

**Gestaltung nachhaltiger Logistik-Konzepte
im urbanen Wirtschaftsverkehr:
Entscheidungsunterstützung mit Optimierungsmodellen**

Von der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Wirtschaftswissenschaften
– Doktor rerum politicarum –

genehmigte Dissertation

von

M.Sc. Max Leyerer
geboren am 01.04.1992 in Göttingen

2020

Betreuer und Gutachter:	Prof. Dr. Michael H. Breitner
Weitere Gutachterin:	Prof. Dr.-Ing. Monika Sester
Vorsitzende der Prüfungskommission:	Prof. Dr. Marina Schröder
Weiteres Mitglied (beratend):	Dr. Ute Lohse
Tag der Promotion:	22.09.2020

Danksagung

Diese Dissertation widme ich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Heike und Rudolf, und meiner Großmutter Marga. Danke für eure Liebe, eure Unterstützung, eure Zeit, eure Hilfe, eure Geduld, eure Ratschläge, eure Kritik und euer Vertrauen. Ohne euch hätte ich mein Ziel nicht erreichen können.

Ein großer Dank gilt auch meinen Freunden sowie meinen Kollegen am Institut und im Unternehmen. Danke Marc und Max, für die gemeinsame Zeit und die erfolgreiche Teamarbeit. Auch bei meinen weiteren Co-Autoren bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit. Danke Susanne und Christian, für eure stetige Förderung, das Gewähren nötiger Freiräume und die positive Arbeitsatmosphäre.

Abschließend bedanke ich mich bei Prof. Dr. Michael H. Breitner für die Betreuung und die Unterstützung. Viele Ideen, Gedankengänge und Lösungsansätze basieren auf den zahlreichen gemeinsamen Diskussionen am Institut und auf Seminaren. Ihre fachliche Expertise und Ihre Beratung haben die entstandenen Beiträge stets bereichert.

I. Abstract

This cumulative dissertation is a summary of ten scientific articles in the field of urban commercial transport. The focus is on the investigation of new logistics concepts as solution approach for a simultaneous consideration of economic and ecological objectives regarding the performance of transport activities in urban areas. For this purpose, mathematical optimization models and decision support systems are presented, which address the conflict of objectives between cost and emission minimization. These have been developed by applying methods of operations research and information systems research. In addition, a critical reflection on the covered topics, the used research methods and the developed solution approaches is integrated. In the dissertation, three topics are presented in detail:

- (1) Sustainable urban parcel delivery: An optimization model, which is embedded in a decision support system, is presented. It enables the optimal design of an alternative logistics concept for the delivery of parcels in cities. The aim is to determine the locations of micro-depots that are used as temporary storage facility and the corresponding vehicle fleet.
- (2) Sustainable e-grocery delivery: A new logistics concept is designed for the delivery of consumer goods ordered online, such as food or household items. By using tempered transshipment points, the last mile can be shortened and the use of cargo cycles as well as customer pick-ups can be realized. A three-stage solution approach enables the optimization of the locations of the transshipment points as well as the vehicle routes.
- (3) Individual route optimization: A decision support system for modeling and solving individual route planning problems is presented. The flexible tool enables the consideration of user-specific problem characteristics and the transformation into a corresponding optimization model. Thereby, various industries can be supported in route planning.

Keywords: Information Systems Research, Operations Research, Optimization, Decision Support Systems, Design Science Research, Green IS, Sustainability, Urban Logistics

Abstrakt

Die vorliegende kumulative Dissertation stellt die Zusammenfassung von zehn wissenschaftlichen Artikeln im Bereich des urbanen Wirtschaftsverkehrs dar. Dabei geht es grundsätzlich um die Untersuchung neuer Logistik-Konzepte als Lösungsansatz für eine gleichzeitige Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Ziele bei der Ausübung von Transportaktivitäten in urbanen Räumen. Dazu werden mathematische Optimierungsmodelle und Entscheidungsunterstützungssysteme präsentiert, welche den Zielkonflikt zwischen einer Kosten- und einer Emissionsminimierung adressieren. Diese sind durch die Anwendung von Methoden des Operations Research und der Informationssystem-Forschung entstanden. Darüber hinaus erfolgt die kritische Reflektion über die behandelten Themen, die genutzten Forschungsmethoden und die entwickelten Lösungsansätze. Drei Themen werden in der Dissertation ausführlich dargestellt:

- (1) Nachhaltige urbane Paketzustellung: Es wird ein Optimierungsmodell präsentiert, welches in ein Entscheidungsunterstützungssystem eingebettet ist und die bestmögliche Gestaltung eines alternativen Logistik-Konzepts für die Zustellung von Paketen in Städten ermöglicht. Dabei geht es um die Bestimmung der Positionen von Mikro-Depots als Orte der Zwischenlagerung sowie der dazugehörigen Fahrzeugflotte.
- (2) Nachhaltige e-Grocery Zustellung: Für die Lieferung von online bestellten Verbrauchsgütern wie Lebensmitteln oder Haushaltsartikeln wird ein neues Logistik-Konzept entworfen. Hierbei erfolgt eine Verkürzung der letzten Meile durch den Einsatz von temperierten Umschlagspunkten sowie eine Integration von Lastenfahrrädern und Kunden-Selbstabholungen. Ein dreistufiger Lösungsansatz ermöglicht die Optimierung der Standorte der Umschlagspunkten sowie der Fahrzeugrouten.
- (3) Individuelle Routenoptimierung: Es wird ein Entscheidungsunterstützungssystem zur Modellierung sowie Lösung von individualisierbaren Tourenplanungsproblemen präsentiert. Das flexible Tool ermöglicht die Abbildung von benutzerspezifischen Problemcharakteristika und die Umwandlung in ein entsprechendes Optimierungsmodell, sodass diverse Branchen bei der Routenplanung unterstützt werden können.

Schlagworte: Informationssystem-Forschung, Operations Research, Optimierung, Entscheidungsunterstützungssysteme, Design Science Research, Green IS, Nachhaltigkeit, Urbane Logistik

II. Management Summary

Problemstellung und Forschungsziele

Durch die fortschreitende Urbanisierung konzentrieren sich die Bedürfnisse der Bevölkerung immer stärker in räumlich begrenzten Gebieten. Die erhöhte Personenanzahl führt zu einer steigenden Mobilitäts- und die Güternachfrage in Städten. Da der Großteil der transportierten Güter über den Straßenverkehr befördert wird (Statistisches Bundesamt, 2019), resultieren diverse Probleme und Herausforderungen. Hierbei sind vor allem die überlastete Verkehrsinfrastruktur sowie Luftschadstoff- und Lärm-Emissionen zu nennen, welche die Lebensqualität der Bewohner¹, ihre Sicherheit und die Effizienz des Verkehrs innerhalb der urbanen Räume negativ beeinflussen.

Die Beförderung von Gütern innerhalb einer Stadt wird als „urbane Logistik“ bezeichnet (EUK, 2013) und aufgrund der genannten Herausforderungen steigen die Anforderungen an die damit zusammenhängenden Tätigkeiten. Bedingt durch die limitierte Verfügbarkeit fossiler Ressourcen und den fortschreitenden Klimawandel wird das ökologisch nachhaltige Handeln in allen Sektoren zunehmend wichtiger. Auch der Transportsektor muss daher einen Beitrag zur Reduzierung von Emissionen und zur Entlastung der Verkehrsinfrastruktur leisten. Um langfristig eine umweltfreundliche urbane Logistik zu erreichen, formuliert die Europäische Kommission das Ziel, bis zum Jahr 2050 sämtliche konventionell betriebene Transportfahrzeuge in Städten der EU durch lokal-emissionsfreie Fahrzeuge zu ersetzen. Die Teilnehmer der urbanen Logistik stehen daher vor der Herausforderung, vermehrt umweltfreundliche Transportmittel einzusetzen und gleichzeitig die steigende Güternachfrage effizient zu befriedigen. Bei den Transportdienstleistern entsteht hierbei ein Zielkonflikt zwischen einer Kosten- und einer Emissionsminimierung, da lokal-emissionsfreie Transportmittel in der Regel höhere Anschaffungskosten verursachen als konventionelle Fahrzeuge.

Das Ziel der vorliegenden kumulativen Dissertation ist daher die Untersuchung neuer Lösungsansätze für diesen sich zuspitzenden Zielkonflikt. Alternative Logistik-Konzepte stellen eine Möglichkeit dar, um den genannten Herausforderungen zu begegnen. Um die bestmögliche Gestaltung einiger dieser Ansätze zu ermöglichen, wurden entsprechende

¹ Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Dissertation die männliche Sprachform bei personenbezogenen Substantiven und Pronomen verwendet. Dies impliziert jedoch keine Benachteiligung des weiblichen Geschlechts, sondern soll im Sinne der sprachlichen Vereinfachung als geschlechtsneutral zu verstehen sein.

mathematische Optimierungsmodelle und Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS) entwickelt. Diese sind durch die Anwendung von Methoden des Operations Research (OR) sowie der Informationssystem-Forschung (IS) entstanden und basieren insbesondere auf dem Design Science Research Ansatz von Hevner (2007). Die entwickelten Tools dienen einer Förderung der Vereinbarkeit von ökonomischer und ökologischer Nachhaltigkeit. Die zugehörigen Veröffentlichungen liefern einen Beitrag zur gestaltungsorientierten IS-Forschung im Bereich der Green IS. Der Hauptteil der Dissertation besteht aus drei Abschnitten, die im Folgenden zusammengefasst werden.

Nachhaltige urbane Paketzustellung

Der erste Hauptteil der vorliegenden Dissertation (Kapitel 2) behandelt den Bereich der urbanen Paketzustellung. Hierbei wird ein Logistik-Konzept untersucht, dass auf einem urbanen Netzwerk aus Mikro-Depots aufbaut, die als lokale Umschlagpunkte fungieren. Um Pakete von großen Transportfahrzeugen (z.B. LKW) auf kleinere und alternative Transportmittel (z.B. elektrisch unterstützte Lastenfahrräder, engl. electric cargo cycles, ECC) zu verladen, erfolgt an den Mikro-Depots eine entsprechende Zwischenlagerung. Dieser Ansatz stellt eine Möglichkeit dar, um die sog. letzte Meile zu den Paketempfängern zu verkürzen und den Einsatz lokal-emissionsfreier Fahrzeuge zu fördern. Dadurch sollen der Straßenverkehr und die dabei verursachten Emissionen in urbanen Räumen reduziert werden. Um die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen verschiedener Ausprägungen dieses Logistik-Konzepts quantifizieren zu können, wurde ein mathematisches Optimierungsmodell entwickelt, das in ein EUS eingebettet ist. Dieses Vorgehen ermöglicht die Durchführung von Szenarioanalysen, da optimale Lösungen für diverse Anwendungsfälle automatisiert und computergestützt ermittelt werden können.

Um den aktuellen Stand der Forschung zu mathematischen Optimierungsmodellen für die letzte Meile der urbanen Paketzustellung zu ermitteln, wurde eine systematische Literaturrecherche nach Webster und Watson (2002) durchgeführt. Diese zeigt, dass zwar diverse Modelle und Ansätze existieren, um die Standort-, Flotten- und Routenplanung einzeln zu optimieren, eine ganzheitliche Kombination dieser Elemente, verknüpft mit einer entsprechenden Entscheidungsunterstützung, jedoch eine relevante Forschungslücke darstellt. Zu diesem Zweck wurde ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem (engl., mixed integer linear problem, MILP) formuliert, welches die taktische Planung des beschriebenen Logistik-Konzepts unterstützt. Die Zielfunktion des MILP minimiert

die Kosten der monatlichen Paketzustellung unter Berücksichtigung von 17 Nebenbedingungen (Kapazitätsrestriktionen, Emissionsobergrenze etc.). Dabei erfolgt eine kombinierte Optimierung der Mikro-Depot-Standorte, der Fahrzeugflotte und der Kurieranzahl bei einer gleichzeitigen Reduzierung der verkehrsbedingten Externalitäten.

Das zugehörige EUS ermöglicht Anwendern ohne Optimierungskennnisse eine Nutzung des entwickelten MILP. Die Systemarchitektur und die Datenflüsse des auf *Java* basierenden Prototyps sind in Abbildung 1 dargestellt.

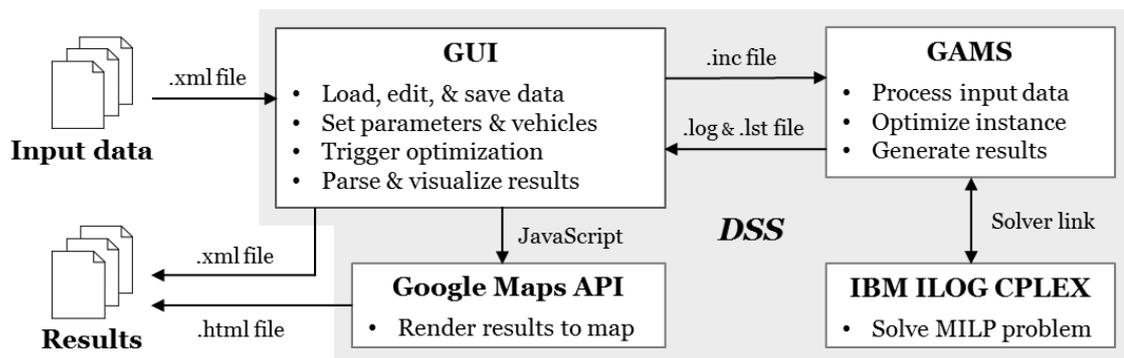


Abbildung 1. Systemarchitektur und Datenflüsse des EUS

Ein Entscheidungsträger kann mithilfe des EUS eigene Fallstudien durchführen. Dazu muss dieser die zugrundeliegenden Eingabedaten seines Anwendungsfalls in das EUS laden sowie alle relevanten Parameter und Optimierungseinstellungen angeben. Die grafische Benutzeroberfläche (engl. graphical user interface, GUI) dient der Steuerung der beschriebenen Vorgänge über entsprechende Schaltflächen. Die Lösung des Modells wird durch die Implementierung des MILP in der Optimierungssoftware GAMS (*General Algebraic Modeling System*) ermöglicht, welche mit dem Solver *CPLEX* verknüpft ist. Die berechneten Ergebnisse werden durch die Nutzung der *Google Maps API* (engl., application programming interface, dt. Programmierschnittstelle) auf einer Karte visualisiert und können in eine html-Datei (Hypertext Markup Language) exportiert werden.

Zur Evaluierung des entwickelten EUS und des Optimierungsmodells wurde eine Szenarioanalyse anhand verschiedener Benchmarks durchgeführt, die auf einem Anwendungsfall der Stadt Hannover basieren. Die in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse resultieren aus einer schrittweisen Senkung der zulässigen durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Fahrzeugflotte. Je Szenario sind hierbei die Gesamtkosten, die Anzahl der errichteten Hubs (Mikro-Depots), die Flottenzusammensetzung, die geschätzten Fahrdistanzen und die daraus resultierenden lokalen CO₂-Emissionen angegeben.

Tabelle 1. Benchmarks für verschiedene Obergrenzen des CO₂-Flottendurchschnitts

Emissionslimit [gCO ₂ /km]	Gesamtkosten [€/Monat]	Anzahl Hubs [#]	Anzahl Fahrzeuge [#]							Geschätzte Distanz [km/Tag]			Gesamte Emissionen [gCO ₂ /Tag]	Durchsch. Flottenemissionen [gCO ₂ /km]
			eCB	eCT	Car	eCar	Van	eVan	∞	Diesel	Elektrisch	∞		
200	187.464,70	37	2	-	-	-	60	-	62	300,2	11,9	312,1	60.038,3	192,3
150	189.156,21	36	19	-	-	-	48	-	67	240,0	121,0	361,0	48.000,0	133,0
100	191.241,84	27	37	-	-	-	36	-	73	180,1	187,5	367,6	36.026,9	98,0
50	195.819,32	33	51	-	2	-	18	6	77	115,2	341,3	456,5	20.820,1	45,6
0	199.090,55	21	54	2	-	-	-	22	78	-	467,4	467,4	0,0	0,0

Die Ergebnisse zeigen, dass der Fahrzeugtyp *Van* (dt. Lieferwagen) das am häufigsten verwendete Transportfahrzeug ist. Dies ist dadurch zu begründen, dass *Vans* unter den betrachteten Fahrzeugtypen die niedrigsten Kosten im Verhältnis zu ihrer Transportkapazität aufweisen. Die weiteren potenziellen Fahrzeugtypen sind *eCB* (electric cargo bicycle, dt. zweirädriges elektrisches Lastenfahrrad), *eCT* (electric cargo tricycle, dreirädriges elektrisches Lastenfahrrad), *Car* (konventionell angetriebener PKW), *eCar* (elektrisch angetriebener PKW) und *eVan* (elektrisch angetriebener Lieferwagen). Wie in Tabelle 1 zu erkennen ist, führt eine Senkung des Emissionslimits zu steigenden Gesamtkosten und einer erhöhten Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge. Diese Veränderungen sind auf die Substitution der konventionell betriebenen *Vans* durch *eVans* (höhere Fixkosten) und *eCBs* (höhere Anzahl durch geringere Kapazität) zurückzuführen. Da die Parkfläche an den Hubs durch eine Nebenbedingung beschränkt ist, hängt die Anzahl der zu errichtenden Hubs von der Anzahl und dem Typ der eingesetzten Fahrzeuge ab. Daher weisen diejenigen Szenarien, welche von großen Fahrzeugen dominiert werden, eine höhere Hub-Anzahl auf als die Szenarien mit mehr kleinen Fahrzeugen. Durch die geringere Transportkapazität der *eCBs* müssen diese die errichteten Hubs häufiger anfahren als größere Fahrzeuge, um weitere Pakete aufzunehmen. Dadurch steigt die Gesamtfahrleistung mit einem zunehmenden Anteil von *eCBs* an. Eine vollständige Vermeidung der lokalen CO₂-Emissionen führt im Vergleich zum uneingeschränkten Szenario zu erhöhten Gesamtkosten in Höhe von 11.625,85 €/Monat (+6,2%). Die Benchmarks zeigen jedoch, dass Lastenfahrräder als Ergänzung in Fahrzeugflotten einbezogen werden sollten, wenn eine CO₂-freie Paketzustellung mit innerstädtischen Mikro-Depots angestrebt wird.

Neben den dargestellten Benchmarks wurden auch Ergebnisse für Szenarien mit homogenen Flotten, also dem Einsatz eines einzigen Fahrzeugtyps, berechnet. Dabei ist in Abbildung 2 die Kostenstruktur der jeweiligen Szenarien durch gestapelte Säulen visuali-

siert, um die einzelnen Kostenarten darzustellen. Die Personalkosten sind in allen Szenarien die größte Kostenkomponente und haben einen Anteil von 56,5% (*eVan*) bis 86,9% (*eCB*) an den Gesamtkosten. Die fixen Fahrzeugkosten stellen mit einem Anteil von 11,3% (*eCB*) bis 38,3% (*eVan*) die zweitgrößte Kostenkomponente dar. Der Vergleich der Szenarien zeigt erneut, dass der Einsatz von konventionellen *Vans* die geringsten Gesamtkosten verursacht (187.615,10 €/Monat), da diese die höchste Transporteffizienz aufweisen. Dies ist durch die kleinste Anzahl von Fahrzeugen und Kurieren zu erklären, die zur Bedienung der anfallenden Paketnachfrage erforderlich sind. Dieser Zusammenhang gilt sowohl für die elektrisch als auch für die konventionell angetriebene Variante.

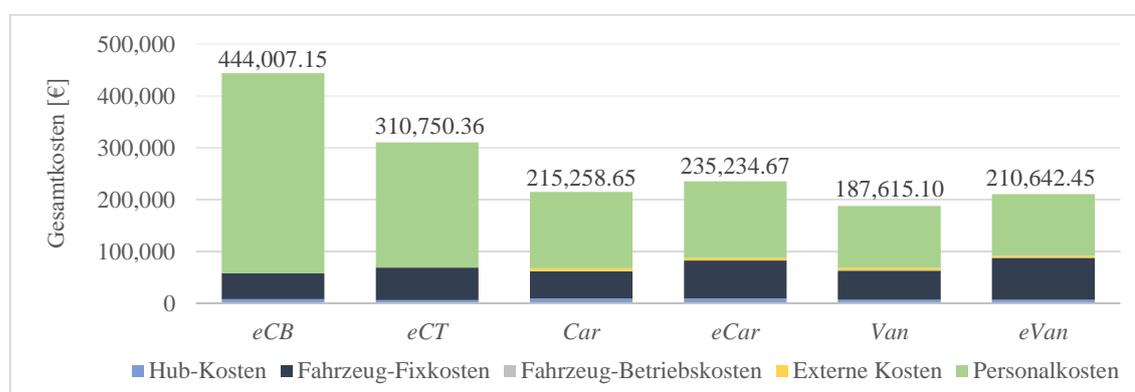


Abbildung 2. Benchmarks für die alleinige Nutzung einzelner Fahrzeugtypen

Insgesamt ermöglichen die Implementierung des Optimierungsmodells in der Software GAMS und das darauf aufbauende EUS die Durchführung von Szenarioanalysen mit selbstdefinierten Parameterkombinationen durch Transportdienstleister, Stadtplaner und andere Entscheidungsträger. Die abgebildeten Benchmarks basieren auf einem Anwendungsfall und zeigen, dass Lieferwagen das effizienteste Verkehrsmittel für die Paketzustellung darstellen. In einem Logistik-Konzept mit lokalen Mikro-Depots können Lastenfahräder jedoch eine sinnvolle Ergänzung der Flotte sein.

Nachhaltige e-Grocery Zustellung

Im zweiten Hauptteil der Dissertation (Kapitel 3) geht es um die Zustellung von online bestellten Verbrauchsgütern. Das sog. e-Grocery verzeichnet weltweit steigende Marktanteile (IGD, 2018) und umfasst Lebensmittel, Haushaltsartikel sowie andere Konsumgüter des täglichen Bedarfs. In der OR- und IS-Forschung wird das Thema der e-Grocery Zustellung bislang kaum behandelt und es besteht eine Forschungslücke bezüglich neuer Lösungsansätze, die sowohl ökonomische als auch ökologische Aspekte der Nachhaltigkeit adressieren. Daher wurde ein neues Logistik-Konzept entworfen, dessen optimale

Gestaltung durch ein mehrstufiges MILP unterstützt wird. Ein Netzwerk aus unterschiedlich temperierten Paketstationen dient hierbei der Zwischenlagerung der online bestellten Verbrauchsgüter und einer Verkürzung der letzten Meile. Von den sog. „Grocery Lockern“ erfolgt entweder eine Zustellung per ECC oder eine Selbstabholung der Kunden. Abbildung 3 visualisiert das Logistik-Konzept und die drei Stufen des entwickelten Optimierungsmodells.

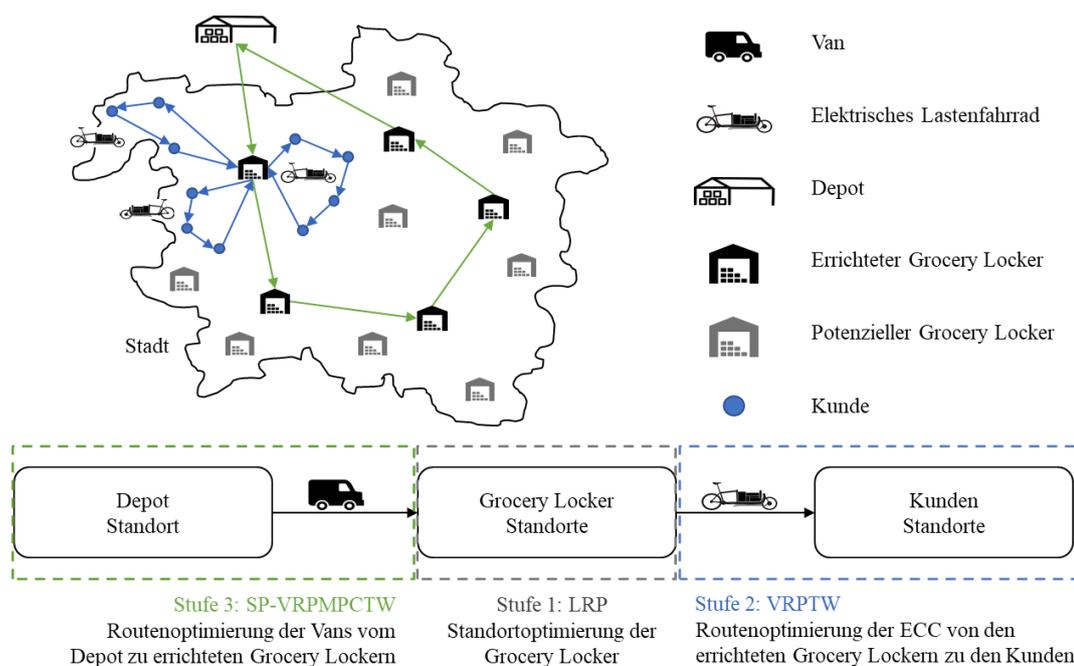


Abbildung 3. Überblick über das Logistik-Konzept für e-Grocery

In der ersten Modellstufe bestimmt ein Location Routing Problem (LRP) die optimale Anzahl, Größen und Standorte der Grocery Locker. Dabei erfolgt die Auswahl aus gewissen Typen verfügbarer Grocery Locker und aus potenziellen Standorten, an denen diese errichtet werden können. Des Weiteren werden die Kunden zu den eröffneten Grocery Locker Standorten zugeordnet und die Routen der Vans vorgeplant. Das LRP minimiert die Summe der Betriebskosten der Grocery Locker und die variablen Transportkosten der Vans unter Einhaltung von sieben Nebenbedingungen. Die zweite Modellstufe optimiert die Routen der ECC von den Standorten der eröffneten Grocery Locker zu denjenigen Kunden, die eine Lieferung nach Hause fordern. Dazu werden die variablen Transportkosten der ECC unter Berücksichtigung von 15 Nebenbedingungen minimiert. Unter anderem müssen Zeitfenster für alle Kunden beachtet werden, sodass die zweite Modellstufe ein Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) darstellt. Im

dritten Schritt erfolgt die Optimierung der Belieferung der Grocery Locker mit den bestellten Produkten. Das Modell minimiert die variablen Transportkosten der von einem Depot startenden Vans und berücksichtigt dabei 14 Nebenbedingungen. Unter anderem sind Inkompatibilitäten zwischen Produkten, Zeitfenster und geteilte Lieferungen eingeschlossen, sodass die dritte Modellstufe als Split-Delivery Vehicle Routing Problem with Multiple Products, Compartments and Time Windows (SP-VRPMPCTW) klassifiziert werden kann.

Zur Optimierung des beschriebenen Logistik-Konzepts wurden drei aufeinander folgende MILP formuliert, welche in Kapitel 3.4 ausführlich erläutert sind. Die Implementierung des Lösungsansatzes in GAMS ermöglicht die computergestützte Berechnung von Optimierungsergebnissen für diverse Szenarien. Zur Evaluierung des entwickelten Optimierungsansatzes wurden mehrere Benchmarks für einen Anwendungsfall der Stadt Hannover mit insgesamt 100 Kunden berechnet und analysiert. Tabelle 2 stellt die Ergebnisse für verschiedene Netzwerkdichten dar, indem der Parameter, welcher die maximale Distanz zwischen einem Grocery Locker und den ihm zugewiesenen Kunden-Standorten definiert, variiert wurde.

Tabelle 2. Benchmarks für verschiedene Maximaldistanzen zwischen Grocery Locker und Kunde

Max. Dist. [km]	Anzahl an Grocery Lockern				Tägliche Distanz		Tägliche Kosten			
	klein [#]	mittel [#]	groß [#]	Σ [#]	ECC [km]	Vans [km]	Groc. Lock. [€]	ECC [€]	Vans [€]	Σ [€]
0,50	25	0	0	25	24,30	225,56	250,00	2,43	67,67	320,10
0,75	19	0	0	19	32,55	223,87	190,00	3,26	67,17	260,42
1,25	4	4	0	8	38,81	212,65	116,00	3,88	63,79	183,68
1,75	2	0	3	5	43,82	209,89	101,00	4,38	62,97	168,35
2,00	0	1	3	4	50,95	202,32	100,00	5,09	60,70	165,79

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verringerung der beschriebenen Maximaldistanz zu einer Erhöhung der Anzahl der errichteten Grocery Locker, der Fahrstrecken der Vans und der Gesamtkosten führt. Auf der anderen Seite kann die zurückgelegte Distanz der ECC durch eine erhöhte Grocery Locker Anzahl verringert werden, sodass weniger Lieferverkehr auf der letzten Meile entsteht. Bei einer Maximaldistanz von 0,5 km werden 25 kleine Grocery Locker eröffnet und es resultieren Gesamtkosten in Höhe von 320,10 €/Tag. Die Netzwerkdichte und -struktur verändert sich mit einer zunehmenden Maximaldistanz, da die Anzahl der eröffneten Grocery Locker sinkt, aber deren Größe

bzw. Kapazität steigt. Für den Fall der Selbstabholung durch die Kunden ist die Entfernung zu einer Sammelstelle ein entscheidender Faktor für die Kundenakzeptanz (Iwan et al., 2016).

Neben der Szenarioanalyse wurde das beschriebene Logistik-Konzept mit einer konventionellen Zustellung von online bestellten Verbrauchsgütern verglichen. Dort erfolgt eine direkte Lieferung der Verbrauchsgüter von einem Depot zu den Kunden-Standorten, sodass die Zwischenlagerung in den Grocery Lockern, die ECC-Touren und die Möglichkeit der Selbstabholung durch Kunden entfallen. Im Vergleich verursacht das neue Logistik-Konzept höhere Gesamtkosten und einen größeren Flächenbedarf durch den Betrieb der Grocery Locker. Andererseits können die Fahrleistung der Vans, die damit verbundenen Emissionen und der städtische Straßenverkehr reduziert werden. Die Höhe der veränderten Kosten, Fahrstrecken und Flächenbedarfe hängt stark von der Gestaltung des alternativen Logistik-Konzepts ab (siehe Tabelle 2).

Insgesamt ermöglicht das vorgestellte Logistik-Konzept eine Entlastung des innerstädtischen Straßenverkehrs, da die Lieferwagen in dem neuen Konzept nur noch wenige Sammelstellen und nicht eine Vielzahl von Kunden-Standorten anfahren müssen. Zudem können die Umschlagspunkte in verkehrssarmen Zeiten (z.B. nachts) bestückt werden, sodass eine zusätzliche Reduzierung eintritt. Grundsätzlich dient das entwickelte dreistufige Optimierungsmodell der bestmöglichen Gestaltung und Planung des alternativen Lösungsansatzes. Die entsprechende Implementierung in GAMS ermöglicht die Durchführung von Szenarioanalysen mit Parameterkombinationen, die durch e-Grocery Anbieter, Transportdienstleister und andere Entscheidungsträger bestimmt werden.

Individuelle Routenoptimierung

Der dritte Hauptteil der Dissertation (Kapitel 4) behandelt die Entwicklung eines flexiblen EUS zur Optimierung von individualisierbaren Touren- bzw. Routenplanungsproblemen diverser Branchen. Für Unternehmen sind effiziente Logistikprozesse von Bedeutung, da diese einen relevanten Kostenfaktor darstellen. Die Tourenplanung von Fahrzeugen (engl. vehicle routing) zum Transport von Gütern und Personen ist ein wesentlicher Teilbereich der Logistik. Hierbei können optimierte Touren zu Kostenreduktionen von bis zu 30% führen (Hasle und Kloser, 2007). In der OR- und IS-Forschung existiert das sog. Vehicle Routing Problem (VRP), welches seit über 50 Jahren intensiv beforscht

wird. Typischerweise werden VRP zur Unterstützung von operativen und taktischen Entscheidungsprozessen im Transportwesen entwickelt, um komplexe Tourenplanungsprobleme zu modellieren und zu optimieren (Lahyani et al., 2015). Während in der Forschung kontinuierlich neue Varianten und Lösungsmethoden für das VRP entstehen, wird ein Großteil der Modelle für seine unrealistischen Annahmen und idealisierten Bedingungen kritisiert (Hartl et al., 2006). Daher liegt der Fokus des entwickelten EUS auf sog. „real-world VRP“, „Rich VRP“ und „Multi-Attribut VRP“, welche eine Vielzahl möglicher Attribute und deren Kombinationen berücksichtigen, um ein Tourenplanungsproblem bestmöglich abzubilden. Ein VRP-Attribut beschreibt hierbei ein Merkmal bzw. eine Eigenschaft des zugrundeliegenden Planungsproblems, z.B. die Berücksichtigung von Zeitfenstern oder die Beachtung von Kapazitätsrestriktionen. Zur Analyse der bestehenden Wissensbasis auf dem beschriebenen Forschungsgebiet wurde eine systematische Literaturrecherche nach Kitchenham et al. (2009) durchgeführt. Dabei wurden 25 Artikel identifiziert, die nach 2009 veröffentlicht wurden und ein VRP mit mindestens vier Modellattributen sowie einen praxisnahen Anwendungsfall beinhalten. Der Literaturüberblick zeigt dabei, dass diverse Routing Attribute und Zielfunktionselemente bereits intensiv untersucht wurden, die existierenden VRP-Artikel jedoch häufig auf spezifische Einzelprobleme zugeschnitten sind. Die fehlende Flexibilität und die Möglichkeit, verschiedene Nebenbedingungen variabel zu kombinieren stellen eine relevante Forschungslücke dar, die das entwickelte EUS mit der Bezeichnung *Multi-Attribute Vehicle Routing Decision Support System* (MAVRDSS) adressiert.

Auf der Basis der Literaturrecherche und der VRP-Taxonomie von Eksioglu et al. (2009) wurde das in Abbildung 4 dargestellte Schema zur Klassifizierung von „real-world“ VRP-Attributen abgeleitet. Das Ziel war dabei die Auflistung und Strukturierung der relevanten Modellattribute, die ein spezifisches VRP und dessen Kontext charakterisieren. Die möglichen VRP-Attribute wurden hierzu in vier Kategorien eingeteilt, um die jeweiligen Problemeigenschaften systematisch abzubilden. Darüber hinaus zeigt Abbildung 4 welche der aufgeführten VRP-Attribute im MAVRDSS implementiert sind (schwarze Schrift). Wegen Inkonsistenzen wurden die Attribute in grauer Schrift nicht implementiert. Da nur wenige Inkompatibilitäten zwischen den Attributen bestehen, ist die generelle Funktionalität des Modells für nahezu alle Kombinationen der Attribute gegeben.

I. Information Characteristics		II. Problem Physical Characteristics	
<i>input data</i> +input evolution └ static └ dynamic +input quality └ deterministic └ stochastic <i>travel mode</i> └ unimodal └ multimodal <i>number of vehicles</i> └ unlimited number └ bounded number <i>customer requests</i> └ pickup or delivery └ pickup and delivery	<i>depots</i> └ single └ multiple <i>periods</i> └ single └ multiple <i>product types</i> └ single └ multiple	<i>vehicles</i> +type └ homogenous └ heterogeneous +capacity └ unrestricted └ capacitated +range └ unlimited └ limited +structure └ no compartments └ compartmentalized +loading policy └ no policy └ specific ordering <i>drivers</i> └ no regulations └ regulations	<i>customers</i> └ unrestricted └ inventory considerations <i>depots</i> └ unconstrained └ capacitated <i>times</i> └ unconstrained └ time dimension +time window structure └ single time window └ multiple time windows +time window components └ customers/requests └ depots └ vehicles/drivers └ roads
III. Route Characteristics		IV. Objective Characteristics	
<i>node covering</i> └ complete └ optional visits <i>visit frequency</i> └ single visit └ multiple visits / load splitting <i>depot connectivity</i> └ closed routes └ open routes <i>vehicle use</i> └ single trip └ multiple trips	<i>incompatibilities</i> └ all compatible └ incompatibilities <i>node coupling</i> └ no precedence └ precedence constraints <i>routes balancing</i> └ no balancing └ balanced routes	<i>structure</i> └ single objective └ multiple objectives └ weighted sum └ hierarchical ordering <i>hardness of constraints</i> └ hard constraints └ soft constraints	<i>components</i> └ distance └ times └ vehicle/driver └ customer/request └ depot └ load

Abbildung 4. Klassifizierung der implementierten VRP-Attribute

Wie beschrieben, stellt das MAVRDSS ein EUS zur Modellierung und Lösung von individualisierbaren Touren- bzw. Routenplanungsproblemen dar. Das MAVRDSS besteht hierbei als Prototyp in Form einer Webapplikation, welche der Benutzer über eine entsprechende GUI steuert. Im Wesentlichen besteht das System aus den folgenden fünf Hauptkomponenten: Modellkonfiguration, Eingabedaten, Optimierungseinstellungen, Ergebnisse und Visualisierung. Im ersten Schritt konfiguriert der Benutzer das zugrunde liegende Optimierungsproblem, indem die relevanten Attribute ausgewählt werden. Dabei wird das Problem in der Reihenfolge, die in Abbildung 4 dargestellt ist (I-IV), spezifiziert. Im zweiten Schritt gibt der Benutzer die Eingabedaten an (z.B. Standorte der Kunden, der Depots und der Fahrzeuge). Die Optimierungseinstellungen umfassen die benutzerseitigen Konfigurationen des Optimierungsprozesses, welche vor einem Optimierungslauf definiert sein müssen (z.B. maximale Rechenzeit). Ein „Interface-to-Database“ System ermöglicht das Schreiben, Bearbeiten und Lesen der relevanten Daten. Wenn die Modellkonfiguration, die Eingabedaten und die Optimierungseinstellungen in einer Datenbank (DB) gespeichert sind, kann ein Optimierungslauf gestartet werden. Dabei wer-

den sämtliche Eingaben und Informationen in ein individuelles Optimierungsmodell umgewandelt und zur Lösung an die Software *LocalSolver* übermittelt. *LocalSolver* ist ein mathematischer Solver, der auf dem heuristischen Lösungsverfahren der lokalen Suche basiert. Durch das sog. „model-and-run“ Paradigma kann dieser eine breite Klasse verschiedener Probleme lösen. Die berechneten Lösungen (z.B. Tourenpläne) werden nach einem Optimierungslauf in der DB gespeichert, sodass der Benutzer diese abrufen und visualisieren kann. Die beschriebene Benutzerinteraktion sowie die Systemarchitektur sind in Abbildung 5 visualisiert.

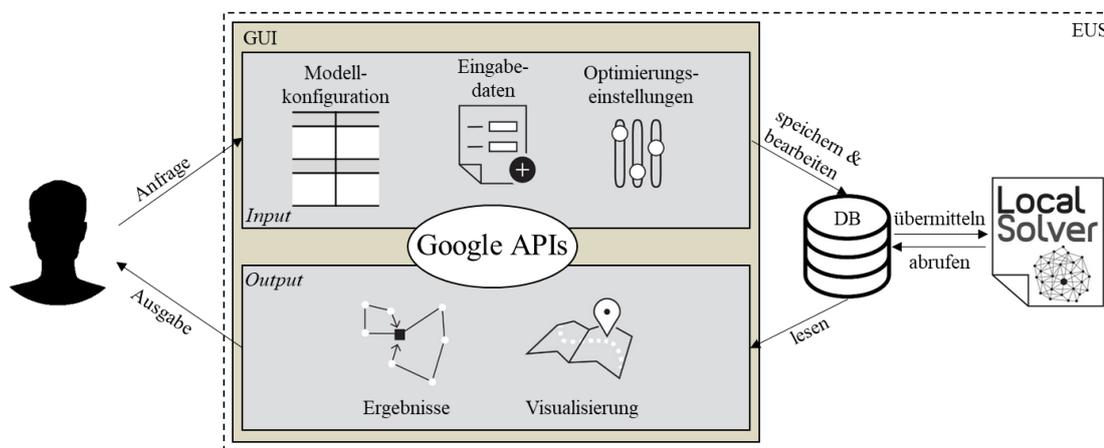


Abbildung 5. Benutzerinteraktion und Systemarchitektur des MAVRDSS

Grundsätzlich sind die Vielseitigkeit und die Individualisierbarkeit des Routing-Modells die wichtigsten Eigenschaften des MAVRDSS. Die Umsetzung in *LocalSolver* dient der Integration aller Komponenten der lokalen Suchheuristik und ermöglicht die Lösung von benutzerspezifischen VRP. Das Suchverfahren ist dabei eine „Simulated Annealing“ Heuristik mit Neustarts. Aufgrund des operativen Planungskontexts von VRP ist die Verwendung eines heuristischen Lösungsverfahrens hierbei von großer Bedeutung, um gute Lösungen in kurzer Zeit zu erhalten.

