EN (besucht am 10. 04. 2024).

[Feh19] Fehrenbach, H.: *Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehrssektor bis 2030: Kurzstudie zu den Potenzialen an Kraftstoffen auf Basis von Anbaubiomasse sowie biogenen Abfällen und Reststoffen*. 2019. URL: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu_Kurzstudie_Potenzialschaetzungen_fuer_Biokraftststoffe_im_Verkehrssektor.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[FH10] Fischer, P., Hofer, P.: *Lexikon der Informatik*. 15. Aufl. 2011. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.

[FK18] Fleischmann, B., Kopfer, H.: „Transport- und Tourenplanung". In: *Planung logistischer Systeme*. Hrsg. von H. Tempelmeier. Fachwissen Logistik. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2018, S. 71–98.

[FL20] Fraunhofer IML, LNC LogisticNetwork Consultants GmbH: *Untersuchung: Veränderung des gewerblichen Lieferverkehrs und dessen Auswirkungen auf die städtische Logistik: Abschlussbericht*. 2020. URL: https://fops.de/wp-content/uploads/2020/12/70-906_Abschlussbericht.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Fra21] Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE: *E-LKW mit vollintegrierter Photovoltaik nimmt Fahrt auf*. 2021. URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2021/2621_

ISE_d_PI_E-LKW-mit-vollintegrierter-Photovoltaik.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Fri+19] Friedrich, M. et al.: *Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle: Bericht: FE 70.919/2015*. 2019.

[GPL20] Gasde, J., Preiss, P., Lang-Koetz, C.: „Integrated Innovation and Sustainability Analysis for New Technologies: An approach for collaborative R&D projects". In: *Technology Innovation Management Review* 10.2 (2020), S. 37–50.

[GG22] Gehring, H., Gabriel, R.: *Wirtschaftsinformatik*. Lehrbuch. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Gabler, 2022.

[GH19] Gerdes, J., Heinemann, G.: „Urbane Logistik der Zukunft – ganzheitlich, nachhaltig und effizient". In: *Handel Mit Mehrwert*. Hrsg. von G. Heinemann. Wiesbaden: Gabler, 2019, S. 397–420.

[Ger02] Gerl, B.: *Innovative Automobilantriebe: Konzepte auf der Basis von Brennstoffzellen, Traktionsbatterien und alternativen Kraftstoffen*. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie, 2002.

[Ger23] Gerstein, D.: *Tank- und Ladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge: DVGW/dena Plattform Schwerlastverkehr*. 2023. URL: https://plattform-nachhaltiger-schwerlastverkehr.de/fileadmin/user_upload/Publikationsordner/20230614_DVGW_Bericht_AG_Infrastruktur.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Gie94] Gietz, M.: *Computergestützte Tourenplanung mit zeitkritischen Restriktionen*. Heidelberg: Physica-Verlag, 1994.

[GF12] Gleißner, H., Femerling, C.: *Logistik: Grundlagen - Übungen - Fallbeispiele*. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer-Gabler, 2012.

[GF16] Gleißner, H., Femerling, C.: *Kompakt Edition: Transport: Elemente - Management - Märkte*. Springer Gabler Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Gabler, 2016.

[Göc+20] Göckeler, K. et al.: *Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr - 1. Teilbericht: Erster Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „StratES: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehr"*. Berlin, 2020. URL: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Teilbericht1-Marktanalyse.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Göc+22] Göckeler, K. et al.: *Anforderungen der Logistikbranche an einen Umstieg auf klimaschonende Fahrzeugtechnologien -Ergebnisbericht einer standardisierten Befragung: Ergebnisbericht einer standardisierten Befragung. Zweiter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „StratES: Strategie für*

die Elektrifizierung des Straßengüterverkehr“. Berlin, 2022. URL: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Teilbericht_2-Befragung_Logistikbranche.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Göc+23] Göckeler, K. et al.: *StratES - Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs: Studie auf Basis von Markthochlaufmodellierungen: Dritter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „StratES: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehr“*. Berlin, 2023. URL: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Szenarien-Elektrifizierung-Strassengueterverkehr.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Gol11] Goll, J.: *Methoden und Architekturen der Softwaretechnik*. 1. Aufl. Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.

[Gud12] Gudehus, T.: *Logistik 1: Grundlagen, Verfahren und Strategien*. 4. Aufl. 2012. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.

[Hel+22] Helms, H. et al.: *Energieverbrauch von Elektroautos (BEV): Abschlussbericht*. Hrsg. von Umweltbundesamt. 2022.

[HB08] Hensher, D. A., Button, K. J.: *Handbook of transport modelling*. 2. ed. Bd. 1. Handbooks in transport. Amsterdam: Elsevier, 2008.

[HS20] Hoekstra, A., Steinbuch, M.: *Vergleich der lebenslangen Treibhausgasemissionen von Elektroautos mit den Emissionen von Fahrzeugen mit Benzin- oder Dieselmotoren: Studie der Eindhofen Uiversity of Technology*. 2020. URL: http://www.energieforum-isny.de/wp-content/uploads/2020/09/deutsch_Studie-EAuto-versus-Verbrenner_CO2.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[IDT23] IDTechEx: *Charging Infrastructure for Electric Vehicles and Fleets 2024-2034*. 2023. URL: https://www.idtechex.com/en/research-report/charging-infrastructure-for-electric-vehicles-and-fleets-2024-2034/945 (besucht am 10. 04. 2024).

[ife23] ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg: *My eRoads-Tool*. 2023. URL: https://www.my-e-roads.de/de-DE/ (besucht am 10. 04. 2024).

[Ihd01] Ihde, G. B.: *Transport, Verkehr, Logistik. Gesamtwirtschafliche Aspekte und einzelwirtschaftliche Handhabung. 3., völlig überarb. und erw. Aufl*. Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München: Vahlen, 2001.

[Int22] Internationales Verkehrswesen - Das technisch-wissenschaftliche Fachmagazin: *KEMREX: Range Extender für elektrisch betriebenen LKW*. 2022. URL: https://www.internationales-verkehrswesen.de/kemrex-range-extender-fuer-elektrisch-betriebenen-lkw/ (besucht am 10. 04. 2024).

[Jak21] Jakoby, W.: *Projektmanagement für Ingenieure: Ein praxisnahes Lehrbuch für den systematischen Projekterfolg*. 5., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2021.

[JV05] Janßen, T., Vollmer, R.: *Kleinräumige Wirtschaftsverkehrsmodelle: FE-Nr. 70.0689/2002*. Aachen, 2005.

[Jöh+22] Jöhrens, J. et al.: *Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030: Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotential des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“*. Heidelberg, 2022. URL: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2022-02-04_-_My_eRoads_-_Potentiale_Lkw-Antriebstechnologien_-_final_01.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Jöh+23] Jöhrens, J. et al.: *Potentialanalyse für Batterie-LKW: Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“*. 2023. URL: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2021-07-29_-_My_eRoads_-_Potentialanalyse_Batterie-Nfz_-_final.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[JGW04] Jong, G., Gunn, H., Walker, W.: „National and International Freight Transport Models: An Overview and Ideas for Future Development“. In: *Transport Reviews* 24.1 (2004), S. 103–124.

[Jün89] Jünemann, R.: *Materialfluß und Logistik: Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen*. Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungen. Berlin und Heidelberg: Springer, 1989.

[Kar20] Karle, A.: *Elektromobilität: Grundlagen und Praxis*. 4., aktualisierte Auflage. Hanser eLibrary. München: Hanser, 2020.

[Kip+22] Kippelt, S., Probst, F., Greve, M., Burges, K.: *Einfach laden an Rastanlagen: Auslegung des Netzanschlusses für E-Lkw-Lade-Hubs*. 2022. URL: https://nationale-leitstelle.de/wp-content/uploads/2022/09/Leitstelle_LKW-Netzstudie.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[KKK12] P. Klaus, W. Krieger, M. Krupp, Hrsg.: *Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2012.

[KUW19] Kluschke, P., Uebel, M., Wietschel, M.: *Alternative Antriebe im straßengebundenen Schwerlastverkehr: eine quantitative Ermittlung der Nutzeranforderungen an schwere Lkw und deren Infrastruktur: Working Paper Sustainability and Innovation No. S 05/2019*. Hrsg. von Fraunhofer ISI. 2019. URL: https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/83dfe856-cff9-470d-a613-1bd1f421f9e1/content#:~:text=Die%20t%C3%A4gliche%20Fahrleistung%20betr%C3%A4gt%20bei,durchschnittlich%20100%20bis%20400%20km. (besucht am 10. 04. 2024).

[Koe18] Koether, R.: *Distributionslogistik: Effiziente Absicherung der Lieferfähigkeit.* 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Gabler, 2018.

[Köh14] Köhler, U.: *Einführung in die Verkehrsplanung: Grundlagen, Modellbildung, Verkehrsprognose, Verkehrsnetze.* Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl., 2014.

[Kra23] Kraftfahrt-Bundesamt, Hrsg.: *Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD): Gesamtverkehr August 2022.* Flensburg, 2023. URL: `https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Kraftverkehr/VD5/vd5_202208.pdf;jsessionid=B7512A8CC58E37F4BCBE26DE211F80D4.live11292?__blob=publicationFile&v=2` (besucht am 10. 04. 2024).

[Kre16] Kreyenberg, D.: „Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität“. Dissertation. Karlsruhe, 2016.

[KHG18] Kühnel, S., Hacker, F., Görz, W.: *Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr: Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich: Erster Teilbericht des Forschungsvorhabens „StratON – Bewertung.* Berlin, 2018.

[Kum10] Kummer, S.: *Einführung in die Verkehrswirtschaft.* 2. Aufl. Bd. 8336. UTB Betriebswirtschaftslehre. Wien: Facultas Verl., 2010.

[LEJ15] Landschützer, C., Ehrentraut, F., Jodin, D.: „Containers for the Physical Internet: requirements and engineering design related to FMCG logistics“. In: *Logistics Research* 8.1 (2015).

[Las23] Lasch, R.: *Strategisches und operatives Logistikmanagement: Distribution.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023.

[Lau12] Lauenroth, L.: „Dachser ist beim Stückgut die Nummer eins“. In: *DVZ Themenheft: Stars der Logistik* 37 (2023-09-12).

[Lau28] Lauenroth, L.: „Zuverlässigkeit ist Trumpf: DVZ-Stückgutumfrage“. In: *Deutsche Verkehrs-Zeitung (DVZ)* 2022.39 (2022-09-28).

[Lee21] Leerkamp, B.: „Modelle und Strategien des Güterverkehrs – Grundlagen, Ziele, Methoden“. In: *Stadtverkehrsplanung.* Hrsg. von D. Vallée, B. Engel, W. Vogt. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2021, S. 341–378.

[Lub96] Lublow, R.: „Konzeption eines telematikgestützten Speditionsleitstandes für den Sammelgutumschlag“. Dissertation. Dortmund: Technische Universität Dortmund, 1996.

[MAN16] MAN Truck & Bus AG: *Grundlagen der Nutzfahrzeugtechnik: LKW und Bus - Lehrbuch der MAN Academy.* 4. vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage. München und Bonn: Kirschbaum, 2016.

[MV14] Mattfeld, D. C., Vahrenkamp, R.: *Logistiknetzwerke: Modelle für Standortwahl und Tourenplanung*. 2., aktualisierte und überarb. Aufl. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.

[Mat+21] Matthes, F. C. et al.: *Die Wasserstoffstrategie 2.0 für Deutschland: Untersuchung für die Stiftung Klimaneutralität*. Berlin, 2021.

[Mau+24] Mauch, L., Walz, K., Otteny, F., Pfleger, D.: „Plattform für einen sektorenübergreifenden Austausch von Transport- und Energiedaten". In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 126.1 (2024), S. 70–74.

[MEP02] ME&P & WSP: *Review of freight modelling: Final Report*. 2002. URL: `https://mwigan.com/mrw/ewExternalFiles/02%2009%20DFTfreightmodelFinal0%20copy.pdf` (besucht am 10. 04. 2024).

[Mes11] Mest, L.: „Typologische Ordnung von Logistikstrategien und -strukturen für die Güterwirtschaftsverkehrsmodellierung". Dissertation. Dortmund: Techn. Univ., 2011.

[MB07] Michael Spahn, Barbara Lenz: „Application of A Multi-Level Freight Transport Demand Model to Estimate the Effects of Political Measures". In: *11th World Conference on Transport Research*. 2007.

[Mil23] Milence: *Charging the future of road transport*. 2023. URL: `https://milence.com/` (besucht am 10. 04. 2024).

[Muc+21] Muchna, C., Brandenburg, H., Fottner, J., Gutermuth, J.: *Grundlagen der Logistik: Begriffe, Strukturen und Prozesse*. 2., aktualisierte Auflage. Springer eBook Collection. Wiesbaden: Springer Gabler, 2021.

[Mül+22] Müller, S. et al.: „Evaluation of the Feasible Provision of Flexibility in Distribution Networks with Advanced Grid Monitoring". In: *2022 17th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*. IEEE, 2022, S. 1–7.

[ME13] Muschkiet, M., Ebel, G.: „Begriffe und Systematik". In: *Verkehrs- und Transportlogistik*. Hrsg. von U. Clausen, C. Geiger. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 123–136.

[Nat20] Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 5 Digitalisierung für den Mobilitätssektor: *Netzintegration von Elektromobilität - Basis für eine erfolgreiche Sektorkopplung - Eine Definition*. 2020. URL: `https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/07/NPM-AG5-Netzintegration-von-Elektromobilit%C3%A4t-Basis-f%C3%BCr-eine-Erfolgreiche-Sektorkopplung-Eine-Definition.pdf` (besucht am 10. 04. 2024).

[Nat21] Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 5 Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung: *Ladeinfrastruktur für batterieelektrische LKW*. 2021. URL: https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/04/NPM_AG5_Ladeinfrastruktur_ELkw.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[NOW23] NOW - Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie: *Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengueterverkehr*. 2023. URL: https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/wp-content/uploads/2023/02/Marktentwicklung-klimafreundlicher-Technologien-im-schweren-Strassengueterverkehr.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[PK22] Pflaum, A., Klaus, P.: *TOP 100 der Logistik: Executive Summary*. 2022/2023. Hamburg: DVV Media Group, 2022. URL: https://www.scs.fraunhofer.de/content/dam/scs/DE/publikationen/studien/maerkte-standorte-logistik/2022_ExecSumm_Top100.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Pfl+20a] Pflaum, A., Schwemmer, M., Dürrbeck, K., Klaus, P.: *TOP 100 der Logistik: Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer*. 2020/2021. Hamburg: DVV Media Group, 2020.

[Pfl18] Pfleger, D.: „Auswirkungen der Elektromobilität auf den Betrieb von Logistikzentren“. In: *Energiebedarf und Effizienz in der Intralogistik*. Hrsg. von C. Landschützer, M. Schedler. 2018, S. 1–16.

[Pfl+24] Pfleger, D., Wagner, C., Schulz, R., Rudion, K.: „Elektrifizierung des Stückgutverkehrs – Vorgehensweise zur virtuellen Elektrifizierung in einer Großstadt“. In: *Next Chapter in Mobility*. Hrsg. von H. Proff. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Forthcoming 2024.

[PW19] Pfleger, D., Walz, K.: „E-Mobilität flexibel: Elektromobilität wird in der Logistik zunehmend wichtiger. Ein Forschungsprojekt untersucht, welche Rolle Logistikzentren für die Ladeinfrastruktur und die Netzstabilität spielen können“. In: *LOGISTIK HEUTE Logistik-Immobilien und Standorte* (2019), S. 26–27.

[Pfl+20b] Pfleger, D. et al.: *Ermittlung des logistischen und energetischen Flexibilitätspotentials eines Logistikzentrums unter Berücksichtigung von Elektromobilität*. Hrsg. von Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik e.V. 2020. URL: https://www.logistics-journal.de/archive/proceedings/2020/5157/pfleger_de_2020.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Pfo18] Pfohl, H.-C.: *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 9. Aufl. 2018. SpringerLink Bücher. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018.

[Pie21] Pieringer, M.: „E-Commerce-Boom treibt Nachfrage nach Logistikflächen: Lösungen für den urbanen Raum“. In: *LOGISTIK HEUTE Sonderheft Logistik-Immobilien & Standorte 2021* (2021).

[PG21] Pietruszka, W. D., Glöckler, M.: *MATLAB und Simulink in der Ingenieurpraxis: Modellbildung, Berechnung und Simulation*. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2021.

[PM21] Pillat, J., Manz, W.: „Modelle des Personenverkehrs“. In: *Stadtverkehrsplanung*. Hrsg. von D. Vallée, B. Engel, W. Vogt. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2021, S. 273–339.

[Pir49] Pirath, C.: *Die Grundlagen der Verkehrswirtschaft*. Zweite erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1949.

[PTV23a] PTV Group: *PTV startet den ersten markenunabhängigen Routenplaner für elektrische LKW: EV Truck Route Planner*. 2023. URL: https://company.ptvgroup.com/nl/resources/pers/laatste-nieuws/ptv-startet-routenplaner-fuer-elektrische-lkw (besucht am 10. 04. 2024).

[PTV23b] PTV Planung Transport Verkehr GmbH: *PTV Route Optimiser ST - Leistungsbeschreibung*. 2023.

[PwC22] PwC - PricewaterhouseCooper: *The Dawn of Elektrified Trucking: Truck Study 2022: Routes to decarboniting commercial vehicles*. 2022. URL: https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/transport/the-dawn-of-electrified-trucking.html (besucht am 10. 04. 2024).

[QGI24] QGIS: *QGIS: Ein freies Open-Source-Geographisches-Informationssystem*. 2024. URL: https://www.qgis.org/de/site/ (besucht am 10. 04. 2024).

[Rei17] Reicher, C.: *Städtebauliches Entwerfen*. 5. Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2017.

[RB18] Rodrigue, J.-P., Behrends, S.: *The Dualism of Urban Freight Distribution: City vs. Suburban Logistics*. New York, 2018. URL: https://www.metrans.org/assets/research/MF%204.1c_Dualism%20of%20urban%20freight%20distribution_Final%20Report_102518.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Rol20] Rolko, K.: „Simulationsbasierte Optimierung der Ausstattung von Teilstrecken mit Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2020. URL: https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/13358/ (besucht am 10. 04. 2024).