Um den Lösungsansatz und die Leistungsfähigkeit des MAVRDSS zu evaluieren, wurden Benchmarks für drei Routing-Problemvarianten (Split-Delivery-VRP, Multi-Depot VRP und LRP) berechnet. Die Grundlage bilden hierbei wissenschaftliche Probleminstanzen mit unterschiedlichem Umfang, welche beispielhafte Datensätze für die genannten Routing-Problemvarianten darstellen. Die erzielten Ergebnisse des MAVRDSS wurden dabei je VRP-Variante mit den Lösungen von zwei bis drei problemspezifischen Algorithmen aus Referenzstudien verglichen. Für jeden Benchmark sind hierzu der relative Abstand

der Lösung zur besten bekannten Lösung und die Rechenzeit angegeben. Die Benchmarks für die Instanzen des Split-Delivery-VRP und des Multi-Depot VRP zeigen, dass das MAVRDSS in der Lage ist, gute Lösungen in relativ kurzer Zeit zu erreichen. Insbesondere für kleine Probleminstanzen können sehr gute Lösungen erzielt werden, die auf dem Niveau der problemspezifischen Algorithmen liegen. Ein einschränkender Nachteil ist die geringe Verbesserung der Lösungsqualität in der verbleibenden Rechenzeit. Die Benchmarks für die LRP-Instanzen zeigen, dass das MAVRDSS mit den problemspezifischen Algorithmen hinsichtlich Lösungsqualität sowie Rechenzeit mithalten und auch für große Datensätze hochwertige Lösungen innerhalb weniger Sekunden liefern kann.

Insgesamt ermöglicht das flexible MAVRDSS die Modellierung sowie die effiziente Lösung verschiedener Routing-Probleme. Die 26 implementierten VRP-Attribute erlauben hierbei die Abbildung diverser Geschäftskontexte und Branchen des urbanen Wirtschaftsverkehrs. Die Benchmarks zeigen, dass das MAVRDSS gute Lösungen in kurzer Zeit berechnen und teilweise mit problemspezifischen Algorithmen mithalten kann. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen, die eine eigene Fahrzeugflotte besitzen und bislang keine Tourenplanungssoftware einsetzen, stellen die primäre Zielgruppe des EUS dar. Durch den Einsatz des MAVRDSS können einzelne Unternehmen, freiberufliche Kuriere und die Umwelt profitieren, indem die Fahrleistung sowie die damit verbundenen Kosten und Emissionen minimiert werden. Grundsätzlich sollte eine Routenoptimierung, in Form einer datengetriebenen Entscheidungsunterstützung, bei allen Fahrten durchgeführt werden, um entsprechende Einsparungspotenziale auszuschöpfen.

III. Inhaltsverzeichnis

I. Abstract	I
II. Management Summary	III
III. Inhaltsverzeichnis	XV
IV. Abbildungsverzeichnis	XVII
V. Tabellenverzeichnis	XVIII
VI. Abkürzungsverzeichnis	XIX
VII. Überblick der Veröffentlichungen und Aufgabenverteilung.....	XXI
1. Einleitung.....	1
1.1. Motivation und Gegenstand	1
1.2. Forschungsmethodik	3
1.3. Aufbau der Dissertation	5
2. Entscheidungsunterstützung zur Optimierung eines nachhaltigen Logistik-	
 Konzepts in der urbanen Paketzustellung.....	7
2.1. Einleitung	7
2.2. Theoretische Grundlagen und Literaturüberblick	9
2.3. Mathematisches Optimierungsmodell.....	16
2.3.1. Annahmen	17
2.3.2. Nomenklatur	18
2.3.3. Zielfunktion und Nebenbedingungen	19
2.4. Entscheidungsunterstützungssystem	21
2.5. Anwendungsfall und Szenarioanalyse.....	22
2.5.1. Datensatz und Parameterdefinition.....	23
2.5.2. Szenarioanalyse und Diskussion der Ergebnisse	26
3. Optimierung eines neuen Logistik-Konzepts für e-Grocery Lieferungen im	
 urbanen Raum	33
3.1. Einleitung	34
3.2. Theoretische Grundlagen	35
3.3. Logistik-Konzept für die letzte Meile des e-Grocery.....	38
3.4. Optimierungsansatz	40
3.4.1. Annahmen	40
3.4.2. Nomenklatur	41
3.4.3. Modellstufe 1: LRP.....	42
3.4.4. Modellstufe 2: VRPTW	44
3.4.5. Modellstufe 3: SP-VRPMPCTW	46
3.5. Anwendungsfall und Szenarioanalyse.....	47
3.5.1. Datensatz und Parameterdefinition.....	47
3.5.2. Szenarioanalyse und Diskussion der Ergebnisse	49

4. Variable Entscheidungsunterstützung für individuelle Routenoptimierungsprobleme	54
4.1. Einleitung	54
4.2. Theoretische Grundlagen und Literaturüberblick	56
4.3. Entscheidungsunterstützungssystem MAVRDSS	61
4.3.1. Anforderungen	61
4.3.2. Funktionen und Benutzerinteraktion	64
4.3.3. Systemkomponenten und Implementierung	66
4.4. Benchmarks und praktische Anwendungsfälle	68
4.4.1. Quantitatives Benchmarking	68
4.4.2. Praxis-Simulationen	72
5. Kritische Würdigung	74
5.1. Diskussion der wissenschaftlichen Beiträge	74
5.2. Darstellung der Limitationen	78
5.3. Ausblick	82
6. Fazit	84
Literaturverzeichnis	85
Anhang	103
Anhang A: Ein Entscheidungsunterstützungssystem zur Tourenplanung am Beispiel eines innovativen Lebensmittel-Lieferkonzeptes	104
Anhang B: Decision Support for Urban E-Grocery Operations	105
Anhang C: Autonomous Unmanned Ground Vehicles for Urban Logistics: Optimization of Last Mile Delivery Operations	106
Anhang D: An Empirical Study of Customers' Behavioral Intention to Use Ridepooling Services	107
Anhang E: Lastenfahrräder im urbanen Wirtschaftsverkehr: Anforderungen von Handwerkern und Apothekern	108
Anhang F: Individually Optimized Commercial Road Transport: A Decision Support System for Customizable Routing Problems	109
Anhang G: Smart Mobility in Smart Cities: Chances and Challenges of Autonomous Passenger Transport	110
Anhang H: Decision Support for Sustainable and Resilience-Oriented Urban Parcel Delivery	111
Anhang I: Shortening the Last Mile of e-Grocery: Optimizing a New Logistics Concept for Urban Areas	112
Anhang J: Behavioral Intention to Use Ridepooling Services – Empirical Insights and Recommendations	113

IV. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Systemarchitektur und Datenflüsse des EUS	V
Abbildung 2. Benchmarks für die alleinige Nutzung einzelner Fahrzeugtypen..	VII
Abbildung 3. Überblick über das Logistik-Konzept für e-Grocery	VIII
Abbildung 4. Klassifizierung der implementierten VRP-Attribute	XII
Abbildung 5. Benutzerinteraktion und Systemarchitektur des MAVRDSS.....	XIII
Abbildung 6. Klassifizierung der Verkehrsarten nach Arndt (2010).....	2
Abbildung 7. Zyklen des Design Science Research im Kontext der urbanen Logistik	4
Abbildung 8. Struktur der Dissertation.....	6
Abbildung 9. Systemarchitektur und Datenflüsse des EUS	22
Abbildung 10. Untersuchungsgebiete und deren Eigenschaften	23
Abbildung 11. Benchmarks für die alleinige Nutzung einzelner Fahrzeugtypen..	30
Abbildung 12. Anteil des e-Grocery nach Ländern im Jahr 2018 und 2023	34
Abbildung 13. Überblick über das Logistik-Konzept für e-Grocery	39
Abbildung 14. Betrachteter Untersuchungsraum und Verteilung der relevanten Standorte	48
Abbildung 15. Klassifizierung der implementierten VRP-Attribute	63
Abbildung 16. Benutzerinteraktion und Systemarchitektur des MAVRDSS.....	65
Abbildung 17. Screenshot der GUI des MAVRDSS während der Modellkonfiguration	66

V. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Benchmarks für verschiedene Obergrenzen des CO ₂ -Flotten- durchschnitts	VI
Tabelle 2. Benchmarks für verschiedene Maximaldistanzen zwischen Grocery Locker und Kunde.....	IX
Tabelle 3. Übersicht der Veröffentlichungen	XXVI
Tabelle 4. Literaturüberblick der Optimierungsansätze im Bereich der LMD.....	15
Tabelle 5. Definition und Einheiten der verwendeten Mengen, Parameter und Variablen.....	18
Tabelle 6. Potenzielle Transportfahrzeuge und deren Eigenschaften.....	24
Tabelle 7. Angenommene Parameter Werte	26
Tabelle 8. Ergebnisse im Basisszenario.....	27
Tabelle 9. Benchmarks für verschiedene Obergrenzen des CO ₂ -Flotten- durchschnitts	27
Tabelle 10. Benchmarks für verschiedene Obergrenzen der verfügbaren Parkfläche	28
Tabelle 11. Benchmarks für verschiedene Obergrenzen der täglichen Arbeitszeit der Kuriere	29
Tabelle 12. Verwendete Mengen, Parameter und Entscheidungsvariablen.....	42
Tabelle 13. Benchmarks für verschiedene Anteile von Hauslieferungs- und Selbstabholer-Kunden.....	50
Tabelle 14. Benchmarks für verschiedene Maximaldistanzen zwischen Grocery Locker und Kunde.....	51
Tabelle 15. Überblick über verbreitete VRP-Attribute, deren Abkürzung und Beschreibung.....	57
Tabelle 16. Klassifizierung der relevanten VRP-Artikel.....	59
Tabelle 17. Benchmarks für das Split-Delivery VRP.....	69
Tabelle 18. Benchmarks für das Multi-Depot VRP.....	70
Tabelle 19. Benchmarks für das Location Routing Problem.....	71

VI. Abkürzungsverzeichnis

AIS	Association for Information Systems
AMCIS	Americas Conference on Information Systems
API	Application Programming Interface
ArbZG	Arbeitszeitgesetz
AUGV	Autonomous Unmanned Ground Vehicles
CT	Computation Time
DB	Datenbank
DSR	Design Science Research
DSS	Decision Support System
eCB	Electric Cargo Bicycle
ECC	Electric Cargo Cycle
eCT	Electric Cargo Tricycle
EJDP	EURO Journal on Decision Processes
EU	Europäische Union
EUS	Entscheidungsunterstützungssystem
FF	Forschungsfrage
GAMS	General Algebraic Modeling System
GIS	Geoinformationssystem
GUI	Graphical User Interface
HICSS	Hawaii International Conference on System Sciences
HTML	Hypertext Markup Language
IF	Impact Factor
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IS	Informationssystem
IT	Informationstechnologie
IWI	Institut für Wirtschaftsinformatik
JQ3	Jourqual 3 Rating
KEP	Kurier Express und Paket
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LMD	Last Mile Delivery
LRP	Location Routing Problem
LSP	Local Search Programming

LUH	Leibniz Universität Hannover
MAVRDSS	Multi-Attribute Vehicle Routing Decision Support System
MILP	Mixed Integer Linear Problem
MIP	Mixed Integer Programming
MKWI	Multikonferenz Wirtschaftsinformatik
NP	Nichtdeterministische Polynomialzeit
OR	Operations Research
PESTEL	Political Economic Social Technological Environmental Legal
SP-VRPMPCTW	Split-Delivery Vehicle Routing Problem with Multiple Products Compartments and Time Windows
TAM	Technology Acceptance Model
UDC	Urban Distribution Center
VHB	Verband der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows
WI	International Conference on Wirtschaftsinformatik
WKWI	Wissenschaftlichen Kommission für Wirtschaftsinformatik

VII. Überblick der Veröffentlichungen und Aufgabenverteilung

Diese Dissertation basiert auf zehn Publikationen, von denen neun ein sog. „peer-review“ Verfahren durchlaufen haben. Neben vier Veröffentlichungen in Konferenzbänden, sind drei Journalartikel und zwei IWI-Diskussionspapiere entstanden. Zusätzlich ist ein Journalartikel eingereicht und befindet sich zum Zeitpunkt der Abgabe der Dissertation im Begutachtungs-Prozess. An den Publikationen waren insgesamt 14 Co-Autoren beteiligt, wobei Marc-Oliver Sonneberg, Maximilian Heumann und Prof. Dr. Michael H. Breitner als bedeutendste Co-Autoren hervorzuheben sind.

In Tabelle 3 ist eine Übersicht der erfolgten Publikationen dargestellt, welche die Informationen über das Erscheinungsjahr, den Titel, die Autoren und deren Reihenfolge sowie das Journal bzw. die Konferenz je Veröffentlichung enthält. Zur Beurteilung der wissenschaftlichen Qualität und Relevanz der einzelnen Beiträge sind drei Bewertungsmaßstäbe bzw. Ratings angegeben. Diese sind die WI-Orientierungslisten 2008, geführt von der Wissenschaftlichen Kommission für Wirtschaftsinformatik (WKWI) (Heinzl et al., 2008); das Jourqual 3 Rating (JQ3), angelegt vom Verband der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft (VHB) (Hennig-Thurau et al., 2015); sowie der Impact Factor (IF), entnommen aus den Journal Citation Reports (Clarivate Analytics, 2019).

Alle Publikationen können dem übergeordneten Themenfeld des urbanen Straßenverkehrs mit einem speziellen Fokus auf die urbane Logistik bzw. den urbanen Wirtschaftsverkehr zugeordnet werden. Der Großteil der Publikationen basiert auf der Methodik des Design Science Research sowie Werkzeugen des Operations Research und behandelt mathematische Optimierungsmodelle sowie Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS), welche dabei helfen sollen, die Effizienz von städtischen Logistik-Konzepten zu maximieren. Dabei steht der auftretende Zielkonflikt zwischen einer Kostenminimierung auf der einen Seite und einer Vermeidung der negativen Effekten anfallender Transportvorgänge auf der anderen Seite im Zentrum der Untersuchungen.

Da sämtliche Veröffentlichungen in verschiedenen Autorenteamen erfolgt sind, werden im Folgenden die jeweiligen Beiträge der beteiligten Autoren beschrieben. Das Paper „Ein Entscheidungsunterstützungssystem zur Tourenplanung am Beispiel eines innovativen Lebensmittel-Lieferkonzeptes“ (Gebski et al., 2018, Anhang A) behandelt den Prototypen einer Web-Applikation zur optimalen Auslieferung von zubereiteten Lebensmitteln

in Städten. Hr. GebSKI und Hr. Czerwinski haben die technische Entwicklung des EUS durchgeführt und das zugrundeliegende Optimierungsmodell entworfen. Hr. Sonneberg hat die Literaturrecherche durchgeführt und die theoretischen Grundlagen verfasst. Ich habe den Rahmenteil verfasst und die Funktionsweise der Applikation beschrieben, den Anwendungsfall durchgeführt, sowie den Beitrag auf der 10. *Multikonferenz Wirtschaftsinformatik* (MKWI) in Lüneburg präsentiert.

Das Paper „Decision Support for Urban E-Grocery Operations“ (Leyerer et al., 2018, Anhang B) behandelt ein zweistufiges Optimierungsmodell zur effizienten Gestaltung eines urbanen Netzwerks aus unterschiedlich temperierten Paketstationen. Diese dienen einerseits dazu, dass sich die Empfänger ihre Bestellungen selbst abholen können und andererseits als Umschlagpunkt, um den Einsatz von elektrischen Lastenfahrrädern als Transportmittel auf der letzten Meile zu ermöglichen. Während die Idee des Logistik-Konzepts im gesamten Autorenteam entstanden ist, hat Herr Sonneberg an den theoretischen Grundlagen mitgewirkt und war für die Diskussion verantwortlich. Ich habe den Rahmenteil verfasst, das Optimierungsmodell in Kooperation mit ihm entwickelt und die Szenarioanalyse durchgeführt. Das Paper wurde von mir auf der 24. *Americas Conference on Information Systems* (AMCIS) in New Orleans (USA) vorgestellt. Der Artikel wurde mit dem Award für das beste Konferenzpaper ausgezeichnet.

Der Beitrag „Autonomous Unmanned Ground Vehicles for Urban Logistics: Optimization of Last Mile Delivery Operations“ (Sonneberg et al., 2019a, Anhang C) behandelt ein Location Routing Problem (LRP), um den Einsatz von Paketrobotern auf der letzten Meile möglichst effizient zu gestalten. Die Idee des Papers stammt von Fr. Kleinschmidt, welche auch das Basismodell entwickelt hat. Dieses wurde im gesamten Autorenteam, aber vor allem von Hr. Knigge, erweitert und verbessert. Ich habe zum Rahmenteil beigetragen und gemeinsam mit Hr. Sonneberg die Berechnungen, Analysen und Interpretation der Szenarien durchgeführt. Hr. Sonneberg hat zusätzlich die Grundlagen sowie die Diskussion über das Vorgehen und die Ergebnisse verfasst, bevor er das Paper schließlich auf der 52. *Hawaii International Conference on System Sciences* (HICSS) auf Maui (USA) präsentiert hat.

Das Paper „An Empirical Study of Customers’ Behavioral Intention to Use Ridepooling Services – An Extension of the Technology Acceptance Model“ (Sonneberg et al., 2019b, Anhang D) thematisiert die Untersuchung der Akzeptanz von potenziellen Kunden für

sog. Ridepooling Dienste. Hierbei hat Hr. Sonneberg an den theoretischen Grundlagen mitgewirkt sowie den Rahmenteil und große Teile der Diskussion verfasst. Ich habe die theoretischen Grundlagen über Ridepooling und die Einordnung in das Feld neuer Mobilitätsdienste beigesteuert sowie zur Interpretation der Ergebnisse beigetragen. Fr. Wille und Hr. Jarlik haben die zugrundeliegende Umfrage durchgeführt und das empirische Modell entwickelt. Hr. Werth war maßgeblich an der Entwicklung der Hypothesen, der Anwendung des TAM (Technology Acceptance Model) und der Interpretation der Ergebnisse beteiligt. Der Beitrag wurde von Hr. Werth auf der 14. *International Conference on Wirtschaftsinformatik (WI)* in Siegen vorgestellt.

In dem Artikel „Lastenfahrräder im urbanen Wirtschaftsverkehr: Anforderungen von Handwerkern und Apothekern“ (Dürkoop et al., 2019, Anhang E) werden die Bedarfe der beiden genannten Personengruppen an Transportfahrräder analysiert. Fr. Dürkoop hat die Arten der verschiedenen Lastenfahrräder zusammengetragen, die Experteninterviews mit entsprechenden Branchenvertretern durchgeführt und die erhobenen Inhalte qualitativ analysiert. Ich habe den Rahmenteil und die kritische Würdigung verfasst, sowie bei der Interpretation der Ergebnisse mitgewirkt.

Das Paper „Individually Optimized Commercial Road Transport: A Decision Support System for Customizable Routing Problems“ (Leyerer et al., 2019a, Anhang F) behandelt ein EUS zur flexiblen Optimierung von vielfältigen Touren- bzw. Routenplanungsproblemen. Hr. Kammann hat hierbei die zugrundeliegende Heuristik und den finalen Prototyp der Webapplikation entwickelt. Die Anforderungen an das EUS wurden in mehreren Diskussionen vom gesamten Autorenteam definiert. Hr. Sonneberg war an den theoretischen Grundlagen und an der kritischen Würdigung beteiligt. Ich habe den Rahmenteil und die Diskussion verfasst, sowie die Szenarioanalyse mit Hr. Heumann durchgeführt. Die Inhalte des Papers und die Funktionen des entwickelten EUS werden in Kapitel 4 im Detail behandelt.

In dem Artikel „Smart Mobility in Smart Cities: Chances and Challenges of Autonomous Passenger Transport“ (Rose et al., 2019, Anhang G) werden die zukünftigen Chancen und Herausforderungen des autonomen Personentransports im Kontext von digitalen und vernetzten Städten untersucht. Mittels PESTEL-Analyse wurden die externen Einflussfaktoren identifiziert sowie die aktuellen Marktbedingungen und die erwarteten Entwicklun-

gen, die eine intelligente Mobilität (engl. smart mobility) und insbesondere den autonomen Personenverkehr betreffen, untersucht. Hr. Rose und Hr. Tautz haben hierbei die theoretischen Grundlagen verfasst und die PESTEL-Analyse durchgeführt. Der Rahmenteil, die kritische Würdigung und das Fazit wurden von mir verfasst.

Das Paper „Decision Support for Sustainable and Resilience-Oriented Urban Parcel Delivery“ (Leyerer et al., 2019b, Anhang H) behandelt ein EUS zur optimalen Gestaltung eines urbanen Netzwerks aus Mikro-Depots, welche als Umschlagpunkte für Pakete fungieren. Dadurch gelingt es, die letzte Meile zu den Paketempfängern mit elektrischen Lastenfahrrädern zu bewältigen und den urbanen Straßenverkehr zu reduzieren. Die Idee und der Rahmenteil stammen von mir. Das zugrundeliegende Optimierungsmodell und das EUS habe ich in Kooperation mit Hr. Sonneberg entwickelt. Gemeinsam mit Hr. Heumann habe ich die theoretischen Grundlagen dargestellt und die Szenarioanalyse durchgeführt. Die kritische Würdigung ist im gesamten Autorenteam entstanden, wobei ich den Großteil davon verfasst habe. Das entwickelte EUS und die Inhalte des Papers werden in Kapitel 2 ausführlich vorgestellt.

Der Artikel „Shortening the Last Mile of e-Grocery: Optimizing a New Logistics Concept for Urban Areas“ (Leyerer et al., 2020, Anhang I) stellt eine Weiterentwicklung des AMCIS-Beitrags (Leyerer et al., 2018, Anhang B) dar. Das mathematische Optimierungsmodell wurde dabei verbessert und von einem zweistufigen zu einem dreistufigen Modell erweitert. Dadurch lassen sich die gewünschten Funktionen besser abbilden und die einzelnen Entscheidungsvariablen insgesamt präziser bestimmen. Ich war für den Rahmenteil, die kritische Würdigung und die Darstellung des Optimierungsmodells verantwortlich. Hr. Sonneberg hat die theoretischen Grundlagen verfasst, sowie an der Diskussion und an der Verfeinerung des Modells mitgewirkt. Die Berechnung der Szenarien und die Interpretation der Ergebnisse erfolgten gemeinsam im Autorenteam. Die Inhalte des Papers und das dreistufige Optimierungsmodell werden in Kapitel 3 detailliert dargestellt. Der Artikel ist in der Special Issue „Smart Cities and Data-driven Innovative Solutions“ des Journals *Smart Cities* erschienen.

In dem Paper „Behavioral Intention to Use Ridepooling Services – Empirical Insights and Recommendations“ (Werth et al., 2020, Anhang J) wird die Kundenakzeptanz von Ridepooling Nutzern analysiert, um diese mit den Ergebnissen von Sonneberg et al. (2019b, Anhang D) zu vergleichen. Hierbei habe ich am Rahmenteil und der Interpretation der

Ergebnisse mitgewirkt. Hr. Sonneberg hat die theoretischen Grundlagen, den Methodik-Teil und den Literaturüberblick verfasst. Hr. Werth hat die Idee des Artikels entwickelt, die Strukturgleichungsmodellierung durchgeführt und den Großteil des Hauptteils verfasst. Der Artikel befindet sich in der ersten Gutachterrunde des Journals *Transportation Research Part A: Policy and Practice* und ist daher noch nicht veröffentlicht.

Hr. Prof. Dr. Breitner war an sämtlichen Publikationen unmittelbar beteiligt. Seine große Expertise im Bereich der Optimierungsverfahren und EUS, sowie seine langjährige Erfahrung bzgl. der Veröffentlichung von wissenschaftlichen Artikeln, insbesondere auf dem Gebiet der Wirtschaftsinformatik, haben maßgeblich zu den dargestellten Publikationen beigetragen. Dank des dauerhaften Austausches wurden Forschungsideen und -ansätze in zahlreichen Diskussionsrunden gemeinsam entwickelt, besprochen und kontinuierlich geschärft. Durch seine Beteiligung wurde die Struktur der Artikel und die Darstellung der Inhalte verbessert.

Überblick der Veröffentlichungen und Aufgabenverteilung

Tabelle 3. Übersicht der Veröffentlichungen

Jahr	Titel	Autoren	Tagungsband / Journal	WKWI	JQ3	IF	Anhang
2018	Ein Entscheidungsunterstützungssystem zur Tourenplanung am Beispiel eines innovativen Lebensmittel-Lieferkonzeptes	GebSKI, S.A.; Czerwinski, P.; Leyerer, M.; Sonneberg, M.-O.; Breitner, M.H.	Tagungsband der 10. Multikonferenz Wirtschaftsinformatik (MKWI) 2018, Lüneburg, Deutschland	C	D	-	A
2018	Decision Support for Urban E-Grocery Operations (<i>Best Conference Paper</i>)	Leyerer, M.; Sonneberg, M.-O.; Breitner, M.H.	Proceedings of the 24th Americas Conference on Information Systems (AMCIS) 2018, New Orleans, USA	B	D	-	B
2019	Autonomous Unmanned Ground Vehicles for Urban Logistics: Optimization of Last Mile Delivery Operations	Sonneberg, M.-O.; Leyerer, M.; Kleinschmidt, A.; Knigge, F.; Breitner, M.H.	Proceedings of the 52th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) 2019, Maui, USA	B	C	-	C
2019	An Empirical Study of Customers' Behavioral Intention to Use Ridepooling Services – An Extension of the Technology Acceptance Model	Sonneberg, M.-O.; Werth, O.; Leyerer, M.; Wille, W.; Jarlik, M.; Breitner, M.H.	Proceedings of the 14th International Conference on Wirtschaftsinformatik (WI), 2019, Siegen, Deutschland	A	C	-	D
2019	Lastenfahrräder im urbanen Wirtschaftsverkehr: Anforderungen von Handwerkern und Apothekern	Dürkoop, M.; Leyerer, M.; Breitner, M.H.	IWI Diskussionspapier #87, Institut für Wirtschaftsinformatik, Leibniz Universität Hannover	-	-	-	E
2019	Individually Optimized Commercial Road Transport: A Decision Support System for Customizable Routing Problems	Leyerer, M.; Sonneberg, M.-O.; Heumann, M.; Kammann, T.; Breitner, M.H.	Sustainability	-	C	2,592	F
2019	Smart Mobility in Smart Cities: Chances and Challenges of Autonomous Passenger Transport	Rose, M.; Tautz, S.-J.; Leyerer, M.; Breitner, M.H.	IWI Diskussionspapier #92, Institut für Wirtschaftsinformatik, Leibniz Universität Hannover	-	-	-	G
2019	Decision Support for Sustainable and Resilience-Oriented Urban Parcel Delivery	Leyerer, M.; Sonneberg, M.-O.; Heumann, M.; Breitner, M.H.	EURO Journal on Decision Processes (EJDP)	-	-	-	H
2020	Shortening the Last Mile of e-Grocery: Optimizing a New Logistics Concept for Urban Areas	Leyerer, M.; Sonneberg, M.-O.; Heumann, M.; Breitner, M.H.	Smart Cities	-	-	-	I
2020	Behavioral Intention to Use Ridepooling Services – Empirical Insights and Recommendations	Werth, O.; Sonneberg, M.-O.; Leyerer, M.; Breitner, M.H.	Transportation Research Part A: Policy and Practice [eingereicht, erste Gutachterrunde]	-	B	3,693	J

1. Einleitung

1.1. Motivation und Gegenstand

Das gesellschaftliche Zusammenleben der Menschen hat sich im Verlauf der vergangenen Jahrzehnte bedingt durch diverse Entwicklungen verändert. Einer der bedeutenden Trends mit vielfältigen Auswirkungen ist die zunehmende Urbanisierung. Als symbolischer Zeitpunkt wird diesbezüglich das Jahr 2010 angesehen, seitdem weltweit mehr Menschen in Städten als in ländlichen Gebieten leben (UN, 2014). Da dieser Trend auch in Zukunft anhalten wird, besteht laut Hochrechnungen die Erwartung, dass im Jahr 2030 über 60% der Weltbevölkerung in Städten leben werden (Taniguchi und Thompson, 2014). Neben diversen Chancen birgt diese Entwicklung jedoch auch zahlreiche Herausforderungen, da sich die menschlichen Bedürfnisse in einem räumlich begrenzten Gebiet konzentrieren. Durch die erhöhte Personenanzahl steigen vor allem der Mobilitätsbedarf und die Güternachfrage in Städten. Es resultieren verschiedene Probleme, wie etwa eine überlastete Verkehrsinfrastruktur, Luftschadstoff- und Lärm-Emissionen, welche die Lebensqualität der Bewohner, ihre Sicherheit und die Effizienz des Verkehrs innerhalb der urbanen Räume negativ beeinflussen (Van Audenhove et al., 2015).

Parallel zur Urbanisierung besteht der Trend der zunehmenden Konnektivität und Digitalisierung, ermöglicht durch entsprechende Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT). In diesem Zusammenhang beschreibt der Begriff des e-Commerce den Kauf und Verkauf von Leistungen, Konsum- und Sachgütern über das Internet (Metzger et al., 2018). Beispielsweise ist der Umsatz des deutschen Onlinehandels von 20,2 Mrd. Euro (2010) auf 53,3 Mrd. Euro (2015) gewachsen (HDE, 2019). Der Großteil der transportierten Güter wird über die Straßeninfrastruktur befördert. In Deutschland wurden im Jahr 2017 beispielsweise 78% der Güter über diesen Verkehrsweg transportiert (Statistisches Bundesamt, 2019). Durch diese Entwicklungen steigen die Gütertransporte zwischen Städten aber vor allem auch innerhalb der urbanen Straßenräume an.

Neben den Gütertransporten lassen sich weitere Verkehrsarten klassifizieren. Während einerseits zwischen dem Personen- und Güterverkehr unterschieden wird, lassen sich andererseits der Privat- und der Wirtschaftsverkehr voneinander trennen. Die Kombination dieser vier Kategorien ergibt verschiedene Subkategorien. Die Klassifizierung erfolgt hierbei durch die entsprechende Einordnung des Transportgegenstands (Person, Gut oder

Dienstleistung) und des Transporteurs (Privatperson oder Unternehmen). Der Wirtschaftsverkehr umfasst hierbei Personenwirtschaftsverkehre (z.B. Geschäftsreisen, Taxifahrten, Dienstfahrten), Dienstleistungsverkehre (z.B. Handwerkerfahrten) und Güterwirtschaftsverkehre (z.B. Paketauslieferung), welche im Rahmen geschäftlicher und betrieblicher Zwecke durchgeführt werden (Arndt, 2010). Abbildung 6 veranschaulicht die beschriebenen Zusammenhänge.

Personenverkehr		Güterverkehr		
Privater Personenverkehr	Wirtschaftsverkehr			Privater Güterverkehr
Berufs-, Einkaufs-, Freizeitverkehr	Personenwirtschaftsverkehr	Dienstleistungsverkehr	Güterwirtschaftsverkehr	Privater Umzugs-, Entsorgungsvverkehr

Abbildung 6. Klassifizierung der Verkehrsarten nach Arndt (2010)

In diesem Kontext muss auch der Begriff „urbane Logistik“ eingeordnet werden, welcher in der wissenschaftlichen Literatur nicht einheitlich verwendet wird. Die Europäische Kommission definiert „urbane Logistik“ als die Beförderung von Gütern, Ausrüstungen und Abfällen in, aus, von, innerhalb oder durch ein städtisches Gebiet (EUK, 2013). Demnach weist der Begriff die größten Gemeinsamkeiten mit dem o.g. Güterwirtschaftsverkehr auf, sodass diese auch in der vorliegenden Dissertation synonym verwendet werden. In einigen Publikationen wird der Begriff aber umfassender verstanden, sodass dort teilweise auch der Dienstleistungs- und Personenwirtschaftsverkehr eingeschlossen ist.

Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit fossiler Ressourcen und des fortschreitenden Klimawandels gewinnt das ökologisch nachhaltige Handeln an Bedeutung. Die dargestellten Verkehre verursachen durch die Nutzung diverser Transportmittel Luftschadstoff- und Lärm-Emissionen, sodass auch in diesem Bereich ein gewisser Handlungsbedarf hinsichtlich einer erhöhten Nachhaltigkeit besteht. Gleichwohl strebt die Politik die Realisierung umweltfreundlicher Verkehre an. Bezüglich des urbanen Güterwirtschaftsverkehrs bzw. der urbanen Logistik formuliert die Europäische Kommission (2011) mit dem *Weißbuch zum Verkehr* verschiedene Ziele. Um Stadtzentren langfristig CO₂-frei zu gestalten, sollen beispielsweise bis zum Jahr 2050 sämtliche konventionell betriebene Transportfahrzeuge in Städten der EU durch nachhaltige Fahrzeuge ersetzt werden. Ein Zwischenziel auf diesem Weg stellt die Halbierung der Nutzung von konventionell betriebenen Liefer-

fahrzeugen bis 2030 dar. Das übergeordnete Ziel stellt die Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 60% bis zum Jahr 2050 gegenüber 1990 dar (EUK, 2011). Stadtverwaltungen nutzen unterschiedliche Ansätze, um die verkehrsbedingten Emissionen in urbanen Räumen zu reduzieren. Unter anderem werden Fahrverbote für gewisse Fahrzeugtypen in einzelnen Straßen oder bestimmten Bereichen der Städte erlassen. So wurden bspw. Fahrverbote für ältere Dieselfahrzeuge (z.B. in Hamburg im Mai 2018) und für Fahrzeuge mit geraden bzw. ungeraden Nummernschildern erlassen (z.B. in Paris im Dezember 2016) oder gänzlich autofreie Innenstädte angekündigt (z.B. in Oslo) (Reuters, 2018; Libert, 2017; Kommune Oslo, 2019).

Somit steht der urbane Wirtschaftsverkehr und speziell die urbane Logistik vor der Herausforderung, die steigende Güternachfrage in Städten möglichst effizient zu bedienen und dabei vermehrt umweltfreundliche Transportmittel einzusetzen, um die ökologische Nachhaltigkeit im Transportsektor zu erhöhen. Dabei steht der auftretende Zielkonflikt zwischen einer Kostenminimierung auf der einen Seite und einer Vermeidung der negativen Effekte anfallender Transportvorgänge auf der anderen Seite im Zentrum der Untersuchungen. Die vorliegende kumulative Dissertation behandelt daher die Erforschung neuer Lösungsansätze für diesen sich zuspitzenden Zielkonflikt. Alternative Logistik-Konzepte stellen eine Option dar, um beide angesprochenen Ziele zu adressieren. Für einige dieser Ansätze wurden mathematische Optimierungsmodelle und Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS, engl. decision support system, DSS) entwickelt, um deren bestmögliche Gestaltung in urbanen Räumen zu ermöglichen. Die Modelle basieren auf Methoden des Operations Research (OR) und der Informationssystem-Forschung (IS). Das beschriebene Vorgehen ermöglicht die Identifikation entscheidungsrelevanter Parameter der jeweiligen Logistik-Konzepte. Auf der Grundlage diverser Szenarioanalysen werden entsprechende Handlungsempfehlungen für Einzelhändler, Transportdienstleister, Fahrzeughersteller und Stadtverwaltungen gegeben.

1.2. Forschungsmethodik

Die im Rahmen dieser Dissertation entstandenen Optimierungsmodelle und EUS wurden durch Anwendung der *Design Science Research* (DSR) Methodik entwickelt und können somit der gestaltungsorientierten Forschung zugeordnet werden. Während in der IS-Forschung grundsätzlich versucht wird Erkenntnisse über den Einsatz von Informationstechnologien (IT) für Verwaltungs- und Managementtätigkeiten zu gewinnen (Zmud, 1997),

fokussiert sich DSR auf das Lösen realer Probleme und die Erschaffung innovativer technologischer Artefakte zur Erweiterung der menschlichen Problemlösungs- und Organisationsfähigkeiten (Hevner et al., 2004). Somit stellen die entwickelten Modelle und EUS lösungsorientierte IS-Artefakte dar, welche auf dem Forschungsansatz von Hevner (2007) basieren. Das Framework besteht aus drei Zyklen, welche im Folgenden exemplarisch für alle im Rahmen dieser Dissertation dargestellten Artefakte erläutert werden.

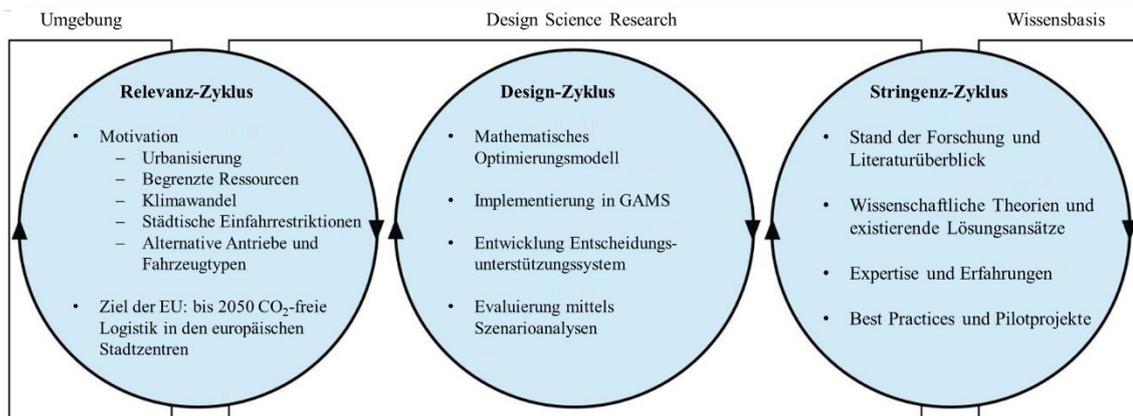


Abbildung 7. Zyklen des Design Science Research im Kontext der urbanen Logistik

Die entwickelten Modelle und EUS sind an einem Relevanz- und Stringenz-Zyklus ausgerichtet, um die Umgebung sowie die bestehende Wissensbasis beim jeweiligen Forschungsobjekt zu berücksichtigen (Hevner, 2007). Der Relevanz-Zyklus stellt den Bezug des Forschungsobjektes zu bedeutenden Entwicklungen sicher, welche vor allem die in Kapitel 1.1 beschriebenen Trends sind. Im Kontext der urbanen Logistik sind hier die Urbanisierung, die Digitalisierung, die zunehmende Bedeutung des ökologisch nachhaltigen Handelns und die politische Zielsetzung der EU zu nennen. Der Stringenz-Zyklus beinhaltet die Analyse der existierenden Wissensbasis auf dem entsprechenden Betrachtungsgebiet, sodass die Innovation der Artefakte gewährleistet ist (Hevner, 2007). Hierzu wurden bestehende Logistik-Konzepte und Optimierungsansätze im thematischen Kontext gesichtet und mittels systematischer Literaturrecherche entsprechende Forschungslücken identifiziert (siehe Abbildung 7).

Im zentralen Design-Zyklus wird das Forschungsobjekt schließlich entwickelt, evaluiert und erweitert, sodass durch den iterativen Prozess eine kontinuierliche Verbesserung der Artefakte erreicht wird (Hevner, 2007). Die Forschungsobjekte dieser Dissertation stellen die lösungsorientierten IS-Artefakte in Form von mathematischen Optimierungsmodellen

und EUS dar, welche einen entsprechenden Beitrag zur IS-Forschung liefern. Drei der entstandenen IS-Artefakte werden im Hauptteil der Dissertation ausführlich vorgestellt.

1.3. Aufbau der Dissertation

Die vorliegende kumulative Dissertation stellt einerseits die übergreifende Zusammenfassung der wichtigsten Publikationen dar, andererseits erfolgt auch die kritische Reflexion über die behandelten Themen, die genutzten Forschungsmethoden und die entwickelten Lösungsansätze. Im Folgenden wird die Struktur der Dissertation dargestellt, welche sich in fünf Hauptbestandteile gliedern lässt (siehe Abbildung 8). Der Abstract und die Management-Zusammenfassung beinhalten eine gebündelte Kurzdarstellung der Inhalte und Ergebnisse. Die Einleitung, die kritische Würdigung sowie das Fazit stellen den Rahmenteil der Dissertation dar und enthalten themenübergreifende Inhalte. Der Hauptteil besteht aus drei spezifischen Kapiteln, welche auf erfolgten Publikationen basieren und unterschiedliche Themenschwerpunkte des urbanen Wirtschaftsverkehrs behandeln.

Zunächst wird in Kapitel 2 der Bereich der urbanen Paketzustellung behandelt. Hierbei erfolgt die Untersuchung eines in mehreren Städten erprobten Logistik-Konzepts, bei dem Mikro-Depots in urbanen Räumen als lokale Umschlagpunkte eingesetzt werden. An diesen Orten erfolgt die kurzfristige Zwischenlagerung von Paketen und deren Verladung von großen Transportfahrzeugen (z.B. LKW) auf kleinere sowie ggf. alternative Transportmittel, z.B. elektrisch unterstützte Lastenfahrräder (engl. electric cargo cycles, ECC). Mit diesem Ansatz soll es gelingen die sog. letzte Meile zu den Paketempfängern zu bewältigen und gleichzeitig den Straßenverkehr sowie die damit verbundenen Emissionen in urbanen Räumen zu reduzieren. Um die Auswirkungen verschiedener Ausprägungen dieses Logistik-Konzepts anhand einer Szenarioanalyse erforschen zu können, wird ein mathematisches Optimierungsmodell samt EUS entwickelt und vorgestellt. Dies ermöglicht die automatisierte und computergestützte Ermittlung der optimalen Lösung für diverse Anwendungsfälle des beschriebenen Mikro-Depot Konzepts.