[Roy70] Royce, W. W.: „Managing the Development of Large Software Systems“. In: *Proceedings of IEEE WESCON,* Bd. 26. 1970, S. 328–388. URL: https://www-scf.usc.edu/~csci201/lectures/Lecture11/royce1970.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Rüh18] Rühl, F.: „Das Konzept des Transportmanagements zur Beeinflussung der Güterverkehrsnachfrage im Rahmen der kommunalen Verkehrsplanung“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2018.

[Sam+22] Samsun, R. C. et al.: *Klimafreundliche Nutzfahrzeuge - Vergleich unterschiedlicher Technologiepfade für CO2-neutrale und -freie Antriebe*. 2022.

[Sch+20] Schemme, S. et al.: „H2-based synthetic fuels: A techno-economic comparison of alcohol, ether and hydrocarbon production“. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 45.8 (2020), S. 5395–5414.

[Sch23] Schulz, R.: „Auftragsmanagement in Netzwerken – Supply Chain Management + JIT“. In: *Handbuch Unternehmensorganisation*. Hrsg. von O. Riedel, K. Hölzle, S. Schlund. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023.

[SKP23] Schulz, R., Korte, D., Pfleger, D.: „Das Stuttgarter Logistik Modell als Beitrag für eine urbane Mobilität“. In: *Towards the new normal in mobility*. Hrsg. von H. Proff. Research. Wiesbaden: Springer Gabler, 2023, S. 797–809.

[Sta24] Statista: *Anzahl der Wasserstofftankstellen in Deutschland 2023*. 2024. URL: `https://de.statista.com/statistik/daten/studie/820836/umfrage/anzahl-der-wasserstofftankstellen-in-deutschland/` (besucht am 10. 04. 2024).

[Sta23] Statistisches Bundesamt: *Beförderungsmenge und Beförderungsleistung nach Verkehrsträgern*. 2023. URL: `https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Tabellen/gueterbefoerderung-lr.html` (besucht am 10. 04. 2024).

[Ste23] Stein, U.: *Programmieren mit MATLAB: Programmiersprache, grafische Benutzeroberflächen, Anwendungen*. 7., vollständig überarbeitete Auflage. Hanser eLibrary. München: Hanser, 2023.

[SS21] Stölzle, W., Schreiner, S.: „Neue Perspektiven für urbane Logistik? Konsolidierungskonzepte im städtischen Güterverkehr“. In: *Stadtverkehrsplanung*. Hrsg. von D. Vallée, B. Engel, W. Vogt. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2021, S. 223–255.

[TRD12] Tavasszy, L. A., Ruijgrok, K., Davydenko, I.: „Incorporating Logistics in Freight Transport Demand Models: State-of-the-Art and Research Opportunities“. In: *Transport Reviews* 32.2 (2012), S. 203–219.

[Tem18] H. Tempelmeier, Hrsg.: *Planung logistischer Systeme*. Fachwissen Logistik. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2018.

[Umu20] Umundum, P.: „Die letzte Meile – Königsdisziplin der Logistik“. In: *Logistik - die unterschätzte Zukunftsindustrie*. Hrsg. von P. H. Voß. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Gabler, 2020, S. 149–162.

[Umw18] Umweltbundesamt: *Aus welchen Quellen stammt Feinstaub?* 2018. URL: https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/aus-welchen-quellen-stammt-feinstaub (besucht am 10. 04. 2024).

[Uni24] Universität Hannover - Initiative Urbane Logistik Hannover: *Das Konzept White-Label im Detail*. 2024. URL: https://useful.uni-hannover.de/konzept-detail?concept=3 (besucht am 10. 04. 2024).

[VKS12] Vahrenkamp, R., Kotzab, H., Siepermann, C.: *Logistik: Management und strategien*. 7., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Oldenbourg Verlag, 2012.

[Vas+17] A. Vastag et al., Hrsg.: *Potenziale einer geräuscharmen Nachtlogistik: Ergebnisse und Handlungsempfehlungen des Forschungsprojekts GeNaLog*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2017. URL: https://www.iml.fraunhofer.de/content/dam/iml/de/documents/OE%20320/GeNaLog_Ger%C3%A4uscharme_Nachtlogistik.pdf (besucht am 10. 04. 2024).

[Wal11] Wallentowitz, H.: *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen*. 2., überarbeitete Auflage. SpringerLink Bücher. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.

[WCR20] Walz, K., Contreras, D., Rudion, K.: „Synthetic charging profiles development of battery–electric trucks for probabilistic grid planning“. In: *CIRED - Open Access Proceedings Journal* 2020.1 (2020), S. 124–127.

[Wal+22] Walz, K., Rudion, K., Moraw, C.-M., Eilers, M.: „Probabilistic Impact Assessment of Electric Truck Charging on a Medium Voltage Grid“. In: *2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*. IEEE, 2022, S. 1–6.

[Waw22] Wawer, T.: „Aufbau und Betrieb von Stromnetzen“. In: *Elektrizitätswirtschaft*. Hrsg. von T. Wawer. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Gabler, 2022, S. 71–96.

[WH20] Wehking, K.-H., Hager, H.-J.: „Verkehrstechnik“. In: *Technisches Handbuch Logistik*. Hrsg. von K.-H. Wehking et al. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2020, S. 741–790.

[WW05] Wermuth, Wirth: „Modelle und Strategien des Güterverkehrs“. In: *Stadtverkehrsplanung: Grundlagen, Methoden, Ziele*. Hrsg. von G. Steierwald, H. D. Künne, W. Vogt. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, S. 296–326.

[Wes29] Westerheide, C.: „Hamburg bekommt Tunnelprojekt“. In: *Deutsche Verkehrs-Zeitung (DVZ)* 2020 (2020-09-29). URL: https://www.dvz.de/unternehmen/logistikimmobilien/detail/news/hamburg-bekommt-tunnelprojekt.html (besucht am 10. 04. 2024).

[Win13] Winter, K.: „Logistikoutsourcing“. In: *Verkehrs- und Transportlogistik*. Hrsg. von U. Clausen, C. Geiger. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 71–94.

[Wlč98] Wlček, H.: „Gestaltung der Güterverkehrsnetze von Sammelgutspeditionen“. Dissertation. Augsburg: Universität Augsburg, 1998.

[Wol+21] Wolff, P. et al.: *Urbane Logistik in der Stadt und Verkehrsplanung*. Hrsg. von Planersocietät. Dortmund, 2021. URL: `https://planersocietaet.de/wp-content/uploads/2021/03/Urbane_Logistik.pdf` (besucht am 10. 04. 2024).

[Zie88] Ziegler, H.-J.: *Computergestützte Transport- und Tourenplanung: Optimierung beim Fahrzeugeinsatz und bei der Gestaltung von Transportanlagen*. Bd. 223. Kontakt + Studium. Würzburg und Ehningen bei Böblingen: Vogel und expert-Verl., 1988.

Anhang

A: Anforderungsliste des Programms der Auftragserzeugung

ID	Name	Beschreibung
1	Funktionale Anforderungen	
1.1	Erzeugung der Kundenstruktur\ Integration der Eingangsdaten	Das Programm benötigt zur Auftragsgeneration eine vorgegebene Eingangsdatenbasis, welche auf öffentlichen Daten und einer geringen Menge an realen Daten von Speditionen basiert. Diese muss über das CSV-Datenformat importiert werden. Die Informationen dienen als Ausgangspunkt für die Generierung der synthetischen Auftragsdaten. Eingangsdaten: - Geografische Daten: Adressen, Gewerbegebiete, POI, etc. - Reale Auftragsdaten: Volumen / Gewicht / Packstücke / Servicezeitklasse - Speditionen & Auftragsvolumen - Verteilung B2B & B2C - Verteilung Aufträge innerhalb und außerhalb Stuttgarts - Verteilung Zustellung & Abholung - Verteilung Nachfragebranchen - Erwerbstätigenzahlen - Einwohnerzahlen - Saisonalitätsdaten
1.2	Konfiguration der zeitlichen Dimension	Das Programm muss dem Benutzenden ermöglichen, den Zeitraum für die Auftragsgenerierung festzulegen. In der Auswahl muss der Bedienende ein oder mehrere Tage im verfügbaren Jahr auswählen können.
1.3	Speditionsauswahl	Das Programm muss dem Benutzenden die Auswahl einzelner oder aller Speditionen in Form einer Liste ermöglichen.
1.4	Generierung der synthetischen Aufträge	Basierend auf den eingegebenen und integrierten Daten muss das Programm synthetische Auftragsdaten mit vorgegebenen Attributen erzeugen. Attribute: - Adresse - Geo-Koordinaten (Angabe in Dezimalgraden) - Depot-ID - Datum - Auftragsnummer - Auftragstyp: Zustellung/Abholung - Gewicht, Volumen, Packstückanzahl - Servicezeitklasse - Zeitfenster
1.5	Export	Das Programm muss die generierten Auftragsdaten in einer vorgegebenen Struktur in Tabellenform für jede gewählte Spedition ausgeben. Die Tabellen müssen im CSV-Dateiformat exportiert werden, um sie in anderen Anwendungen (z. B. Tourenplanungssoftware) verwenden zu können.

ID	Name	Beschreibung
1.6	Übertragbarkeit	Die Übertragbarkeit auf einen anderen Zeitraum (Änderung des Betrachtungsjahrs), ein anderes Gebiet und eine andere Branche muss durch den einfachen Austausch der Basisdaten gegeben sein.
2	Nicht-funktionale Anforderungen	
	Allgemeine Anforderungen	
2.1	Leistung	Das Programm ist in der Lage, eine große Anzahl von Aufträgen effizient zu erzeugen, um lange Wartezeiten zu vermeiden.
2.2	Stabilität	Das Programm muss stabil und zuverlässig sein, um Ausfälle während der Generierung von Aufträgen zu verhindern.
2.3	Einzelnutzung	Der Betrieb durch eine Person ist ausreichend.
	Anforderungen an die Software-Ergonomie	
2.4	Sprache: Deutsch	Die Schnittstelle zum Benutzenden sowie alle Fehlermeldungen sind in deutscher Sprache zu erstellen.
2.5	Kennzeichnung von Schlüssel- und Pflichtfeldern	Die Schlüssel- und Pflichtfelder müssen in allen Dialogen durchgängig gekennzeichnet werden.
2.6	Nutzbarkeit mit PC-Grundkenntnissen	Da das Programm in sehr unregelmäßigen Abständen von den anwendenden Personen genutzt wird, sollte die Nutzung auf Basis von PC-Grundkenntnissen möglich sein. Darunter ist zu verstehen, dass durch das neue System kein weiterer Schulungsbedarf entstehen darf. Kenntnisse, die für die tägliche Arbeit mit einem PC-Arbeitsplatz genügen, sind als ausreichend für die Arbeit mit der neuen Software anzusehen.
2.7	Eindeutigkeit der Oberfläche	Die Oberfläche muss eindeutig und widerspruchsfrei gestaltet werden. Dies betrifft insbesondere klare Namensgebung der Eingabefelder, sowie den klaren Aufbau der Dialoge.
	Technische Anforderungen	
2.8	Programmiersprache	Das Programm kann in einer geeigneten Programmiersprache entwickelt werden, die die definierten Anforderungen erfüllt (z. B. MATLAB, Java, Python, C#).
2.9	Schnittstelle/ Datenaustausch	Zum Datenaustausch dient das CSV-Dateiformat/ Schnittstelle.
2.10	Datenbank	Das Programm kann CSV-Dateien als Datenbank verwenden, um Auftragskonfigurationen und generierte Aufträge zu speichern.
2.11	Plattform-unabhängigkeit	Das Programm ist plattformunabhängig und auf verschiedenen Betriebssystemen (Windows, macOS, Linux) lauffähig.
2.12	Dokumentation	Das Programm muss eine umfassende Dokumentation bereitstellen, die Bedienanleitungen, technische Spezifikationen und andere relevante Informationen enthält. Die Dokumentation ist in deutscher Sprache anzufertigen.

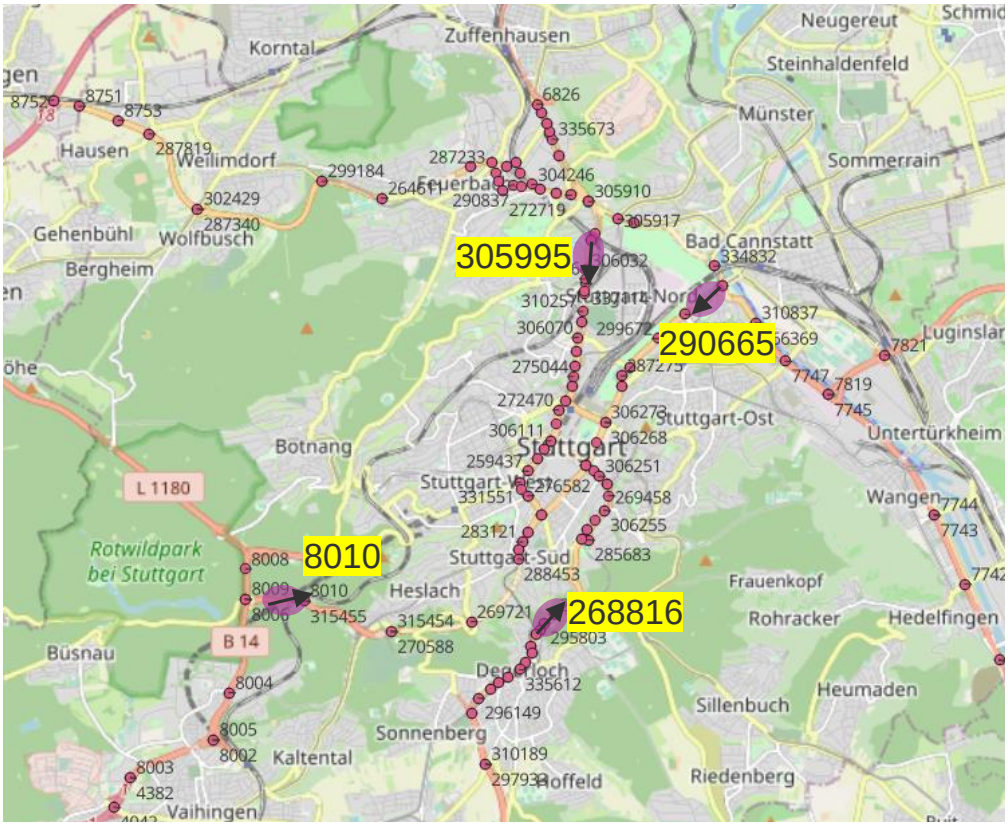
B: Aufteilung der Nachfragerbranchen

In der folgenden Tabelle sind diejenigen Nachfragerbranchen mit Unterbranchen aufgelistet, welche Bedarf an Stückgutzustellungen/-abholungen haben. Die Kategorie Gewerbegebiet (blau) und POI (orange; mit Unterkategorien) sind diesen zugeordnet und die Gewichtung angegeben. Die Gewichtung wird über den Umsatz und Logistikkosten ermittelt. Im Gesamten besteht eine Nachfrage nach Gewerbegebieten mit 68 % und nach POI mit 32 %.