In Kapitel 3 erfolgt die Untersuchung eines neuen Logistik-Konzepts für die Zustellung von online bestellten Verbrauchsgütern, welches somit dem sog. e-Grocery zugeordnet werden kann. Hierbei dient ein Netzwerk aus unterschiedlich temperierten Paketstationen der Zwischenlagerung von Lebensmitteln und anderen Waren des täglichen Bedarfs. Diese können entweder vom Endkunden eigenständig abgeholt oder mittels ECC zum Kunden ausgeliefert werden. Für dieses Konzept erfolgt eine Szenarioanalyse anhand

verschiedener Parameterkonstellationen, welche auf einem entwickelten mathematischen Optimierungsmodell basieren, um kritische Faktoren des Ansatzes herauszuarbeiten.

In Kapitel 4 wird schließlich ein branchenübergreifendes EUS vorgestellt, welches durch seinen flexiblen Charakter die individualisierte Routenoptimierung für verschiedene Optimierungsprobleme ermöglicht. Hierbei kann der Nutzer des EUS unterschiedliche Problemklassen (Vehicle Routing Problem, Location Routing Problem etc.) auswählen, das gewünschte Zielkriterium (Gewinnmaximierung, Distanzminimierung etc.) bestimmen und die zu berücksichtigenden Nebenbedingungen (Kapazitätsrestriktionen, Flottenrestriktionen etc.) definieren. Um Lösungen in kurzer Zeit und hinreichender Qualität berechnen zu können, bildet ein heuristischer Ansatz die Grundlage für das EUS. Die Implementierung eines Prototyps erfolgt in Form einer Webapplikation und ermöglicht die Berechnung diverser Benchmarks zur Untersuchung der Anwendbarkeit des EUS. Der beschriebene Aufbau der Dissertation und die zugehörigen Publikationen der jeweiligen Kapitel im Hauptteil sind in Abbildung 8 zusammengefasst und visualisiert.

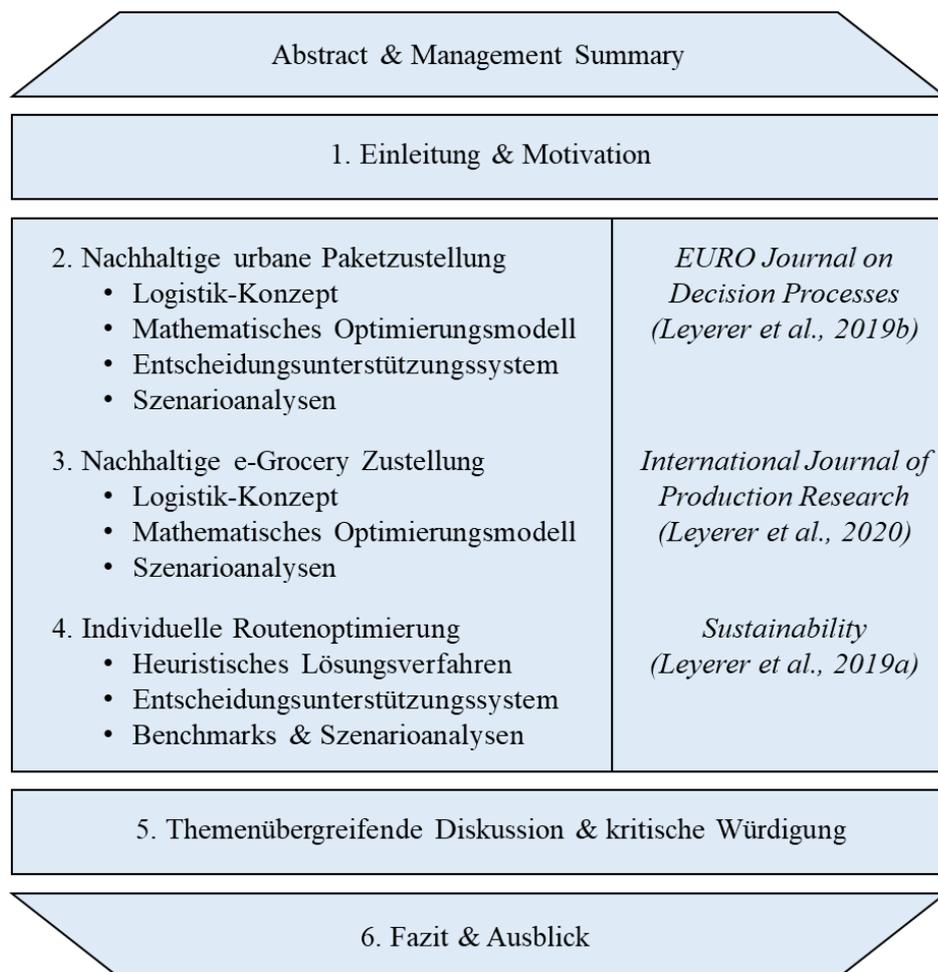


Abbildung 8. Struktur der Dissertation

2. Entscheidungsunterstützung zur Optimierung eines nachhaltigen Logistik-Konzepts in der urbanen Paketzustellung

Dieses Kapitel bezieht sich auf die Veröffentlichung „Decision support for sustainable and resilience-oriented urban parcel delivery“ (Leyerer et al., 2019b; Anhang H) und behandelt ein EUS zur Optimierung eines alternativen Logistik-Konzepts für die urbane Paketzustellung. In Bezug zu Abbildung 6 in Kapitel 1.1 kann das Thema dem Güterwirtschaftsverkehr zugeordnet werden. An dem Artikel haben Marc-Oliver Sonneberg, Maximilian Heumann und Prof. Dr. Michael H. Breitner vom Institut für Wirtschaftsinformatik (IWI) der Leibniz Universität Hannover (LUH) mitgewirkt. Die Veröffentlichung basiert auf einem peer-review Verfahren und erfolgte nach Abschluss von drei Revisionsrunden. Der Artikel erschien 2019 im *EURO Journal on Decision Processes* (EJDP), welches von der *Association of European Operational Research Societies* und dem *Springer* Verlag veröffentlicht wird. Da das Journal erst seit 2013 existiert, war es zum Zeitpunkt des JQ3 (Stand 2015) noch weitgehend unbekannt, sodass es zu wenig Votes für eine eindeutige Beurteilung erhalten hat. Im OR-Teilrating wurde das EJDP 17 Mal mit der folgenden Verteilung bewertet: „A+“ 5,9%; „A“ 35,3%; „B“ 17,6%; „C“ 29,4%; „D“ 11,8%.

2.1. Einleitung

Wie bereits in Kapitel 1.1 beschrieben, sind die steigende Urbanisierung in Verbindung mit dem zunehmenden e-Commerce elementare Treiber für eine erhöhte Transportmenge innerhalb der Städte (Taniguchi und Thompson, 2014; HDE, 2019). Da der Großteil der beförderten Güter per Straßenverkehr transportiert wird (Statistisches Bundesamt, 2019), steigt die damit verbundene Belastung für die Umwelt und die ansässige Bevölkerung. Im Bereich der urbanen Mobilität existieren bereits diverse Alternativen, um Personen zu befördern. Neben öffentlichen Verkehrsmitteln kamen in den vergangenen Jahren das Car- und Bike-Sharing sowie Ridepooling-Angebote als umweltfreundliche Alternativen zur Fortbewegung (in Städten) hinzu (Clewlow and Mishra, 2017). Auch in der wissenschaftlichen Literatur besteht eine Vielzahl von qualitativen und quantitativen Untersuchungen zu dem Thema der nachhaltigen Mobilität. Auf dem Gebiet nachhaltiger Gütertransporte existiert hingegen ein großer Forschungsbedarf, da neue Lösungsansätze nur bedingt vorhanden sind.

In der Kurier- Express- und Paket-Branche (KEP) ist die sog. letzte Meile, also der letzte Abschnitt zum Paketempfänger, der kostenintensivste Abschnitt der Lieferkette (Gevaers et al., 2009). Daher versuchen Transportunternehmen insbesondere diesen Teil ihres Geschäfts zu optimieren. Ebenso sind Stadtverwaltungen an einer Verbesserung der Paketzustellung auf der letzten Meile (engl. last mile delivery, LMD) interessiert, da sie eine zunehmende Quelle der Verkehrs- und Emissionsbelastung darstellt, insbesondere aufgrund der steigenden Anzahl von Paketen und Dienstleistern. Wie in Kapitel 1.1 erwähnt, hat die Europäische Kommission das Ziel formuliert, die Treibhausgasemissionen signifikant zu reduzieren. In Bezug auf die KEP-Verkehre besteht die Absicht, "eine im Wesentlichen CO₂-freie Stadtlogistik in größeren städtischen Zentren bis 2030" zu erreichen (EUK, 2011). Ein Ansatz zur Erreichung dieser Ziele ist die Einführung von Emissionshöchstgrenzen oder Niedrigemissionszonen (engl. low emission zone). Bei Überschreitung der entsprechenden Grenzwerte in gewissen Bereichen der Städte können die Stadtverwaltungen den Einsatz bestimmter Fahrzeugtypen untersagen. Derartige regulative Maßnahmen setzen KEP-Dienstleister und andere Teilnehmer des Wirtschaftsverkehrs dem Risiko aus, dass sie ihre Kunden in den betroffenen Gebieten nicht mehr erreichen können, wenn ihre Fahrzeugflotten betroffen sind. Diese Herausforderungen zeigen den Bedarf an neuen Logistik-Konzepten und alternativen Lieferfahrzeugen auf.

Ein Ansatz für die nachhaltige Gestaltung der LMD ist die Zustellung mit sog. Mikro-Depots an taktischen Standorten innerhalb einer Stadt. Dort können die auszuliefernden Pakete zwischengelagert und von großen auf kleine Transportfahrzeuge umgeschlagen werden. Hinsichtlich der Entscheidungsunterstützung besteht hierbei eine Forschungslücke, da dieses Logistik-Konzept in der wissenschaftlichen Literatur bislang kaum adressiert wird. Das im Folgenden vorgestellte EUS ermöglicht eine optimale Planung des beschriebenen Ansatzes. Das zugrundeliegende mathematische Modell minimiert die Gesamtkosten, optimiert die Hub-Standorte und die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte, schätzt die Fahrstrecken ab und ermöglicht die Festlegung einer einstellbaren CO₂-Emissionsobergrenze. Das EUS ermöglicht die Berechnung und den Vergleich relevanter Entscheidungsvariablen verschiedener Szenarien. Dadurch können KEP- und andere Transportdienstleister unterschiedliche Emissionsgrenzwerte monetär bewerten. Das EUS unterstützt auch Stadtverwaltungen dabei, die Auswirkungen verschiedener Grenzwerte zu verstehen und Anreize zu schaffen, die den Einsatz von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen fördern. Um das entwickelte Modell zu bewerten und die Anwendbarkeit des EUS

zu demonstrieren, werden Benchmarks für eine mittelgroße deutsche Stadt präsentiert. Die behandelten Inhalte sind von der folgenden Forschungsfrage (FF) geleitet:

FF: Wie können Entscheidungsträger bei der Gestaltung eines Mikro-Depot-Netzwerks für die Paketzustellung unterstützt und die Quantifizierung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen ermöglicht werden?

2.2. Theoretische Grundlagen und Literaturüberblick

Der Begriff „Urbane Logistik“ ist im internationalen Kontext unter der Bezeichnung *city logistics* etabliert, welchen Taniguchi et al. (2001) folgendermaßen definieren: "the process for totally optimising the logistics and transport activities by private companies in urban areas considering the traffic environment, the traffic congestion and the energy savings within the framework of a market economy" (Taniguchi et al., 2001). Wie bereits erwähnt, führen die zunehmende Urbanisierung und der steigende e-Commerce zu einem erhöhten Paketaufkommen und den damit verbundenen Transportaktivitäten in den Städten. Zusätzlich streben die Politik und die Stadtverwaltungen umweltfreundliche Logistiklösungen an. Da diese in der Regel eine Minimierung der lokalen Emissionen beabsichtigen, steht der Verkehrssektor vor großen Herausforderungen, insbesondere wenn entsprechende Gesetze erlassen werden. Der Bedarf nach einer entsprechenden Optimierung gewinnt somit an Relevanz und diese wird durch die Dimension der ökologischen Nachhaltigkeit zunehmend komplexer.

Insbesondere die städtische Paketzustellung steht im Fokus, da die letzte Meile den teuersten Abschnitt der Transportkette darstellt (Gevaers et al., 2009), sodass der Zielkonflikt zwischen einer Kosten- und einer Emissionsminimierung hier besonders kritisch ist. Verschiedene Strategien und Konzepte zielen darauf ab, die urbane Logistik und speziell die LMD hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit zu verbessern. Um dies zu erreichen werden lokal emissionsfreie Transportfahrzeuge (z.B. Elektroautos, ECC, Drohnen) eingesetzt und neue Elemente in die Logistik-Konzepte von KEP-Dienstleistern integriert. Unter anderem können Mikro-Depots (im Folgenden Hubs genannt) innerhalb der Stadtzentren und Wohngebiete errichtet werden, um die letzte Meile zum Endkunden zu verkürzen und einen Einsatz von ECC zu ermöglichen. Intelligente Verkehrssysteme können ebenfalls dazu beitragen die Effizienz der LMD zu steigern (Taniguchi, 2014).

In der wissenschaftlichen Literatur existiert eine Vielzahl von Ansätzen, die sich auf einen nachhaltigen städtischen Güterverkehr fokussieren und speziell die LMD adressieren. Mehrere Artikel untersuchen die Gestaltung und Implementierung intelligenter Verkehrssysteme, infrastrukturbezogener Elemente (z.B. Verkehrsbeschränkungen, Be- und Entladeflächen) sowie Stakeholder-übergreifender Logistikprojekte (Figliozzi und Tipagornwong, 2017; McLoed et al., 2019; Taniguchi, 2014). Darüber hinaus befassen sich mehrere Artikel mit den Kosten, den Auswirkungen und den best practices neuer Logistik-Konzepte, wie z.B. White-Label-Logistik und Nachtbelieferungen (Castrellón-Torres et al., 2018; Fossheim und Anderson, 2017; He und Haasis, 2019). Alternative Lieferkonzepte und der Einsatz innovativer Fahrzeuge sind auch Gegenstand der Akzeptanzforschung, die vorwiegend anhand von Umfragen und Interviews (z.B. mit KEP-Dienstleistern und Endverbraucher) durchgeführt wird (de Oliveira et al., 2017; Ehrler und Hebes, 2012; Wang et al., 2018a).

Ein weiteres relevantes Thema in diesem Zusammenhang ist die Forschung zu Externalitäten bzw. externen Effekten. Externalitäten sind dadurch gekennzeichnet, dass diese keine Auswirkungen für den Verursacher haben, da zwischen ihm und den Betroffenen keine über den Preis- bzw. Marktmechanismus vermittelte Beziehung besteht (Feess, 2019). Im Kontext der urbanen Paketzustellung können hier etwa Emissionen, Staus, Unfälle, Flächenverbräuche, Ölabhängigkeit und andere Komponenten angeführt werden (Korzhenevych et al., 2014). In diesem Zusammenhang untersuchen Arnold et al. (2018) die Kostenverteilung der Nutzung von Hubs in Kombination mit ECC. Tob-Ogu et al. (2018), Ranieri et al. (2018) und Digiesi et al. (2017) präsentieren Literaturübersichten zu Lösungsansätzen zur Reduzierung von Externalitäten im Straßengüterverkehr. Alle drei Artikel identifizieren neue Technologien und Strategien, um die Effizienz der Zustellungen zu steigern und dabei gleichzeitig die Externalitäten zu reduzieren. Die effektivsten Methoden zur Reduzierung von Externalitäten bei der LMD sind Umschlagspunkte, eine anbieterübergreifende Zustellung, (autonome) Elektrofahrzeuge sowie der Einsatz von IKT.

Um den aktuellen Stand der Forschung auf dem Gebiet der LMD zu ermitteln, wird eine umfassende Literaturrecherche nach der Methodik von Webster und Watson (2002) durchgeführt. Da die Optimierung der Paketzustellung auf der letzten Meile im Fokus des Kapitels steht, werden ausschließlich Publikationen, die relevante Ansätze in diesem Be-

reich beinhalten, berücksichtigt (siehe Tabelle 4). Grundsätzlich lassen sich Optimierungsmodelle in drei Planungsebenen unterteilen, welche entweder strategische (langfristig), taktische (mittelfristig) oder operative (kurzfristig) Entscheidungen umfassen (Schmidt und Wilhelm, 2000).

Strategische Entscheidungen werden auf lange Sicht getroffen und umfassen typischerweise die Planung der Hauptkomponenten eines Transportsystems. So muss ein Unternehmen beispielsweise über die Anzahl, die Standorte und die Größe der zu betreibenden Anlagen oder über die einzusetzenden Technologien entscheiden (Lahyani et al., 2015; Schmidt und Wilhelm, 2000). Um aus einer Reihe von potenziellen Positionen den bzw. die optimalen Standorte zu ermitteln, werden Standortprobleme in unterschiedlichen Formen entworfen, damit die besten Positionen von Industrieanlagen, Büros, Krankenhäuser und anderen Gebäuden bestimmt werden können (Klose und Drexl, 2005). Bezüglich der LMD ist die Auswahl der optimalen Lager- und Depotstandorte relevant. Positionsalternativen können nach verschiedenen Kriterien bewertet und mit verschiedenen Ansätzen ausgewählt werden. Bei der Planung effizienter Transportnetzwerke mit optimalen Lagerstandorten liegt der Fokus typischerweise auf der Kostenminimierung, während eine gegebene Nachfrage befriedigt werden muss. Einen Überblick über bestehende Ansätze zur strategischen Entscheidungsunterstützung liefern z.B. Barceló et al. (2018) und Guarstaroba et al. (2016). Entsprechende Ansätze können Lager- und Transportkosten beinhalten, aber auch CO₂-Emissionen bei der Standortwahl berücksichtigen oder mehrere Ziele hierarchisch erfüllen (Li et al., 2008). Die Betrachtung von Umweltaspekten bei Transportproblemen wird häufig als „Green Supply Chain Management“ bezeichnet. In diesem Zusammenhang präsentierten Wang et al. (2011) eine multikriterielle Optimierung zum Aufbau eines globalen Lieferketten-Netzwerks, welche die Transport-, Umschlags- und Investitionskosten minimiert und gleichzeitig die CO₂-Emissionen begrenzt. Andere Beiträge untersuchen die Einführung von Emissionshöchstgrenzen, um deren Effekt auf die Gesamtkosten zu analysieren. Die Ergebnisse zeigen in der Regel, dass eine Senkung des Emissionsgrenzwertes zu steigenden Kosten für Lagerung, Anlagen und Transporten führt (Diabat und Simchi-Levi, 2009). Auch andere Autoren bestätigen den trade-off zwischen einer Emissionsreduktion und steigenden Logistikkosten (Ramudhin et al., 2008). Crainic et al. (2004) stellen organisatorische und technologische Rahmenbedingungen für ein umfassendes Management des städtischen Güterverkehrs vor und

zeigen ebenfalls, dass die Logistikkosten ansteigen, wenn eine erhöhte ökologische Nachhaltigkeit angestrebt wird. Hinsichtlich der städtischen Infrastruktur befassen sich nur wenige Optimierungsmodelle mit der langfristigen Standortoptimierung. Ein mögliches Konzept ist der multikriterielle Ansatz für die Standortplanung sog. Urban Distribution Center (UDC). Diese Methode kann die Identifizierung potenzieller Standorte, die Auswahl von Bewertungskriterien oder die quantitative Bewertung von Standorten zur Auswahl der optimalen UDC-Position umfassen (Awasthi et al., 2011; Bouhana et al., 2013). Rao et al. (2015) präsentieren ein Bewertungssystem, welches ökonomische, ökologische und soziale Kriterien für die Standortwahl von urbanen Logistikzentren berücksichtigt. Der Einsatz alternativer Transportmittel in nachhaltigen Logistik-Konzepten wird in der aktuellen Forschung in diesem Bereich jedoch weitgehend vernachlässigt.

Taktische Entscheidungen umfassen die mittelfristige Planung der physischen und funktionalen Komponenten eines Transportsystems, wie etwa die Größe und Zusammensetzung der Fahrzeugflotte (Bielli et al., 2011) sowie des Personals (Drexl, 2012). Unternehmen wägen in der Regel zwischen der Auslagerung von Transportaktivitäten und dem Betrieb eines eigenen Fuhrparks ab (Stenger et al., 2013). In vielen Fällen bestehen enge Zusammenhänge zwischen den Entscheidungen über die Transportprozesse und den restlichen Aspekten der Wertschöpfungskette eines Unternehmens. Die Missachtung dieser Abhängigkeiten kann zu großen Ineffizienzen führen (Schmidt und Wilhelm, 2000). In der Forschung existieren daher verschiedene Ansätze, um den Materialfluss, die Produktionsniveaus der Anlagen oder die Lagerbestände in Logistikmodellen zu integrieren (Díaz-Madroño et al., 2015; Schmid et al., 2013). Beispielsweise stellen Cepolina und Farina (2015) ein städtisches Güterverteilsystem vor, um externe Effekte wie Schadstoff-Emissionen zu reduzieren. Das Modell bestimmt die optimale Anzahl und die Standorte von mobilen Paketstationen, welche in Form von speziellen Elektrofahrzeugen bestehen. Zu dem Thema des taktischen Managements von Fahrzeugflotten liefern Baykasoğlu et al. (2018) und de Oliveira et al. (2017) ausführliche Überblicke.

Die operative Planungsebene umfasst die kurzfristigen und täglichen Entscheidungen im Zusammenhang mit der Beförderung von Waren oder Dienstleistungen unter Verwendung der auf strategischer und taktischer Ebene konzipierten Transportsysteme (Schmidt und Wilhelm, 2000). Ein Entscheidungsträger muss in dieser Phase typischerweise Routen- und Dispositionspläne für Fahrer erstellen und bestimmen, welche Fahrzeuge aus einer verfügbaren Flotte eingesetzt werden (Lahyani et al., 2015). Diese Komponenten

sind Teil des weit verbreiteten Vehicle Routing Problems (VRP), das erstmals von Dantzig und Ramser (1959) entwickelt wurde. Hierbei wird die Gesamtfahrleistung eines Fahrzeugs minimiert und die optimale Reihenfolge der anzufahrenden Kunden bestimmt. Inzwischen existiert eine große Anzahl an VRP-Varianten, welche diverse Zielfunktionen und Nebenbedingungen abbilden. Die meisten der entwickelten Modelle konzentrieren sich auf eine Kostenminimierung unter gewissen Randbedingungen, aber einige priorisieren auch ökologische Ziele. Figliozzi (2010) stellt ein VRP-Variante vor, bei dem sog. Emissionskosten proportional zur Menge der Treibhausgasemissionen der Fahrzeuge modelliert und dadurch in die Zielfunktion integriert werden. Andere Autoren konzentrieren sich auf die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs als eigenständiges Ziel (Yao et al., 2015). Murray und Chu (2015) präsentieren einen VRP-Ansatz für den optimalen Einsatz von konventionellen Lieferfahrzeugen in Kombination mit Drohnen. Im Wesentlichen wird das VRP verwendet und angepasst, um verschiedene Aspekte zu minimieren, wie z.B. die Gesamtkosten, die Gesamtfahrzeit, die Gesamtfahrstrecke, die Gesamtemissionen oder den Gesamtkraftstoffverbrauch. Es existieren auch multikriterielle Optimierungsmodelle, welche sowohl ökonomische als auch ökologische Elemente beinhalten (Demir et al., 2014; Jabir et al., 2015). Überblicke zu VRP-Ansätzen werden beispielsweise von Barceló et al. (2018) und Catturazza et al. (2017) dargestellt. In dieser Dissertation wird die Thematik des VRP detailliert in Kapitel 4 behandelt.

Darüber hinaus lassen sich die drei beschriebenen Entscheidungsebenen auch kombinieren. Die gleichzeitige Planung von Standort- und Routenaspekten (engl. location routing problem, LRP) eines Transportsystems ist hierbei ein relevantes Forschungsfeld (Prodhon und Prins, 2014). Albareda-Sambola et al. (2007) stellen einen heuristischen Lösungsansatz für ihr stochastisches, zweistufiges Optimierungsmodell zur Lösung eines LRP vor. Ein relevantes Unterscheidungsmerkmal beim LRP ist, ob der Standort eines einzelnen Depots oder mehrere Umschlagpunkte geplant werden. Da die Problemformulierung und Lösung von LRP komplex ist, ist ggf. eine Aufteilung in Teilprobleme erforderlich, um Ergebnisse für größere Datensätze zu erzielen (Wu et al., 2002). Darüber hinaus lassen sich Modelle hinsichtlich des eingesetzten Fuhrparks kategorisieren. Neben der Betrachtung eines einzelnen Fahrzeugtyps (homogene Flotten), modellieren einige Autoren heterogene Flotten, um verschiedene Transportmittel und deren Eigenschaften zu nutzen (Chan et al., 2001). Angesichts der beschriebenen politischen Situation und den damit verbundenen Klimaschutzziele zur Reduzierung der CO₂-Emissionen verfolgen

einige Ansätze die Reduzierung von Externalitäten bei der urbanen Paketzustellung. Externe Effekte können hierbei z.B. durch die Integration der durch die eingesetzten Transportfahrzeuge induzierten Luftschadstoff- und Lärm-Emissionen sowie Staus modelliert werden. Basierend auf diversen Faktoren (z.B. CO₂-Emissionen/Kilometer) umfassen verschiedene Artikel die Standort- und Routenplanung sowie die optimale Zusammensetzung der Fahrzeugflotten einschließlich alternativer Verkehrsmittel wie etwa ECC (Simoni et al., 2018; Winkenbach et al., 2016; Zhao et al., 2018). Koç et al. (2016) analysieren die Auswirkungen der kombinierten Planung von Depotstandort, Flottenzusammensetzung und Fahrzeugrouten auf die resultierenden Emissionen und empfehlen Distributionszentren außerhalb der Innenstadt. Moutaoukil et al. (2015) minimieren die Externalitäten von Transportaktivitäten und empfehlen die Errichtung von UDC sowie die Ausweitung der Lieferzeitfenster. Tricoire und Parragh (2017) führen ein sog. „Green City Hub“ Konzept ein, um den Zusammenhang zwischen den strategischen Investitionen in Logistikanlagen und den täglichen Transportemissionen in der Stadt zu untersuchen. Ohne Berücksichtigung variabler Fahrzeug- und Personalkosten empfehlen die Autoren, Logistikanlagen an zentraleren Orten zu platzieren. In derartigen Fällen kann die Standortentscheidung als taktisch, also mittelfristig angesehen werden. In der Praxis hat *DHL* ein ähnliches Konzept umgesetzt, bei dem Transportcontainer als mobile Hubs fungieren, welche häufig innerhalb der Stadtgebiete platziert und verlagert werden (DHL, 2017). Trotz der umfassenden Modelle, welche Externalitäten, Umweltfaktoren und Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigen, bieten die genannten Artikel kein praktikables EUS, sodass eine entsprechende Unterstützung für KEP-Dienstleister und Stadtverwaltungen fehlt.

Hinsichtlich der Forschung zu EUS im Bereich der LMD existieren zwar Ansätze für die einzelnen Phasen der Planung (strategisch, taktisch, operativ), jedoch fehlt ein EUS zur ganzheitlichen Betrachtung einer nachhaltigen Flottenplanung. Basierend auf der Annahme eines wirtschaftlich handelnden Entscheidungsträgers beinhalten die meisten Artikel ausschließlich direkte Kostenparameter. EUS-Ansätze konzentrieren sich in der Regel auf VRP- und LRP-Anwendungen, wobei die Aspekte der Nachhaltigkeit bzw. der Emissionsreduzierung häufig vernachlässigt werden (Gayialis und Tatsiopoulos, 2004; Li et al., 2007; Lin et al., 2014; Ruiz et al., 2004; Santos et al., 2011). Einen umfassenden Ansatz stellen Pamučar et al. (2016) dar, welche ein EUS zur Optimierung umweltfreundlicher Touren in Kombination mit städtischen Logistikzentren präsentieren und dabei Externalitäten berücksichtigen.

Tabelle 4. Literaturüberblick der Optimierungsansätze im Bereich der LMD

Autor(en)	Jahr	Fokus auf:							Inhalt
		Optimierung der Depotstandorte	Optimierung der Fahrzeugflotte	Optimierung der Fahrzeugrouten	Alternative Transportmittel	Nachhaltigkeit	Externalitäten	EUS	
Albareda-Sambola et al.	2007	o	o						Zweistufige Heuristik für stochastisches LRP
Awasthi et al.	2011	o				o	o		Multikriterieller Entscheidungsansatz zur Standortplanung von UDC
Bouhana et al.	2013	o				o	o		Multikriterieller Entscheidungsansatz zur Standortplanung von UDC
Boccia et al.	2018	o	o	o					LRP zur Optimierung von städtischen Güterverteilzentren
Cepolina and Farina	2015				o	o	o		Optimierung eines alternativen städtischen Güterverteilsystems unter Einsatz spezieller Elektrofahrzeuge als mobile Paketstation
Chan et al.	2001	o	o	o					Multi-Depot Multi-Fahrzeug LRP
Ćirović et al.	2014			o	o	o	o	o	"Green logistics VRP" für leichte Lieferfahrzeuge in Städten
Crainic et al.	2004	o				o	o		Organisatorische und technologische Rahmenbedingungen für ein umfassendes Management des städtischen Güterverkehrs
Demir et al.	2014			o		o	o		VRP zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs und der Fahrzeit
Diabat and Simchi-Levi	2009	o				o	o		Optimierungsmodell zur Gestaltung der Lieferkette und Berücksichtigung einer CO ₂ -Emissionsobergrenze
Figliozzi	2010			o		o	o		VRP zur Minimierung der Emissionen als primäres Ziel
Gayialis and Tsiopoulos	2004			o				o	Gestaltung eines EUS zur Routen- und Dispositionsoptimierung
Gianessi et al.	2015	o				o			LRP für mehrere Güterarten der urbanen Logistik
Jabir et al.	2015			o		o	o		Simultane Optimierung der Kosten und Emissionen in einem Modell
Koç et al.	2016	o	o	o		o	o		Untersuchung der Auswirkungen der kombinierten Planung von Depotstandort, Flottenzusammensetzung und Fahrzeugrouten
Li et al.	2007			o				o	EUS für eine dynamische Neuplanung von Fahrzeugrouten
Li et al.	2008	o				o	o		Standortoptimierung nach Transportkosten und Emissionen
Lin et al.	2014			o				o	Dynamische Optimierung der Touren von Kourieren
Moutaoukil et al.	2015			o		o	o		Optimierung der städtischen Lieferrouten zur Reduzierung der Emissionen
Murray and Chu	2015			o	o				VRP zur Optimierung der LMD mit Drohnenunterstützung
Nataraj et al.	2019	o		o		o	o		LRP zur Optimierung des Betriebs von UDC
Pamućar et al.	2016	o		o	o	o	o	o	Optimierung umweltfreundlicher Routen für innerstädtische Logistikzentren
Quintero-Araujo et al.	2019	o		o		o	o		Analyse verschiedener Kooperationskonstellationen anhand eines LRP
Ramudhin et al.	2008	o				o	o		Optimierungsmodell zur Gestaltung einer umweltfreundlichen Lieferkette
Rao et al.	2015	o				o	o		Bewertungssystem zur Standortauswahl von städtischen Güterzentren
Ruiz et al.	2004			o				o	EUS für ein zweistufiges VRP und Darstellung eines Anwendungsfalls
Santos et al.	2011			o				o	Entwicklung eines webbasierten EUS zur Lösung eines VRP
Schiffer and Walther	2017	o		o	o	o			LRP zur Optimierung von innerbetrieblichen Touren und Standorten, während die Aufladung von Elektrofahrzeugen berücksichtigt wird
Schiffer and Walther	2018	o		o	o	o			Strategische Planung von Lieferflotten mit Elektrofahrzeugen
Schneider and Löffler	2017	o		o					LRP unter Berücksichtigung begrenzter Kapazitäten
Simoni et al.	2018	o	o	o	o	o	o		VRP zur Optimierung des Einsatzes einer heterogenen Fahrzeugflotte unter Berücksichtigung mehrerer Depots
Tricoire and Parragh	2017	o		o		o	o		LRP zur Analyse des trade-offs zwischen den strategischen Investments in Anlagen und den operativen Logistiktätigkeiten
Wang et al.	2011	o				o		o	Optimierung einer umweltfreundlichen Lieferkette unter Berücksichtigung verschiedener Ziele
Wang et al.	2018b	o		o	o	o			LRP mit den Zielen der Minimierung der Kosten und der Maximierung der Kundenzufriedenheit
Winkenbach et al.	2015	o	o	o	o	o	o		Mehrstufiges LRP für Dienstleistungen in der urbanen Logistik
Wu et al.	2002	o	o	o					Heuristischer Ansatz zur Lösung des LRP mit mehreren Depots
Yang and Zeng	2018	o		o					Zweistufiges LRP mit Zeitfenstern im Kontext der urbanen Logistik
Yao et al.	2015			o		o	o		VRP zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs
Zhao et al.	2018	o	o	o	o	o	o		Optimierungsmodell zur Bestimmung des kostenminimalen Liefernetzwerks in Städten sowie der optimalen Flottenzusammensetzung
Zhou et al.	2016	o		o					LRP zur simultanen Optimierung von Hauszustellungen und Selbstabholungen durch Kunden

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass diverse Modelle und Ansätze existieren, um die urbane Logistik hinsichtlich Standort-, Flotten- und Routenplanung zu optimieren (siehe Tabelle 4), diese aber in der Regel nicht auf die Entscheidungsunterstützung für eine ganzheitliche Kombination der einzelnen Elemente ausgerichtet sind. Die umfangreichsten Ansätze befassen sich zwar mit der Optimierung von Logistik-Standorten und Fahrzeugrouten sowie der Flottenzusammensetzung unter Berücksichtigung von Emissionsreduzierungen und Externalitäten, bieten jedoch kein EUS. Trotz der großen Anzahl relevanter Studien in den einzelnen Kategorien gibt es bislang keine Lösung für einen ganzheitlichen Paketzustellansatz. Die kombinierte Optimierung von Hub-Standorten, der zugehörigen Fahrzeugflotte und den erforderlichen Kurieren bei gleichzeitiger Reduzierung der verkehrsbezogenen Externalitäten in einem EUS fehlt. Diese unzureichende Unterstützung der Entscheidungsträger und der Bedarf an umweltfreundlichen LMD-Konzepten in den Städten stellen somit eine relevante Forschungslücke dar. Diese wird durch die Entwicklung des im Folgenden vorgestellten mathematischen Modells und des dazugehörigen EUS für die taktische Planungsebene adressiert.

2.3. Mathematisches Optimierungsmodell

In diesem Kapitel erfolgt die Vorstellung eines alternativen Logistik-Konzepts für die urbane LMD und dessen Optimierung anhand eines mathematischen Modells. Hierbei werden die optimalen Standorte von Mikro-Depots innerhalb der Stadt sowie die entsprechende Fahrzeugflotte ermittelt. Mit diesem Konzept können Pakete innerhalb der Zustellgebiete zwischengelagert und die letzte Meile zum Paketempfänger reduziert werden. Dies ermöglicht auch den Einsatz von ECC, welche ohne Hubs nicht produktiv sein könnten. Unter Berücksichtigung verschiedener Kapazitätsrestriktionen und der Festlegung einer einstellbaren CO₂-Emissionsobergrenze stellt die Gesamtkostenminimierung das primäre Ziel des Modells dar. Einige Ideen und Ansätze der in Kapitel 2.2 genannten Artikel werden in dem Modell aufgegriffen und kombiniert. Das beschriebene Logistik-Konzept ist für die LMD konzipiert und wird derzeit in unterschiedlichen Pilotprojekten getestet, z.B. von *UPS* in Frankfurt und Hamburg (UPS, 2017). Das entwickelte Modell und das darauf aufbauende EUS können die optimale Planung und Realisierung des Konzepts unterstützen. Vor allem KEP-Dienstleister und Stadtplaner sind adressiert, welche den Optimierungsansatz berücksichtigen sollten, um sowohl die Effizienz als auch die Umweltverträglichkeit der LMD zu maximieren.

2.3.1. *Annahmen*

Das entwickelte gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsproblem (engl., mixed integer linear problem, MILP) umfasst die taktische Planung des oben beschriebenen Logistik-Konzepts und minimiert die monatlichen Betriebskosten der urbanen LMD für einen oder mehrere KEP-Dienstleister. Zu diesem Zweck werden die Standorte von zu errichtenden Hubs, die Fahrzeugflotte und das entsprechende Personal optimiert. Die folgenden Annahmen bilden die Grundlage des mathematischen Modells:

- Die Nachfrage ist als Paketanzahl pro Tag gegeben, die bestimmten Orten innerhalb der Stadt zugeordnet ist, welche durch geographische Koordinaten definiert sind. Diese Nachfrage muss vollständig bedient und alle Pakete erfolgreich zugestellt werden; die Möglichkeit von unzustellbaren Paketen existiert nicht. Das Gewicht der Pakete wird nicht berücksichtigt, da das Paketvolumen in der Regel der kritische Faktor bei der LMD ist. Die Paketanzahl je Nachfrage-Standort wird mit dem durchschnittlichen Paketvolumen multipliziert.
- Potenzielle Hub-Standorte sind gegeben und über geografische Koordinaten definiert. An den Standorten ist Raum für die Zwischenlagerung der Pakete und das Abstellen der zugeordneten Fahrzeuge. Für die Zwischenlagerung werden standardisierte 20-Fuß-Container verwendet, welche jeden Morgen mit den auszuliefernden Paketen beladen sind. Die Container weisen identische monatliche Mietkosten auf. Die monatlichen Flächenkosten können über die potenziellen Hub-Standorte variieren.
- Jeder errichtete Hub-Standort ist mit mindestens einem Transportfahrzeug ausgestattet. Die eingesetzten Fahrzeuge unterscheiden sich hinsichtlich Kosten, Antriebsart, Emissionen, Reichweite und Transportvolumen. Diese Eigenschaften bestimmen die maximale Anzahl der transportierten Pakete pro Tour sowie die maximale tägliche städtische Lieferreichweite pro Fahrzeugtyp. An jedem Hub-Standort sind Ladepunkte für Elektrofahrzeuge vorhanden, um ein Aufladen über Nacht zu ermöglichen.
- Die fixen monatlichen Fahrzeugkosten umfassen die Aufwendungen für Miete, Wartung, Ersatzteile und Versicherungen. Die variablen Fahrzeugkosten beinhalten die

Aufwendungen für den verbrauchten Kraftstoff. Externe Kosten können für die fahrzeugbezogenen Luftschadstoff- und Lärm-Emissionen, Staus etc. anfallen. Durch die eingesetzten Kurierere entstehen Personalkosten.

- Die variable Fahrzeugkosten basieren auf den zurückgelegten Fahrstrecken, welche auf der Grundlage von euklidischen Distanzen geschätzt werden.
- Durch eine entsprechende Obergrenze lassen sich die durchschnittlichen lokalen CO₂-Emissionen der Fahrzeugflotte begrenzen.

2.3.2. Nomenklatur

In Tabelle 5 sind die zugrundeliegenden Mengen, Parameter und Entscheidungsvariablen des entwickelten MILP definiert.