	in %							in %		
Nachfragerbranchen	**Spezielle Stückgüter**	**allgemeine Stückgüter**	**gesamt**	**gesamt ohne Kleinunternehmen inkl. Privathaushalte**		**Unterbranchen**	**Gewerbegebiet/POI**	**Nachfrage Gewerbegebiet**	**Nachfrage POI**	**Zuteilung POI**
Metall/Maschinen	5	20	12,5	14,53	1	Metallerzeugung und Bearbeitung	Gewerbegebiet	10,00	0,00	
					2	Großhandel Eisen, Erze, Stahl	Gewerbegebiet	1,21	0,00	
					3	Maschinenbau	Gewerbegebiet	2,57	0,00	
					4	Großhandel Maschinen, Ausrüstung	Gewerbegebiet	1,06	0,00	
Holz/Glas/Kunststoff	5	7	6	6,98	5	holzverarbeitende Industrie (ohne Möbel)	Gewerbegebiet	0,89	0,00	
					6	Zellstoff, Papier	Gewerbegebiet	1,25	0,00	
					7	Druckgewerbe	Gewerbegebiet	0,40	0,00	
					8	Verlagsgewerbe	Gewerbegebiet	1,09	0,00	
					9	Einzelhandel Bücher, Zeitschriften	POI	0,00	0,20	bookshop, newsagent
					10	Gummi- und Kunststoffverarbeitung	Gewerbegebiet	2,21	0,00	
					11	Glasgewerbe, Keramik	Gewerbegebiet	0,60	0,00	
					12	Großhandel Haushaltswaren	Gewerbegebiet	0,48	0,00	
Elektronik	10	5	7,5	8,72	13	Büromaschinen, DV-Geräte Elektrotechnik	Gewerbegebiet	0,35	0,00	
					14	elektrische Verteilanlagen	Gewerbegebiet	1,50	0,00	
					15	Mess-, Steuer- u. Regeltechnik, Medizintechnik, Optik	Gewerbegebiet	1,23	0,00	
					16	Rundfunk/Fernseh-Herstellung	Gewerbegebiet	1,41	0,00	
					17	Großhandel Rundfunk-, Fernseh- und Unterhaltungstechnik	Gewerbegebiet	3,97	0,00	
					18	Einzelhandel elektrische Haushaltsgeräte	POI	0,00	0,44	computershop
Wohnen/Freizeit	10	5	7,5	8,72	19	Herstellung Möbel, Schmuck, Spielwaren, Sportartikel etc.	Gewerbegebiet	3,75	0,00	
					20	Einzelhandel Möbel, Spielwaren	POI	0,00	5,16	bicycle_rental, florist, funiture_shop, gift_shop, toy_shop, departement store
Bekleidung	5		2,5	2,91	21	Textil- u. Bekleidungsherstellung	Gewerbegebiet	0,64	0,00	
					22	Ledergewerbe, Schuhe	Gewerbegebiet	0,07	0,00	
					23	Großhandel Textil/Bekleidung/Schuhe	Gewerbegebiet	1,13	0,00	
					24	Einzelhandel Textil/Bekleidung/Schuhe	POI	0,00	1,13	clothes, shoe_sho, sports_shop, outdoor_shop
Lebensmittel	10	15	12,5	14,53	25	Lebensmittel-Herstellung	Gewerbegebiet	2,94	0,00	
					26	Tabakwaren-Herstellung	Gewerbegebiet	0,11	0,00	
					27	Großhandel Sonstige Nahrungsmittel	Gewerbegebiet	2,91	0,00	
					28	Großhandel sog. Gebrauchs-/Verbrauchsgüter, Non-Food	Gewerbegebiet	0,62	0,00	
					29	Einzelhandel Nahrung, Getränke, Tabakwaren	POI	0,00	3,99	bakery, supermarket, convenience, butcher, beverages
					30	Einzelhandel Non-Food	POI	0,00	0,48	kiosk, general
					31	Gastgewerbe	POI	0,00	0,51	restaurant, fast_food, cafe, pub, bar, hotel, nightclub, greengrocer, biergarten, hostel
					32	nicht stationärer Handel (Versandhandel)	Gewerbegebiet	3,29	0,00	
Sonst. Handel	7	4	5,5	6,40	33	sonstige Großhandel Roh- / Reststoffe (private Entsorger)	Gewerbegebiet	5,15	0,00	
					34	Einzelhandel Orthopädie und Antiquitäten	Gewerbegebiet	0,23	0,00	
					35	aller sonstiger Großhandel	Gewerbegebiet	1,15	0,00	
					36	sonstiger stationärer Facheinzelhandel	Gewerbegebiet	0,00	0,00	
Dienstleistungen	12		6	6,98	37	Reparatur von Gebrauchsgütern		0,00	0,00	
					38	Handelsvermittlung		0,00	0,00	
					39	Verkehr, Nachrichtenübermittlung		0,00	0,00	
					40	Banken, Versicherungen	POI	0,00	0,43	bank
					41	sonstige privatwirtschaftl. Dienstleistungen	POI	0,00	3,30	doctors, dentist, optican, travel_agent, museum, sports_center, veterinary, cinema, nursing_home, zoo
					42	sonstige öffentliche Dienstleistungen	POI	0,00	1,28	Tourist_info, libary, theatre,, arts_centre, archaeological,
Öffentl. Sektor	16	8	12	13,95	43	öffentlicher Sektor ohne Ust.-Ausweisung, wie Bundeswehr, Krankenhaus, kommunale Entsorgungswirtschaft	POI	0,00	14,25	kindergarten, school, community_centre, recycling, embassy, police, town_hall, fire_station, clinic, college, courthouse, public_building, hospital, university
~~Kleinbetriebe~~	~~20~~	~~8~~	~~14~~		~~44~~	~~Kleinunternehmen ohne Umsatzsteuerpflicht, inkl. Privathaushalte~~		0,00	0,00	
Chemie		5	2,5	2,91	45	Chemische Industrie	Gewerbegebiet	2,24	0,00	
					46	Großhandel chemische Erzeugnisse	Gewerbegebiet	0,38	0,00	
					47	Großhandel Pharma	Gewerbegebiet	0,23	0,00	
					48	Einzelhandel Pharma, Apotheken	POI	0,00	0,07	pharmacy
					49	Facheinzelhandel Kosmetik/Drogerien	POI	0,00	0,05	beauty_shop, chemist
Automobil		5	2,5	2,91	50	Automobilerzeugung	Gewerbegebiet	2,61	0,00	
					51	sonstiger Fahrzeugbau	Gewerbegebiet	0,13	0,00	
					52	Kfz-Handel	POI	0,00	0,21	
					53	Kfz-Reparatur und sonstiges	POI	0,00	0,01	car_dealership
Bau		13	6,5	7,56	54	Abbau Steine und Erden	Gewerbegebiet	0,59	0,00	car_wash, car_rental
					55	Großhandel Holz, Baustoffe, etc.	Gewerbegebiet	1,12	0,00	
					56	Großhandel Steine und Erden	Gewerbegebiet	0,00	0,00	
					57	Hochbau, Tiefbau	Gewerbegebiet	2,31	0,00	
					58	Großhandel Bauelemente Metall, Industriebedarf	Gewerbegebiet	0,56	0,00	
					59	Bauinstallation, Handwerk	Gewerbegebiet	2,31	0,00	
					60	sonstige Baunebenwirtschaft	Gewerbegebiet	0,49	0,00	
					61	Einzelhandel Bau- und Heimwerker	POI	0,00	0,33	doityourself, garden_centre
Mineralöl		5	2,5	2,91	62	Mineralölverarbeitung	Gewerbegebiet	1,47	0,00	
					63	Großhandel feste Brennstoffe und Mineralöl-Erzeugnisse	Gewerbegebiet	1,29	0,00	
					64	Tankstellen, eigener Handel	Gewerbegebiet	0,21	0,00	

C: Mautabschnitte

In der folgenden Karte sind die ausgewählten Mautabschnitte einzusehen. Zusätzlich sind die Abschnitte tabellarisch aufgelistet.



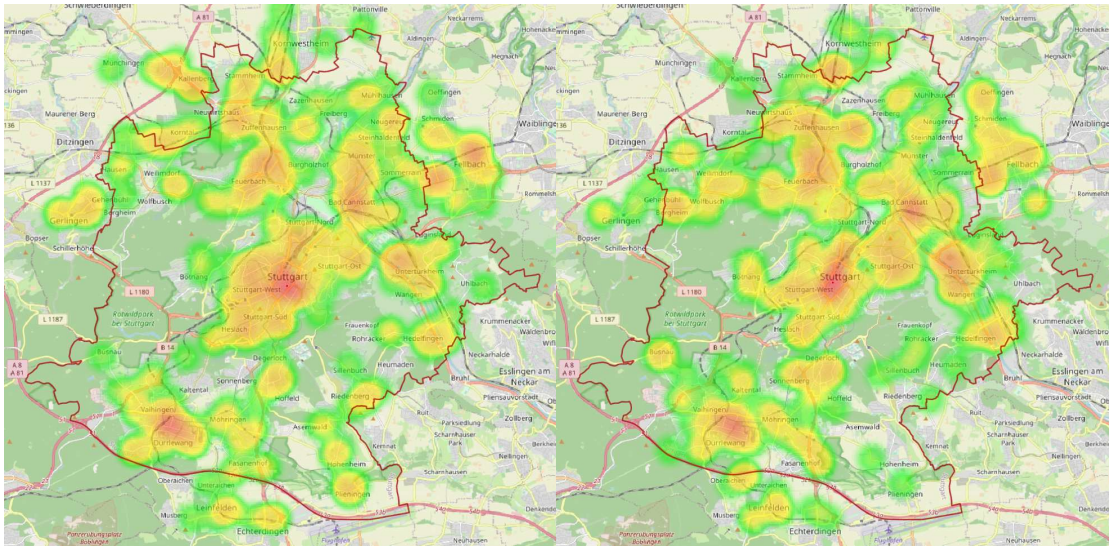
Abschnitts-ID	Von	Nach	Länge (km)	Bundesfern-straße
8010	B14 Stuttgart Schattenring	B14 Vaihingen Tunnel Gäubahn	0,9	B14
268816	B27 Stuttgart, Neue Weinsteige	B27 Stuttgart, Ernst-Sieglin-Platz	1,5	B27
290665	B10/B14 Stuttgart	B14 Stuttgart, Villastraße	0,7	B14
305995	B10/B27/B295 Stuttgart	B27 Stuttgart, Unterer Dornbusch	0,5	B27

D: Abgleich der synthetischen mit realen Auftragslisten

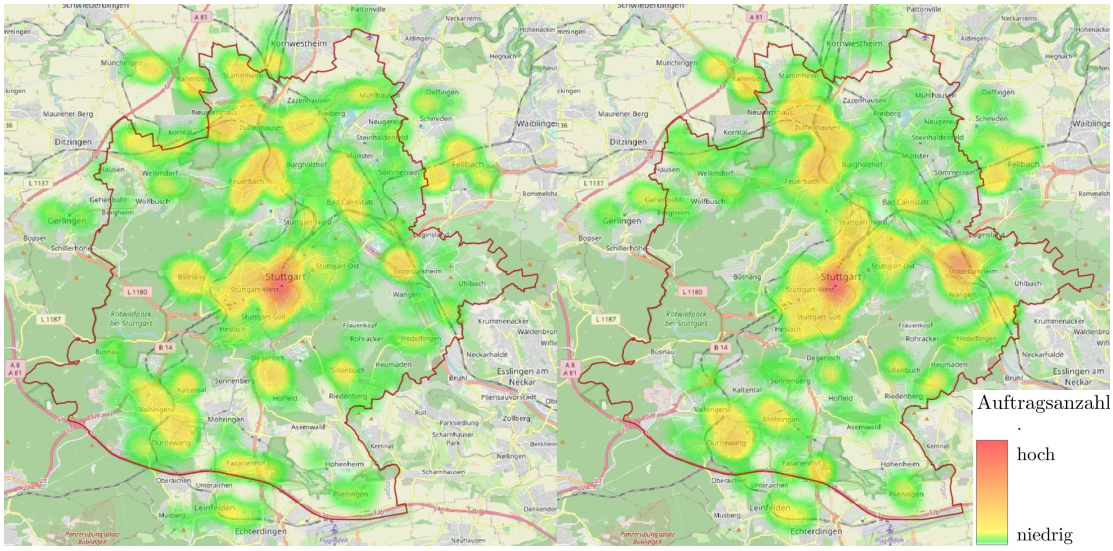
In folgende Tabelle ist das Ergebnis des Vergleichs von zehn synthetischen Auftragslisten der KW19 in 2022 zusammengestellt.