Tabelle 5. Definition und Einheiten der verwendeten Mengen, Parameter und Variablen

Mengen:	<i>j</i> (1, ..., <i>J</i>) Potentieller Hub – Standort
<i>i</i> (1, ..., <i>I</i>) Fahrzeugtyp	<i>k</i> (1, ..., <i>K</i>) Nachfrage – Standort
Parameter:	
<i>a</i> verfügbarer Platz je Hub – Standort [m ²]	<i>o</i> Anzahl der Arbeitstage [# / month]
<i>b_i</i> Paketzustellrate von Fahrzeugtyp <i>i</i> [# / h]	<i>p_j</i> verfügbarer Parkraum am Standort <i>j</i> [m ²]
<i>c</i> monatliche Kosten eines Containers [€ / #]	<i>Q</i> minimale Distanz je Fahrzeug [km]
<i>d_k</i> Paketnachfrage an Standort <i>k</i> [# / Tag]	<i>r_i</i> Reichweite von Fahrzeugtyp <i>i</i> [km / Tag]
<i>e_i</i> lokale CO ₂ – Emissionen von Fahrzeugtyp <i>i</i> [gCO ₂ / km]	<i>s</i> Kapazität eines Containers [m ³]
<i>E</i> maximal zulässige CO ₂ – Emissionen der Fahrzeugflotte [gCO ₂ / km]	<i>T</i> maximale Arbeitsstunden [h / Tag]
<i>F_i</i> maximale Anzahl von Fahrzeugtyp <i>i</i> je Hub – Standort [#]	<i>u_{j,k}</i> Distanz zwischen Hub – Standort <i>j</i> und Nachfrage – Standort <i>k</i> [km]
<i>g_i</i> erforderlicher Parkraum von Fahrzeugtyp <i>i</i> [m ²]	<i>U</i> maximale Distanz zw. Hub – Standort <i>j</i> und Nachfrage – Standort <i>k</i> [km]
<i>h_j</i> monatliche Flächenkosten an Hub – Standort <i>j</i> [€ / m ²]	<i>v_i^{ext}</i> externe Kosten von Fahrzeugtyp <i>i</i> [€ / #]
<i>l_i</i> Ladefaktor von Fahrzeugtyp <i>i</i>	<i>v_i^{fix}</i> monatliche Fixkosten von Fahrzeugtyp <i>i</i> [€ / #]
<i>m_i</i> Transportkapazität von Fahrzeugtyp <i>i</i> [m ³ / Tag]	<i>v_i^{ope}</i> Betriebskosten von Fahrzeugtyp <i>i</i> [€ / km]
<i>n̄</i> durchschnittliches Paketvolumen [m ³]	<i>w</i> Stundenlohn der Kurierere [€ / h]
Variablen:	
<i>f_{ij}</i> Anzahl der Fahrzeuge von Typ <i>i</i> an Standort <i>j</i> [#]	<i>t</i> gesamte Auslieferzeit [h / Tag]
<i>q_i</i> zurückgelegte Distanz von Fahrzeugtyp <i>i</i> [km / Tag]	<i>y_{ij,k}</i> 1, falls Standort <i>k</i> von Fahrzeugtyp <i>i</i> vom Hubstandort <i>j</i> bedient wird, 0 sonst
	<i>z_j</i> 1, wenn Hub <i>j</i> errichtet wird, 0 sonst

2.3.3. Zielfunktion und Nebenbedingungen

Im Folgenden sind die Zielfunktion und die bei der Optimierung zu berücksichtigenden Nebenbedingungen des MILP dargestellt.

$$\text{Min.} \quad \underbrace{\sum_{j=1}^J (z_j \cdot (h_j \cdot a + c))}_{\text{Hubkosten}} + \underbrace{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (f_{i,j} \cdot v_i^{\text{fix}})}_{\text{fixe Fahrzeugkosten}} + o \cdot \underbrace{\left(\sum_{i=1}^I (q_i \cdot (v_i^{\text{ope}} + v_i^{\text{ext}})) + (t \cdot w) \right)}_{\text{variable Kosten}} \quad (1)$$

$$z_j \geq y_{i,j,k} \quad \forall i, j, k \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{i,j,k} \geq 1 \quad \forall k \quad (3)$$

$$f_{i,j} \leq q_i \cdot F_i \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$q_i \leq r_i \cdot \sum_{j=1}^J f_{i,j} \quad \forall i \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (y_{i,j,k} \cdot d_k \cdot \bar{n}) \leq \sum_{i=1}^I (f_{i,j} \cdot m_i) \quad \forall j \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (u_{j,k} \cdot y_{i,j,k} \cdot l_i) \leq \sum_{i=1}^I (f_{i,j} \cdot r_i) \quad \forall j \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (y_{i,j,k} \cdot d_k \cdot \bar{n}) \leq s \quad \forall j \quad (8)$$

$$f_{i,j} \leq z_j \cdot F_i \quad \forall i, j \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K d_k \leq T \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (f_{i,j} \cdot b_i) \quad (10)$$

$$u_{j,k} \cdot y_{i,j,k} \leq U \quad \forall i, j, k \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (f_{i,j} \cdot e_i) \leq E \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{i,j} \quad (12)$$

$$q_i = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (u_{j,k} \cdot y_{i,j,k} \cdot l_i) \quad \forall i \quad (13)$$

$$t = T \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{i,j} \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I (f_{i,j} \cdot g_i) \leq p_j \quad \forall j \quad (15)$$

$$Q \cdot \sum_{j=1}^J f_{i,j} \leq q_i \quad \forall i \quad (16)$$

$$y_{i,j,k}, z_j \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k \quad (17)$$

$$f_{i,j}, q_i, t \geq 0 \quad \forall i, j \quad (18)$$

Die Zielfunktion (1) minimiert die monatlichen Gesamtkosten der urbanen LMD im Untersuchungsgebiet, welche sich aus den Hub-, Fahrzeug- und Personalkosten zusammensetzen. Die Fahrzeugkosten beinhalten die monatlichen Fixkosten (Leasing, Versicherung, Wartung) sowie die variablen Fahrzeugkosten bestehend aus Betriebskosten (Kraftstoff) und externen Kosten (Emissionen, Lärm, Staus, etc.). Nebenbedingung (2) gewährleistet, dass ein Nachfrage-Standort nur von einem errichteten Hub bedient werden kann. Nebenbedingung (3) stellt sicher, dass jeder Nachfrage-Standort von mindestens einem Hub-Standort bedient wird. Nebenbedingungen (4) und (5) stellen sicher, dass die eingesetzte Fahrzeugflotte für die anfallende Paketmenge ausreichend ist. Dabei muss die Transportkapazität der Fahrzeuge die ihnen zugewiesene Paketnachfrage vom Volumen übersteigen (6) und die tägliche Fahrzeugreichweite eingehalten werden (7). Die aggregierte Transportkapazität der Fahrzeuge an einem Hub muss das Volumen der dort gelagerten Paketnachfrage übersteigen. Im Kontext der taktischen Planungsebene ist diese Annahme angemessen, um die entsprechende Flottengröße zu bestimmen. Die konkrete Tourenplanung und die Zuordnung von Paketen auf einzelne Fahrzeuge ist Teil der nachgelagerten operativen Planungsebene, welche in täglichen Optimierungsprozessen erfolgen muss. Nebenbedingung (8) stellt sicher, dass die Kapazität eines Containers ausreichend ist, um die einem Hub zugewiesenen Pakete zu lagern. Die Fahrzeuganzahl pro Hub ist begrenzt, um die jeweilige Flächenverfügbarkeit je Standort zu berücksichtigen (9). Da Pakete per Kurier zugestellt werden müssen, begrenzt Nebenbedingung (10) die tägliche Arbeitszeit pro Mitarbeiter. Nebenbedingung (11) legt die maximal zulässige Entfernung zwischen einem Hub-Standort und den ihm zugeordneten Nachfrage-Standorten fest. Der durchschnittliche lokale CO₂-Ausstoß der eingesetzten Fahrzeugflotte lässt sich durch Festlegung einer entsprechenden Obergrenze beschränken (12). Mithilfe von

Gleichung (13) wird die zurückgelegte Distanz pro Fahrzeugtyp abgeschätzt, indem ein Ladefaktor implementiert wird, um die Vorteile des optimalen Fahrzeugroutings der nachgelagerten operativen Planungsebene zu berücksichtigen. In Gleichung (14) wird die tägliche Arbeitszeit der eingesetzten Kuriere summiert, um die entsprechenden Personalkosten zu ermitteln. Jeder Hub-Standort verfügt über eine begrenzte Parkfläche für die ihm zugewiesenen Transportfahrzeuge, welche nicht überschritten werden darf (15). Nebenbedingung (16) gewährleistet, dass jedes eingesetzte Fahrzeug eine gewisse Mindestdistanz zurücklegen muss, um eine unzureichende Verwendung zu vermeiden. (17) und (18) definieren die zulässigen Wertebereiche der Entscheidungsvariablen.

Das dargestellte mathematische Modell ermöglicht die Optimierung des beschriebenen Logistik-Konzepts für die urbane LMD. Der Zusammenhang zwischen der kostenminimierenden Zielfunktion und der Obergrenze der lokalen CO₂-Emissionen lässt sich anhand einer Szenarioanalyse untersuchen. Hierbei werden in Kapitel 2.5.2 unterschiedliche CO₂-Obergrenzen festgelegt und deren Auswirkungen auf die einzelnen Kostenarten analysiert. Neben Elektrofahrzeugen können auch alternative Transportmittel, wie etwa ECC, eingesetzt werden, um geringe Emissionsdurchschnitte über die Flotte zu erreichen. Mit der Nebenbedingung, welche die Entfernung zwischen einem Hub-Standort und den ihm zugewiesenen Nachfrage-Standorten beschränkt, kann der Nutzer die Dichte des Hub-Netzwerks beeinflussen.

2.4. Entscheidungsunterstützungssystem

Um Anwendern ohne Optimierungskennntnisse eine Nutzung des entwickelten Modells zu ermöglichen, wird ein entsprechendes EUS benötigt, dessen Vorstellung in diesem Kapitel erfolgt. Der entworfene Prototyp basiert auf *Java* und adressiert primär KEP-Dienstleister und Stadtplaner, welche mit dem Tool eigene Fallstudien durchführen können.

Eine hohe Benutzerfreundlichkeit ist durch eine einfache Bedienbarkeit gewährleistet und die Inhalte werden anschaulich dargestellt. Nachdem der Nutzer die gewünschten Datensätze importiert und alle Parameter eingetragen hat, löst das EUS das zugrunde liegende Optimierungsmodell und visualisiert die resultierenden Ergebnisse. Grundvoraussetzung für die Optimierung ist die Implementierung des mathematischen Modells in der Software GAMS (*General Algebraic Modeling System*). Die Systemarchitektur und die Datenflüsse sind in Abbildung 9 dargestellt.

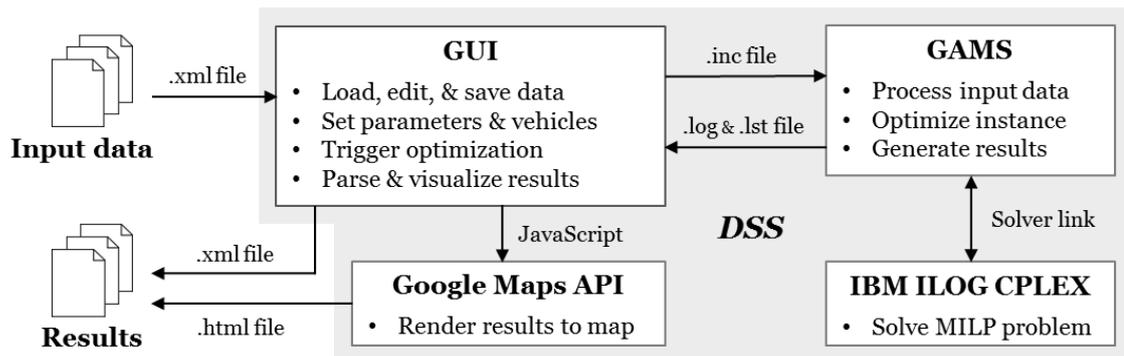


Abbildung 9. Systemarchitektur und Datenflüsse des EUS

Wie in Abbildung 9 dargestellt, muss der Entscheidungsträger zunächst einen externen Input in Form einer xml-Datei in das EUS eingeben. Hier müssen vor allem die potenziellen Hub- und Nachfrage-Standorte mit ihren Koordinaten im betrachteten Untersuchungsgebiet enthalten sein. Die grafische Benutzeroberfläche (engl. graphical user interface, GUI) des EUS ist in vier Teile gegliedert. Der erste Teil bietet die Möglichkeit, Datensätze zu laden, zu bearbeiten und zu speichern. Der zweite und dritte Teil enthalten die Eingabe aller Parameter, die zur Lösung des zugrunde liegenden mathematischen Modells notwendig sind. Während die Hub-bezogenen Parameter im zweiten Teil einstellbar sind, bietet der dritte Teil die Möglichkeit, die potenziellen Transportfahrzeuge und deren Eigenschaften zu hinterlegen, wie etwa die Kapazität oder die lokalen CO₂-Emissionen. Durch die Variation der Parameterwerte ist der Anwender in der Lage, verschiedene Szenarien zu simulieren und zu vergleichen. Elemente zum Starten der Optimierung und zur Visualisierung der Ergebnisse bilden den vierten Teil der GUI. Nach dem Beginn der Optimierung wird eine Include-Datei (.inc) geschrieben, welche die externen Inputdaten und die ausgewählten Parameterwerte enthält. GAMS und der angeschlossene Solver *IBM ILOG CPLEX* berechnen die optimale Lösung des mathematischen Modells. GAMS erzeugt automatisch eine Protokoll-Datei (.log) und eine Listing-Datei (.lst), in denen der Optimierungsprozess und die Ergebnisse dokumentiert sind. Die grafische Visualisierung des resultierenden Hub-Netzwerks kann mittels *Google Maps API* in eine html-Datei exportiert werden.

2.5. Anwendungsfall und Szenarioanalyse

Zur Evaluierung des entwickelten EUS und des zugrunde liegenden Optimierungsmodells wird ein Anwendungsfall sowie eine Szenarioanalyse mit entsprechenden Benchmarks dargestellt.

2.5.1. Datensatz und Parameterdefinition

Aufgrund der Existenz der „Initiative Urbanen Logistik“ wird die Stadt Hannover als Untersuchungsbeispiel gewählt. Hannover ist eine mittelgroße Stadt mit einer Gesamtbevölkerung von über 500.000 Einwohnern. Bezüglich der verkehrsrelevanten Infrastrukturen der LMD steigt die Zahl der öffentlichen Ladepunkte und der Paketabholorte kontinuierlich an, was die zunehmende Akzeptanz und Förderung von Elektrofahrzeugen und alternativen Zustellkonzepten widerspiegelt.

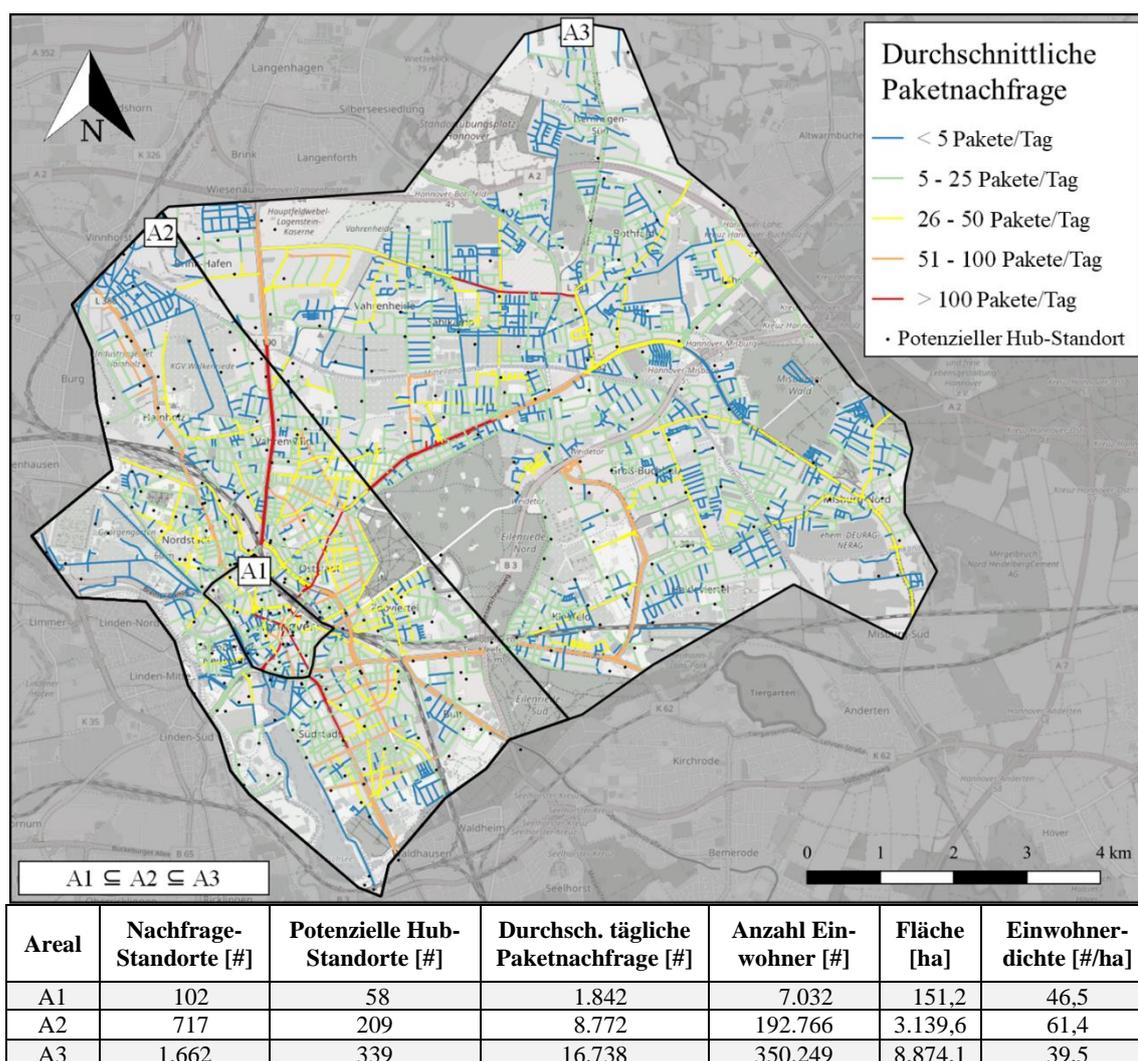


Abbildung 10. Untersuchungsgebiete und deren Eigenschaften

In der Stadt Hannover werden drei Untersuchungsgebiete (A1, A2 und A3) definiert, um die Anwendbarkeit des Modells in unterschiedlichen Skalen zu untersuchen (siehe Abbildung 10). Das Areal A1 repräsentiert hierbei das Stadtzentrum inkl. Hauptbahnhof, Fußgängerzone und Einkaufsstraßen. Insgesamt sind 58 potenzielle Hub-Standorte in A1

gesetzt, welche überwiegend an Positionen von Parkplätzen und Parkhäusern liegen. Darüber hinaus werden 102 Nachfrage-Standorte in Form von Straßen definiert, so dass jeder dieser Standorte 5-50 Gebäude umfasst. Da das Modell die taktische Planungsebene unterstützen soll, erscheint dieses Zusammenfassen als Vereinfachung der realen Bedingungen angemessen. Durch die gleiche Vorgehensweise sind A2 und A3 mit Nachfrage- und potenziellen Hub-Standorten versehen. Innerhalb der Untersuchungsgebiete sind unbewohnte Bereiche (z.B. Grünflächen) ausgeschlossen. Areal A2 enthält die Standorte von A1 und umfasst die bevölkerungsreicheren innenstadtnahen Stadtteile, was zu insgesamt 717 Nachfrage-Orten und 209 potenziellen Hub-Standorten führt. A3 ist eine zusätzliche Erweiterung mit insgesamt 1.662 Nachfrage- und 339 potenziellen Hub-Standorten. Darüber hinaus ist jedes Untersuchungsgebiet durch seine Fläche, Einwohnerzahl und die resultierende Bevölkerungsdichte charakterisiert (siehe Abbildung 10). Basierend auf einem Datensatz der Transportvolumina eines KEP-Dienstleisters ist das durchschnittliche tägliche Paketaufkommen je Nachfrage-Standort definiert. Für A1 ergeben sich bei 1.842 zuzustellenden Paketen und einer Bevölkerung von 7.032 Einwohnern etwa 18,1 Pakete pro Tag und Nachfrageort. Für A2 und A3 liegt eine durchschnittliche Nachfrage von 8.772 bzw. 16.738 Paketen pro Tag vor.

Tabelle 6. Potenzielle Transportfahrzeuge und deren Eigenschaften

Parameter	Einheit	eCB	eCT	Car	eCar	Van	eVan
Fixkosten	€/Monat	250	500	675	950	900	1,300
Betriebskosten	€/km	0,002	0,003	0,06	0,03	0,09	0,05
Externe Kosten	€/km	0,0	0,0	0,6	0,5	0,7	0,5
Parkfläche	m ²	3,0	3,5	6,0	6,0	10,0	10,0
Kapazität	m ³	0,25	0,8	2,0	2,0	10,0	10,0
Tägl. Touren	Touren/Tag	6,0	3,0	3,0	3,0	1,0	1,0
Tägl. Kapazität	m ³ /Tag	1,5	2,4	6,0	6,0	10,0	10,0
Ladefaktor	-	1,6	1,2	0,8	0,8	0,6	0,6
Zustellrate	Pakete/h	14	15	16	16	20	20
Tägl. Reichweite	km/Tag	40	90	500	200	500	130
Lokale Emissionen	gCO ₂ /km	0	0	105	0	200	0

Für die Zustellung von Paketen an die Empfänger werden Transportfahrzeuge benötigt. Für diesen Anwendungsfall sind sechs mögliche Fahrzeugtypen implementiert, welche sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften unterscheiden (Tabelle 6). Neben einem zweirädrigen elektrisch unterstützten Lastenfahrrad (engl. electric cargo bicycle, eCB) und einem dreirädrigen elektrisch unterstützten Lastenfahrrad (engl. electric cargo tricycle, eCT) ist der Einsatz von vier Automobil-Typen möglich: zwei PKW (engl. Car) und zwei Lieferwagen (engl. Van), von denen jeweils einer mit einem elektrischen Antrieb und einer mit

einem Dieselaggregat ausgestattet ist. Die angegebenen Werte basieren auf den Herstellerangaben und zeigen die jeweiligen Vor- und Nachteile der einzelnen Fahrzeugtypen. Während größere Fahrzeuge eine höhere Kapazität haben und mehr Pakete gleichzeitig transportieren können, benötigen sie mehr Parkfläche und weisen höhere Fixkosten (Leasing, Wartung, Versicherung etc.) sowie Betriebskosten (Diesel- oder Energieverbrauch) auf. Um die negativen Auswirkungen des Verkehrs zu berücksichtigen und monetär zu quantifizieren, sind externe Kosten in dem Optimierungsmodell integriert. In diesem Anwendungsfall sind diejenigen Externalitäten berücksichtigt, welche in der wissenschaftlichen Literatur die größte Aufmerksamkeit erhalten, nämlich Luftschadstoff- und Lärm-Emissionen sowie Staus (Korzhenevych et al., 2014). Während die lokalen CO₂-Emissionen und Lärm-Emissionen hauptsächlich von der Art des Antriebs abhängen, tragen ausschließlich Fahrzeuge des Straßenverkehrs zur Staubildung bei. Zur Quantifizierung der externen Kosten pro Fahrzeugtyp wird der Ansatz von Arnold et al. (2018) herangezogen, sodass 0,5 €/km für Fahrzeuge des Straßenverkehrs anfallen. Zusätzlich verursachen PKW 0,1 €/km und Lieferwagen 0,2 €/km für den Ausstoß lokaler Luftschadstoff- und Lärm-Emissionen, welche für die entsprechenden elektrischen Alternativen nicht anfallen. Um den Effekt eines effizienten Fahrzeugroutings zu berücksichtigen, ist ein sog. Ladefaktor implementiert, der in die Berechnung der Betriebskosten eingeht. Größere Fahrzeuge müssen die Umschlagspunkte aufgrund ihrer höheren Transportkapazität seltener besuchen als kleinere Fahrzeuge, sodass dieser Faktor bei großen Fahrzeugen gering und bei kleinen Fahrzeugen hoch ist. Die tägliche Kapazität der Fahrzeugtypen errechnet sich aus der Multiplikation der Fahrzeugkapazität mit der Anzahl der täglichen Touren. Eine Tour umfasst dabei einen Zyklus, der an dem zugewiesenen Hub des Fahrzeugs startet und endet. Die Zustellrate eines Kuriers hängt vom verwendeten Fahrzeugtyp ab. Da Fahrzeuge mit einer geringen Transportkapazität die Hubs häufiger besuchen müssen, weisen sie eine geringere Zustellrate als größere Fahrzeuge auf. Die Reichweite von Elektrofahrzeugen ist im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen eher gering. Da elektrische Verkehrsmittel keine lokalen Emissionen verursachen, wird ihr CO₂-Ausstoß mit Null angegeben. In einer ganzheitlichen Bewertung der Emissionen (Well-to-Wheel Emissionen) muss der zugrundeliegende Strommix und dessen Emissionsfaktor herangezogen werden. Grundsätzlich sollte Strom aus erneuerbaren Energiequellen bei der Nutzung von Elektrofahrzeugen bevorzugt werden, um entsprechende Vorteile zu gewährleisten.

Tabelle 7. Angenommene Parameter Werte

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Kosten eines Containers [€/Monat]	100,0	Anzahl der Arbeitstage [#Monat]	24,0
Kapazität eines Containers [m ³]	26,48	Maximale tägliche Arbeitsstunden [h/Tag]	8,0
Durchschnittliches Paketvolumen [m ³]	0,03	Stundenlohn der Kuriere [€/h]	10,0
Maximale Distanz zwischen einem Hub- und den zug. Nachfrage-Standorten [km]	2,5	Maximal zulässige lokale CO ₂ -Emissionen der Fahrzeugflotte [gCO ₂ /km]	200,0
Erforderliche Fläche je Hub-Standort [m ²]	35	Minimale Distanz je Fahrzeug [km/Tag]	5,0

Neben den fahrzeugbezogenen Parametern müssen vor Beginn der Optimierung mehrere allgemeine Faktoren festgelegt werden. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Werte im Basisszenario. So gibt es beispielsweise verschiedene Parameter, die sich auf die Hubs beziehen. Erstens werden die Kosten pro Container benötigt. Zweitens ist die Kapazität der Container ein relevanter Faktor, der sich aus dem verwendeten Containertyp (hier 20-Fuß-Container) ergibt. Drittens muss die zur Verfügung stehende Parkfläche zum Abstellen der Fahrzeuge an jedem Hub-Standort separat zugeordnet werden, abhängig von den räumlichen Gegebenheiten. Dieser Wert beträgt durchschnittlich 20 m², sodass maximal zwei (*e*)Vans einem Hub zugeordnet werden können. Da die benötigte Hubfläche aus der Containerfläche (15 m²) und der durchschnittlichen Parkfläche besteht, kann ihr Wert durch Addition dieser beiden Faktoren bestimmt werden (hier: 35 m²). Die Anzahl der Arbeitstage ist zur Berechnung der monatlichen anfallenden variablen Fahrzeugkosten und Personalkosten erforderlich (hier: 24 Tage/Monat). Um die tägliche Arbeitszeit der Kuriere zu beschränken, ist eine entsprechende Obergrenze implementiert. Der Stundensatz der Kuriere ist anpassbar und sollte die nationalen bzw. lokalen Standards beachten. Mit einem Wert von 200 gCO₂/km sind die zulässigen CO₂-Emissionen der Fahrzeugflotte im Basisszenario unbegrenzt, da dies dem Niveau des Fahrzeugtyps mit den höchsten lokalen Emissionen entspricht (hier: *Van*). Um sicherzustellen, dass die Transportfahrzeuge hinreichend genutzt werden, muss jedes Fahrzeug mindestens 5 km/Tag zurücklegen. Die maximale Entfernung zwischen einem Hub und den ihm zugeordneten Nachfrage-Standorten beträgt 2,5 km, um ein ausreichend dichtes Hubnetzwerk zu etablieren. Die monatlichen Flächenkosten variieren in Abhängigkeit vom Gebiet und den konkreten Positionen der potenziellen Hub-Standorte (3 - 4 €/m²).

2.5.2. Szenarioanalyse und Diskussion der Ergebnisse

Die genannten Parameterwerte wurden im EUS eingetragen und alle Berechnungen wurden auf einem Standardcomputer (Intel Core i7, 2,5 GHz, 16 GB RAM) durchgeführt. Die dargestellten Ergebnisse resultieren aus dem Einsatz der Software GAMS (Version

24.5.6) und dem Solver *IBM ILOG CPLEX* (Version 12.6.2) mit einer zu erreichenden Optimalitätslücke von 1% (relativer Abstand zur bestmöglichen Lösung).

Tabelle 8. Ergebnisse im Basisszenario

Areal	Gesamtkosten [€/Monat]	Anzahl Hubs [#]	Anzahl Fahrzeuge [#]							Geschätzte Distanz [km/Tag]			Gesamte Emissionen [gCO ₂ /Tag]	Durchsch. Flottenemissionen [gCO ₂ /km]
			eCB	eCT	Car	eCar	Van	eVan	Σ	Diesel	Elektrisch	Σ		
A1	35.792,64	7	1	-	-	-	11	-	12	55,1	6,4	61,5	11.021	179,3
A2	187.464,70	37	2	-	-	-	60	-	62	300,2	11,9	312,1	60.038	192,3
A3	317.102,11	53	1	-	-	-	104	-	105	520,0	7,9	527,9	104.000	197,0

Tabelle 8 listet die berechneten Optimierungsergebnisse für die beschriebenen Areale auf, um den Einfluss der Größe des Untersuchungsgebiets zu verdeutlichen. Für jeden Fall sind die Gesamtkosten, die Anzahl der errichteten Hubs, die Flottenzusammensetzung, die ungefähren Fahrdistanzen und die daraus resultierenden lokalen CO₂-Emissionen angegeben. Naturgemäß weist das kleinste Untersuchungsgebiet (A1) die niedrigsten monatlichen Kosten auf und erfordert sieben Hubs, ein eCB sowie elf konventionell angetriebene Vans. Um alle Nachfrage-Standorte in A1 zu bedienen, legen die Transportfahrzeuge eine ungefähre Strecke von 61,5 km/Tag zurück, was zu lokalen CO₂-Emissionen von ca. 11 kgCO₂/Tag führt. Die Vergrößerung des Untersuchungsgebietes führt zu erhöhten Kosten, mehr Hubs und Transportfahrzeugen sowie einer steigenden Fahrleistung. Die Bedienung von Areal A3 ist am teuersten (317.102 €/Monat), da hier die meisten Pakete (16.738) zugestellt werden müssen. Basierend auf den angenommenen 24 Betriebstagen pro Monat entspricht dieser Wert Stückkosten von 0,789 €/Paket. Die Rechenzeit für die drei dargestellten Szenarien beträgt 2,1 Minuten für A1, 2,2 Stunden für A2 und 5,5 Stunden für A3.

Tabelle 9. Benchmarks für verschiedene Obergrenzen des CO₂-Flottendurchschnitts

Emissionslimit [gCO ₂ /km]	Gesamtkosten [€/Monat]	Anzahl Hubs [#]	Anzahl Fahrzeuge [#]							Geschätzte Distanz [km/Tag]			Gesamte Emissionen [gCO ₂ /Tag]	Durchsch. Flottenemissionen [gCO ₂ /km]
			eCB	eCT	Car	eCar	Van	eVan	Σ	Diesel	Elektrisch	Σ		
200	187.464,70	37	2	-	-	-	60	-	62	300,2	11,9	312,1	60.038,3	192,3
150	189.156,21	36	19	-	-	-	48	-	67	240,0	121,0	361,0	48.000,0	133,0
100	191.241,84	27	37	-	-	-	36	-	73	180,1	187,5	367,6	36.026,9	98,0
50	195.819,32	33	51	-	2	-	18	6	77	115,2	341,3	456,5	20.820,1	45,6
0	199.090,55	21	54	2	-	-	-	22	78	-	467,4	467,4	0,0	0,0

Nach der Darstellung der Ergebnisse des Basisszenarios für die drei Untersuchungsgebiete erfolgt die schrittweise Senkung der zulässigen durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Fahrzeugflotte (Tabelle 9). Für diese Benchmarks ist Bereich A2 ausgewählt. Beim

Betrachten der Ergebnisse fällt auf, dass der Fahrzeugtyp *Van* das am häufigsten verwendete Transportfahrzeug ist. Dies liegt daran, dass er das niedrigste Verhältnis aus Kosten und Kapazität aufweist. Die Senkung der Emissionsobergrenze führt zu einer steigenden Anzahl von eingesetzten Fahrzeugen und zunehmenden Gesamtkosten. Diese Steigerungen sind auf die Substitution konventionell betriebener *Vans* durch *eCBs* (geringere Kapazität) und *eVans* (höhere Fixkosten) zurückzuführen. Die Anzahl der zu errichtenden Hubs variiert je nach Anzahl und Typ der eingesetzten Fahrzeuge. Die greifende Nebenbedingung hierbei ist, dass größere Fahrzeuge mehr Parkfläche an den Hubs einnehmen als kleinere Fahrzeuge; z.B. benötigt ein (*e*)*Van* (10 m²) mehr Platz als drei *eCBs* (9 m²). Bedingt durch die begrenzte Fläche an den Hub-Standorten weisen diejenigen Szenarien, welche von großen Fahrzeugen dominiert werden, eine höhere Hub-Anzahl auf als die Szenarien mit mehr kleinen Fahrzeugen. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Distanzen der Fahrzeuge mit einer sinkenden CO₂-Obergrenze zunehmen. Dies liegt ebenfalls an der unterschiedlichen Flottenstruktur, da *Vans* nicht ausschließlich durch *eVans*, sondern auch durch *eCBs* substituiert werden. Wie bereits erwähnt, haben die Lastenfahrräder eine geringe Transportkapazität und müssen die Hubs öfter als größere Fahrzeuge besuchen, um ihre Transportbehälter neu zu beladen. Daher führt eine höhere Anzahl von Touren zu einer größeren Fahrleistung. Besonders auffällig ist, dass die jeweiligen Emissionsgrenzwerte der Szenarien nahezu vollständig ausgenutzt werden, um die resultierenden Gesamtkosten zu minimieren und gleichzeitig alle Nebenbedingungen zu erfüllen. Im Vergleich zum uneingeschränkten Szenario führt eine vollständige Vermeidung der lokalen CO₂-Emissionen zu erhöhten Gesamtkosten von 11.625,85 €/Monat (+6,2%). Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass Lastenfahrräder in die Fahrzeugflotte integriert werden sollten, wenn eine CO₂-freie Paketzustellung mit innerstädtischen Umschlagpunkten angestrebt wird.

Tabelle 10. Benchmarks für verschiedene Obergrenzen der verfügbaren Parkfläche

Verfüg. Parkfläche [m ²]	Gesamtkosten [€/Monat]	Anzahl Hubs [#]	Anzahl Fahrzeuge [#]							Geschätzte Distanz [km/Tag]			Gesamte Emissionen [gCO ₂ /Tag]	Durchsch. Flottenemissionen [gCO ₂ /km]
			<i>eCB</i>	<i>eCT</i>	<i>Car</i>	<i>eCar</i>	<i>Van</i>	<i>eVan</i>	Σ	Diesel	Elektrisch	Σ		
20	187.464,70	37	2	-	-	-	60	-	62	300,2	11,9	312,1	60.038,3	192,37
30	184.123,57	22	2	-	-	-	60	-	62	300,0	11,6	311,6	60.000,1	192,55
40	183.678,63	20	2	-	-	-	60	-	62	300,0	12,1	312,1	60.000,0	192,23

Wie bereits zuvor beschrieben, ist die verfügbare Parkfläche je Hub-Standort ein relevanter Einflussfaktor für die Gestaltung des Logistik-Konzepts. Tabelle 10 zeigt neben dem Basisszenario (20 m² Parkfläche) die Ergebnisse von zwei weiteren Benchmarks mit einer

erhöhten Flächenverfügbarkeit. Diese Benchmarks gelten ebenfalls für Areal A2. Es ist erkennbar, dass eine Erhöhung der Parkfläche keinen Einfluss auf die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge, die Zusammensetzung der Flotte und deren zurückgelegte Distanz hat, da die entsprechenden Entscheidungsvariablen nahezu identisch zum Basisszenario sind. Eine signifikante Änderung stellt jedoch die Anzahl der erforderlichen Hubs dar. Eine Verdopplung der verfügbaren Parkfläche je Hub-Standort von 10 m² auf 20 m² führt zu einer Reduzierung der Hub-Anzahl von 37 auf 22 (-40,5%). Die Gesamtkosten sinken in diesem Fall um 3.341,13 €/Monat (-1,8%). Eine zusätzliche Erhöhung um 10 m² ist mit einer weiteren Reduzierung der Hub-Anzahl um zwei Einheiten und einer Verringerung der Gesamtkosten um 444,94 €/Monat verbunden. Somit gilt folgender Zusammenhang: durch eine Erhöhung der verfügbaren Parkfläche je Hub-Standort sinkt die Anzahl der benötigten Hubs und damit auch die Anzahl der benötigten Container zur Paket-Zwischenlagerung. Dadurch können die monatlichen Gesamtkosten gesenkt und die Effizienz der eingesetzten Container durch eine gesteigerte Auslastung erhöht werden.

Tabelle 11. Benchmarks für verschiedene Obergrenzen der täglichen Arbeitszeit der Kuriere

Max. Arbeitszeit [h/Tag]	Gesamtkosten [€/Monat]	Anzahl Hubs [#]	Anzahl Fahrzeuge [#]							Geschätzte Distanz [km/Tag]			Gesamte Emissionen [gCO ₂ /Tag]	Durchsch. Flottenemissionen [gCO ₂ /km]
			eCB	eCT	Car	eCar	Van	eVan	Σ	Diesel	Elektrisch	Σ		
8	187.464,70	37	2	-	-	-	60	-	62	300,2	11,9	312,1	60.038,3	192,37
10	172.846,40	24	3	-	-	-	47	-	50	235,0	16,6	251,6	47.000,1	186,83
12	163.684,35	21	-	-	-	-	41	-	41	212,7	0,0	212,7	42.530,0	200,00
14	158.894,17	19	3	-	-	-	33	-	36	171,6	48,5	220,1	34.328,5	155,94
16	153.836,88	16	1	-	-	-	30	-	31	197,0	13,0	210,1	39.408,7	187,60

Für die Berechnung der Entscheidungsvariablen ist die maximale tägliche Arbeitszeit der Kuriere ein weiterer wichtiger Parameter (Tabelle 11). Auch für diese Benchmarks ist Bereich A2 ausgewählt. Da dieser Wert in der Regel gesetzlich festgelegt ist, dienen die dargestellten Benchmarks vielmehr der Untersuchung der hypothetischen Auswirkungen einer veränderten Obergrenze. In Deutschland darf die werktägliche Arbeitszeit von Arbeitnehmern acht Stunden nicht überschreiten. Diese kann auf bis zu zehn Stunden verlängert werden, sofern innerhalb von sechs Monaten oder innerhalb von 24 Wochen im Durchschnitt acht Stunden werktäglich nicht überschritten werden (§ 3 ArbZG). Die Benchmarks zeigen, dass eine Verdoppelung der maximalen Arbeitszeit von 8 h/Tag auf 16 h/Tag eine Halbierung der erforderlichen Fahrzeuganzahl, eine Reduzierung der Hub-Anzahl um 21 Einheiten (-56,8%) und eine Verringerung der Gesamtkosten um 33.627,82 €/Monat (-17,9%) zur Folge hätte. Somit hat der Faktor der maximalen täglichen Arbeitszeit einen erheblichen Einfluss auf die Auslegung des Logistik-Konzepts.

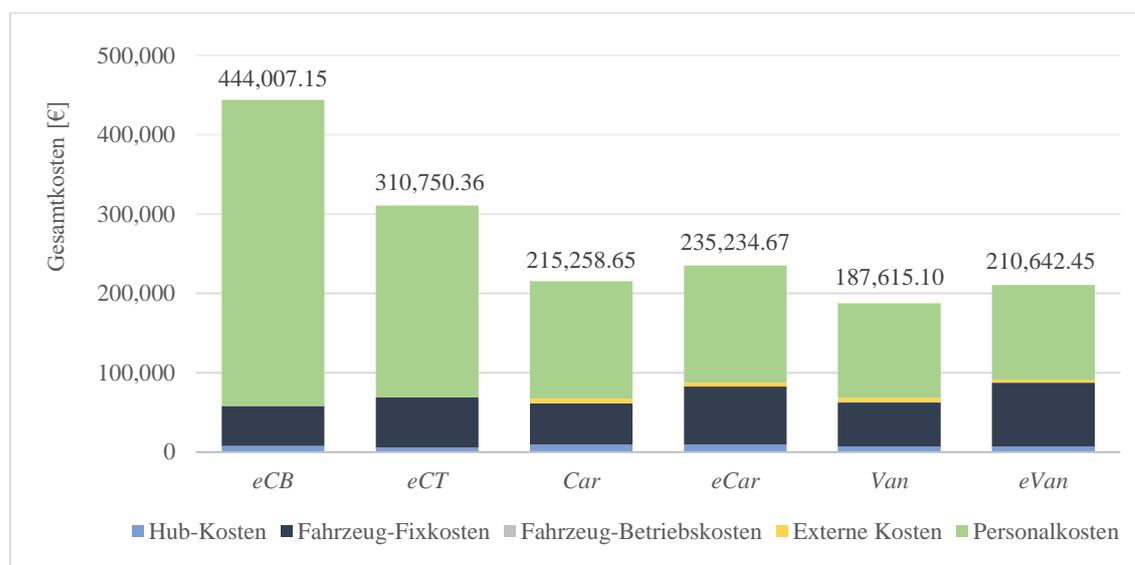


Abbildung 11. Benchmarks für die alleinige Nutzung einzelner Fahrzeugtypen

Da die bislang dargestellten Szenarien von (*e*)*Vans* und gemischten Flotten dominiert werden, sind weitere Benchmarks für homogene Flotten mit nur einem Fahrzeugtyp von Relevanz (siehe Abbildung 11). Die Kostenstruktur der betrachteten Szenarien ist dabei in Form von gestapelten Säulen visualisiert, um die jeweiligen Kostenarten darzustellen. Mit einem Anteil von 56,5% (*eVan*) bis 86,9% (*eCB*) an den Gesamtkosten sind die Personalkosten in allen Szenarien die größte Kostenkomponente. Mit einem Anteil von 11,3% (*eCB*) bis 38,3% (*eVan*) an den Gesamtkosten stellen die fixen Fahrzeugkosten die zweitgrößte Kostenkomponente dar. Aufgrund der relativ geringen Fahrstrecke in diesem Anwendungsfall hat die Integration der externen Kosten nur einen geringen Einfluss und macht bis zu 2,8% der Gesamtkosten aus (*Van*). Aus demselben Grund haben die Betriebskosten der Fahrzeuge nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtkosten. Wie bereits festgestellt, ist der Einsatz von konventionell angetriebenen *Vans* mit den niedrigsten Gesamtkosten verbunden (187.615,10 €/Monat), da diese die höchste Transporteffizienz aufweisen. Dies ist dadurch zu erklären, dass in diesem Szenario die geringste Anzahl von Fahrzeugen und Kurieren erforderlich ist, um die anfallende Paketnachfrage zu bedienen. Dieser Zusammenhang gilt sowohl für die elektrisch als auch für die konventionell angetriebene Variante.