		Auftragsliste												
	Durchlauf	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mittelwert	Standard-abweichung	Vorgabe
Anzahl an Aufträgen	Gesamtanzahl	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375			
	09.05.2022	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74			
	10.05.2022	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78			
	11.05.2022	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74			
	12.05.2022	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79			
	13.05.2022	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70			
	innerhalb	298	317	323	321	329	309	325	318	313	315	316,8	8,4	
	außerhalb	77	58	52	54	46	66	50	57	62	60	58,2	8,4	
	Delivery	255	249	260	247	266	271	240	247	273	242	255,0	11,3	
	Pickup	120	126	115	128	109	104	135	128	102	133	120,0	11,3	
Prozent	innerhalb [%]	79,5	84,5	86,1	85,6	87,7	82,4	86,7	84,8	83,5	84,0	84,5	2,2	81,7
	außerhalb [%]	20,5	15,5	13,9	14,4	12,3	17,6	13,3	15,2	16,5	16,0	15,5	2,2	18,3
	Delivery [%]	68,0	66,4	69,3	65,9	70,9	72,3	64,0	65,9	72,8	64,5	68,0	3,0	67,5
	Pickup [%]	32,0	33,6	30,7	34,1	29,1	27,7	36,0	34,1	27,2	35,5	32,0	3,0	32,5
	PLZ-Bereich													
Anzahl an Aufträgen	70173	12	21	22	21	19	13	19	22	15	16	18,0	3,5	
	70174	9	9	9	3	7	5	6	5	5	1	5,9	2,5	
	70176	9	21	14	13	19	6	5	4	7	8	10,6	5,6	
	70178	8	18	18	28	13	9	5	13	14	11	13,7	6,2	
	70180	5	4	6	5	6	8	5	2	7	7	5,5	1,6	
	70182	8	8	4	5	5	0	3	2	3	4	4,2	2,4	
	70184	4	5	4	4	6	5	6	6	6	9	5,5	1,4	
	70186	2	22	14	30	15	4	7	3	5	4	10,6	8,9	
	70188	6	9	12	2	7	9	4	7	4	12	7,2	3,2	
	70190	7	6	4	2	6	7	4	7	6	4	5,3	1,6	
	70191	7	7	8	4	5	7	15	6	9	9	7,7	2,9	
	70192	2	4	1	2	2	5	2	4	2	4	2,8	1,2	
	70193	2	7	7	12	8	4	6	6	4	3	5,9	2,7	
	70195	2	2	6	6	10	4	8	1	4	3	4,6	2,7	
	70197	5	12	13	7	15	6	8	5	4	14	8,9	4,0	
	70199	10	0	7	2	6	10	7	3	7	3	5,5	3,2	
	70327	18	4	5	13	4	15	20	17	12	22	13,0	6,3	
	70329	10	3	8	8	10	9	3	9	8	5	7,3	2,5	
	70372	14	9	11	13	10	14	14	14	10	19	12,8	2,8	
	70374	6	18	10	12	23	15	9	10	5	12	12,0	5,2	
	70376	14	10	5	7	3	9	11	13	8	9	8,9	3,2	
	70378	11	3	4	2	6	12	10	5	14	8	7,5	3,9	
	70435	13	12	12	9	11	10	18	19	16	15	13,5	3,2	
	70437	6	5	9	9	10	10	16	10	10	5	9,0	3,1	
	70439	5	9	11	6	10	5	7	8	6	3	7,0	2,4	
	70439	0	5	3	5	6	0	0	0	1	0	2,0	2,4	
	70469	25	5	8	6	8	19	21	25	25	21	16,3	8,1	
	70499	9	28	29	24	26	18	13	11	18	17	19,3	6,8	
	70563	9	0	0	0	1	9	9	6	11	7	5,2	4,2	
	70565	22	5	10	1	5	15	11	12	20	17	11,8	6,5	
	70567	10	14	3	15	12	11	14	13	16	13	12,1	3,5	
	70569	6	3	7	7	6	14	8	11	10	8	8,0	2,9	
	70597	6	1	4	5	4	6	12	15	5	7	6,5	3,9	
	70599	10	12	9	11	9	4	7	12	5	7	8,6	2,7	
	70619	6	16	25	22	16	11	12	12	10	8	13,8	5,7	

Die folgenden Heatmaps stellen die Anzahl an synthetischen Aufträgen einer Spedition im Stadtgebiet Stuttgart pro Durchlauf der Auftragserzeugung dar.
(eigene Darstellung; Geodaten: © OSM (CC-BY-SA 2.0), © Landeshauptstadt Stuttgart, Stadtmessungsamt & Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme (GIS-AG))



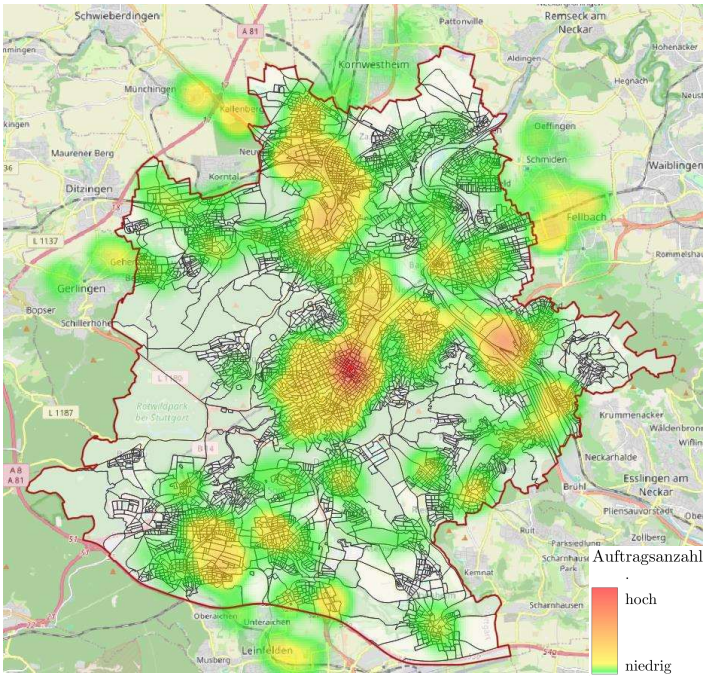
(1) (2)



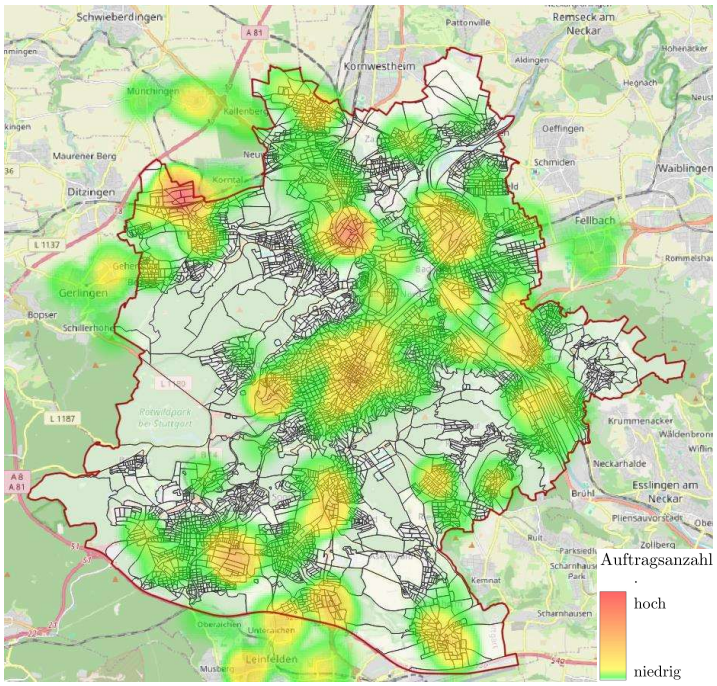
(3) (4)

E: Heatmaps von synthetischen und realen Aufträgen einer Spedition

Die folgenden Heatmaps stellen die Anzahl an synthetischen und realen Aufträgen einer Spedition im Stadtgebiet Stuttgart dar.
(eigene Darstellung; Geodaten: © OSM (CC-BY-SA 2.0), © Landeshauptstadt Stuttgart, Stadtmessungsamt & Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme (GIS-AG))