Die vollständige Bedienung der Nachfrage mit kleineren Fahrzeugen erhöht die monatlichen Gesamtkosten erheblich. Dies ist vor allem auf die höhere Anzahl an Fahrzeugen und insbesondere an Kurieren zurückzuführen. Wenn das Ziel einer lokal emissionsfreien Zustellung von KEP-Dienstleistern erreicht werden soll, ist eine Flotte aus *eVans*

(210.642,45 €/Monat) die Alternative mit den geringsten Gesamtkosten. Sofern ausschließlich Lastenfahrräder verwendet werden sollen, sind *eCTs* gegenüber *eCBs* vorzuziehen, da sie deutlich geringere Gesamtkosten verursachen (-30,01%). Dies lässt sich durch ihre höhere Transportkapazität erklären, wodurch die Anzahl der benötigten Fahrzeuge und Kuriere reduziert ist. Dieses Ergebnis ist unter anderem deswegen interessant, da die in Tabelle 9 dargestellten Benchmarks primär *eCBs* in die heterogenen Flotten integriert haben. Für den Fall ohne lokale Emissionsbeschränkungen sind PKW als Lieferfahrzeuge nicht wettbewerbsfähig, da *Vans* und sogar *eVans* geringere Gesamtkosten aufweisen. Im Vergleich zu den vorherigen Benchmarks mit heterogenen Flotten wird deutlich, dass eine homogene Flotte keine effiziente Lösung zur Befriedigung der Paketzustellungsanfrage ist.

Insgesamt ist zu beachten, dass die vorliegenden Ergebnisse nur für den beschriebenen Anwendungsfall und die dargestellten Parameterkonstellationen gelten. Unter anderen Bedingungen kann es zu Unterschieden in der Bewertung der Szenarien kommen. Bei der Analyse der dargestellten Ergebnisse müssen die zugrunde liegenden Annahmen und Nebenbedingungen des Optimierungsmodells zwingend berücksichtigt werden. Für die Hub-Anzahl sind das Gesamtnachfragevolumen, die maximale Entfernung zwischen einem Hub und den ihm zugewiesenen Nachfrage-Standorten, die Flottengröße sowie die verfügbare Fläche an den jeweiligen Hub-Standorten entscheidende Einflussfaktoren. In dem dargestellten Basisszenario ist die Flächenverfügbarkeit je Hub-Standort auf 35 m² festgelegt. Der Platzbedarf eines Containers sowie der einem Hub zugeordneten Lieferfahrzeuge muss kleiner sein als dieser vergleichsweise geringe Wert. Da in dieser Parameterkonstellation lediglich zwei (*e*)*Vans* je Hub-Standort abgestellt werden können, ist dies ein Grund für die relativ hohe Anzahl von Hubs im Basisszenario. Die Benchmarks mit einer erhöhten Flächenverfügbarkeit je Hub-Standort zeigen jedoch, dass die Hub-Anzahl bei gleichbleibender Fahrzeuganzahl reduziert werden kann. Es hängt somit von den lokalen Gegebenheiten der zu untersuchenden Stadt ab, ob eine geringe Menge großer oder eine hohe Anzahl kleiner Umschlagsorte errichtet werden sollen. Der Benutzer des EUS hat also über die Eingabe der Flächenverfügbarkeit die Möglichkeit, die Dichte des Netzwerks zu beeinflussen. Aus rein wirtschaftlicher Perspektive ist die Hub-Anzahl zu minimieren, da hierdurch Kosten für die Container eingespart werden können. Eine weitere entscheidende Variable ist die Anzahl und Art der eingesetzten Fahrzeuge, die

von diversen Nebenbedingungen beeinflusst wird, z.B. muss die Flottenkapazität das Volumen der Paketnachfrage übersteigen, die Fahrzeuge müssen alle Kunden erreichen, die Arbeitszeit der Kuriere muss ausreichen, um alle Pakete auszuliefern, die Flotte muss die vorgegebene Emissionsobergrenze einhalten etc. In dem dargestellten Basisszenario ist der Parameter, der die maximale Arbeitszeit je Kurier (hier: 8 h/Tag) beschreibt, einer der wichtigsten Faktoren. Da jedem Fahrzeug ein Kurier zugeordnet ist und deren Arbeitszeit nicht variabel ist, hat dieser Parameter einen großen Einfluss auf die Gesamtzahl der eingesetzten Fahrzeuge und die resultierenden Gesamtkosten (siehe Tabelle 11). Die Benchmarks einer erhöhten Obergrenze der täglichen Kurier-Arbeitszeit zeigen die hypothetischen Auswirkungen auf die Entscheidungsvariablen. Bezüglich der Festlegung des Parameters sind somit die nationalen bzw. regionalen Gesetze vom EUS-Nutzer zu berücksichtigen, welche im Allgemeinen durch entsprechende Rechtsgrundlagen geregelt sind (z.B. in Deutschland durch das Arbeitszeitgesetz).

Auch wenn die dargestellten Ergebnisse nicht allgemeingültig sind, zeigen sie, dass heterogene Flotten effizienter sein können als homogene. Nichtsdestotrotz ermöglichen die Implementierung des Optimierungsmodells in der Software GAMS und das darauf aufbauende EUS die Durchführung von Szenarioanalysen mit selbstdefinierten Parameterkombinationen durch KEP-Dienstleister, Stadtplaner und andere Entscheidungsträger.

3. Optimierung eines neuen Logistik-Konzepts für e-Grocery Lieferungen im urbanen Raum

Dieses Kapitel behandelt die Thematik der innerstädtischen Zustellung von online bestellten Lebensmitteln und anderen Konsumgütern des täglichen Bedarfs, dem sog. e-Grocery. In Bezug zu Abbildung 6 in Kapitel 1.1 kann das Thema dem Güterwirtschaftsverkehr zugeordnet werden. Hierzu wird ein neuartiges Logistik-Konzept für die letzte Meile vorgestellt, welches den Zielkonflikt einer Kostenminimierung und einer Vermeidung lokaler Emissionen adressiert. Zur Maximierung der Effizienz der Transporte wurde ein mehrstufiger Optimierungsansatz entwickelt.

Der ursprüngliche Ansatz umfasst zwei Optimierungsstufen und ist in dem Artikel „Decision Support for Urban E-Grocery Operations“ (Leyerer et al., 2018; Anhang B) detailliert erläutert. Der Autor dieser Dissertation hat das Paper in Zusammenarbeit mit Marc-Oliver Sonneberg sowie Prof. Dr. Michael H. Breitner verfasst und schließlich auf der 24. *Americas Conference on Information Systems (AMCIS)* in New Orleans, Louisiana, USA (16.-18.08.2018) präsentiert. Die Veröffentlichung basiert auf einem double-blind peer-review Verfahren und erfolgte nach dem Abschluss einer Revisionsrunde. Die wissenschaftliche Qualität der Konferenz wird von der WKWI mit „B“ und im JQ3 mit „D“ bewertet. Der Artikel wurde in dem Track „Information Systems for Sustainable and Resilient Businesses and Supply Chains“ vorgestellt und mit dem Award für das beste Konferenz-Paper ausgezeichnet. Die positive Resonanz und die Vernetzung mit der *AIS Special Interest Group in Green IS* haben zur Verbesserung des Ansatzes beigetragen.

Auf der Grundlage des beschriebenen AMCIS-Papers erfolgte die Weiterentwicklung des Optimierungsansatzes zu einem dreistufigen Verfahren. Durch die Erweiterungen können die zugrundeliegenden Zusammenhänge besser abgebildet und die einzelnen Entscheidungsvariablen präziser bestimmt werden. Der Artikel „Shortening the Last Mile of e-Grocery: Optimizing a New Logistics Concept for Urban Areas“ (Leyerer et al., 2020; Anhang I) Ansatz wurde gemeinsam mit Marc-Oliver Sonneberg, Maximilian Heumann und Prof. Dr. Michael H. Breitner vom IWI der LUH verfasst und ist in der Special Issue „Smart Cities and Data-driven Innovative Solutions“ des Open Access Journals *Smart Cities* erschienen. Die Inhalte dieses Kapitels basieren weitestgehend auf dem zuletzt genannten Artikel.

3.1. Einleitung

Während im vorherigen Kapitel die urbane Paketzustellung im Fokus der Betrachtung stand, geht es in diesem Abschnitt der Dissertation um den stetig wachsenden Markt des e-Grocery, also der Auslieferung von online bestellten Lebensmitteln bzw. Verbrauchsgütern an private Endkonsumenten. Sortiert nach der absoluten Marktgröße zeigt Abbildung 12 den Anteil des e-Grocery an den gesamten Lebensmittelumsätzen für ausgewählte Länder. Der Vergleich der Anteile in den Jahren 2018 und 2023 (Prognose) verdeutlicht die zunehmende Bedeutung dieses Vertriebskanals. Heute ist China mit 50,9 Mrd. US\$ der größte Markt des Online-Lebensmitteleinkaufs, gefolgt von den USA mit 23,9 Mrd. US\$. Für 2023 besteht die Prognose, dass Südkorea den weltweit höchsten e-Grocery Anteil haben wird (14,2%). In Europa wird e-Grocery hauptsächlich in den westlichen Ländern angeboten und genutzt. Hierbei ist das U.K. mit 14,6 Mrd. US\$ der größte europäische Markt und hat mit 6,0% (2018) auch einen vergleichsweise hohen e-Grocery Anteil (IGD, 2018).

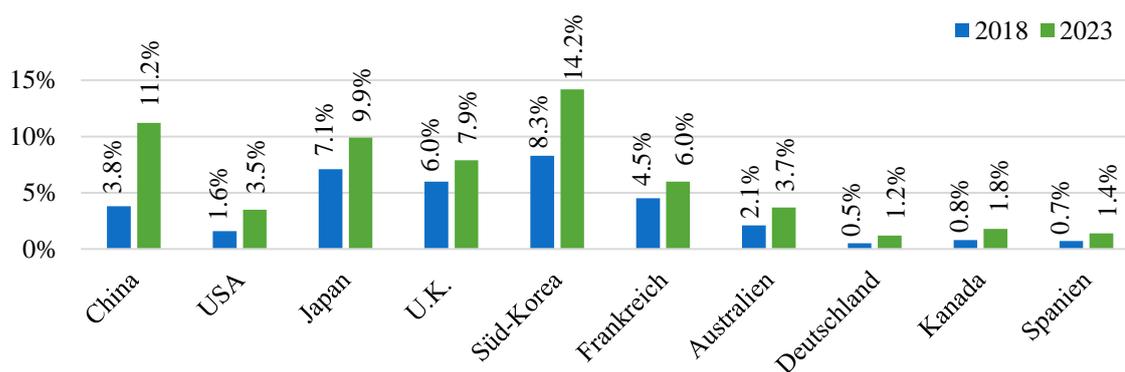


Abbildung 12. Anteil des e-Grocery nach Ländern im Jahr 2018 und 2023 (IGD, 2018)

Grundsätzlich gewinnt die ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit in allen Bereichen der Gesellschaft zunehmend an Bedeutung (Dedrick, 2010). Wie bereits zuvor beschrieben, sind im Zuge des globalen Klimawandels sämtliche Transportvorgänge langfristig ökologisch nachhaltig zu gestalten. Somit besteht die Herausforderung, die steigenden Transportvolumina des e-Grocery umweltverträglich zu den Endkonsumenten zuzustellen. Dies erfordert vor allem in Städten neue Logistik-Konzepte für die letzte Meile der Lieferketten. Wie in Kapitel 2 dargestellt, setzen KEP-Dienstleister beispielsweise Mikro-Depots an innerstädtischen Standorten ein, um die Paketzustellung mit ECC durchzuführen, was zu einer entsprechenden Reduzierung des urbanen Straßenverkehrs führt (UPS, 2017). Daneben besteht die Möglichkeit, die Paketempfänger in den Zustellprozess zu integrieren. So werden etwa Paketabholorte (z.B. Paketstationen) eingerichtet,

an denen die Kunden ihre bestellten Waren selbst abholen können (Hübner et al., 2016). In beiden Fällen wird die letzte Meile verkürzt, um den Einsatz umweltfreundlicher Transportfahrzeuge zu ermöglichen und gleichzeitig effektive Prozesse zu gewährleisten. Logistik-Konzepte, die eine ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit adressieren, sind im e-Grocery Bereich heute kaum vorhanden. Um den beschriebenen Herausforderungen einer zunehmenden Urbanisierung, der damit verbundenen steigenden Nachfrage nach Verbrauchsgütern in Städten und der Notwendigkeit nachhaltiger Transportkonzepte für die letzte Meile mit Methoden der IS-Forschung zu begegnen, wird dieses Kapitel von der folgenden Forschungsfrage geleitet:

FF: Wie kann ein Optimierungsmodell die effiziente Gestaltung eines umweltfreundlichen Logistik-Konzepts für Lieferungen von online bestellten Lebensmitteln unterstützen?

Um diese Frage zu adressieren, wird ein Ansatz präsentiert, der ein neues Logistik-Konzept für den e-Grocery Bereich optimiert. Hierbei dient ein Netzwerk aus unterschiedlich temperierten Paketstationen, sog. „Grocery Locker“, der Zwischenlagerung von Lebensmitteln und anderen Konsumgütern des täglichen Bedarfs. Die Kunden können ihre Bestellungen entweder an den Grocery Lockern abholen oder eine Zustellung per ECC anfordern. Um die Standorte der Grocery Locker, die Touren von den Grocery Lockern zu den Kunden und die Touren von einem Depot zu den Grocery Lockern zu bestimmen, wird ein mehrstufiges Optimierungsmodell vorgestellt. Dieses minimiert die gesamten Betriebskosten über drei aufeinander folgende Stufen mit (1) einem LRP, (2) einem VRP mit Zeitfenstern und (3) einem VRP unter Berücksichtigung mehrerer Produkte, Zeitfenster und geteilten Lieferungen (engl. split-delivery). Die drei MILP sind in GAMS implementiert, um die computergestützte Lösung verschiedener Fälle und Analysen diverser Szenarien zu ermöglichen. Zur Evaluierung der Optimierungsmodelle werden ein Anwendungsbeispiel und Benchmarks dargestellt. Das Logistik-Konzept und der entwickelte Lösungsansatz richten sich an Lebensmitteleinzelhändler, KEP-Dienstleister und Stadtverwaltungen.

3.2. Theoretische Grundlagen

Zu der bereits beschriebenen Urbanisierung kommt ein steigendes Konsumverhalten der Menschen hinzu, was entsprechende Probleme innerhalb der Städte verursacht. So führt etwa die fortschreitende Digitalisierung dazu, dass die Stadtbewohner ihre Waren immer leichter online bestellen können und KEP-Dienstleister diese zu den Wohnorten oder zu

Abholpunkten transportieren (Savelsberg und Van Woensel, 2016). Konsumenten haben heutzutage die Vorteile, unabhängig von Geschäftszeiten und -orten einzukaufen, entsprechende Fahrt- und Einkaufszeiten einzusparen und aus einer größeren Produktvielfalt auswählen zu können. Diese Möglichkeiten sind nicht mehr auf unverderbliche Waren wie Kleidung oder Technik beschränkt, sondern schließen durch e-Grocery mittlerweile auch online erhältliche Verbrauchsgüter ein. Hierzu gehören Lebensmittel und Haushaltsartikel sowie andere Konsumgüter des täglichen Bedarfs (engl., fast-moving consumer goods).

Die Dienstleistung der Zustellung von Verbrauchsgütern wird von einer steigenden Anzahl an Lebensmitteleinzelhändlern angeboten. Diese sind entweder reine Online-Anbieter oder entwickeln sich von einem klassischen Einzelhändler mit nur einem Vertriebskanal zu einem Multi- oder sogar Omni-Channel-Retailer weiter (Wollenburg et al., 2018). Beim e-Grocery wird zwischen dem Kommissionierungsprozess (z.B. im Geschäft, Fulfillment Center, Depot) und dem Auslieferungsprozess unterschieden. Der vom Kunden zusammengestellte virtuelle Warenkorb wird als Paket oder in Tüten bis zur Haustür des Kunden oder an spezielle Abholpunkte geliefert (Hübner et al., 2016). Dabei verfügen die e-Grocery Anbieter entweder über einen eigenen Fuhrpark für die lokale bzw. regionale Belieferung oder sie versenden die Ware über Transportdienstleister. Ein eigener Fuhrpark hat die Vorteile von spezialisierten Lieferfahrzeugen für unterschiedliche Temperaturanforderungen und der Möglichkeit, kleinere Lieferzeitfenster anbieten zu können. Allerdings besteht der Nachteil, auf den lokalen bzw. regionalen Markt beschränkt zu sein (Hübner et al., 2016). Wie bereits in Abbildung 12 dargestellt, ist der Anteil des e-Grocery heutzutage zwar vergleichsweise gering, jedoch wird dieser in den kommenden Jahren zunehmen. Dies hängt stark von den Kosten der Zustellung und den Erfahrungen der Kunden bzgl. einer pünktlichen Lieferung im gewünschten Zeitfenster, der Richtigkeit, Vollständigkeit und Qualität der bestellten Waren ab (Wollenburg et al., 2018).

Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, wird die Auslieferung von Waren an Kunden als LMD bezeichnet, die den letzten und kostenintensivsten Teil der Lieferkette darstellt (Gevaers et al., 2009). Daher besteht ein zunehmender Bedarf an Lösungen und Konzepten, die Optimierungsansätze umfassen. Van Audenhove et al. (2015) identifizieren die vier Handlungsfelder Regulierung, Infrastruktur, Anreize und Technologie, um denjenigen Straßenverkehr, der durch die urbane Logistik induziert wird, zu reduzieren. Um positive Effekte zu erzielen, reicht es hierbei nicht aus, die Flotten zu elektrifizieren, da dadurch

keinerlei Straßenverkehr vermieden wird (Van Audenhove et al., 2015). Neue Geschäftsmodelle und Logistik-Konzepte entstehen am Markt oder werden im Rahmen von Pilotprojekten erprobt. Wie im vorherigen Kapitel dargestellt, existiert in der Paketbranche der Ansatz, ein Netzwerk aus innerstädtischen Mikro-Depots zu errichten. Von diesen Standorten aus werden die Kunden entweder mittels ECC beliefert oder können ihre Waren dort selbst abholen. Dieser Ansatz wird mittlerweile auch von e-Grocery Anbietern genutzt, die spezielle Sammelpunkte nutzen (Seidel et al., 2016). Der Gegenstand dieses Kapitels ist die Optimierung eines Netzwerkes aus unterschiedlich temperierten Paketstationen, sog. „Grocery Locker“, von denen die Kunden ihre Ware selbst abholen können oder die Ware mittels ECC ausgeliefert wird.

In der wissenschaftlichen Literatur wird das Thema e-Grocery bislang nicht besonders intensiv beforscht. Übersichten zu relevanten Forschungsthemen werden beispielsweise von Martín et al. (2019) sowie Mkansi et al. (2018) vorgestellt. Verschiedene Studien untersuchen die strategische Planung des Multi- und Omni-Channel Handels für den Verkauf von Verbrauchsgütern (z.B. Holzapfel et al., 2016; Hübner et al., 2016; Wollenburg et al., 2018). Darüber hinaus existieren Analysen zu Märkten, Anbietern, Preisstreuungen und der Kundenwahrnehmung von e-Grocery (z.B. Fedoseeva et al., 2017; Seidel et al., 2016; Seitz et al., 2017). Fikar (2018) stellt ein EUS vor, welches mittels agentenbasierter Simulation Lebensmittelverluste ermittelt und dabei Verzögerungen sowie Ineffizienzen quantifiziert. Das Ergebnis sind Lager- und Transportstrategien, die den Zusammenhang zwischen Lebensmittelqualität und Fahrstrecke aufzeigen. Ein ähnlicher Ansatz wird von Waitz et al. (2018) vorgestellt. Das vorgestellte EUS ermöglicht es Nutzern, den Einfluss von verschiedenen Dienstleistungsumfängen und Logistikprozessen zu bewerten. Hinsichtlich der Routenoptimierung im Bereich des e-Grocery existieren verschiedene mathematische Optimierungsmodelle und heuristische Lösungsansätze, welche die Qualität der transportierten Verbrauchsgüter in Abhängigkeit zu Touren-Entscheidungen setzen (z.B. Amorim und Almada-Lobo, 2014; Hsu und Chen, 2014). Emeç et al. (2016) präsentieren ein VRP sowie eine Heuristik speziell für den Bereich des e-Grocery. Ihr Ansatz basiert auf einem Distributionsnetzwerk, bei dem Waren von einer Reihe externer Einzelhändler an mehreren Standorten erworben und anschließend an Kunden ausgeliefert werden. Die Gestaltung eines urbanen Netzwerkes aus unterschiedlich temperierten Paketstationen ist Teil des Optimierungsansatzes von Leyerer et al. (2018). Dies ist der zu-

vor beschriebene Ansatz, der als Grundlage für das Kapitel dient und entsprechend weiterentwickelt wurde. Einen allgemeinen Überblick über wissenschaftliche VRP- und LRP-Ansätze geben Eksioglu et al. (2009), welche die große Vielfalt der Anwendungen in diesem Forschungsbereich darstellen. Im Kontext von e-Grocery ist die Zustellung von Gütern auf der letzten Meile allerdings nur selten im Fokus der Betrachtung. Mkansi et al. (2018) empfehlen in ihrem Literaturüberblick intermodale Transporte mit Fahrrädern, Elektroautos und Lieferwagen sowie die Integration der Kunden in die Lieferprozesse, um die Probleme im Straßenverkehr anzugehen. Mit dem im Folgenden vorgestellten Logistik-Konzept und dem entwickelten Optimierungsmodell wird die aktuelle Forschungslücke eines e-Grocery Ansatzes, der sowohl effizient ist als auch Straßenverkehr vermeidet, adressiert.

3.3. Logistik-Konzept für die letzte Meile des e-Grocery

Um ein Gebiet mit Lebensmitteln und anderen Konsumgütern des täglichen Bedarfs zu versorgen, dient ein Netzwerk von unterschiedlich temperierten Paketstationen der Zwischenlagerung von online bestellten Waren. Von diesen sog. „Grocery Lockern“ erfolgt entweder eine Zustellung per ECC oder eine Selbstabholung der Kunden. Das Ziel ist es, die optimalen Standorte der Grocery Locker, die optimalen Zustellrouten von diesen Sammelpunkten zu den Kunden und die optimalen Routen für die Bestückung der Grocery Locker von einem Depot aus zu bestimmen. Um die Komplexität des beschriebenen Problems zu reduzieren, werden die einzelnen Entscheidungsvariablen über drei Optimierungsstufen bestimmt. Abbildung 13 veranschaulicht das beschriebene Logistik-Konzept und die einzelnen Stufen des Optimierungsansatzes.

Im ersten Schritt bestimmt ein angepasstes LRP, welches auf der Formulierung von Perl und Daskin (1985) basiert, die optimale Anzahl, Größen und Standorte der Grocery Locker. Hierzu sind gewisse Typen verfügbarer Grocery Locker und potenzielle Standorte, an denen diese errichtet werden können, anzugeben. Die große Vielfalt an verfügbaren Verbrauchsgütern ist mit unterschiedlichen Lagertemperaturen und Volumina der Produkte verbunden. Daher müssen unterschiedliche Größen und Typen (z.B. drei Temperaturzonen gefroren, gekühlt und trocken) von Grocery Lockern berücksichtigt werden. Außerdem erfolgt die Zuordnung von Kunden zu den Grocery Locker Standorten in der ersten Modellstufe. Die Kunden können ihre bestellten Produkte entweder selbst abholen oder eine Lieferung nach Hause per ECC anfordern. In beiden Fällen dienen die Grocery

Locker als Zwischenlager. Für diejenigen Kunden, die eine Lieferung nach Hause bevorzugen, ermöglichen die Grocery Locker eine umweltfreundliche Zustellung, da ECC für die vergleichsweise geringen Entfernungen zwischen den Grocery Lockern und den Kunden-Standorten genutzt werden können. Um die Belieferung der Grocery Locker schon bei der Netzwerkplanung zu berücksichtigen, werden die Routen der Lieferwagen bereits in der ersten Phase miteinbezogen. Das LRP minimiert die Summe der Betriebskosten der Grocery Locker sowie die variablen Transportkosten der Lieferwagen (im Folgenden als Vans bezeichnet).

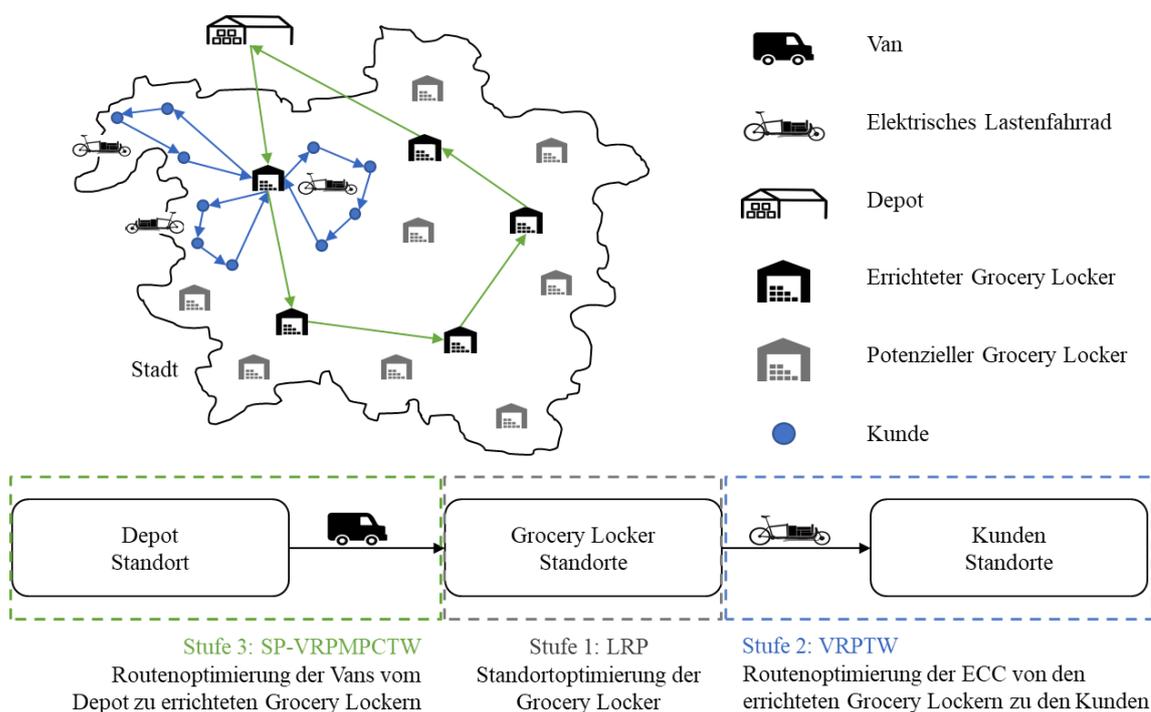


Abbildung 13. Überblick über das Logistik-Konzept für e-Grocery

In der zweiten Stufe werden die Routen der ECC von den Standorten der eröffneten Grocery Locker zu denjenigen Kunden, die eine Lieferung nach Hause fordern, optimiert. Dabei werden die Transportkosten minimiert, die in einem linearen Zusammenhang zu der Fahrstrecke der genutzten ECC stehen. Wegen der begrenzten Kapazität der ECC und durch den Einsatz von Kühlboxen muss die Entfernung von den Grocery Lockern zu den Kunden begrenzt sein, um die Anforderung einer durchgängigen Kühlkette sicherzustellen. Wie beim e-Grocery üblich, müssen Zeitfenster für alle Kunden berücksichtigt und eingehalten werden, sodass die zweite Modellstufe ein Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) darstellt.

Im dritten Schritt wird die Belieferung der Grocery Locker mit den bestellten Produkten geplant. Dabei müssen die unterschiedlichen Produkthanforderungen und Unverträglichkeiten berücksichtigt werden, z.B. darf Tiefkühlkost nicht zusammen mit Trockenware gelagert werden. Auch Zeitfenster müssen berücksichtigt werden, um die rechtzeitige Bestückung der Grocery Locker zu gewährleisten. Zu diesem Zweck wird ein angepasstes VRP dargestellt, welches von dem Modell von El Fallahi et al. (2008) abgeleitet ist. Die Routing-Entscheidungen zur Belieferung der Grocery Locker werden im operativen Kontext modelliert. Das VRP minimiert die Transportkosten der von einem Depot startenden Lieferfahrzeuge und berücksichtigt dabei vorgegebene Inkompatibilitäten zwischen Produkten, Zeitfenster und geteilte Lieferungen (engl. Split-Delivery Vehicle Routing Problem with Multiple Products, Compartments and Time Windows, SP-VRPMPCTW). Geteilte Lieferungen können die Optimalität der Lösung erhöhen und sind eine geeignete Eigenschaft in dem gegebenen Kontext. Da an den Grocery Lockern kein Personal zur Annahme der Waren erforderlich ist, wird die Servicequalität für den Endkunden nicht beeinträchtigt (Archetti et al., 2006). Obwohl die Fahrstrecken und die variablen Kosten der Vans, welche die Grocery Locker bestücken, bereits in der ersten Stufe enthalten sind, werden diese in der dritten Stufe aktualisiert, um detaillierte Routenentscheidungen unter Berücksichtigung der beschriebenen Nebenbedingungen zu treffen.

3.4. Optimierungsansatz

Zur Optimierung des beschriebenen Logistik-Konzept werden drei aufeinander folgende MILP formuliert. Die zugrunde liegenden Annahmen, die Nomenklatur und die mathematischen Modelle der drei Stufen sind im Folgenden erläutert.

3.4.1. Annahmen

Die folgenden Annahmen bilden die Grundlage der drei mathematischen Modelle:

- Die Kunden-Standorte sind gegeben und mit einem Nachfrageniveau für die verschiedenen Produkttypen versehen. Diese Nachfrage muss erfüllt werden, wobei sich die Produkttypen hinsichtlich der Anforderungen an die Kühlkette unterscheiden, die innerhalb des gesamten Lieferprozesses sichergestellt sein muss.
- Die potenziellen Standorte der Grocery Locker sind gegeben. Es existieren verschiedene Größen der Grocery Locker, die sich hinsichtlich ihrer Kapazität und Maße un-

terscheiden. Außerdem sind die Grocery Locker in Fächer unterteilt, um jede Produktart bei ihrer entsprechenden Lagertemperatur zu lagern. Der Betrieb eines Grocery Lockers ist durch einen vorhandenen Stromanschluss und einen Bildschirm für die Lager- und Abholvorgänge sichergestellt. Jeder errichtete Grocery Locker verfügt über eine Steckdose zum Aufladen der ECC-Batterien. Je nach Standort fallen unterschiedliche Betriebskosten der Grocery Locker an.

- Diejenigen Kunden, die eine Lieferung nach Hause fordern, erhalten ihre bestellten Produkte durch eine bestimmte Anzahl an ECC mit identischen Spezifikationen. Jede Tour beginnt und endet dabei an dem gleichen Grocery Locker. Verschiedene Produkttypen werden gleichzeitig geliefert, um jeden Kunden-Standort nur einmal anzufahren. Die Kapazität eines ECC ist begrenzt und es werden Kühlboxen zur Erhaltung der Temperatur eingesetzt. Um die Einhaltung einer durchgängigen Kühlkette sicherzustellen, ist die Länge der einzelnen ECC-Touren begrenzt.
- Die Grocery Locker werden von einem gegebenen Depot mit den bestellten Produkten beliefert. Sämtliche Touren beginnen und enden an diesem Depot, in dem alle bestellten Verbrauchsgüter in ausreichender Menge gelagert werden.
- Die Vans, die zur Versorgung der Grocery Locker eingesetzt werden, sind gegeben und weisen identische Eigenschaften auf. Der Transportraum der Vans ist in die Anzahl der Produkttypen unterteilt, die wiederum mit Fächern ausgestattet sind und die Erhaltung der jeweils erforderlichen Lagertemperatur sicherstellen. Die Versorgung verschiedener Grocery Locker kann in verschiedenen Touren erfolgen, da geteilte Lieferungen zulässig sind. Für die pünktliche Belieferung der Kunden wird die Versorgung der Grocery Locker durch Zeitfenster eingeschränkt.

3.4.2. Nomenklatur

Die folgende Tabelle 12 enthält die zugrunde liegende Notation der Mengen, der Parameter und der Entscheidungsvariablen für das LRP, das VRPTW und das SP-VRPMPCTW.

Tabelle 12. Verwendete Mengen, Parameter und Entscheidungsvariablen

Mengen	
$a, b, r \in \theta \cup S$	Knoten des SP – VRPMPCTW
$g, h, l \in N \cup M$	Knoten des LRP und des VRPTW
$j \in J$	Größen der Grocery Locker
$k \in K$	ECC – Touren
$m \in M$	Potenzielle Standorte der Grocery Locker
$n \in N$	Kunden
$p \in P$	Produkttypen
$s, \sigma \in S \subseteq M$	Eröffnete Grocery Locker
$v \in V$	Van – Touren
$\beta, \phi \in \Omega \subseteq N$	Hauslieferungs – Kunden
$\eta \in \Pi \subseteq N$	Selbstabholer – Kunden
θ	Depot
Parameter	
c^{ecb}	Durchschnittliche Kosten je Distanzeinheit der ECC
c^{van}	Durchschnittliche Kosten je Distanzeinheit der Vans
$d_{\beta p}$	Nachfrage nach Produkttyp p von Hauslieferungs – Kunde β
$d_{\eta ps}$	Nachfrage nach Produkttyp p von Selbstabholer – Kunde η gelagert in Grocery Locker s
d_{np}	Nachfrage nach Produkttyp p von Kunde n
F_{jm}	Betriebskosten eines Grocery Locker der Größe j am Standort m
\mathcal{M}	Hinreichend große Zahl
Q^{ecb}	Kapazität eines ECC
Q_{jp}^{gl}	Kapazität eines Grocery Locker der Größe j für Produkttyp p
Q_{vp}^{van}	Kapazität für Produkttyp p in der Van – Tour v
q_{sp}	Erforderliche Menge des Produkttyps p im Grocery Locker s
T_{β}^{min}	Beginn des Zeitfensters von Hauslieferungs – Kunde β
T_{β}^{max}	Ende des Zeitfensters von Hauslieferungs – Kunde β
T_a^{min}	Beginn des Zeitfensters zur Beladung am Knoten a
T_a^{max}	Ende des Zeitfensters zur Beladung am Knoten a
α	Maximale Distanz zwischen einem Grocery Locker und den zugewiesenen Kunden
Δ_{gh}^{ecb}	Fahrstrecke eines ECC zwischen den Knoten g und h
Δ_{ab}^{van}	Fahrstrecke eines Vans zwischen den Knoten a und b
$\bar{\Delta}^{ecb}$	Maximale Distanz einer ECC – Tour
$\bar{\Delta}^{van}$	Maximale Distanz einer Van – Tour
δ_{gh}^{ecb}	Fahrzeit eines ECC zwischen den Knoten g and h
δ_{ab}^{van}	Fahrzeit eines Vans zwischen den Knoten a and b
τ	Durchschnittliche Servicezeit je Kunde
λ	Durchschnittliche Umschlagszeit je Produkteinheit
Entscheidungsvariablen	
o_{jm}	1, wenn ein Grocery Locker der Größe j am Standort m eröffnet wird; 0, sonst
t_{av}	Ankunftszeit am Knoten a in Van – Tour v
$t_{\beta k}$	Ankunftszeit bei Hauslieferungs – Kunde β in ECC – Tour k
u_l	$l \in N$; Hilfsvariable um Kurzzyklen zwischen Kunden zu vermeiden
u_{rv}	$r \in S$; Hilfsvariable um Kurzzyklen zwischen Grocery Lockern zu vermeiden
x_{ghk}	1, wenn Knoten g vor Knoten h in ECC – Tour k angefahren wird; 0, sonst
x'_{abv}	1, wenn Knoten a vor Knoten b in Van – Tour v angefahren wird; 0, sonst
y_{nm}	1, wenn Kunde n dem Grocery Locker am Standort m zugewiesen ist; 0, sonst
z_{svp}	1, wenn Produkttyp p zu Grocery Locker s in Van – Tour v geliefert wird; 0, sonst

3.4.3. Modellstufe 1: LRP

Im Folgenden sind die Zielfunktion und die bei der Optimierung zu berücksichtigenden Nebenbedingungen des MILP der ersten Modellstufe dargestellt.

$$\text{Min. } \sum_j \sum_m F_{jm} \cdot o_{jm} + \sum_j \sum_m \sum_{\theta} \Delta_{\theta m}^{van} \cdot c^{van} \cdot o_{jm} \quad (19)$$

$$\Delta_{gh}^{ecb} \cdot y_{nm} \leq \alpha \quad \forall n, m \quad (20)$$

$$\sum_m y_{nm} = 1 \quad \forall n \quad (21)$$

$$\sum_j o_{jm} \geq y_{nm} \quad \forall n, m \quad (22)$$

$$\sum_j o_{jm} \leq 1 \quad \forall m \quad (23)$$

$$\sum_n d_{np} \cdot y_{nm} \leq \sum_j Q_{jp}^{gl} \cdot o_{jm} \quad \forall m, p \quad (24)$$

$$o_{jm} \in \{0,1\} \quad \forall j, m \quad (25)$$

$$y_{nm} \in \{0,1\} \quad \forall n, m \quad (26)$$

Die Zielfunktion in (19) minimiert die Kosten für den Betrieb der Grocery Locker und deren Belieferung mit den gewünschten Produkten vom Depot aus. Durch die Integration der Transportkosten in der ersten Modellstufe wird die Entscheidung über die optimalen Standorte der Grocery Locker ganzheitlich getroffen, wodurch die Gesamtkosten langfristig niedriger sind (Salhi und Rand, 1989). Mit Nebenbedingung (20) wird die Entfernung zwischen einem eröffneten Grocery Locker und dessen zugeordneten Kunden begrenzt, sodass diese kleiner als eine vorgegebene Distanz sein muss. Die Formulierung erfüllt dadurch zwei Aufgaben: für den Fall der Selbstabholung durch Kunden repräsentiert die Nebenbedingung das angestrebte Serviceniveau. Ein eröffneter Grocery Locker soll demnach nur diejenigen Kunden bedienen, die in dessen Zuständigkeitsbereich mit dem Radius α fallen. Ist die Distanz zu einem Kunden größer als α , muss dieser von einem anderen, nähergelegenen Standort bedient werden. Wie Iwan et al. (2016) mit ihrer Umfrage zur Paketzustellung herausgefunden haben, ist die Platzierung von Abholorten nahe den Wohnorten der Paketempfänger ein entscheidender Faktor für die Akzeptanz der Selbstabholung. Darüber hinaus dient das α in Nebenbedingung (20) dazu, die Fahrstrecke der ECC gering zu halten, damit die Einhaltung einer durchgängigen Kühlkette gewährleistet werden kann. Ein niedriger (hoher) α -Wert führt somit zu einem dichten (dünnen) Netzwerk von Grocery Lockern. Die Nebenbedingung (21) garantiert, dass jeder Kunde genau einem eröffneten Grocery Locker zugeordnet ist. Nebenbedingung (22) stellt sicher, dass an jedem optimierten Standort ein Grocery Locker errichtet wird, um die jeweils zugeordneten Kunden zu bedienen. Die Nebenbedingung (23) stellt sicher, dass nur ein Grocery Locker Typ je Standort eingerichtet wird. Die Nebenbedingung (24)

ist für mehrere Zwecke notwendig: erstens darf die kumulierte Nachfrage der Kunden die Kapazität des zugewiesenen Grocery Lockers nicht übersteigen; zweitens wird sichergestellt, dass die Kunden nur zu tatsächlich existierenden Grocery Lockern zugewiesen werden; drittens werden der Standort und die Größe eines Grocery Lockers auf Grundlage der Nachfrage bestimmt. Nebenbedingungen (25) und (26) definieren die zulässigen Wertebereiche der Variablen o_{jm} und y_{nm} .

3.4.4. Modellstufe 2: VRPTW

Im Folgenden sind die Zielfunktion und die bei der Optimierung zu berücksichtigenden Nebenbedingungen des MILP der zweiten Modellstufe dargestellt.

$$\text{Min. } \sum_g \sum_h \sum_k \Delta_{gh}^{ecb} \cdot c^{ecb} \cdot x_{ghk} \quad (27)$$

$$\sum_h \sum_k x_{\beta hk} = 1 \quad \forall \beta \quad (28)$$

$$\sum_g x_{h g k} - \sum_g x_{g h k} = 0 \quad \forall h, k \quad (29)$$

$$\sum_{\beta} \sum_s x_{\beta s k} \leq 1 \quad \forall k \quad (30)$$

$$u_l - u_{\beta} + |\Omega| \cdot x_{l \beta k} \leq |\Omega| - 1 \quad \forall l \in \Omega, \beta, k \quad (31)$$

$$\sum_{\beta} \sum_h \sum_p d_{\beta p} \cdot x_{\beta h k} \leq Q^{ecb} \quad \forall k \quad (32)$$

$$\sum_g \sum_h \Delta_{gh}^{ecb} \cdot x_{ghk} \leq \bar{\Delta}^{ecb} \quad \forall k \quad (33)$$

$$\sum_{\beta} d_{\beta p} \cdot y_{\beta s} + \sum_{\eta} d_{\eta p s} \leq \sum_j Q_{jp}^{gl} * o_{jm} \quad \forall p, s \quad (34)$$

$$\sum_h (x_{\beta h k} + x_{s h k}) - y_{\beta s} \leq 1 \quad \forall \beta, s, k \quad (35)$$

$$\sum_s y_{\beta s} = 1 \quad \forall \beta \quad (36)$$

$$t_{\beta k} \geq T_{\beta}^{min} \quad \forall \beta, k \quad (37)$$

$$t_{\beta k} + \tau \leq T_{\beta}^{max} \quad \forall \beta, k \quad (38)$$

$$t_{gk} + \sum_{\phi} \sum_p d_{\phi p} \cdot x_{g \phi k} \cdot \lambda + \delta_{g\beta}^{ecb} - (1 - x_{g\beta k}) \cdot \mathcal{M} \leq t_{\beta k} \quad \forall g, \beta, k \quad (39)$$

$$t_{gk} + \tau + \delta_{gh}^{ecb} - (1 - x_{ghk}) \cdot \mathcal{M} \leq t_{hk} \quad \forall g, h, k; g \neq h \quad (40)$$

$$x_{ghk} \in \{0,1\} \quad \forall g, h, k \quad (41)$$

$$y_{\beta s} \in \{0,1\} \quad \forall \beta, s \quad (42)$$

Die Zielfunktion (27) minimiert die variablen Transportkosten der ECC für die Belieferung derjenigen Kunden, die ihre Produkte nach Hause bestellen. Die Transportkosten sind linear zur Fahrstrecke der ECC modelliert, sodass möglichst viele Kunden zu Touren zusammengefasst werden, um die kumulierte Distanz zu minimieren. Nebenbedingung (28) stellt sicher, dass jeder Kunden-Standort in genau einer ECC-Tour angefahren wird. Die Nebenbedingung (29) stellt sicher, dass jeder von den ECC angefahrte Kunden-Standort auch wieder verlassen wird. Jede ECC-Tour muss einem Grocery Locker zugeordnet werden, um geteilte Lieferungen von mehreren Standorten zu verhindern (30). Nebenbedingung (31) gewährleistet die Vermeidung von Kurzyklen zwischen Kunden-Standorten. Nebenbedingung (32) stellt die Einhaltung der verfügbaren Kapazität der eingesetzten Lastenfahräder sicher, die bei jeder ECC-Tour berücksichtigt werden muss. Um die Einhaltung der Kühlkette zu gewährleisten, dürfen die ECC-Touren nicht beliebig lang werden. Mit dem Parameter $\bar{\Delta}^{ecb}$ in Nebenbedingung (33) kann die maximale Länge der ECC-Touren definiert werden. Dies ist wichtig, da die Annahme besteht, dass die ECC nicht mit einem Kühlaggregat, sondern lediglich mit Kühlboxen ausgestattet sind. Die Nebenbedingung (34) garantiert, dass die Kapazität eines Grocery Lockers das Volumen der ihm zugeordneten Nachfrage übersteigt. Dabei müssen sowohl die Hauslieferungs- als auch die Selbstabholer-Kunden berücksichtigt werden. Während o_{jm} in der ersten Optimierungsstufe eine Entscheidungsvariable ist, dienen die dort bestimmten Werte in der zweiten Stufe als bekannter Parameter. Die Nebenbedingung (35) gewährleistet, dass Kunden und ECC-Touren einem Grocery Locker zugeordnet sind und Lieferungen von anderen Standorten verhindert werden. Nebenbedingung (36) stellt sicher, dass jeder Kunde genau einem Grocery Locker zugeordnet wird. Die Nebenbedingungen (37) - (40) bilden die zeitlichen Zusammenhänge für die Hauslieferungs-Kunden ab. Die Nebenbedingungen (37) und (38) stellen eine pünktliche Belieferung jedes Kunden sicher, sodass der Ankunftszeitpunkt des zugeordneten ECC innerhalb des jeweiligen Zeitfensters liegt und die Servicezeit τ berücksichtigt wird. Bei der Belieferung des ersten Kunden jeder ECC-Tour sind die anfallenden Umschlags- und Fahrzeiten zu berücksichtigen (39). Da die Umschlagszeit für die nachfolgenden Kunden irrelevant ist, ist die alleinige Betrachtung der Fahr- und Servicezeit zur Einhaltung der Zeitfenster angemessen (40). Die Nebenbedingungen (41) und (42) definieren die zulässigen Wertebereiche der Entscheidungsvariablen x_{ghk} und $y_{\beta s}$.

3.4.5. Modellstufe 3: SP-VRPMPCTW

Im Folgenden sind die Zielfunktion und die bei der Optimierung zu berücksichtigenden Nebenbedingungen des MILP der dritten Modellstufe dargestellt.

$$\text{Min. } \sum_a \sum_b \sum_v \Delta_{ab}^{van} \cdot c^{van} \cdot x'_{abv} \quad (43)$$

$$\sum_a x'_{asv} \leq 1 \quad \forall s, v \quad (44)$$

$$\sum_a x'_{asv} - \sum_a x'_{sav} = 0 \quad \forall s, v \quad (45)$$

$$u_{rv} - u_{sv} + |S| \cdot x'_{rsv} \leq |S| - 1 \quad \forall r \in S, s, v \quad (46)$$

$$z_{svp} \leq \sum_a x'_{asv} \quad \forall s, v, p \quad (47)$$

$$\sum_v z_{svp} \leq 1 \quad \forall s, p \quad (48)$$

$$q_{sp} \leq \sum_v z_{svp} \cdot \mathcal{M} \quad \forall s, p \quad (49)$$

$$\sum_s z_{svp} \cdot q_{sp} \leq Q_{vp}^{van} \quad \forall v, p \quad (50)$$

$$\sum_a \sum_b \Delta_{ab}^{van} \cdot x'_{abv} \leq \bar{\Delta}^{van} \quad \forall v \quad (51)$$

$$t_{av} \geq T_a^{min} \quad \forall a, v \quad (52)$$

$$t_{av} + \sum_p q_{ap} \cdot z_{avp} \cdot \lambda \leq T_a^{max} \quad \forall a, v \quad (53)$$

$$t_{\theta v} + \sum_p \sum_\sigma q_{\sigma p} \cdot z_{\sigma vp} \cdot \lambda + \delta_{\theta s}^{van} - (1 - x'_{\theta sv}) \cdot \mathcal{M} \leq t_{sv} \quad \forall s, v \quad (54)$$

$$t_{av} + \sum_p q_{ap} \cdot z_{avp} \cdot \lambda + \delta_{ab}^{van} - (1 - x'_{abv}) \cdot \mathcal{M} \leq t_{bv} \quad \forall a, b, v; a \neq b \quad (55)$$

$$x'_{abv} \in \{0,1\} \quad \forall a, b, v \quad (56)$$

$$z_{svp} \in \{0,1\} \quad \forall s, v, p \quad (57)$$

Die Zielfunktion (43) minimiert die variablen Transportkosten der Vans, die für die Versorgung der eröffneten Grocery Locker anfallen. Wie in der zweiten Stufe sind die Transportkosten auch hier linear zur Fahrstrecke modelliert. Nebenbedingung (44) garantiert, dass jeder Grocery Locker innerhalb einer Van-Tour höchstens einmal besucht wird. Ana-

log zum VRPTW stellt Nebenbedingung (45) den Tourenablauf der Vans sicher und Nebenbedingung (46) dient der Vermeidung von Kurzzyklen. Nebenbedingung (47) garantiert die Auslieferung der Produkte in bestehenden Touren. Mit (48) wird gewährleistet, dass die Belieferung der Grocery Locker mit einem Produkttyp nicht in mehreren Touren erfolgt. Die Grocery Locker können jedoch von mehr als einem Fahrzeug beliefert werden, da geteilte Lieferungen in der dritten Stufe zulässig sind (49). Die Nebenbedingung (50) stellt sicher, dass die Kapazität der produkttypbezogenen Fächer in den Vans nicht überschritten wird. Durch den Parameter $\bar{\Delta}^{van}$ in Nebenbedingung (51) wird die maximale Länge einer Van-Tour festgelegt. Die Nebenbedingungen (52) - (55) bilden die zeitlichen Zusammenhänge zur Belieferung der Grocery Locker ab. Der früheste Ankunftszeitpunkt eines Vans an einem Grocery Locker wird durch Nebenbedingung (52) definiert. Der späteste Ankunftszeitpunkt einschließlich der Umschlagszeit zur Bestückung eines Grocery Lockers wird durch Nebenbedingung (54) festgelegt. Die Ankunft an einem Grocery Locker muss später als die Ankunft an dem zuvor belieferten Grocery Locker erfolgen und dabei die Umschlagszeit sowie die Fahrzeit zwischen den beiden Orten berücksichtigen. Die Nebenbedingungen (54) und (55) beschränken den frühesten Ankunftszeitpunkt des ersten und der nachfolgenden Grocery Locker auf einer Van-Tour. Die Nebenbedingungen (56) und (57) definieren die zulässigen Wertebereiche der Entscheidungsvariablen x'_{abv} und z_{svp} .

3.5. Anwendungsfall und Szenarioanalyse

Zur Evaluierung des entwickelten Optimierungsansatzes werden im Folgenden ein Anwendungsfall sowie eine Szenarioanalyse mit entsprechenden Benchmarks dargestellt.

3.5.1. Datensatz und Parameterdefinition

Um die Funktionsweise des beschriebenen Optimierungsansatzes zu bewerten, wird die Stadt Hannover als Anwendungsbeispiel zugrunde gelegt. Wie bereits zuvor beschrieben, ist Hannover eine mittelgroße Stadt mit mehr als 500.000 Einwohnern, die auf einer Fläche von rund 20.413 Hektar ($\cong 204,13 \text{ m}^2$) leben.

Zu Beginn ist es notwendig, ein Basisszenario mit sämtlichen Parameterwerten zu definieren, um anschließend Benchmarks berechnen zu können. Dabei werden ausgewählte Parameter in ihrer Ausprägung variiert, während alle anderen Eingangswerte identisch zum Basisszenario sind (*ceteris paribus*). Anhand der verschiedenen Szenarien lässt sich

der Effekt eines einzelnen Parameters auf die Entscheidungsvariablen gesondert analysieren. Der grundlegende Aufbau des Basisszenarios ist in Abbildung 14 dargestellt. Es sind 25 potenzielle Standorte für Grocery Locker (Dreiecke), 100 Kunden-Standorte (Punkte) und ein Depot, welches ca. 26 km außerhalb des Stadtzentrums liegt, definiert.

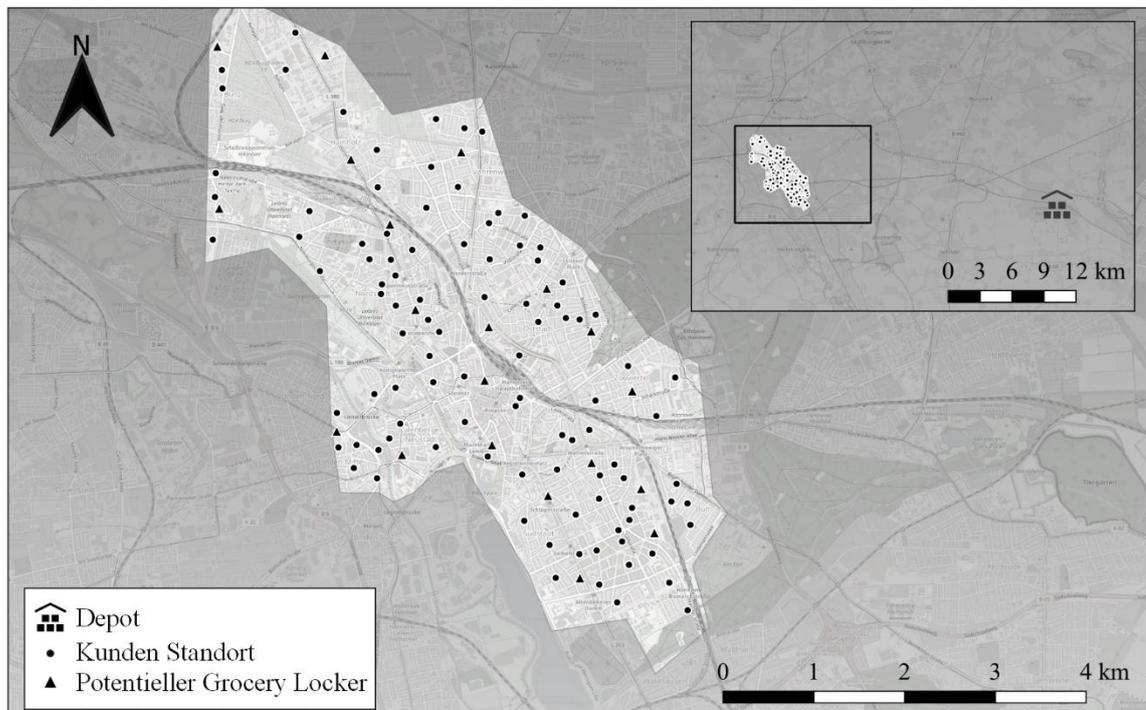


Abbildung 14. Betrachteter Untersuchungsraum und Verteilung der relevanten Standorte

Das Basisszenario umfasst somit 100 Kunden, die sich aus 50 Hauslieferungs- und 50 Selbstabholer-Kunden zusammensetzen, sodass sich ein Anteil von jeweils 50% ergibt. Jeder dieser Kunden hat eine Nachfrage von 1-6 Tüten aus drei Produktarten (0-1 Tüte von Tiefkühlprodukten, 0-2 Tüten von Kühlprodukten und 1-3 Tüten von Trockenprodukten). Diese Nachfrage muss vollständig bedient werden und die Belieferung der relevanten Kunden muss innerhalb der individuellen Zeitfenster zwischen 6 und 20 Uhr erfolgen. Wie beim e-Grocery üblich, werden die bestellten Produkte in standardisierten Transportbehältern wie Paketen, Kisten oder Tüten verpackt. Die Kapazitäten der Transportfahrzeuge und die unterschiedlichen Größen der Grocery Locker sind daher als Obergrenze der maximal lagerfähigen Tüten angegeben. Hinsichtlich des Konzeptes der Grocery Locker, also Abholstationen mit einer abschnittswisen Kühlfunktion, existieren bereits verschiedene Systeme von mehreren Anbietern, wie z.B. *emmasbox* oder *BentoBox* (Dell'Amico et al., 2011). Für diesen Anwendungsfall werden drei mögliche Größen der Grocery Locker angenommen, welche unterschiedliche Kapazitäten und Betriebskosten aufweisen: klein (50 Tüten; 10 €/Tag), mittel (100 Tüten; 19 €/Tag) und groß

(150 Tüten; 27 €/Tag). Die maximale Entfernung zwischen einem Kunden-Standort und dem ihm zugewiesenen Grocery Locker ist auf 1,25 km festgelegt. Die Zeitfenster für die geplante Bestückung der Grocery Locker liegen zwischen 3 und 6 Uhr. Die eingesetzten ECC können bis zu 20 Tüten pro Tour transportieren und verursachen durchschnittliche Transportkosten in Höhe von 0,1 €/km. Darüber hinaus darf eine ECC-Tour nicht länger als 30 km sein, um die Einhaltung einer durchgängigen Kühlkette zu gewährleisten. Die Fahrzeiten sowie die Fahrstrecken zwischen jeder potenziellen Grocery Locker Position und jedem Kunden-Standort werden automatisch mithilfe der Software *QGIS* generiert. Die Servicezeit beträgt 10 Minuten pro Kunde und die Umschlagszeit für die Verladung der Verbrauchsgüter umfasst 15 Sekunden pro Tüte. Die Vans, die zur Belieferung der Grocery Locker eingesetzt werden, besitzen eine maximale Reichweite von 300 km/Tag und verursachen durchschnittliche Transportkosten in Höhe von 0,3 €/km.

3.5.2. Szenarioanalyse und Diskussion der Ergebnisse

Die im Folgenden dargestellten Benchmarks wurden mit den drei entwickelten MILP und den beschriebenen Parametereinstellungen berechnet. Zwei relevante Eingangsgrößen werden variiert, um deren Einfluss auf die Entscheidungsvariablen zu analysieren. Die resultierenden Ergebnisse sind nachfolgend in Tabellenform dargestellt und beinhalten diejenigen Variablen, welche die resultierenden Kosten und Distanzen sowie die Netzwerkstruktur abbilden. Die Ergebnisse setzen sich dabei aus den drei Optimierungsstufen zusammen, sind in den Tabellen jedoch aufbereitet dargestellt. Aus der ersten Stufe ergeben sich die Anzahl und die Kosten der Grocery Locker. In der zweiten Stufe werden die Distanzen und die entsprechenden Kosten der ECC ermittelt. Aus der dritten Optimierungsstufe resultieren schließlich die Distanzen und die zugehörigen Kosten der Vans. Die Gesamtkosten ergeben sich aus der mehrstufigen Optimierung als Summe der einzelnen Kostenbestandteile.

Zunächst wird das Verhältnis der Hauslieferungs- und Selbstabholer-Kunden variiert, um die resultierenden Effekte auf die Entscheidungsvariablen zu untersuchen. Abhängig von diesem Verhältnis ist die Belieferung einer gewissen Kundenanzahl entweder kostenintensiver oder kostengünstiger für den e-Grocery Anbieter. Die jeweiligen Anteile werden zwischen 100% Hauslieferungs- und 0% Selbstabholer-Kunden sowie 0% Hauslieferungs- und 100% Selbstabholer-Kunden variiert. Die resultierenden Ergebnisse sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13. Benchmarks für verschiedene Anteile von Hauslieferungs- und Selbstabholer-Kunden

Hausliefer. / Selbstabhol. [%]	Anzahl an Grocery Lockern				Tägliche Distanz		Tägliche Kosten			
	klein [#]	mittel [#]	groß [#]	Σ [#]	ECC [km]	Vans [km]	Groc. Lock. [€]	ECC [€]	Vans [€]	Σ [€]
100/0	4	4	0	8	111,82	212,65	116,00	11,18	63,79	190,98
75/25	4	4	0	8	64,36	212,65	116,00	6,44	63,79	186,23
50/50	4	4	0	8	38,81	212,65	116,00	3,88	63,79	183,68
25/75	4	4	0	8	18,55	212,65	116,00	1,85	63,79	181,65
0/100	4	4	0	8	0,00	212,65	116,00	0,00	63,79	179,79

Das Verhältnis von Hauslieferungs- und Selbstabholer-Kunden beeinflusst primär den Prozess der Zustellung auf der letzten Meile. Bei einem Anteil von 100% Hauslieferungs-Kunden wird die letzte Meile vollständig von dem jeweiligen Lebensmitteleinzelhändler bzw. einem Transportdienstleister übernommen. Im Gegensatz dazu finden bei einem Anteil von 100% Selbstabholer-Kunden keine ECC-Touren statt, sodass auch keine Distanz zurückgelegt wird und keine ECC-Kosten entstehen. In den Szenarien mit steigendem Anteil von Hauslieferungs-Kunden nehmen die Anzahl der ECC-Touren, die gefahrenen Kilometer und die resultierenden ECC-Kosten stetig zu. Die Anzahl, die Größen, die Positionierung und die Kosten der Grocery Locker ändern sich mit einem unterschiedlichen Verhältnis nicht, da der Kapazitätsbedarf an den Sammelstellen unabhängig davon ist, ob die bestellten Produkte zu einem Hauslieferungs- oder Selbstabholer-Kunden gehören. Aus dem gleichen Grund bleiben die Tourenanzahl, die Fahrstrecke und die Kosten der Vans unverändert über sämtliche Benchmarks. Bei der Betrachtung der zurückgelegten Distanz der Vans ist vor allem der Ort, von dem die Grocery Locker versorgt werden, zu berücksichtigen. Wie oben beschrieben, liegt das Depot in diesem Anwendungsfall ca. 26 km außerhalb des Stadtzentrums, wodurch sich eine entsprechende Strecke zur An- und Abreise ergibt. Alternativ könnten auch konventionelle Lebensmittelgeschäfte innerhalb der Stadt als Ursprung der Touren genutzt werden. Jedoch ist bei steigenden e-Grocery Volumina eine Kommissionierung in dezentralen und separaten Umschlagszentren effizienter, da diese speziell für den Umschlag von online bestellten Waren ausgelegt sind (Hübner et al., 2016).

Obwohl eine Erhöhung des Anteils der Hauslieferungs-Kunden einen deutlichen Einfluss auf die zurückgelegte Strecke der ECC hat, sind die Auswirkungen auf die Gesamtkosten vergleichsweise gering. Steigt die Distanz der ECC von 0 km/Tag (0% Hauslieferungs-Kunden) auf 111,82 km/Tag (100% Hauslieferungs-Kunden), so erhöhen sich die Gesamtkosten von 179,79 €/Tag auf 190,98 €/Tag lediglich um 6,22%, was durch die gerin-

gen Transportkosten der ECC zu begründen ist. Mit jeder Erhöhung des Anteils der Hauslieferungs-Kunden um 25%-Punkte steigen die Gesamtkosten im Durchschnitt um 1,5%. Dagegen steigt die insgesamt zurückgelegte Distanz der ECC mit jeder Erhöhung um 25%-Punkte um durchschnittlich 27,95 km/Tag. Diese Differenz ist dadurch zu erklären, dass die Kosten in diesem Optimierungsansatz in einem operativen Planungskontext modelliert sind, wodurch lediglich die kurzfristigen, variablen Kostenbestandteile einbezogen sind. Wird ein mittelfristiger Zeithorizont betrachtet, so können bei einem dauerhaften Anteil von 100% Selbstabholer-Kunden zusätzlich die fixen Fahrzeugkosten der ECC (Leasing, Wartung, Versicherung etc.) sowie die Personalkosten für die Kurier der letzten Meile eingespart werden.

Wie Iwan et al. (2016) bereits für die Paketzustellung nachgewiesen haben, ist die Entfernung zwischen einem Abholort und den ihm zugewiesenen Kunden ein entscheidender Einflussfaktor für die Akzeptanz derartiger Logistik-Konzepte. In dem dargestellten Optimierungsansatz dient der Parameter α dazu, die maximale Distanz zwischen einem Grocery Locker und den ihm zugewiesenen Kunden zu definieren. Die Benchmarks in Tabelle 14 zeigen die resultierenden Ergebnisse für verschiedene α -Werte zwischen 0,5 und 2,0 Kilometer.

Tabelle 14. Benchmarks für verschiedene Maximaldistanzen zwischen Grocery Locker und Kunde

Max. Dist. [km]	Anzahl an Grocery Lockern				Tägliche Distanz		Tägliche Kosten			
	klein [#]	mittel [#]	groß [#]	Σ [#]	ECC [km]	Vans [km]	Groc. Lock. [€]	ECC [€]	Vans [€]	Σ [€]
0,50	25	0	0	25	24,30	225,56	250,00	2,43	67,67	320,10
0,75	19	0	0	19	32,55	223,87	190,00	3,26	67,17	260,42
1,25	4	4	0	8	38,81	212,65	116,00	3,88	63,79	183,68
1,75	2	0	3	5	43,82	209,89	101,00	4,38	62,97	168,35
2,00	0	1	3	4	50,95	202,32	100,00	5,09	60,70	165,79

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass eine Verringerung des α -Werts zu einer Erhöhung der Anzahl der errichteten Grocery Locker, der Fahrstrecken der Vans und der Gesamtkosten führt. Bei dem niedrigsten α -Wert von 0,5 km betragen die Gesamtkosten 320,10 €/Tag. Dabei werden 25 kleine Grocery Locker eröffnet und es resultieren Grocery Locker Kosten in Höhe von 250,00 €/Tag. Dies veranschaulicht, dass die Anzahl der eröffneten Grocery Locker aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten minimiert werden muss. Auf der anderen Seite zeigt sich, dass die zurückgelegte Fahrstrecke der ECC durch eine erhöhte Grocery Locker Anzahl verringert wird. Somit erfolgt eine entsprechende Reduzierung des Lieferverkehrs auf der letzten Meile in städtischen Gebieten. Durch eine

erhöhte Grocery Locker Anzahl steigt hingegen die Gesamtdistanz der Vans. Durch den Einsatz der Sammelstellen kann dieser Straßenverkehr zur Bestückung der Grocery Locker jedoch in verkehrsarme Zeiten verlagert werden. Beim Betrieb von 25 Grocery Lockern (250,00 €/Tag, bei $\alpha = 0,5$ km) wird ausschließlich die Größe „klein“ verwendet. Beim Betrieb von acht Grocery Lockern ($\alpha = 1,25$ km) ist eine gemischte Einrichtung von vier kleinen und vier mittleren Sammelstellen optimal. Werden lediglich vier Grocery Locker eingesetzt ($\alpha = 2,0$ km), so sind eine mittlere und drei große Ausführungen zu errichten, die entsprechend an zentralen Stellen im Untersuchungsraum aufgestellt werden. Über einem bestimmten α -Wert (hier: 2,0 km) ändern sich die Größe sowie Zusammensetzung des Netzwerks aus Grocery Lockern und die Gesamtkosten nicht mehr, da sämtliche Kunden durch die kleinstmögliche Anzahl von Grocery Lockern beliefert werden können. Grundsätzlich lässt sich der Parameter α als Serviceniveau interpretieren. Je niedriger der Parameterwert ist, desto näher liegt ein Grocery Locker an den ihm zugewiesenen Kunden. Für den Fall der Selbstabholung ist dieses Serviceniveau ein entscheidender Faktor für die Kundenakzeptanz (Iwan et al., 2016). Zusätzlich ermöglichen kurze Wege den Kunden eine Abholung ihrer bestellten Produkte mit dem Fahrrad oder zu Fuß, wodurch der Straßenverkehr reduziert werden kann. Insgesamt lässt sich festhalten, dass aus einer rein wirtschaftlichen Perspektive die Anzahl der Grocery Locker zu minimieren und der Selbstabholer-Anteil zu maximieren ist, um das Szenario mit den geringsten Gesamtkosten zu realisieren.

Neben den dargestellten Ergebnissen, die verschiedene Ausprägungen des vorgestellten Logistik-Konzepts zeigen, können die Resultate mit der konventionellen Zustellung im e-Grocery Bereich verglichen werden. Dabei werden die bestellten Verbrauchsgüter vom Depot direkt zu den Kunden-Standorten geliefert, sodass die Zwischenlagerung in den Grocery Lockern sowie die Umladung auf ECC entfällt. Um eine entsprechende Vergleichbarkeit zu den Benchmarks in Tabelle 13 und 14 herzustellen, wird die dritte Modellstufe zur Berechnung der Ergebnisse einer konventionellen Zustellung verwendet. Anstelle der eröffneten Grocery Locker werden die Kunden-Standorte direkt von den Vans angefahren und bis auf die Verhinderung von geteilten Lieferungen bleiben alle anderen Nebenbedingungen sowie Eingangsparameter identisch. Für die Belieferung der 100 Kunden ergeben sich eine Fahrstrecke von 293,27 km und Gesamtkosten in Höhe von 87,97 €. Im Vergleich zu dem vorgestellten Logistik-Konzept ergeben sich damit folgende Unterschiede: das Szenario mit 100% Hauslieferungs- und 0% Selbstabholer-

Kunden (Maximaldistanz zwischen Grocery Locker und Kunden = 1,25 km) ist 103,01 €/Tag teurer (+117,1%), benötigt 48 m² (vier kleine Grocery Locker je 4 m² und vier mittlere Grocery Locker je 8 m²) mehr Fläche, aber reduziert die Fahrleistung der Vans um 80,62 km/Tag (-27,5%). Das Szenario mit 50% Hauslieferungs- und 50% Selbstabholer-Kunden (Maximaldistanz zwischen Grocery Locker und Kunden = 2,0 km) ist 77,82 €/Tag teurer (+88,5%), benötigt 44 m² (ein mittlerer Grocery Locker mit 8 m² und drei große Grocery Locker je 12 m²) mehr Fläche, aber reduziert die Fahrleistung der Vans um 90,95 km/Tag (-31,0%). Somit zeigt sich, dass das vorgestellte Logistik-Konzept einen höheren Flächenbedarf sowie deutlich erhöhte Gesamtkosten verursacht. Demgegenüber können die Fahrstrecke der Vans und die damit verbundenen Emissionen signifikant reduziert werden. Insbesondere der innerstädtische Straßenverkehr kann durch das Konzept entlastet werden, da die Vans in dem neuen Konzept nur noch wenige Sammelstellen und nicht eine Vielzahl von Kunden-Standorten anfahren müssen. Daher gilt es von e-Grocery Anbietern abzuwägen, ob eine Minimierung der Kosten und Flächenverbräuche oder eine Reduzierung der Fahrleistung zu priorisieren ist. Der Staat bzw. Kommunen können das vorgestellte Logistik-Konzept unterstützen, indem sie Flächen zur Errichtung von Grocery Lockern bereitstellen und ECC finanziell fördern, sodass die Mehrkosten der e-Grocery Anbieter minimiert werden.

Die dargestellten Benchmarks wurden durch die Implementierung des entwickelten Optimierungsansatzes in der Software GAMS (Version 24.5.6) mit dem Solver *IBM ILOG CPLEX* (Version 12.6.1) berechnet. Mit einem Standardrechner (Intel Core i5-6200U CPU 2,30 GHz, 8 GB RAM, Windows 10, 64-bit) variieren die Rechenzeiten der drei aufeinander folgenden Modellstufen, abhängig von der eingestellten Optimalitätslücke, der maximalen Rechenzeit und den gewählten Werten der Parameter. In dem dargestellten Anwendungsfall wird die erste Modellstufe (LRP) in wenigen Sekunden gelöst und die bestmögliche Lösung gefunden (relative Optimalitätslücke beträgt 0%). Die Optimierung der zweiten Stufe (VRPTW) wurde jeweils nach einer Stunde gestoppt und die Ergebnisse weisen einen relativen Abstand zur bestmöglichen Lösung von ca. 22% auf. Die Rechenzeit der dritten Stufe (SP-VRPMPCTW) wurde ebenfalls auf eine Stunde begrenzt und es ergeben sich Lösungen, die mindestens 36% von dem bestmöglichen Ergebnis entfernt sind.

4. Variable Entscheidungsunterstützung für individuelle Routenoptimierungsprobleme

Dieses Kapitel bezieht sich auf die Veröffentlichung „Individually Optimized Commercial Road Transport: A Decision Support System for Customizable Routing Problems“ (Leyerer et al., 2019a; Anhang F). In dem Paper geht es um ein flexibles EUS, welches die Optimierung von Routenplanungsproblemen verschiedener Branchen ermöglicht. Dadurch können die zurückgelegte Gesamtdistanz einer Fahrzeugflotte sowie die damit verbundenen Emissionen in unterschiedlichen Kontexten minimiert werden. In Bezug zu Abbildung 6 in Kapitel 1.1 kann das Thema dem übergeordneten Wirtschaftsverkehr zugeordnet werden, da das Tool eine Unterstützung für sämtliche Teilbereiche dieser Verkehrsart darstellt. An der Erstellung des Artikels waren Marc-Oliver Sonneberg, Maximilian Heumann und Prof. Dr. Michael H. Breitner vom IWI der LUH sowie Tim Kammann beteiligt. Die Veröffentlichung basiert auf einem peer-review Verfahren und erfolgte nach Abschluss von zwei Revisionsrunden. Der Artikel erschien 2019 in dem Open-Access Journal *Sustainability* des MDPI-Verlags. Das Journal hat einen IF von 2,075 und ist im JQ3 mit „C“ bewertet.

4.1. Einleitung

In der heutigen wettbewerbsintensiven Wirtschaft streben Unternehmen gut organisierte Logistikprozesse und Kostenreduzierungen an. Eine effiziente Auslieferung von Waren bzw. Durchführung von Dienstleistungen ist dabei entscheidend, da der Transport von Gütern und Personen ein wichtiger Kostenfaktor ist. Daher ist die Tourenplanung der verfügbaren Fahrzeuge (engl. vehicle routing) eine Möglichkeit, um Einsparungspotenziale zu realisieren (Drexl, 2012). Studien zeigen, dass optimierte Routen zu signifikanten Kostenreduktionen von bis zu 30% führen können (Hasle und Kloser, 2007; Toth und Vigo, 2001). Neben der wirtschaftlichen Bedeutung für einzelne Unternehmen ist die gesamtwirtschaftliche Relevanz einer effizienten Tourenplanung im Hinblick auf die ökologische Nachhaltigkeit hervorzuheben. Die Vermeidung von unnötig langen Fahrstrecken und ungenutzten Kapazitäten ermöglicht eine Entlastung der Straßeninfrastruktur und führt zu einer Reduktion von Emissionen sowie Staus (Cattaruzza et al., 2017).

Wie bereits im zweiten Kapitel beschrieben, wird die Bestimmung der optimalen Routen einer Fahrzeugflotte als VRP bezeichnet (Toth und Vigo, 2001). Das VRP existiert in

diversen Ausprägungen und wird seit mehr als 50 Jahren umfassend beforscht (Laporte, 2009). Typischerweise werden VRP zur Unterstützung von operativen und taktischen Entscheidungsprozessen im Transportwesen entwickelt (Lahyani et al., 2015). Ein menschlicher Planer kann zwar in der Lage sein, eine praktikable Tourenplanung für eine kleine Fahrzeugflotte innerhalb einer akzeptablen Zeitspanne durchzuführen. Jedoch sind derartige manuelle Lösungen in der Regel weit vom optimalen Ergebnis entfernt, insbesondere bei größeren Planungsproblemen oder wenn spezielle Nebenbedingungen wie Zeitfenster und Kapazitätsbeschränkungen zu berücksichtigen sind (Rademeyer und Lubinsky, 2017). Während die Forschung immer nach neuen Varianten und Lösungsmethoden für das VRP strebt, wird ein Großteil der Modelle dafür kritisiert, zu sehr auf idealisierte Bedingungen und unrealistische Annahmen für praktische Anwendungen fokussiert zu sein (Hartl et al., 2006). Um diese Forschungslücke zu adressieren, wurde die DSR-Methodik zur Entwicklung eines EUS angewandt. Das Tool soll Routenoptimierungsprobleme für verschiedene geschäftliche Kontexte des Wirtschaftsverkehrs lösen. Das EUS muss dabei sowohl die gewünschte Zielfunktion als auch die Nebenbedingungen in ein VRP-Modell übertragen und strukturell unterschiedliche Probleme lösen können (Lahyani et al., 2014). Durch die beschriebenen Anforderungen und Herausforderungen lässt sich die folgende Forschungsfrage formulieren:

FF: Wie kann ein individualisierbares VRP in einem EUS implementiert werden und eine Routenoptimierung für verschiedene Branchen des Wirtschaftsverkehrs ermöglichen?

Um dieser Frage nachzugehen, werden zunächst verschiedene VRP-Attribute beschrieben und klassifiziert. Außerdem erfolgt die Durchführung einer systematischen Literaturrecherche und die Einordnung der relevanten wissenschaftlichen Artikel, basierend auf den jeweils einbezogenen VRP-Attributen. Anschließend wird das entwickelte IS-Artefakt, das *Multi-Attribute Vehicle Routing Decision Support System* (MAVRDSS), vorgestellt. Dieses EUS dient dazu verschiedene VRP-Attribute in einem generischen und flexiblen Optimierungsmodell zusammenzufassen. Dadurch ermöglicht es einem Nutzer das zugrunde liegende Tourenplanungs-Problem seines individuellen Geschäftskontexts zu formulieren und zu lösen. Das entwickelte EUS besteht als Prototyp in Form einer Web-Applikation, deren Komponenten und Funktionen in diesem Kapitel detailliert beschrieben werden. Zur Evaluierung des MAVRDSS werden Benchmarks für öffentlich verfügbare Datensätze aus der Wissenschaft und Simulationsergebnisse zwei realer Anwendungsfälle im Kontext der urbanen Logistik präsentiert.

4.2. Theoretische Grundlagen und Literaturüberblick

Grundsätzlich stellt das VRP ein eigenständiges Fachgebiet im Bereich des Operations Research und der Informatik dar, was auch durch die große Anzahl der wissenschaftlichen Artikel in diesem Bereich deutlich wird (Toth und Vigo, 2001; Baldacci et al., 2008). Hinsichtlich des Planungshorizonts von Transport- und Logistikprozessen unterstützt das VRP kurzfristige und alltägliche Entscheidungen im Zusammenhang mit Transporten von Gütern und Personen. Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten VRP-Attribute bzw. zu berücksichtigenden Nebenbedingungen gegeben. Das Ziel des Literaturüberblicks ist es, Erkenntnisse über aktuelle „real-world“ Probleme im Transportwesen festzustellen und dabei effiziente Lösungsansätze für Routingmodelle aufzunehmen. Da das entwickelte EUS für eine Vielzahl von Routing-Problemen einsetzbar sein soll, bilden diese Erkenntnisse die Grundlage für die weitere Betrachtung. Die VRP-Forschung folgt dabei dem Trend, diejenigen Aspekte, die für das Routing in der Praxis wesentlich sind, einzubeziehen. „Real-world“ Probleme können folgendermaßen definiert werden: „Real-world problems are generally characterized by several interacting attributes, which describe their feasibility and optimality structures“ (Crainic et al., 2009a). Diejenigen Routing-Probleme, die eine Vielzahl möglicher Attribute und deren Kombinationen berücksichtigen, sind unter der Bezeichnung „Rich VRP“ zusammengefasst (Hartl et al., 2006). Derartige Modelle umfassen diverse Ziele sowie Nebenbedingungen und führen andere unabhängige Probleme zusammen (Caceres-Cruz et al., 2015). Wenn ein Modell eine Vielzahl von Nebenbedingungen und Zielsetzungen abbilden kann, ist es häufig auch unter dem Begriff „Multi-Attribut VRP“ zu finden (Crainic et al., 2009a; Crainic et al., 2009b; Vidal et al., 2012).

Tabelle 15 stellt eine Übersicht über die „real-word“ Attribute des VRP dar. Die Liste basiert auf dem Schema von Lahyani et al. (2015) und dient als Referenz für das entwickelte EUS. Die Übersicht umfasst die englische Bezeichnung und Abkürzung der VRP-Attribute sowie eine kurze Beschreibung der jeweiligen Merkmale. Da in der wissenschaftlichen Literatur noch diverse weitere Attribute existieren, besteht hierbei kein Anspruch auf Vollständigkeit. Hinsichtlich der jeweiligen Erläuterungen und dem entwickelten EUS werden die verschiedenen Standorte (z.B. Kunden, Zentrallager, Zwischenlager, Wohnorte der Fahrer) in nur zwei Arten von Knotenpunkten übersetzt: eine Menge von Knoten, bei denen eine Nachfrage existiert (im Folgenden *Kunden* genannt) und eine Menge von Knoten, bei denen keine Nachfrage besteht (im Folgenden *Depots* genannt).