Synthetische Daten



Reale Daten

F: Planungsparameter der Tourenplanung

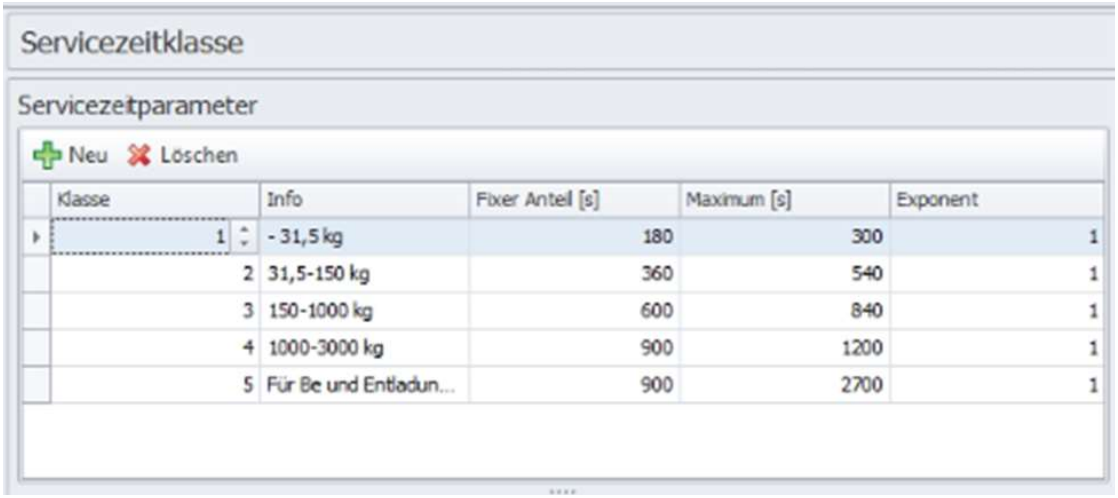
Basiseinstellungen	
Grenzwerte	• Maximale Tourdauer • Maximale Tourfahrzeit • Maximale Tourlänge • Maximale Entfernung vom ersten zum letzten Tourstopp • Maximale Entfernung zwischen aufeinanderfolgenden Tourstopps • Maximale Anzahl Tourstopps pro Tour • Maximale Anzahl Fahrzeug-Einsätze
Tourenstoppbildung	Kriterien für Tourenstopp
Kostenverteilung	Menge der Kostenverteilung
Luftlinienberechnung	• Standardumwegfaktor • Standardgeschwindigkeit
Aktivierung der Restriktionen	
Kapazität prüfen	• Gewicht, Volumen, Lademeter, Mengen • Anhängerladeverbot
Öffnungszeiten prüfen	Öffnungszeit • Exakt prüfen • Mit Toleranz prüfen • Nicht prüfen
Einsatzzeiten prüfen	• Einsatzzeiten • Tourstart
Ausstattung prüfen	• Qualifikationen • Disqualifikationen
Auftragsmaße prüfen	
Planungsanforderungen prüfen	• Beifahrer (nicht relevant) • Mehrkammern • Fahrzeuggruppen • Vorzuordnung Motorfahrzeug • Max. Anzahl Tourstopps • Max. Tourlänge
Grenzwerte prüfen	Alle Grenzwerte
Distanzmatrix-Verbindungen prüfen	
Zeitrechnung	
Basiseinstellungen	• Verfrühten Service-Beginn erlauben • Servicezeit splitten • Servicezeitberechnung • Fixe Servicezeit am Tourstopp berechnen • Verwendung der Lenk, Ruhe- und Arbeitszeiten • Servicezeit als Pause/Ruhezeit nutzbar • Servicezeitfaktor für Touren mit Beifahrer • Allgemeiner Fahrzeitfaktor • Wendezeit zwischen zwei Touren • Motorfahrzeuge sind vorgeladen • Jede Tour in genau einem Einsatzintervall

Telematik	• Ist-Zeiten berücksichtigen • Tourstopps mit Ist-Zeiten vorne einsortieren • Nach Umsortierung Reihenfolge der Tourstopps neu optimieren • Zeitraum ab Aktualzeit für Tourstoppfixierung
Lenk- und Ruhezeit	

1-Fahrer-Besatzung	• Pausenreglung aktiv
	• Maximale Fahrzeit bis Pause
	• Splittbarkeit
	  ○ Dauer der ersten Teilpause
	  ○ Dauer der zweiten Teilpause
	• Tägliche Ruhezeitregelung aktiv
	• Maximale Fahrzeit Fahrzeit bis Ruhezeit
	• Maximale verlängerte Fahrzeit bis Ruhezeit
	• Maximale Anzahl verlängerter Fahrzeiten pro Woche
	• Dauer der Ruhezeit
	• Splittbarkeit
	  ○ Dauer der ersten Teilruhezeit
	  ○ Dauer der zweiten Teilruhezeit
	• Dauer der verkürzten Ruhezeit
	• Maximale Anzahl verkürzter Ruhezeiten zwischen zwei wöchentlichen Ruhezeiten
	• Maximaler Abstand zwischen den Enden zweier Ruhezeiten
	• Wöchentliche Ruhezeitregelung aktiv
	• Maximale Fahrzeit pro Woche
	• Dauer der wöchentlichen Ruhezeit
	• Maximale Fahrzeit innerhalb zweier aufeinanderfolgender Wochen
	• Maximaler Abstand zwischen zwei wöchentlichen Ruhezeiten

Arbeitszeiten	
1-Fahrer-Besatzung	• Arbeitszeitregelung aktiv • Maximale Arbeitszeit bis Pause • Dauer der Pause • Arbeitszeit, ab welcher eine verlängerte Pause notwendig wird • Maximale Arbeitszeit bis Pause • Dauer der verlängerten Pause • Mindestlänge einer Teilpause • Maximale tägliche Arbeitszeit bis Ruhezeit • Dauer der Ruhezeit • Maximale Arbeitszeit pro Woche
Nacharbeit	• Nacharbeitsregelung aktiviert • Beginn Nachzeit • Ende Nachzeit • Mindestlänge der Nacharbeit • Reduzierte maximale tägliche Arbeitszeit

Das folgende Bild zeigt ein Screenshot des RO-ST zu den Einstellungsmöglichkeiten der Servicezeitklassen.



Klasse	Info	Fixer Anteil [s]	Maximum [s]	Exponent
1	- 31,5 kg	180	300	1
2	31,5-150 kg	360	540	1
3	150-1000 kg	600	840	1
4	1000-3000 kg	900	1200	1
5	Für Be und Entladun...	900	2700	1

G: Ergebnisse der Tourenplanung

Auszug einer Tourenliste:

Kennung 1	# Aufträge	# Tourstopps	MFzg-Kennung	Gewichtsklasse	Einsatz	Gewicht	% Gewicht	Volumen	% Volumen	Startzeit	Endezeit	Länge	Dauer	Fahrzeit	Servicezeit	Pausenzeit	Ruhezeit	Kosten
KW19-14811	11	12	barth-02	7,5	1	1758 kg	1, %	8 m³	0, %	09.05. 06:00	11:31	98 km	05:31	03:16	02:14	00:00	00:00	530,03 €

Nr	Kennung 1	Stellenname	Ankunft	Abfahrt	# Aufträge	Lfd. Gewicht	Beladung Gewicht	Entladung Gewicht	Weg ab Vorgänger	Fahrzeit	Servicezeit	Beginn des Zeitfensters	Ende des Zeitfensters
0	KW19-14811	barth Spedition GmbH	06:00	06:26	7	1758 kg	1758 kg	0 kg	0 km	00:00	00:26	09.05.2022 06:00	09.05.2022 18:00
1	KW19-14811	Kalb	07:04	07:18	1	641 kg	0 kg	1117 kg	29 km	00:38	00:14	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
2	KW19-14811	Leupold	07:25	07:36	1	476 kg	0 kg	165 kg	3 km	00:06	00:10	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
3	KW19-14811	Lampert	07:51	08:01	2	342 kg	0 kg	134 kg	5 km	00:14	00:10	09.05.2022 06:00	09.05.2022 12:00
4	KW19-14811	DAWSON	08:13	08:22	1	200 kg	0 kg	142 kg	5 km	00:12	00:09	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
5	KW19-14811	Schürer	08:34	08:43	1	100 kg	0 kg	100 kg	5 km	00:12	00:09	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
6	KW19-14811	Frühauf	08:54	08:57	1	101 kg	1 kg	0 kg	3 km	00:10	00:03	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
7	KW19-14811	Kämpf	09:08	09:17	1	185 kg	84 kg	0 kg	4 km	00:11	00:08	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
8	KW19-14811	Joachim	09:28	09:37	1	85 kg	0 kg	100 kg	4 km	00:11	00:09	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
9	KW19-14811	Scheler	09:47	09:56	1	220 kg	135 kg	0 kg	3 km	00:09	00:09	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
10	KW19-14811	Beller	10:11	10:19	1	280 kg	60 kg	0 kg	4 km	00:15	00:08	09.05.2022 06:00	09.05.2022 12:00
11	KW19-14811	barth Spedition GmbH	11:14	11:31	4	0 kg	0 kg	280 kg	33 km	00:55	00:16	09.05.2022 05:00	09.05.2022 18:00

KW19-14814	5	7	Beck-01	7,5	1	1642 kg	1, %	2 m³	0, %	09.05. 06:00	09:41	83 km	03:41	02:05	01:36	00:15	00:00	366,91 €