Tabelle 15. Überblick über verbreitete VRP-Attribute, deren Abkürzung und Beschreibung

Attribut	Abk.	Beschreibung
Pickup and delivery	PD	Die Kunden können Abhol- und Zustellaufträge haben, die entweder nacheinander, getrennt oder gleichzeitig bearbeitet werden
Multiple depots	MD	Es existiert mehr als ein Knoten ohne Nachfrage; Fahrzeugtouren starten und/oder enden an mehr als einem Depot
Multiple periods	MP	Der Planungshorizont umfasst mehr als eine Periode und die Nachfrage wird auf Basis von Besuchsmustern gedeckt
Multiple products	MC	Fahrzeuge können mehr als einen Produkttyp transportieren (z.B. trockene, flüssige, gefrorene Güter)
Heterogeneous vehicles	HV	Die eingesetzten Fahrzeuge haben unterschiedliche Eigenschaften (z.B. Kosten, Kapazität, maximale Reichweite, Geschwindigkeit)
Capacitated vehicles	CV	Die eingesetzten Fahrzeuge haben eine begrenzte Transportkapazität
Limited range	LR	Die Länge einer Tour ist beschränkt (z.B. begrenzter Treibstoff, Emissionen)
Compartmentalized vehicles	VC	Unterschiedliche Produkttypen werden in getrennten Fächern des Fahrzeugs transportiert
Loading policy/ specific ordering	LP	Die Tourenpläne müssen bei der Belieferung der Kunden eine Beladungsstrategie berücksichtigen (z.B. "last-in-first-out")
Driver regulations	DR	Die Tourenpläne müssen die Gesetzgebung bzgl. der Arbeitszeit und Sicherheit der Fahrer berücksichtigen (z.B. Ruhezeiten)
Inventory considerations	IN	Die Nachfrage basiert auf den Lagerbeständen der Kunden (z.B. Vermeidung von ausgehenden Lagerbeständen)
Capacitated depots	CD	Die Depots haben eine begrenzte Kapazität
Multiple time windows	MW	Kunden haben mehr als ein Zeitfenster, in denen ihre Nachfrage bedient werden muss; bzw. das Zeitfenster ist durch mindestens eine Pause unterbrochen
Time window component:		Zeitliche Beschränkungen von:
-customers/requests	CT	-Kunden/Anfragen (z.B. Öffnungszeiten, Pausenzeiten)
-depots	DT	-Depots (z.B. Geschäftsschluss)
-vehicles/drivers	VT	-Fahrzeugen/Fahrern (z.B. Arbeitszeiten, Mittagspausen)
-roads	RT	-Straßen (z.B. zeitabhängige Einfahrrestriktionen)
Optional visits	OV	Die Kundenbesuche sind nicht obligatorisch, sodass die Optimierung die Auswahl der zu bedienenden Kunden umfasst
Multiple trips	MT	Die Fahrzeuge können mehr als eine Tour je Planungsperiode durchführen
Multiple visits/ split-deliveries	MV	Die Fahrzeuge können Kunden mehrfach anfahren, sodass geteilte Lieferungen zulässig sind
Open routes	OR	Der Start- und Endpunkt der Tour eines Fahrzeugs müssen nicht gleich sein
Incompatibilities	IC	Die Reihenfolge der Knoten muss physische Ein- oder Ausschlussbeschränkungen berücksichtigen (z.B. zwischen Fahrzeug und Kunde, Fahrzeug und Depot, Fahrzeug und Produkt, Kunde und Depot)
Precedence constraints	PC	Die Tourenpläne müssen bei der Belieferung der Kunden physische oder Service-Gründe berücksichtigen (z.B. Beladungsprobleme)
Balanced routes	BR	Der Umfang bzw. die Auslastung der Touren müssen ausgeglichen sein (z.B. Distanz, Dauer, transportierte Menge oder Kosten der Touren)
Objective components:		Der Gegenstand der Optimierung kann verschiedene Ziele umfassen:
-distance	DO	-Distanz (z.B. Minimierung der insgesamt zurückgelegten Distanz)
-times/durations	TO	-Zeit/Dauer (z.B. Minimierung der Reisezeiten oder Zeitfenster)
-vehicle/driver	VO	-Fahrzeug/Fahrer (z.B. Minimierung der Anzahl von Fahrzeugen/Fahrern)
-customer/request	CO	-Kunde/Anfrage (z.B. Maximierung der Anzahl von bedienten Kunden)
-facility/depot	FO	-Einrichtung/Depot (z.B. Minimierung der Anzahl erforderlicher Standorte)
-loads	LO	-Beladung (z.B. Minimierung der Anzahl oder Kosten der Beladung)
Multiple objectives	MO	Es existiert mehr als ein Optimierungsziel (z.B. Minimierung der fixen Fahrzeugkosten und der Transportkosten); mehrere Ziele können entweder durch Gewichtung oder eine hierarchische Reihenfolge priorisiert werden
Soft constraints	SC	Nebenbedingungen sind in der Zielfunktion integriert (z.B. Strafgebühren)

Die beschriebenen VRP-Attribute werden von vielen Wissenschaftlern in unterschiedlichen Kombinationen behandelt. Um den Stand der Forschung auf diesem Gebiet zu ermitteln, erfolgt die systematische Analyse und Klassifizierung der vorhandenen Literatur zu „Rich VRP“ bzw. „Multi-Attribut VRP“. Hinsichtlich der Begriffsbezeichnung sind drei wesentliche Punkte zu berücksichtigen: erstens ist die Definition des Begriffs "Rich"

zur Bezeichnung eines Modells unspezifisch, sodass sich die Verwendung unter Autoren deutlich unterscheiden kann. Einige Autoren verwenden den Begriff "Rich" gegebenenfalls nicht, obwohl ihr Modell diverse Attribute und Nebenbedingungen enthält. Zweitens entwickelt sich der Stand der VRP-Forschung ständig weiter. Modelle, die vor einigen Jahren von ihren Autoren explizit als "Rich" bezeichnet wurden, können heute gegebenenfalls nicht mehr als solche betrachtet werden. Drittens, obwohl die Begriffe "real-world" und "real-life" von vielen Autoren zur Beschreibung ihres Modells verwendet werden, kann sich der Grad der tatsächlichen Anwendung bedeutend unterscheiden. Während einige Autoren anschauliche und realistische Fallstudien darstellen, weisen andere Autoren lediglich auf mögliche Anwendungsfelder ihres Modells hin.

Um mit den beschriebenen Punkten umzugehen, wird der Leitfaden zur systematischen Literaturrecherche von Kitchenham et al. (2009) angewandt. Im ersten Schritt werden verschiedene Datenbanken herangezogen: *Google Scholar*, *Springer Link*, *AISel* und *Web of Science*. Dort wurde nach den Schlagworten "vehicle routing", "rich", "multi attribute", "multi feature", "real world" und "case study" in verschiedenen Kombinationen gesucht. Darüber hinaus wurde eine Vorwärts- und Rückwärtssuche nach der Methodik von Webster und Watson (2002) durchgeführt, die zu einer Gesamtzahl von 54 relevanten Artikeln führte. Im zweiten Schritt wurden Ausschlusskriterien genutzt, um den Forschungsbereich auf diejenigen Artikel einzugrenzen, die relevante Erkenntnisse über reale Transport- und Logistikprobleme sowie Modellierungsattribute liefern. Eingeschlossen wurden diejenigen Ansätze, die mindestens vier Modellattribute und einen praxisnahen Anwendungsfall enthalten. Um einen aktuellen und qualitativ hochwertigen Überblick zu gewährleisten, wurden Paper aus Tagungsbänden sowie Journalartikel, die vor 2009 veröffentlicht wurden, ausgeschlossen. Durch das beschriebene Vorgehen wurden insgesamt 25 Artikel als relevant eingestuft, deren Klassifizierung in Tabelle 16 abgebildet ist.

Wie die Tabelle 16 zeigt, wurden bereits diverse Routing Attribute (z.B. HV, CV, CT) und Zielfunktionselemente (z.B. DO, VO, MO) intensiv untersucht, aber kein Modell ist in der Lage, annähernd alle Merkmale zu erfassen. In der dargestellten Liste liegt die durchschnittliche Anzahl der enthaltenen VRP-Attribute bei 7,4. Die meisten Elemente wurden von Armas et al. (2015) implementiert, welche 14 der 32 aufgelisteten Modellattribute in ihrem Ansatz berücksichtigen. Grundsätzlich existieren sehr viele Artikel zum VRP und seinen vielfältigen Varianten. Eksioglu et al. (2009) stellen die Entwicklung der VRP-Forschung in den letzten Jahren dar. Dabei identifizieren sie über 1.000 Artikel in wissenschaftlichen Zeitschriften. Im Vergleich zu der in Tabelle 16 dargestellten geringen Anzahl von Multi-Attribut VRP sind die meisten der existierenden VRP-Artikel auf spezifische Einzelprobleme zugeschnitten, sodass eine entsprechende Flexibilität fehlt. Die Berücksichtigung von weniger häufig implementierten Attributen und insbesondere die Möglichkeit, verschiedene Nebenbedingungen zu kombinieren, stellen eine relevante Forschungslücke dar, die mit dem entwickelten EUS adressiert wird.

Um einen Nutzen für Transport- und andere Dienstleistungsunternehmen verschiedener Größen und Branchen zu ermöglichen, muss das VRP in ein benutzerfreundliches EUS eingebettet sein. Viele idealisierte Modelle sind jedoch häufig nicht in der Lage, die Vielfalt der Eigenschaften zu erfassen, die sich bei Tourenplanungsproblemen in der Praxis ergeben. In letzter Zeit hat sich die VRP-Forschung darauf konzentriert, mehr unterschiedliche Zielgegenstände und Nebenbedingungen in Optimierungsmodelle einzubinden, um die Komplexität der praktischen Anwendungen zu bewältigen. Darüber hinaus existieren verschiedene kommerzielle Webanwendungen zur Lösung des VRP, die jedoch aufgrund der geringen Auswahl an Problemspezifikationen nur eine begrenzte Nutzbarkeit bieten. Um in einer Vielzahl von Branchen anwendbar zu sein, muss ein EUS seine Allgemeingültigkeit bewahren und gleichzeitig die Berücksichtigung möglichst vieler Attribute bieten. Ein Anwender muss unter den genannten Attributen wählen können, die das jeweilige Problem am besten abbilden. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurde das MAVRDSS entwickelt, welches im nächsten Abschnitt detailliert vorgestellt wird.

4.3. Entscheidungsunterstützungssystem MAVRDSS

4.3.1. Anforderungen

Routing-Software wird hauptsächlich von denjenigen Unternehmen eingesetzt, die Güter produzieren und die entsprechenden Abholungen und/oder Belieferungen planen müssen sowie von Dienstleistungsunternehmen, die LKW-Ferntransporte anbieten oder Kurieren und Technikern (Drexl, 2012). Eine Erkenntnis ist, dass die meisten dieser Unternehmen relativ groß und auf Lieferungen spezialisiert sind (Speditionen, KEP-Dienstleister). Um die Entscheidungsträger verschiedener Branchen des Wirtschaftsverkehrs entsprechend zu unterstützen, wurde das MAVRDSS unter Einsatz des quelloffenen Webframeworks *Ruby on Rails* entwickelt. Die primäre Zielgruppe des Tools sind sämtliche kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die am urbanen Wirtschaftsverkehr teilnehmen und einen eigenen Fuhrpark betreiben, z.B. Handwerker, Zeitungszusteller sowie Paket-, Apotheken-, e-Grocery- und Pflegedienste. Da sich die meisten dieser Unternehmen auf der Basis ihrer eigens gesammelten Erfahrungen und Best Practices verhalten, setzen nur wenige eine geeignete Software zur Optimierung ihrer täglichen Tourenplanung ein. Daraus ergeben sich erhebliche Einsparungsmöglichkeiten hinsichtlich der Fahrstrecken, der Fahrzeiten, der Reisekosten, der Fahrzeugemissionen und dem daraus resultierenden Verkehrsaufkommen. Um diese ungenutzten Potenziale zu erschließen und insbesondere KMU ohne bestehende Routingoptimierung eine entsprechende Hilfestellung zu ermöglichen, muss das MAVRDSS möglichst viele VRP-Attribute abbilden können.

Hinsichtlich der Rechenzeit muss das MAVRDSS schnelle Empfehlungen der optimalen Touren für die Entscheidungsträger liefern. Die zunehmende Rechenleistung ermöglicht es Forschern, immer größere und komplexere kombinatorische Optimierungsprobleme zu lösen. Grundsätzlich sind über die Jahre diverse Lösungsmethoden für das NP-schwere (Nichtdeterministische Polynomialzeit) VRP entstanden (Lenstra und Kan, 1981). Die Methoden zur Lösung von Optimierungsproblemen lassen sich in zwei grundlegende Ansätze unterteilen: Exakte Methoden, die auf mathematischer Programmierung basieren, und Näherungsverfahren, die auf Heuristiken und Metaheuristiken basieren (Lin et al., 2014). Exakte Methoden können optimale Lösungen garantieren. In diesem Zusammenhang gilt die gemischt-ganzzahlige Programmierung (engl. mixed integer programming, MIP) als eines der leistungsstärksten Werkzeuge im Operations Research. Bei großen kombinatorischen Problemen sind jedoch selbst die besten MIP-Solver nicht in der Lage,

hochwertige Lösungen innerhalb akzeptabler Rechenzeiten zu liefern. Daher werden in der Forschung üblicherweise Heuristiken zur Lösung von VRP verwendet und entwickelt (Lahyani et al., 2015; Cordeau et al., 2002). Näherungsverfahren liefern auch für große Probleminstanzen gute Lösungen in kurzer Zeit, können aber keine Informationen über die Optimalität der Ergebnisse geben. Heuristiken sind meist auf die Lösung eines bestimmten Problems ausgerichtet. Durch das systematische Befolgen gewisser Schritte liegt der Fokus auf dem schnellen Ermitteln von zulässigen und guten Lösungen (Talbi, 2009). Im Gegensatz dazu sind Metaheuristiken vielseitige Algorithmen, die eine gründlichere Suche im Lösungsraum durchführen. Durch das Zulassen von schlechteren und teilweise unzulässigen Ergebnissen zielen diese darauf ab, akzeptable Lösungen in kurzen Rechenzeiten zu liefern. Sie sind für eine breitere Klasse von Problemen anwendbar und können als Leitstrategie zur Anpassung der zugrundeliegenden Heuristiken eingesetzt werden (Cordeau et al., 2002; Laporte, 1992). Metaheuristiken können in zwei Hauptklassen eingeteilt werden: lokale Suche (engl. local search) und populationsbasierte Suche (engl. population search). Diejenigen Methoden, die auf einer lokalen Suche basieren (z.B. Tabu-Suche), durchsuchen den Lösungsraum intensiv, indem sie iterativ von der aktuellen Lösung zu einer anderen erfolgversprechenden Lösung in ihrer Nachbarschaft übergehen. Algorithmen, die auf der populationsbasierten Suche beruhen (z.B. Genetische Algorithmen), haben ein Kontingent an guten Elternlösungen und rekombinieren diese zu vielversprechenden Nachkommen, die das Kontingent ergänzen bzw. ersetzen. Die Leistungsstärke eines lokalen Suchalgorithmus hängt weitgehend von seiner Fähigkeit ab, die Suche im Lösungsraum zu diversifizieren, d.h. aus lokalen Optima zu "entkommen" (Pisinger und Ropke, 2007). Die Entwicklung von problemunabhängigen Algorithmen zur Durchführung einer effizienten lokalen Suche ist ein aktives Forschungsthema. Hierbei existieren auch einige Artikel und Lösungsansätze zur Optimierung verschiedener Varianten des VRP (Vidal et al., 2012; Pisinger und Ropke, 2007; Kritzing et al., 2012). Die Anwendung derartiger Ansätze erfordert jedoch eine starke Expertise im Bereich der Algorithmen und ein erhebliches Maß der Benutzereinbindung (z.B. Definition von Nachbarschaften), welche in kleinen und mittleren Unternehmen der beschriebenen Branchen normalerweise nicht vorhanden ist. Laut Bräysy und Gendreau (2005) sollten Heuristiken die folgenden Eigenschaften aufweisen: hohe Lösungsqualität hinsichtlich des Zielfunktionswertes, schnell, einfach zu implementieren, flexibel und robust. Das entwickelte MAVRDSS adressiert diese Anforderungen und ermöglicht Anwendern ohne Optimierungskennnisse die Ermittlung der bestmöglichen Lösungen.

Basierend auf der VRP-Taxonomie von Eksioglu et al. (2009) und der in Kapitel 4.2 dargestellten Literaturübersicht ist das nachfolgende Schema zur Klassifizierung von „real-world“ VRP-Attributen abgeleitet (Abbildung 15). Dabei wurde die Komplexität der VRP-Taxonomie von Eksioglu et al. (2009) reduziert, da für das entwickelte MAVRDSS nicht alle Kategorien passend sind. Beispielsweise wird nicht zwischen verschiedenen Lösungsmethoden unterschieden, da ausschließlich ein heuristischer Ansatz zum Einsatz kommt. Eine solche Komplexitätsreduktion wird auch von Lahyani et al. (2015) empfohlen, die bestehende Taxonomien aufgrund ihres hohen Detaillierungsgrades als missverständlich bewerten. Das Ziel ist es dabei nicht, alle Besonderheiten und Unterschiede sämtlicher VRP-Varianten hervorzuheben, sondern die relevanten Modellattribute, die ein spezifisches VRP ausmachen können, aufzulisten.

I. Information Characteristics		II. Problem Physical Characteristics	
<i>input data</i>	<i>depots</i>	<i>vehicles</i>	<i>customers</i>
+input evolution	└ single	+type	└ unrestricted
└ static	└ multiple	└ homogenous	└ inventory considerations
└ dynamic		└ heterogeneous	
+input quality	<i>periods</i>	+capacity	<i>depots</i>
└ deterministic	└ single	└ unrestricted	└ unconstrained
└ stochastic	└ multiple	└ capacitated	└ capacitated
<i>travel mode</i>	<i>product types</i>	+range	<i>times</i>
└ unimodal	└ single	└ unlimited	└ unconstrained
└ multimodal	└ multiple	└ limited	└ time dimension
		+structure	+time window structure
		└ no compartments	└ single time window
		└ compartmentalized	└ multiple time windows
<i>number of vehicles</i>		+loading policy	└ loading policy
└ unlimited number		└ no policy	+time window components
└ bounded number		└ specific ordering	└ customers/requests
			└ depots
<i>customer requests</i>		<i>drivers</i>	└ vehicles/drivers
└ pickup or delivery		└ no regulations	└ roads
└ pickup and delivery		└ regulations	
III. Route Characteristics		IV. Objective Characteristics	
<i>node covering</i>	<i>incompatibilities</i>	<i>structure</i>	<i>components</i>
└ complete	└ all compatible	└ single objective	└ distance
└ optional visits	└ incompatibilities	└ multiple objectives	└ times
		└ weighted sum	└ vehicle/driver
<i>visit frequency</i>	<i>node coupling</i>	└ hierarchical ordering	└ customer/request
└ single visit	└ no precedence		└ depot
└ multiple visits / load	└ precedence constraints	<i>hardness of constraints</i>	└ load
└ splitting		└ hard constraints	
	<i>routes balancing</i>	└ soft constraints	
<i>depot connectivity</i>	└ no balancing		
└ closed routes	└ balanced routes		
└ open routes			
<i>vehicle use</i>			
└ single trip			
└ multiple trips			

Abbildung 15. Klassifizierung der implementierten VRP-Attribute

Wie bereits in Tabelle 15 umgesetzt, sind hier die englischen Bezeichnungen der Attribute abgebildet. Die möglichen VRP-Attribute werden in vier Kategorien eingeteilt, um

die jeweiligen Problemeigenschaften systematisch zu modellieren. Der Benutzer des MAVRDSS beschreibt die spezifischen Problemmerkmale und die dabei zu berücksichtigenden Nebenbedingungen in der dargestellten Reihenfolge (I-IV). Abbildung 15 zeigt außerdem, welche der aufgelisteten VRP-Attribute im MAVRDSS implementiert sind (schwarze Schrift). Im Hinblick auf die in Tabelle 15 dargestellten VRP-Attribute wurden 26 der 32 beschriebenen Attribute implementiert, wodurch eine hohe Flexibilität und ein breites Anwendungsspektrum gegeben ist. Aufgrund von Inkonsistenzen sind die Attribute in grauer Schrift nicht implementiert. Die generelle Funktionalität des Modells ist für nahezu alle Attributkombinationen erfüllt. Es bestehen nur wenige Inkompatibilitäten zwischen den Attributen, z.B. sind offene Routen nicht mit einem einzelnen Depot-Standort kompatibel. Darüber hinaus ist das Attribut „multiple trips“ inkompatibel mit dem Attribut „pickup and delivery“ und geteilte Lieferungen können nicht mit mehreren Touren kombiniert werden.

4.3.2. Funktionen und Benutzerinteraktion

Das MAVRDSS besteht als Prototyp in Form einer Webapplikation und läuft auf einem Remote-Server, um die rechenintensive Optimierung durchzuführen. Der Benutzer des MAVRDSS muss hingegen lediglich ein Gerät bedienen, welches einen Web-Browser unterstützt. Alle Benutzeraktionen werden über die GUI ausgeführt. Wie in Abbildung 16 dargestellt, besteht die Software aus fünf Hauptkomponenten: Modellkonfiguration, Eingabedaten, Optimierungseinstellungen, Ergebnisse und Visualisierung. Die Modellkonfiguration stellt den individualisierbaren Teil des VRP dar, die auf den Attributen des Klassifikationsschemas basiert. Mit den in Abbildung 15 dargestellten vielfältigen Konfigurationsmöglichkeiten lassen sich diverse Anwendungsfälle des urbanen Wirtschaftsverkehrs unter Berücksichtigung der branchenspezifischen Nebenbedingungen abbilden. Über den gesamten Konfigurationsprozess stehen dem Benutzer Informationen zu den einzelnen Modellattributen zur Verfügung. Die Eingabedaten beziehen sich auf die Eigenschaften und Standorte der Kunden, der Depots und der Fahrzeuge sowie deren Beziehungen. Durch das Ausfüllen von gewissen Eingabemasken kann ein Benutzer die Parameterwerte der Kunden, Depots etc. anlegen. Die Optimierungseinstellungen beziehen sich auf benutzerseitige Konfigurationen des Optimierungsprozesses, die vor einem Optimierungslauf eingestellt werden können (z.B. Festlegung der maximalen Rechenzeit). Das MAVRDSS bietet ein „Interface-to-Database“ System, welches das Schreiben, Bearbeiten und Lesen der relevanten Daten ermöglicht. Eine Fortschrittsanzeige visualisiert

dabei den Status der Konfiguration. Nach dem Speichern der Modellkonfiguration, der Eingabedaten und der Optimierungseinstellungen in der Datenbank (DB) kann der Benutzer einen Optimierungslauf starten. Sämtliche Informationen werden dann in ein fallspezifisches Optimierungsmodell überführt und zur Lösung an die Software *LocalSolver* übergeben. *LocalSolver* ist ein mathematischer Solver, der auf der Technik der lokalen Suche basiert und dem sog. „model-and-run“ Paradigma folgt, wodurch eine breite Klasse verschiedener Probleme gelöst werden kann. Auf diese Weise werden die komplexen Prozesse der Definition von Nachbarschaften, zulässigen Zügen und dem Suchverfahren automatisiert. Nach einem Optimierungslauf werden die Lösungen (z.B. Tourenpläne) in der DB gespeichert. Der Benutzer kann diese über die GUI abrufen und visualisieren, was durch die Nutzung von *Google* Programmierschnittstellen (engl. application programming interface, API) ermöglicht wird. Mit diesen beschriebenen Komponenten interagiert der Benutzer während der Anwendung der Web-Applikation (siehe Abbildung 16).

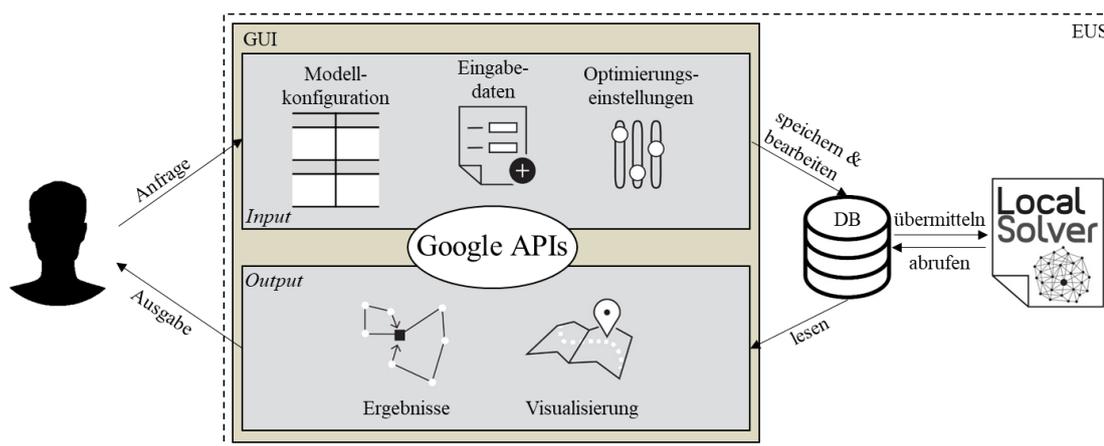


Abbildung 16. Benutzerinteraktion und Systemarchitektur des MAVRDSS

Während lediglich die Modellkonfiguration und die Eingabedaten als eigene Ressourcen behandelt werden, sind alle Komponenten Teil einer Projektressource. Jeder Benutzer kann dabei verschiedene Projekte haben und jedes Projekt kann eine Vielzahl an Fahrzeugen, Kunden etc. enthalten. Ein Benutzer kann neue Instanzen der Ressourcen anlegen und diese lesen, bearbeiten oder löschen. Ein Projekt ist ausführbar, wenn der Benutzer die zugrunde liegenden Modellattribute ausgewählt und mindestens ein Fahrzeug, ein Depot sowie zwei Kunden-Standorte angelegt hat. Darüber hinaus müssen die Fahrstrecken und -zeiten zwischen allen Kunden- und Depot-Standorten berechnet werden. Mit Hilfe von HTML-Elementen werden die jeweiligen Inhalte auf Basis der aktuellen Controller-

Aktion angezeigt. Der Browser des Benutzers muss *JavaScript* unterstützen, um die Web-Applikation ausführen zu können.

Da die Vielseitigkeit und Individualisierbarkeit des Routing-Modells die wichtigsten Eigenschaften des MAVRDSS sind, muss dessen Nutzung durch eine adäquate Gestaltung und Funktionalität der Web-Applikation unterstützt werden. Eine relevante Anforderung in diesem Kontext ist die Anwendbarkeit des MAVRDSS durch Benutzer, die weder über Programmierkenntnisse noch über Expertise im Bereich von Optimierungsmethoden verfügen. Da die Entwicklung eines benutzerfreundlichen Interface mit einem umfassenden Hilfesystem ein langfristiger Prozess ist, stellt das Tool lediglich einen Prototyp für das Multi-Attribut VRP dar. Zur weiteren Unterstützung des Benutzers existieren Informationsschaltflächen mit Hover-Effekt, die eine kurze Beschreibung jedes Attributs liefern. Abbildung 17 zeigt einen beispielhaften Ausschnitt der GUI der Web-Applikation während der Modellkonfiguration.

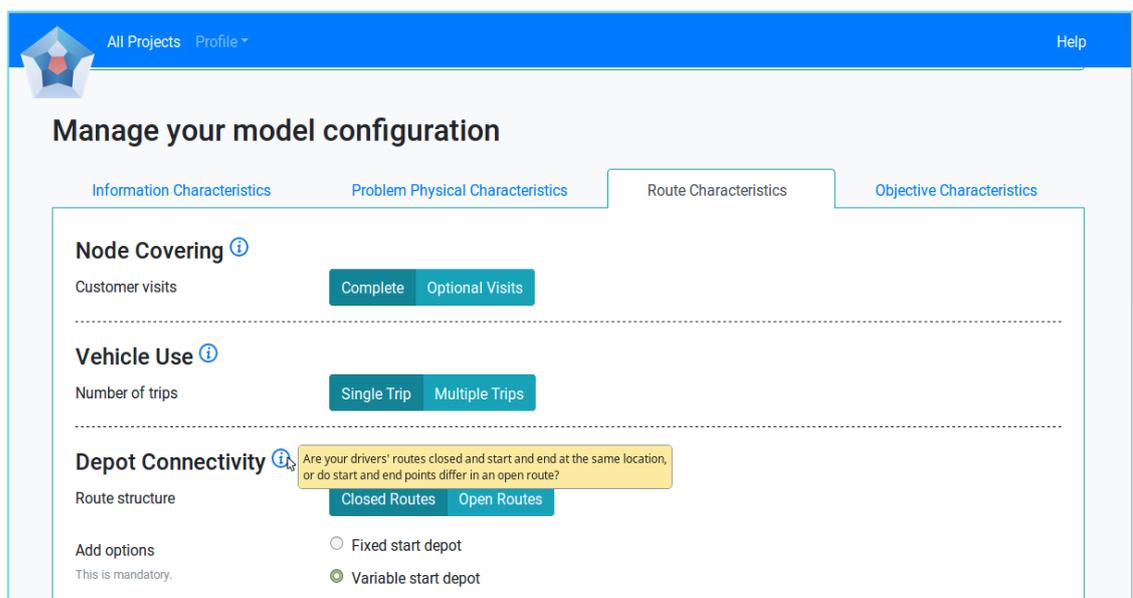


Abbildung 17. Screenshot der GUI des MAVRDSS während der Modellkonfiguration

4.3.3. Systemkomponenten und Implementierung

Das MAVRDSS wurde mit dem quelloffenen Webframework *Ruby on Rails* entwickelt, das in der Programmiersprache *Ruby* geschrieben ist. Das Framework ist auf Produktivität ausgerichtet und zielt auf die Beschleunigung der Entwicklung von Webanwendungen ab (Hartl, 2019). Bis auf *LocalSolver* werden alle Instrumente zur Implementierung des MAVRDSS innerhalb des *Ruby on Rails* Frameworks verwaltet.

Die räumliche Komponente des MAVRDSS umfasst folgende Funktionen: die Generierung der Distanz- und Zeit-Matrix, die automatische Vervollständigung von Eingabemasken beim Eintragen von Adressen, die Darstellung von Standorten auf Karten und die Visualisierung von Touren. Zur Umsetzung dieser Aktionen interagiert das MAVRDSS mit verschiedenen *Google API*. Alle API-Funktionen werden dabei durch die *Google Maps JavaScript API* ermöglicht. Die *Google Maps Embed API* wird zum Abbilden von Karten in verschiedenen HTML-Ansichten verwendet. Dadurch kann sich ein Benutzer beispielsweise die Position einer eingetragenen Adresse in der eingebetteten Karte anzeigen lassen. Die *Google Geocoding API* wird dazu verwendet, um die eingetragenen Adressen in geographische Koordinaten zu konvertieren, um Markierungen auf der Karte zu platzieren und um die Karte anhand der jeweiligen Adressen zu zentrieren. Sofern der Benutzer es zulässt, ruft die *Google Geolocation API* dessen aktuelle Position ab und nutzt diese zur Anpassung der automatischen Adressvervollständigung. Dadurch erhält der Benutzer beim Eintragen des ersten Buchstaben einer Straße in die Eingabemaske entsprechende Vorschläge für nahegelegene Straßennamen, die mit dem gleichen Buchstaben beginnen. Die *Waypoints API* visualisiert die optimierten Touren der Fahrzeuge. Die Distanz- und die Zeit-Matrix werden mit Hilfe der *Google Distance Matrix API* generiert.

Wie oben erwähnt, wird *LocalSolver* zur Integration aller Komponenten der lokalen Suchheuristik und zur Lösung des benutzerspezifischen VRP eingesetzt. Das Suchverfahren ist eine „Simulated Annealing“ Heuristik mit Neustarts. Die Entscheidung über den nächsten Zug ist eine Auswahl aus verschiedenen existierenden Möglichkeiten. Dabei werden Statistiken über die Nachbarschaften gesammelt und die Suche auf dieser Basis kontinuierlich angepasst. Für die unzulässigen Züge wird die Auswahlwahrscheinlichkeit auf null gesetzt. Bei den Zügen handelt es sich um allgemeine Transformationen von Nachbarschaften, wobei die Zulässigkeit in jeder Iteration erhalten bleiben soll. Der Solver ist nicht auf lineare Nebenbedingungen beschränkt, sondern kann auch nichtlineare Modelle lösen. *LocalSolver* ist in der Sprache C++ implementiert. Dessen Compiler kann Modelle, die in C++, C#, Python, Java oder der integrierten Modellierungssprache LSP (*Local Search Programming*) geschrieben sind, verarbeiten. Letztere wird in der Version 7.0 zur Implementierung des beschriebenen Multi-Attribut VRP verwendet. In der Sprache LSP ist es möglich, Datenstrukturen anzupassen und ein Optimierungsmodell

mit Hilfe von mathematischen Operatoren, eingebauten Variablen und Funktionen zu definieren. LSP weist zwar alle Eigenschaften einer Skriptsprache auf, ist aber der Modellierung und Lösung eines Problems gewidmet (Gardi et al., 2014).

Bei der Anwendung des MAVRDSS hängt die Effizienz des individuell zusammengestellten Modells von der Auswahl geeigneter Nebenbedingungen, klar definierter Zielfunktionen und der richtigen Parametrisierung des Solvers ab. Neben den benutzerseitigen Einstellungen muss die Umsetzung des Multi-Attribut VRP in *LocalSolver* möglichst schlank und effizient sein, um überflüssige Berechnungen zu vermeiden. Das Multi-Attribut-VRP ist in einem einzigen LSP-Modell implementiert, das auf polyvalenten Komponenten basiert. Dadurch werden die meisten Grundfunktionen für verschiedene Problemkonfigurationen verwendet, sodass sich lediglich die einzelnen Funktionsbestandteile auf Basis der ausgewählten Attribute ergeben. Die Modellkonfiguration wird in insgesamt 77 Boolesche Variablen übersetzt, die sich auf bestimmte Funktionen in der LSP-Datei beziehen. Diese Werte werden zur Bestimmung des endgültigen Modells verwendet, welches anschließend an den Solver übergeben wird. Um die Rechenzeit zu minimieren und ein effizientes Modell zu erhalten, werden lediglich die ausgewählten Attribute an *LocalSolver* übergeben. Dies wird durch eine umfassende Menge von bedingten Anweisungen in der LSP-Modelldatei erreicht, welche die einzelnen Attribute und die jeweiligen Attributkombinationen aktivieren oder deaktivieren.

4.4. Benchmarks und praktische Anwendungsfälle

Zur Bewertung des vorgestellten Lösungsansatzes und zur Evaluierung der Leistungsfähigkeit des MAVRDSS werden im Folgenden Benchmarks für verschiedene Probleminstanzen aus der Forschung sowie Simulationsergebnisse für zwei reale Anwendungsfälle dargestellt.

4.4.1. Quantitatives Benchmarking

Die Leistungsfähigkeit des entwickelten MAVRDSS wird anhand von Routing-Problemvarianten getestet: Split-Delivery-VRP, Multi-Depot VRP und LRP. Das MAVRDSS muss diese Probleme zunächst abbilden können, um anschließend eine Reihe von verfügbaren Probleminstanzen zu lösen. Verschiedene Autoren haben sich mit den genannten VRP-Varianten auseinandergesetzt und ihre Lösungsansätze anhand diverser Standardinstanzen getestet. Für jede Problemvariante wird eine Reihe von Instanzen ausgewählt, um

die resultierenden MAVRDSS-Lösungen mit zwei bis drei Algorithmen anderer Studien zu vergleichen. Hierbei wurden diejenigen Referenzstudien ausgewählt, welche die leistungsfähigste Lösungsmethode für die jeweilige VRP-Variante präsentieren.

In den folgenden drei Tabellen sind die jeweiligen Referenz-Algorithmen am Tabellenkopf angegeben. Die erste Spalte beschreibt dabei die Größe der Problem Instanz. Die Werte in der Spalte „Gap“ geben den relativen Abstand der heuristischen Lösung zur besten bekannten Lösung an. Die besten Lösungen werden der jeweils zuletzt veröffentlichten Referenzstudie entnommen. Die fettgedruckten Einträge zeigen an, ob die optimale Lösung erreicht wurde (Gap = 0,0%). Die Spalte „CT“ gibt die Rechenzeit (engl. computation time, CT) in Sekunden an. Hierbei ist zu beachten, dass *LocalSolver* die Rechenzeit nur in vollen Sekunden angibt. Für jede Instanz ist das beste Ergebnis von drei Optimierungsdurchgängen angegeben. Die Größe der Instanz wird solange erhöht, bis nach 120 Sekunden keine zulässige Lösung mehr erreicht wird. Diese vergleichsweise geringe maximale Laufzeit wird festgelegt, da im operativen Geschäft schnelle Entscheidungen erforderlich sind und dies eine relevante Anforderung an eine praktisch anwendbare Routing-Applikation ist. Das „Simulated Annealing Level“ und die Anzahl der Threads sind für alle Problem Instanzen auf zwei gesetzt. Alle Berechnungen mit MAVRDSS wurden auf einem Computer mit einem Intel Core i7 QuadCore CPU (2,2 GHz) und 8 GB Arbeitsspeicher ausgeführt.

In Tabelle 17 sind die Benchmarks für sieben Instanzen des Split-Delivery-VRP von Belenguer et al. (2000) dargestellt. Die MAVRDSS-Lösungen werden mit der SplitILS-Heuristik von Silva et al. (2015) und einer unbenannten Heuristik von Aleman et al. (2009) verglichen. Laut Silva et al. (2015) übertrifft die SplitILS-Heuristik alle bisher veröffentlichten Lösungsansätze und erreicht in allen Fällen die optimale Lösung (Gap = 0,0%).

Tabelle 17. Benchmarks für das Split-Delivery VRP

Anzahl der Kunden	Aleman et al.		SplitILS		MAVRDSS	
	Gap	CT	Gap	CT	Gap	CT
22	0,0	2,6	0,0	0,2	0,0	19
23	0,1	1,6	0,0	0,1	0,4	12
30	0,0	7,5	0,0	0,2	0,4	9
33	0,1	8,4	0,0	0,5	1,5	22
51	0,1	49,8	0,0	1,8	1,2	17
76	0,2	91,4	0,0	51,8	4,2	45
101	0,2	298,2	0,0	38,9	8,8	117

Die Ergebnisse zeigen, dass das MAVRDSS in der Lage ist, für die gegebenen Problem-
instanzen zuverlässige und umsetzbare Lösungen zu erreichen, d.h. die gesamte Kun-
dennachfrage zu bedienen und dabei die Kapazitätsbeschränkungen einzuhalten. Auch
wenn die MAVRDSS-Lösungen für die meisten Instanzen unterhalb eines Gaps von 5%
liegen, sind sie den problemspezifischen Heuristiken unterlegen. Die Ergebnisse zeigen
zum einen, dass *LocalSolver* die Lösungen in einer relativ kurzen Zeitspanne generiert.
Auf der anderen Seite werden diese Lösungen in der verbleibenden Rechenzeit kaum
verbessert. Dies deutet darauf hin, dass das Suchverfahren zu lokalen Optima neigt und
dass eine Diversifizierung der Suche nicht immer erfolgreich ist.

Tabelle 18 zeigt die Benchmarks für das Multi-Depot VRP im Vergleich zu drei Algo-
rithmen, die laut Cordeau und Maischberger (2010) die besten Lösungen für diesen Prob-
lemtyp erzielt haben. Die genutzten Instanzen stammen von Cordeau et al. (1997), wobei
die Anzahl der Fahrzeuge vorgegeben ist. Die drei Algorithmen sind ALNS (Pisinger und
Ropke, 2007), CGL (Cordeau et al., 1997) und ITS/1 (Cordeau und Maischberger, 2010).
Die von Cordeau et al. (1997) angegebenen Gaps stellen die relativen Abstände zu den
damals besten bekannten Ergebnissen dar. Diese wurden durch die Werte aus dem Artikel
von Cordeau und Maischberger (2010) aktualisiert, welche die neuen besten Benchmarks
darstellen. Die letztgenannten Autoren geben keine Rechenzeiten ihres Algorithmus an.
Stattdessen nennen sie das beste Ergebnis nach 100.000 Iterationen mit einer durch-
schnittlichen Rechenzeit von 110 Sekunden. Wie zuvor wurden die Berechnungen mit
dem MAVRDSS nach 120 Sekunden abgebrochen und die besten Werte angegeben.

Tabelle 18. Benchmarks für das Multi-Depot VRP

$ N \times M \times K $	ALNS		CGL		ITS/1		MAVRDSS	
	Gap	CT	Gap	CT	Gap	CT	Gap	CT
50 × 4 × 4	0,0	29	0,0	15	0,0	-	0,0	12
50 × 4 × 2	0,0	28	0,1	50	0,0	-	0,0	14
75 × 5 × 3	0,0	64	0,6	17	0,1	-	0,0	22
80 × 2 × 5	0,1	75	0,1	1	0,0	-	0,0	42
100 × 2 × 5	0,3	120	0,4	79	0,2	-	3,4	31
100 × 2 × 8	0,5	88	0,6	336	0,5	-	1,5	32
100 × 3 × 6	0,7	93	0,2	293	0,4	-	3,4	48
100 × 4 × 4	0,8	88	1,1	427	0,7	-	1,9	40
160 × 4 × 5	0,0	179	0,4	539	0,0	-	7,1	28
240 × 6 × 5	0,3	315	0,0	10	0,3	-	5,5	54
249 × 2 × 14	0,8	333	2,5	1175	2,2	-	7,0	102
249 × 3 × 12	0,5	361	1,6	419	1,7	-	5,4	88
249 × 4 × 8	0,5	363	2,3	984	1,7	-	5,2	89
249 × 5 × 6	0,8	357	1,0	1040	1,0	-	3,5	110
360 × 9 × 5	0,5	582	1,1	1786	0,7	-	0,9	78

$|N|$: Anzahl der Kundenknoten; $|M|$: Anzahl der Depotknoten; $|K|$: Anzahl der Fahrzeuge/Touren

Die angegebenen Zielfunktionswerte vom MAVRDSS sind im Vergleich zu den drei Referenz-Algorithmen meist schlechter. Dennoch wurden insbesondere für die kleineren Probleminstanzen sehr gute Lösungen erzielt und bei den größeren Datensätzen (ab 100 Kunden) liegen die Zielfunktionswerte um einen Gap von etwa 5%. Somit lässt sich eine ähnliche Schlussfolgerung wie beim Split-Delivery VRP ziehen: *LocalSolver* kann in kurzer Zeit gute Lösungen erzeugen, welche jedoch in der verbleibenden Rechenzeit kaum verbessert werden.