Nr	Kennung 1	Stellenname	Ankunft	Abfahrt	# Aufträge	Lfd. Gewicht	Beladung Gewicht	Entladung Gewicht	Weg ab Vorgänger	Fahrzeit	Servicezeit	Beginn des Zeitfensters	Ende des Zeitfensters
0	KW19-14814	Beck	06:00	06:21	3	948 kg	948 kg	0 kg	0 km	00:00	00:21	09.05.2022 06:00	09.05.2022 18:00
1	KW19-14814	Schmiedel	06:44	06:57	1	1568 kg	620 kg	0 kg	17 km	00:22	00:13	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
2	KW19-14814	Storm	07:06	07:15	1	1642 kg	74 kg	0 kg	4 km	00:09	00:08	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
3	KW19-14814	Baumert	07:24	07:37	1	940 kg	0 kg	702 kg	4 km	00:08	00:13	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
4	KW19-14814	PAYNE	07:57	08:02	1	894 kg	0 kg	46 kg	7 km	00:19	00:05	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
5	KW19-14814	Asmus	08:32	08:48	1	694 kg	0 kg	200 kg	18 km	00:30	00:15	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
6	KW19-14814	Beck	09:22	09:41	2	0 kg	0 kg	694 kg	33 km	00:33	00:19	09.05.2022 05:00	09.05.2022 18:00

KW19-14818	13	12	LSU-12	12	1	3641 kg	1, %	12 m³	0, %	09.05. 06:00	10:08	40 km	04:08	01:24	02:43	00:15	00:00	388,34 €

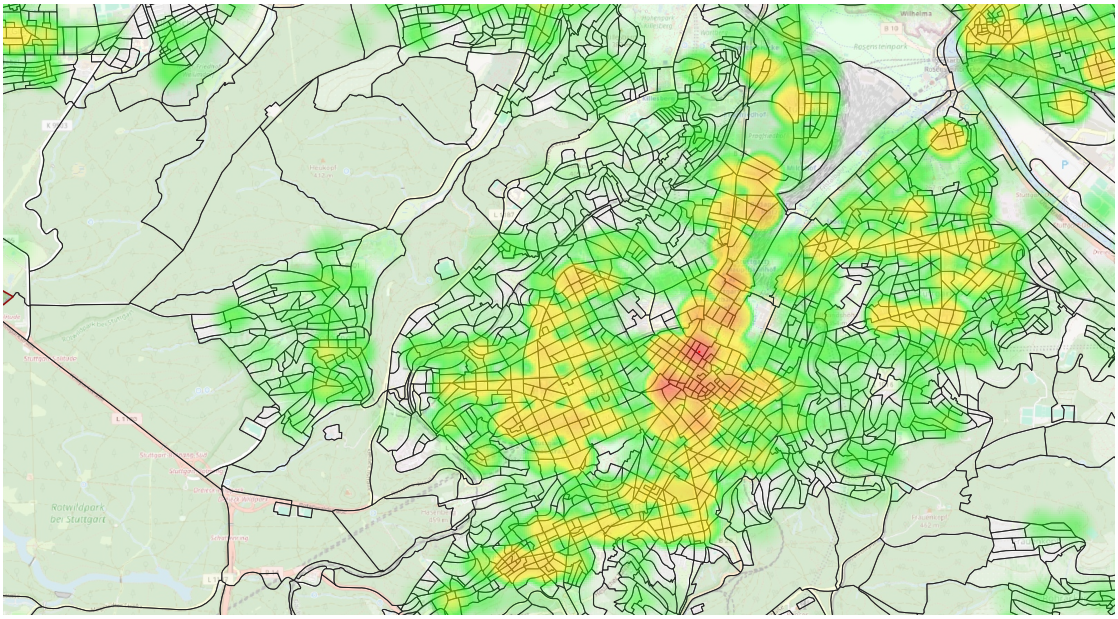
Nr	Kennung 1	Stellenname	Ankunft	Abfahrt	# Aufträge	Lfd. Gewicht	Beladung Gewicht	Entladung Gewicht	Weg ab Vorgänger	Fahrzeit	Servicezeit	Beginn des Zeitfensters	Ende des Zeitfensters
0	KW19-14818	LSU Schäberle	06:00	06:36	7	3281 kg	3281 kg	0 kg	0 km	00:00	00:36	09.05.2022 06:00	09.05.2022 18:00
1	KW19-14818	Piel	07:04	07:15	2	3641 kg	360 kg	0 kg	13 km	00:27	00:11	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
2	KW19-14818	Zoller	07:20	07:29	1	3526 kg	0 kg	115 kg	1 km	00:04	00:09	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
3	KW19-14818	Cornelius	07:32	07:43	1	3315 kg	0 kg	211 kg	1 km	00:03	00:11	09.05.2022 06:00	09.05.2022 12:00
4	KW19-14818	Menge	07:48	07:57	1	3459 kg	144 kg	0 kg	1 km	00:04	00:09	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
5	KW19-14818	Meisel	08:05	08:13	1	3399 kg	0 kg	60 kg	2 km	00:07	00:08	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
6	KW19-14818	Buß	08:22	08:29	1	3449 kg	50 kg	0 kg	4 km	00:09	00:07	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
7	KW19-14818	Freier	08:42	08:59	2	2005 kg	45 kg	1489 kg	6 km	00:12	00:17	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
8	KW19-14818	Bürkle	09:01	09:12	1	1811 kg	0 kg	194 kg	0 km	00:01	00:10	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
9	KW19-14818	Wellmann	09:14	09:30	2	695 kg	17 kg	1133 kg	1 km	00:02	00:15	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
10	KW19-14818	Marek	09:30	09:39	1	616 kg	0 kg	79 kg	0 km	00:00	00:08	09.05.2022 06:00	09.05.2022 23:59
11	KW19-14818	LSU Schäberle	09:49	10:08	6	0 kg	0 kg	616 kg	10 km	00:09	00:19	09.05.2022 05:00	09.05.2022 18:00

Vergleich der Ergebnisse der Tourenplanung mit den Vorgabewerten des Auftragsvolumen:

Spedition	Vorgabe			Tourenplanung			Abweichung		
	Touren pro Woche	Stopps pro Tour	Gesamtanzahl Aufträge	Touren pro Woche	Stopps pro Tour	Gesamtanzahl Aufträge	Touren	Stopps	Gesamtanzahl Aufträge
Spedition 1	18	8	144	17	8	134	6%	0%	7%
Spedition 2	3	3	9	4	3	11	33%	8%	22%
Spedition 3	13	10	130	15	8	123	15%	18%	5%
Spedition 4	5	5	25	5	5	24	0%	4%	4%
Spedition 5	20	10	200	20	10	191	0%	4%	5%
Spedition 6	35	15	525	30	17	502	14%	12%	4%
Spedition 7	5	15	75	5	14	72	0%	4%	4%
Spedition 8	4	18	72	5	14	70	25%	22%	3%
Spedition 9	10	10	100	10	10	96	0%	4%	4%
Spedition 10	40	10	400	35	11	382	13%	9%	5%
Spedition 11	23	6	138	21	6	128	9%	2%	7%
Spedition 12	5	12	60	6	10	58	20%	19%	3%
Spedition 13	5	9	45	5	8	42	0%	7%	7%
Spedition 14	20	20	400	20	19	378	0%	6%	6%
Spedition 15	5	4	20	5	4	20	0%	0%	0%
Spedition 16	6	3	18	6	3	16	0%	11%	11%
Spedition 17	13	8	104	15	7	100	15%	17%	4%
Spedition 18	10	10	100	10	10	95	0%	5%	5%
Spedition 19	5	15	75	5	14	72	0%	4%	4%
Spedition 20	10	10	100	10	9	94	0%	6%	6%
Spedition 21	5	4	20	5	4	20	0%	0%	0%
Spedition 22	15	18	270	18	14	260	20%	20%	4%
Spedition 23	5	10	50	6	8	48	20%	20%	4%
Spedition 24	10	16	160	10	15	153	0%	4%	4%
Spedition 25	5	11	55	10	6	55	100%	50%	0%
Spedition 26	1	10	10	2	5	10	100%	50%	0%
Spedition 27	30	10	300	27	10	283	10%	5%	6%
Spedition 28	2	2	4	3	2	5	50%	17%	25%
Spedition 29	5	8	40	7	6	39	40%	30%	3%
Spedition 30	30	8	240	27	8	228	10%	6%	5%
Spedition 31	15	11	165	15	10	157	0%	5%	5%
Spedition 32	1	13	13	2	6	12	100%	54%	8%
Spedition 33	10	15	150	11	13	144	10%	13%	4%
Spedition 34	5	13	65	9	7	64	80%	45%	2%
Spedition 35	10	10	100	10	9	94	0%	6%	6%
Spedition 36	23	19	437	23	18	414	0%	5%	5%
					Mittelwert		19%	14%	5%

H: Batteriekapazitäten der verfügbaren batterieelektrischen Nutzfahrzeuge

Fahrzeug-gewichtsklasse	**3,5 t**	**7,5 t**	**12 t**	**18 t**
Batterie-kapazität in kWh	31,7	81	120	141
	37	82,6	141	200
	74	115	217	240
	75	116	240	244
	77	123,9	282	246
	79	124	289	280
	89	126		289
				300
				340
				381
				395
				565
				1017

I: Anwendungsergebnisse

Die folgende Heatmap stellt einen detaillierten Ausschnitt der Gesamt-Heatmap dar. (eigene Darstellung; Geodaten: © OSM (CC-BY-SA 2.0), © Landeshauptstadt Stuttgart, Stadtmessungsamt & Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme (GIS-AG))