In Tabelle 19 sind die MAVRDSS-Lösungen für das klassische LRP (gleichzeitige Bestimmung der optimalen Depotstandorte und Fahrzeugrouten) aufgelistet, die mit drei problemspezifischen Algorithmen verglichen werden. Diese weisen in einer Untersuchung von Yu et al. (2010) die besten Ergebnisse hinsichtlich der Lösungsqualität und der Rechenzeit unter sechs getesteten Algorithmen auf. Die drei herangezogenen Heuristiken sind MAPM (Prins et al., 2006), LRGTS (Prins et al., 2007) und SALPR (Yu et al., 2010). Die zugrunde liegenden Probleminstanzen wurden von Barreto (2004) bereitgestellt. Diese Instanzen berücksichtigen die klassischen LRP-Bedingungen von kapazitätsbeschränkten Depots und Fahrzeugen. Wie bei den Benchmarks zuvor, wurden die Berechnungen mit dem MAVRDSS nach 120 Sekunden gestoppt und die besten Werte angegeben.

Tabelle 19. Benchmarks für das Location Routing Problem

N × M	MAPM		LRGTS		SALRP		MAVRDSS	
	Gap	CT	Gap	CT	Gap	CT	Gap	CT
21 × 5	0,0	0,3	0,0	0,2	0,0	18,3	0,0	1
22 × 5	4,6	0,3	0,4	0,2	0,0	16,6	0,0	1
27 × 5	0,0	1,0	0,1	0,3	0,0	23,3	0,0	2
29 × 5	0,0	0,8	0,0	0,4	0,0	23,9	0,0	1
32 × 5	6,0	1,0	0,1	0,5	0,0	25,1	0,0	2
36 × 5	5,4	1,4	3,5	0,7	0,0	31,7	0,0	2
50 × 5	0,0	3,8	3,7	2,4	0,0	52,8	0,0	18
75 × 10	8,4	9,4	8,1	10,1	0,4	126,8	2,2	94
88 × 8	1,5	34,2	5,2	17,5	0,0	226,9	0,8	65
100 × 10	3,9	44,5	3,0	28,2	0,6	330,8	2,2	86
134 × 8	9,7	110,5	7,1	48,3	0,0	552,4	3,4	9
150 × 10	1,4	255,0	2,3	119,2	2,7	577,0	6,0	80

|N|: Anzahl der Kundenknoten; |M|: Anzahl der potenziellen Depot Standorte

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass das MAVRDSS mit den problemspezifischen LRP-Algorithmen hinsichtlich Lösungsqualität und Rechenzeit mithalten kann. Bei den kleineren Instanzen wurden die besten bekannten Lösungen nahezu sofort (Rechenzeit 1-2 Sekunden) erreicht. Auch bei den größeren Datensätzen wurden hochwertige Lösungen innerhalb von Sekunden gefunden und anschließend weiter verbessert.

Zusammenfassend zeigen die dargestellten Benchmarks die Leistungsfähigkeit des MAVRDSS hinsichtlich der Modellierung und der Lösung von verschiedenen Routing-Problemen. Insbesondere bei relativ wenigen harten Nebenbedingungen (z.B. bei einem LRP), ist das Risiko von lokalen Optima eher gering. Die Benchmarks für das Multi-Depot VRP und das Split-Delivery VRP zeigen außerdem, dass *LocalSolver* die lokale Suche nicht immer erfolgreich diversifizieren kann. Dennoch werden in kurzen Laufzeiten gute Ergebnisse erzielt. In einigen Fällen übertreffen diese sogar die Lösungen der problemspezifischen Heuristiken, die als Referenz dargestellt sind. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das MAVRDSS die Modellierung und effiziente Lösung diverser Routing-Probleme ermöglicht und häufig mit problemspezifischen Algorithmen mithalten kann.

4.4.2. Praxis-Simulationen

Nach der Darstellung der Benchmarks auf Basis verschiedener Standardinstanzen und den entsprechenden Vergleichen mit problemspezifischen Lösungsansätzen folgt die Untersuchung von zwei realen Anwendungsfällen im Kontext der urbanen Logistik, um den Mehrwert des MAVRDSS zu analysieren.

Der erste Fall umfasst drei Arbeitstage eines freiberuflichen Kuriers, der Lieferungen für einen kleinen lokalen Kaffeeanbieter ausführt. Der zweite Fall behandelt eine Tagestour eines mittelständischen KEP-Dienstleisters. In beiden Fällen wird die Lösung des MAVRDSS mit der tatsächlich gefahrenen Strecke der Kuriere verglichen. Hinsichtlich des vorgestellten Klassifikationsschemas in Abbildung 15, gelten die folgenden Attribute für beide Routing-Probleme: gegebener Depot-Standort, gegebene Kunden-Standorte, deterministische Nachfrage, ein Produkttyp, kapazitätsbeschränkte Fahrzeuge mit begrenzter Reichweite, geschlossene Routen und einzelne Kundenbesuche. Darüber hinaus umfasst der erste Fall Kundenzeitfenster, die bei der Belieferung eingehalten werden müssen. Die Minimierung der zurückgelegten Gesamtstrecke stellt in beiden Fällen das zu optimierende Ziel dar. Im Zuge dieser Effizienzmaximierung werden ebenfalls die resultierenden Fahrzeugemissionen und die gesamten Transportkosten minimiert, was zu einer optimierten Ressourcennutzung führt. Da viele Kuriere lediglich die Kunden-Standorte des jeweiligen Tages unmittelbar vor der Tour erhalten, müssen sie die Routen selbst

planen. Dementsprechend entscheiden die Fahrer häufig eigenständig und ohne Softwareunterstützung über die Reihenfolge der anzufahrenden Kunden basierend auf ihrer persönlichen Einschätzung.

Im ersten Fall musste der Kaffee-Kurier täglich bis zu 12 Kunden in städtischer Umgebung beliefern. Die zurückgelegte Distanz des Kuriers lag dabei zwischen 28,03 km und 42,07 km pro Tag. Durch eine optimierte Kunden-Reihenfolge mithilfe des MAVRDSS hätten diese Strecken zwischen 4,61 km und 11,89 km pro Tag reduziert werden können. Dies entspricht Einsparungen zwischen 16,14% und 42,75%.

Im zweiten Fall musste ein Kurier 119 Pakete an 97 Kunden in einem städtischen Gebiet ausliefern. Dabei legte dieser eine Gesamtdistanz von 44,27 km mit seinem Fahrzeug zurück. Werden die gleichen Kunden-Standorte herangezogen führt eine Lösung des beschriebenen Optimierungsproblems mit dem MAVRDSS zu einer Gesamtfahrstrecke von 27,52 km. Diese potenzielle Reduzierung der Gesamtdistanz um 16,75 km ist mit einer Effizienzsteigerung in Höhe von 37,83% gleichbedeutend. Die Berechnung dauert unter Einsatz der oben genannten Hardware (Intel Core i7 QuadCore CPU 2,2 GHz, 8GB Arbeitsspeicher) 45 Sekunden. Bei Verwendung der gleichen Hardware und der identischen Problem Instanz dauert die Optimierung mit einer exakten Lösungsmethode (Solver: *CPLEX*) ca. 24 Stunden, bis ein ähnliches Ergebnis erzielt wird (28,94 km). Dieser erhebliche Unterschied der Rechenzeiten verdeutlicht die Notwendigkeit einer Heuristik bei der Lösung von Routing-Problemen.

5. Kritische Würdigung

Dieses Kapitel dient der Diskussion des wissenschaftlichen Beitrags sowie der Limitationen der vorliegenden kumulativen Dissertation. Dabei gilt es, sowohl auf die einzelnen Elemente des Hauptteils als auch auf die themenübergreifenden Aspekte einzugehen und darüber hinaus weitere Forschungsmöglichkeiten im Bereich der urbanen Logistik aufzuzeigen.

5.1. Diskussion der wissenschaftlichen Beiträge

Die entwickelten Optimierungsmodelle und EUS adressieren verschiedene Forschungslücken und teilweise unterschiedliche Zielgruppen, weisen aber auch einige Gemeinsamkeiten auf. Daher werden zunächst die Mehrwerte der im Hauptteil (Kapitel 2 - 4) behandelten IS-Artefakte diskutiert, um anschließend die themenübergreifenden Beiträge darzustellen.

Kapitel 2 umfasst die Darstellung eines EUS zur optimalen Gestaltung eines urbanen Netzwerks aus Mikro-Depots, die als Umschlagpunkte für Pakete fungieren. Die letzte Meile zu den Paketempfängern kann dadurch mit ECC überwunden und der urbane Straßenverkehr entsprechend entlastet werden. Der Fokus lag hierbei auf der Entwicklung und Anwendung eines mathematischen Modells, das die optimale Umsetzung des Logistik-Konzepts unterstützt. Das resultierende EUS stellt damit ein IS-Artefakt dar, das Entscheidungsträgern von KEP-Dienstleistern, Transportfirmen sowie Stadtverwaltungen die Bewertung eigens erstellter Szenarien ermöglicht. Durch eine Variation der eingegebenen Parameterwerte können verschiedene Ausprägungen des beschriebenen Logistik-Konzepts analysiert werden. Grundsätzlich liefert das Kapitel, bzw. das dazugehörige Paper, einen Beitrag zu einer nachhaltigen Gestaltung der urbanen Paketzustellung. Da ECC und andere umweltfreundliche Verkehrsmittel in der konventionellen Paketzustellung eine untergeordnete Rolle spielen, sind alternative Logistik-Konzepte erforderlich, um eine Reduktion des Straßenverkehrs und den damit verbundenen Externalitäten zu erreichen. Das beschriebene Konzept erhöht die Anzahl der potenziellen Transportfahrzeuge und wird durch das EUS bei der effizienten Umsetzung unterstützt. Zusätzlich erfolgt in dem entwickelten Modell die Integration der Kosten für die fahrzeugtypbezogenen Externalitäten in der Zielfunktion sowie einer möglichen Obergrenze der durchschnittlichen CO₂-Emissionen, sodass die entsprechenden Auswirkungen quantifiziert werden können.

Die präsentierten Benchmarks zeigen, dass strengere CO₂-Vorgaben zu erhöhten Kosten für den Betreiber einer Transportflotte führen. Diese Erkenntnis stimmt mit den Ergebnissen von Diabat und Simchi-Levi (2009) sowie Ramudhin et al. (2008) überein, welche ebenfalls den Zielkonflikt einer Kosten- und einer Emissionsminimierung hervorheben. Das EUS bildet diesen Zielkonflikt in Form eines Optimierungsmodells ab und ermöglicht eine Quantifizierung der Kosten einer CO₂-freien Paketzustellung. Da lokal emissionsfreie Transportfahrzeuge in der Regel mit hohen Anschaffungskosten verbunden sind, ist eine freiwillige Umrüstung der Flotten durch KEP-Dienstleister unwahrscheinlich. Externe Einflüsse wie eine finanzielle Förderung von Elektrofahrzeugen oder städtische Einfahrrestriktionen können jedoch einen entsprechenden Umstieg auslösen bzw. beschleunigen.

Kapitel 3 behandelt ein dreistufiges Optimierungsmodell zur effizienten Gestaltung eines urbanen Netzwerks aus unterschiedlich temperierten Paketstationen, den sog. „Grocery Lockern“. Diese dienen einerseits dazu, dass sich die Empfänger ihre bestellten Verbrauchsgüter selbst abholen können und andererseits als Umschlagpunkt, um den Einsatz von ECC als Transportmittel auf der letzten Meile zu ermöglichen. Der Fokus liegt damit auf der Unterstützung einer optimalen Planung des beschriebenen Logistik-Konzepts, welches sowohl ökonomische als auch ökologische und soziale Aspekte der Nachhaltigkeit adressiert. Die ökonomische Ebene wird durch die Zielfunktionen der drei Modellstufen abgebildet, welche die anfallenden Betriebskosten minimieren. Dies ist wichtig, da e-Grocery langfristig nur dann angeboten werden kann, wenn eine entsprechende Wirtschaftlichkeit und Effizienz der Prozesse gegeben sind. Die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit ist durch eine Reduzierung der negativen Externalitäten der Transporte abgebildet. Durch das Logistik-Konzept wird die letzte Meile zum Endkonsumenten verkürzt und ermöglicht die Nutzung von ECC, sodass ein gewisser Teil des Straßenverkehrs substituiert und entsprechende Fahrzeug-Emissionen reduziert werden können. Die Wahl des Transportmittels der Selbstabholer ist ein weiterer relevanter Aspekt. Diese hängt dabei unter anderem von der Distanz zwischen dem Wohnort des Endkonsumenten und dem Abholort ab (Iwan et al., 2016). Kurze Distanzen fördern dabei eine Selbstabholung per Fahrrad, öffentlicher Verkehrsmittel oder zu Fuß, wodurch weitere Emissionseinsparungen realisiert werden können. Der Betrieb eines dichten Netzwerks an Grocery Lockern verursacht hingegen erhöhte Gesamtkosten im Vergleich zu einer konventionellen Zustellung von Verbrauchsgütern. Die dargestellten Benchmarks verdeutlichen somit erneut

den Zielkonflikt einer gleichzeitigen Kosten- und Emissionsminimierung. Zusätzlich adressiert das beschriebene Logistik-Konzept die soziale Dimension der Nachhaltigkeit. Im Zuge des steigenden Fahrermangels in der Logistikbranche ist die Versorgungssicherheit der Bevölkerung zunehmend gefährdet (Lanzinger, 2019). Das dargestellte Logistik-Konzept erhöht die Menge der potenziellen Kurierere, da durch den ECC-Einsatz auch Personal ohne PKW- bzw. LKW-Führerschein beschäftigt werden kann. Somit umfasst der ganzheitliche Ansatz sowohl Aspekte der ökonomischen als auch der ökologischen und der sozialen Nachhaltigkeit. Die primäre Zielgruppe des Optimierungsmodells stellen e-Grocery Anbieter, aber auch Stadtverwaltungen und Transportdienstleister dar.

Kapitel 4 behandelt ein EUS zur flexiblen Optimierung von individuellen Touren- bzw. Routenplanungsproblemen. Hierbei sind im Wesentlichen drei Beiträge hervorzuheben: der Literaturüberblick, das Klassifizierungsschema und das entwickelte MAVRDSS. Zunächst wurde der Stand der Forschung zu „Multi-Attribut VRP“ bzw. „real-world VRP“ ermittelt, indem eine systematische Literaturrecherche nach Kitchenham et al. (2009) durchgeführt wurde. Die resultierende Tabelle 16 liefert einen entsprechenden Überblick über die existierenden Optimierungsansätze auf diesem Feld und veranschaulicht die Forschungslücke eines fehlenden generischen Tourenplanungsmodells. Auf Basis der Literaturübersicht wurden die relevanten VRP-Attribute identifiziert und ein Klassifizierungsschema zur Einordnung von VRP abgeleitet (siehe Abbildung 15). Dieses Schema ist angelehnt an die VRP-Taxonomie von Eksioglu et al. (2009) und ermöglicht durch eine entsprechende Gruppierung der Attribute einen schnellen Überblick der Merkmale. Basierend auf diesen Vorarbeiten wurde schließlich das MAVRDSS entwickelt. Dieses IS-Artefakt stellt den Prototypen eines EUS dar, das die Modellierung und Lösung von individuellen Tourenplanungsproblemen ermöglicht. Die insgesamt 26 implementierten VRP-Attribute erlauben die Abbildung diverser Geschäftskontexte und Branchen des urbanen Wirtschaftsverkehrs. Mit dem MAVRDSS wird die identifizierte Forschungslücke adressiert und die präsentierten Benchmarks zeigen, dass die zugrunde liegende Lösungsmethode (*LocalSolver*) effizient ist und häufig mit problemspezifischen Algorithmen mithalten kann. Auch in diesem Kontext ist die Dimension der ökologischen Nachhaltigkeit implizit eingeschlossen, da eine Optimierung der Tourenpläne in der Regel mit einer Minimierung der Fahrstrecken zusammenhängt und dadurch auch die entsprechenden Fahrzeug-Emissionen reduziert werden. Die primäre Zielgruppe des EUS stellen insbesondere KMU dar, die eine eigene Fahrzeugflotte besitzen und keine Tourenplanungssoftware

einsetzen. Durch den Einsatz von MAVRDSS können somit einzelne Unternehmen, aber auch freiberufliche Kuriere und die Umwelt im Allgemeinen profitieren, indem eine Minimierung der Fahrleistung und der Emissionen erfolgt. Somit besteht die Handlungsempfehlung, eine Routenoptimierung in möglichst vielen Branchen durchzuführen und dass KMU die Digitalisierung sowie eine entsprechende datengetriebene Entscheidungsunterstützung nutzen sollten.

Neben den Einzelbeiträgen liefert die vorliegende kumulative Dissertation auch themenübergreifende Mehrwerte. Wie bereits oben dargestellt, ist die optimale Gestaltung nachhaltiger Logistik-Konzepte eines der Ziele der Dissertation. Nachhaltigkeit besteht hierbei aus den drei Dimensionen der ökonomischen, der ökologischen und der sozialen Nachhaltigkeit. Die ökonomische Nachhaltigkeit stellt die Maximierung des ökonomischen Ertrags bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der benötigten Eingangsressourcen dar (Nowak und Leymann, 2018a). Die ökologische Nachhaltigkeit beschreibt den weit-sichtigen und rücksichtsvollen Umgang mit natürlichen Ressourcen (Nowak und Leymann, 2018b). Die soziale Nachhaltigkeit umfasst die bewusste Organisation von sozialen und kulturellen Systemen (Nowak und Leymann, 2018c). Eine gleichzeitige Optimierung aller drei Dimensionen stellt in der Regel einen Zielkonflikt dar. Die Bedeutung der Nachhaltigkeit wird auch in der IS-Forschung hervorgehoben, da Informationen eine Voraussetzung für Entscheidungen über Nachhaltigkeitsmaßnahmen sind (Watson et al., 2010). Der Forschungsbereich „Green IS“ befasst sich hierbei mit der transformativen Rolle von IS im Kontext einer nachhaltigen Gesellschaft und entsprechenden Geschäftsstrategien. Die Schwerpunkte in diesem Bereich sind vielfältig und umfassen u.a. Konzepte, Analysen, Designs sowie Auswirkungen von IS, die nachhaltiges Handeln fördern (Watson et al., 2010). Studien zur Green IS-Forschung zeigen, dass es an gestaltungs- und lösungsorientierter Forschung mangelt (Malhotra et al., 2013; Gholami et al. 2016).

Da der IS-Bereich als ein interdisziplinärer Raum beschrieben wird, der eine Vielzahl von Themen und Methoden umfasst (Hassan, 2014), sind in den oben dargestellten Inhalten Elemente der Informatik, des Operations Research, der Betriebswirtschaftslehre und der Verkehrswissenschaft kombiniert. Durch die Anwendung der DSR-Methodik nach Hevner (2007) wurden die beschriebenen Modelle und EUS entwickelt. Da diese einen starken Bezug zur Nachhaltigkeit haben, liefern die lösungsorientierten IS-Artefakte und die zugehörigen Veröffentlichungen einen Beitrag zur Green IS- sowie zur DSR-Forschung.

5.2. Darstellung der Limitationen

Neben den Beiträgen müssen auch die Einschränkungen und Limitationen der vorliegenden Dissertation kritisch diskutiert werden. Dabei sind die angewandte Methodik, die dargestellten Ergebnisse sowie die daraus gezogenen Schlussfolgerungen zu hinterfragen. Zunächst werden die themenübergreifenden Limitationen aufgeführt, um anschließend auf die Einschränkungen der einzelnen Inhalte des Hauptteils einzugehen.

Die erste Limitation bezieht sich auf die angewandte Forschungsmethodik des DSR. Die Entwicklung der lösungsorientierten IS-Artefakte beruht auf dem Ansatz von Hevner (2007) und resultiert aus den jeweiligen Relevanz-, Stringenz- und Design-Zyklen. Während die vorhandene wissenschaftliche Literatur zu Optimierungsmodellen und EUS im Bereich der urbanen Logistik systematisch analysiert wurde, ist der Umfang der Einbindung von Experten aus der Praxis ein Kritikpunkt. An dieser Stelle ist die *Initiative Urbane Logistik Hannover* zu nennen, in deren Kontext die vorliegende Dissertation und die dargestellten Forschungsprojekte entstanden sind. Dieser Zusammenschluss aus Wirtschaft, Wissenschaft und Kommune ermöglichte einen institutionsübergreifenden Austausch und einen gegenseitigen Wissenstransfer. Hierdurch konnten zwar generelle Anforderungen an die jeweiligen Modelle bzw. EUS in umfassenden Diskussionen und Workshops mit diversen Stakeholdern aufgenommen werden, doch die technische Umsetzung erfolgte in der Regel ohne deren Beteiligung. Somit besteht ein gewisser Optimierungsbedarf hinsichtlich der Einbindung von relevanten Praktikern bei der Entwicklung der IS-Artefakte. Im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses sollten die Modelle und EUS gemeinsam entwickelt, getestet, evaluiert und überarbeitet werden, sodass iterative Fortschritte erzielt werden.

In diesem Zuge sind auch die fehlende Erprobung bzw. Anwendung der entwickelten IS-Artefakte zu nennen. Die Funktionalität der Modelle und EUS wurde anhand diverser quantitativer Benchmarks sowie Szenarioanalysen untersucht und bewertet, sodass die theoretische Perspektive jeweils abgedeckt ist. Praxisanwendungen und Feldtests sind jedoch ausstehend, sodass eine Bewertung aus Anwendersicht bislang nicht erfolgt ist. Die Evaluation durch Praktiker kann Probleme und Herausforderung aufzeigen, die bislang nicht identifiziert wurden. Somit besteht die Limitation, dass der aktuelle Stand der IS-Artefakte nicht ausreichend bewertet ist und damit die Möglichkeit existiert, dass nicht alle Anforderungen erfüllt sind. Dies ist in der Wissenschaft jedoch keine Seltenheit, da

nur ca. 13,5% der im DSR-Kontext entwickelten EUS in Feldtests evaluiert werden (Arnott und Pervan, 2012).

Als dritte themenübergreifende Limitation ist der eingeschränkte Zugang zu realen Daten aus der Praxis anzuführen. Insbesondere bei der Behandlung von Anwendungsfällen und der Durchführung von Szenarioanalysen sind eine Vielzahl von Parameterwerten zu verarbeiten, welche einen unmittelbaren Einfluss auf die Optimierungsergebnisse und die Schlussfolgerungen haben. Die dargestellten Berechnungen basieren daher auf Angaben aus der Literatur, geschätzten Werten und Herstellerangaben. Während die grundsätzliche Funktionalität der entwickelten Modelle und EUS mit den angenommenen Parameterwerten nachgewiesen werden kann, unterliegen die abgeleiteten Implikationen der Limitation einer begrenzten Aussagekraft. In diesem Kontext wird erneut die erforderliche Zusammenarbeit mit Unternehmen deutlich, die entsprechende Daten und Einschätzungen aus der Praxis liefern können (z.B. im Rahmen eines Verbunds wie der *Initiative Urbane Logistik Hannover*). Vor allem die Bewertung der zugrunde liegenden Kostenstrukturen der jeweiligen Modelle sowie die Gegenüberstellung von alternativen und konventionellen Logistik-Konzepten sind hierbei als relevante Bereiche aufzuführen. Beide Seiten können von entsprechenden Kooperationen profitieren, sodass die resultierenden IS-Artefakte einen höheren Nutzen erzielen. Grundsätzlich ist zu betonen, dass die Ergebnisse der Modelle sowie EUS als Empfehlungen zu verstehen sind und diese nicht unreflektiert umgesetzt werden sollten. Die finalen Entschlüsse sind von den jeweiligen Entscheidungsträgern zu treffen und können lediglich quantitativ unterstützt werden.

Neben den genannten Limitationen bestehen diejenigen Einschränkungen, die bei einer Modellierung der Realität grundsätzlich zu berücksichtigen sind. Dabei existieren diverse Fehlerquellen: bei der Auswahl eines Realitätsausschnitts kann es zu Abstraktionsfehlern kommen und der Entwurf von Zielfunktionen sowie Nebenbedingungen unterliegt potenziellen Modellierungsfehlern. Die numerischen Modelle können Diskretisierungsfehler enthalten und bei der Lösung der Modelle sind etwaige Rechenfehler zu berücksichtigen. Schließlich kann es bei der Ableitung von Handlungsempfehlungen zu Interpretations- und Logikfehlern kommen (Breitner, 2008).

Zusätzlich zu den themenübergreifenden Limitationen sind die kapitelbezogenen Einschränkungen zu diskutieren. Das in Kapitel 2 vorgestellte mathematische Modell sowie das zugehörige EUS zur optimalen Umsetzung eines Mikro-Depot-Konzepts im KEP-

Bereich basieren auf diversen Annahmen. Hierbei sind vor allem die statische Nachfrage und das durchschnittliche Paketvolumen zu erwähnen, welche die Komplexität der Realität signifikant vereinfachen, in der eine hohe Diversität der zu transportierenden Pakete besteht. Des Weiteren ist es umstritten, ob ECC tatsächlich keinerlei Externalitäten verursachen, obwohl diese Verkehr auf Straßen sowie Fahrrad- und Gehwegen induzieren und damit negative Effekte für andere Stakeholder verursachen. Die Behandlung von einem spezifischen Anwendungsfall (hier: Hannover) ist ebenfalls zu hinterfragen, da im Rahmen anderer Stadtstrukturen abweichende Ergebnisse resultieren können. Ein entsprechender Vergleich ist damit ausstehend, sodass eine Allgemeingültigkeit nicht gegeben ist. Bei der Bewertung des vorgeschlagenen Logistik-Konzepts ist die Abbildung der verschiedenen Auswirkungen zu diskutieren. Der Einsatz von Mikro-Depots zur Zwischenlagerung von Paketen ist mit einem gewissen Flächenbedarf verbunden. In dicht bebauten Städten besteht die Problematik der geringen Verfügbarkeit von zentral gelegenen Flächen. Darüber hinaus können Container unter Umständen störend auf das Stadtbild wirken. Die optische Gestaltung von Mikro-Depots wird beispielsweise im Projekt *City2Share* behandelt (Internationales Verkehrswesen, 2017). Abschließend ist die technische Umsetzung zur Lösung des Optimierungsmodells zu hinterfragen. Das mathematische Modell wurde in GAMS implementiert und die dargestellten Ergebnisse mit einem exakten Lösungsverfahren berechnet. Durch das Vorliegen eines NP-schweren Problems kommt diese Form der Umsetzung jedoch bei großen Datensätzen zu keinen hinreichenden Lösungen innerhalb eines praktikablen Zeitrahmens, sodass hierfür heuristische Lösungsansätze erforderlich sind.

Das in Kapitel 3 vorgestellte dreistufige Optimierungsmodell sowie das zugrunde liegende Logistik-Konzept unterliegen ebenfalls verschiedenen Einschränkungen. Grundsätzlich greift der Ansatz verschiedene Ideen aus der Praxis auf und vereint diese in einem neuartigen Logistik-Konzept. Während Iwan et al. (2016) die Akzeptanz von Kunden gegenüber Abholorten im KEP-Kontext ermitteln, steht eine entsprechende Analyse im Bereich des e-Grocery aus. Da der Fokus auf einer Minimierung der Kosten in einem operativen Kontext liegt, sind die fixen Fahrzeugkosten, die Personalkosten und die Einnahmen nicht in dem Modell enthalten. Dadurch kann keine Aussage über die Profitabilität gemacht werden. Da jedoch unterschiedliche Kosten für die Belieferung von Hauslieferungs- und Selbstabholer-Kunden resultieren, sollte sich diese Differenzierung auch in den Preisen der e-Grocery Anbieter widerspiegeln. Aufgrund der hohen Komplexität

des zu optimierenden Problems wurde ein dreistufiger Ansatz entwickelt. Die drei MILP werden dabei mit einem exakten Optimierungsverfahren gelöst. Da auch in diesem Fall lange Rechenzeiten für größere Datensätze resultieren, ist die Entwicklung eines heuristischen Lösungsansatzes für einen praktikablen Einsatz notwendig. Speziell im operativen Planungskontext müssen die Optimierungsergebnisse innerhalb weniger Minuten verfügbar sein, um eine relevante Entscheidungsunterstützung zu bieten. Abschließend ist der Planungszeitraum der drei Modellstufen zu diskutieren. Die zweite und dritte Modellstufe behandeln Tourenplanungsprobleme, die täglich optimiert werden müssen, da die Standorte der Kunden entsprechend variieren. Die erste Modellstufe umfasst hingegen die optimale Platzierung der Grocery Locker. Abhängig von den räumlichen Nachfrageschwankungen gilt es zu untersuchen, in welchem Rhythmus (z.B. täglich, wöchentlich, monatlich) die Standorte der Grocery Locker angepasst werden sollten.

Auch bei der Betrachtung des vierten Kapitels sind einige Limitationen zu beachten. Das entwickelte MAVRDSS dient der Modellierung und Lösung von individualisierbaren Tourenplanungsproblemen diverser Branchen. Dennoch ist die Flexibilität des EUS unter Umständen nicht ausreichend, um einige unternehmensspezifische Szenarien abzubilden, da nicht alle Attribute aus der Realität dargestellt werden können. Es ist nicht auszuschließen, dass gewisse Spezifikationen und Prämissen existieren, die mit dem MAVRDSS nicht modelliert werden können, z.B. eine Integration der Parksituation bei Kunden (Holguin-Veras et al., 2018) oder eine Vermeidung des Linksabbiegens (Holland et al., 2017). Der Prototyp des EUS stellt somit keine "one-size-fits-all"-Lösung dar, sondern versucht eine möglichst große Anzahl an VRP-Attributen zu integrieren. Eine Identifikation, welche Branchen des Wirtschaftsverkehrs einen tatsächlichen Nutzen aus dem Einsatz des Tools ziehen können, steht daher aus. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Auswahl der VRP-Attribute die Leistungsfähigkeit des MAVRDSS beeinflusst. Da der MAVRDSS-Anwender durch die Auswahl der Modellattribute ein praktisches Problem nachbildet, müssen potenzielle nutzerseitige Fehlerquellen identifiziert werden. Einerseits erschwert das Hinzufügen von vielen Nebenbedingungen eine Lösung des resultierenden Modells, da die Gefahr von lokalen Optima steigt. Andererseits kann das EUS seine praktische Anwendbarkeit verlieren, wenn umfassende Modelle nicht hinreichend lösbar sind. Daher muss das MAVRDSS eine geeignete Anleitung enthalten, die dem Nutzer die Zielfunktionen und mögliche Konflikte erklärt. Im Gegensatz zum derzeitigen Status des Tools sollten verschiedene Formate von Daten einlesbar sein, um ein möglichst

breites Einsatzspektrum zu ermöglichen. Abschließend ist die Methode zur Bestimmung der Fahrzeiten zu diskutieren. Die *Google API* wird hierbei verwendet, um die geschätzten Fahrzeiten sowie die Entfernungen zwischen den einzelnen Standorten zu ermitteln. Während die Distanzen unabhängig von der Verkehrslage sind, können sich die Fahrzeiten einer Strecke im Tagesverlauf ändern. Das MAVRDSS nutzt beim Abrufen der Fahrzeiten den aktuellen Zustand der Verkehrslage, sodass es zu möglichen Abweichungen kommen kann, wenn der Ablauf einer Tagestour auf dieser Basis geplant wird. Als potenzielle Erweiterung besteht hierbei die Möglichkeit, die Fahrzeiten und Entfernungen auf Basis der aktuellen sowie der durchschnittlichen Verkehrslage zu bestimmen, um den Nutzer über etwaige Verzögerungen zu informieren. Grundsätzlich gilt es jedoch zu beachten, dass neben abweichenden Verkehrsbedingungen auch andere externe Einflüsse auf den Tagesablauf eines Dienstleisters bzw. Transporteurs einwirken und eine Anpassung der optimalen Routenführung erfordern können. Beispielsweise sind hier Absagen von Kunden, der Wunsch nach einem anderen Zeitfenster oder extreme Wetterbedingungen zu nennen. Derartige Ereignisse erfordern eine schnelle Neubewertung der veränderten Gegebenheiten. Wie die dargestellten Benchmarks zeigen, ermöglicht das MAVRDSS die Berechnung qualitativ hochwertiger Ergebnisse innerhalb kurzer Rechenzeiten, sodass eine schnelle Reoptimierung des jeweiligen Tourenplans möglich ist.

5.3. Ausblick

Neben den in dieser kumulativen Dissertation dargestellten Themen sind zahlreiche weitere Fragestellungen im Bereich der urbanen Logistik bzw. des urbanen Wirtschaftsverkehrs relevant. Während die KEP-Branche häufig im Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen sowie öffentlicher Diskussionen steht, bildet dies nicht die Komplexität des urbanen Wirtschaftsverkehrs ab. Diverse Stakeholder aus unterschiedlichen Branchen nehmen am Straßenverkehr teil und beeinflussen diesen durch ihre täglichen Transporte bzw. Dienstleistungen. Neben der KEP-Branche sind hier vor allem Lieferanten (Spedition, Einzelhandel, Bäckerei, Apotheke, Gastronomie etc.), Handwerker, Techniker und Müllentsorgungsdienste zu nennen, die ebenfalls eine Vielzahl an Halte- und Parkvorgängen im urbanen Straßenraum auslösen (Schäfer et al., 2019).

Auf dem Gebiet des urbanen Güterwirtschaftsverkehrs sollte künftig untersucht werden, inwiefern anbieterübergreifende Kooperationen und entsprechend gebündelte Lieferungen realisierbar sind. Durch die hohe Anzahl an Transportdienstleistern kommt es zu

mehrfachen Belieferungen von Privatpersonen und Unternehmen. Hierbei sollten die Effekte einer anbieterübergreifenden Zusammenarbeit mit einer entsprechenden Bündelung der Sendungen untersucht werden. Durch diesen Ansatz müssten die verschiedenen Zielorte nicht mehrfach von unterschiedlichen Transporteuren angefahren werden. Derartige Ansätze existieren unter den Stichworten „Gebietslogistik“ und „white label logistics“, jedoch umfassen diese in der Regel lediglich die theoretische Perspektive (DLR, 2011). Somit müssen Anreize geschaffen und regulatorische Maßnahmen eingeführt werden, die umweltfreundliche Konzepte und Fahrzeuge fördern. Beispielsweise können die Kommunen und Stadtverwaltungen Logistik-Flächen zur Erprobung und Umsetzung neuer Ansätze bereitstellen. Grundsätzlich bedarf es einer Gestaltung von ganzheitlichen Logistik-Konzepten, die möglichst alle Transportanbieter sowie die Stadtverwaltungen und Bewohner integrieren. Derartige Ansätze können z.B. im Rahmen eines institutionsübergreifenden Zusammenschlusses wie der *Initiative Urbane Logistik Hannover* gemeinsam initiiert, erprobt und bewertet werden. Hierbei gilt es eine anbieteroffene Plattform für diverse Stakeholder zu schaffen, die einen freiwilligen Ideen-, Erfahrungs- und Datenaustausch ermöglicht.

Neben alternativen Transportkonzepten für den urbanen Güterwirtschaftsverkehr sollten auch neue Lösungsansätze für Personenwirtschaftsverkehr sowie Dienstleistungsverkehr untersucht werden. Hinsichtlich der urbanen Mobilität sind im Laufe der vergangenen Jahre bereits diverse Alternativen der Fortbewegung entstanden (Carsharing, Ridesharing, Ridepooling etc.), welche sowohl praktisch umgesetzt als auch in der Wissenschaft analysiert werden. Demgegenüber besteht auf dem Gebiet der Dienstleistungsverkehr eine bedeutende Forschungslücke, da es für Handwerker, Techniker etc. an alternativen Ansätzen zur Ausübung ihrer Dienstleistungen mangelt.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass sämtliche Teilnehmer des urbanen Wirtschaftsverkehrs Daten über ihr Mobilitätsverhalten erheben, analysieren und nutzen sollten. Die fortschreitende Digitalisierung ermöglicht die Aufzeichnung von umfangreichen Mobilitätsdaten mit hohem Informationsgehalt. Diese können selbst ausgewertet oder mit anderen Stakeholdern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung geteilt werden, um den Nutzen der Informationen zu maximieren. Datengetriebene Analysen bieten das Potenzial den Status Quo des urbanen Wirtschaftsverkehrs im Detail zu erfassen, daraus innovative Lösungsansätze abzuleiten und mit Hilfe von IS eine entsprechende Entscheidungsunterstützung zu ermöglichen.

6. Fazit

In dieser kumulativen Dissertation wurden drei Forschungsthemen aus dem Bereich der urbanen Logistik bzw. dem urbanen Wirtschaftsverkehr vorgestellt. Der erste Abschnitt des Hauptteils behandelt die Gestaltung eines alternativen Logistik-Konzepts für die urbane Paketzustellung, indem die Optimierung eines Mikro-Depot-Netzwerks durch ein EUS ermöglicht wird. Im zweiten Teil wird ein dreistufiges Optimierungsmodell dargestellt, das die Planung eines neuen Lieferkonzepts für die Zustellung von online bestellten Verbrauchsgütern unterstützt. Der dritte Abschnitt des Hauptteils umfasst ein EUS zur Modellierung und Lösung von individualisierbaren Tourenplanungsproblemen, sodass eine Minimierung der täglichen Fahrstrecken für KMU diverser Branchen ermöglicht wird.

Die dargestellten IS-Artefakte in Form von EUS und Optimierungsmodellen wurden durch die Anwendung von Methoden der IS- und OR-Forschung entwickelt. Das Ziel dieser Artefakte ist es, den bestehenden Zielkonflikt zwischen einer Kosten- und einer Emissionsminimierung im Kontext von Transportprozessen abzubilden. Die optimale Gestaltung von Logistik-Konzepten, welche sowohl die ökonomische als auch die ökologische und die soziale Nachhaltigkeit adressieren, stellt eine relevante Forschungslücke dar und stand daher im Fokus der Betrachtung. In diesem Kontext liefern die entstandenen Artefakte und Veröffentlichungen einen wissenschaftlichen Beitrag zur gestaltungsorientierten IS-Forschung im Bereich der Green IS. Hinsichtlich der praktischen Umsetzung von innovativen und nachhaltigen Logistik-Konzepten sind die entwickelten Tools als Hilfsmittel zu verstehen, um einen Teil der bestehenden Optimierungspotenziale in der urbanen Logistik zu erschließen. Unternehmen diverser Branchen können durch eine datengetriebene Entscheidungsunterstützung profitieren, indem sie ihre täglichen Transportprozesse auf der Grundlage quantitativer Analysen und sachlicher Informationen optimieren.

Neben der Optimierung der individuellen Transportvorgänge einzelner Unternehmen und Dienstleister, besteht ein großer Forschungsbedarf hinsichtlich des Nutzens sowie der Realisierung von anbieterübergreifenden Kooperationen und entsprechend gebündelten Lieferungen. Durch geeignete Forschungsprojekte und regulatorische Rahmenbedingungen können derartige Ansätze untersucht und erprobt werden, sodass sowohl die Dienstleister als auch die Kommunen und die Bevölkerung von einer Umsetzung profitieren.

Literaturverzeichnis

- Albareda-Sambola M., Fernández E., Laporte G. 2007. Heuristic and lower bound for a stochastic location-routing problem. *European Journal of Operations Research* (179), pp. 940-955.
- Aleman, R.E., Zhang, X., Hill, R.R. 2009. A ring-based diversification scheme for routing problems. *International Journal of Mathematics in Operational Research* (1:1-2), pp. 163-190.
- Amorim, P., Parragh, S.N., Sperandio, F., Almada-Lobo, B. 2014. A rich vehicle routing problem dealing with perishable food: A case study. *Top* (22), pp. 489-508.
- Amorim, Pedro and Bernardo Almada-Lobo. 2014. The Impact of Food Perishability Issues in the Vehicle Routing Problem. *Computers & Industrial Engineering* (67), pp. 223-233.
- Archetti, C., Savelsbergh, M.W.P., Speranza M.G. 2006. Worst-Case Analysis for Split Delivery Vehicle Routing Problems. *Transportation Science* (40), pp. 226-234.
- Armas, J., Melián-Batista, B., Moreno-Pérez, J.A., Brito, J. 2015. GVNS for a real-world rich vehicle routing problem with time windows. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* (42), pp. 45-56.
- Arndt, W.-H. 2010. Optimierungspotenziale im Wirtschaftsverkehr durch bestellerseitige Kooperation. Untersuchung des Ansatzes einer Beschaffungs-/Bestellerkooperation als ein Instrument für eine effiziente und stadtverträgliche Gestaltung des Wirtschaftsverkehrs. *Dissertation, Technische Universität Berlin*, 256 p.
- Arnold F., Cardenas I., Sörensen K., Dewulf W. 2018. Simulation of B2C e-commerce distribution in Antwerp using cargo bikes and delivery points. *European Transport Research Review*, (10:1), 13 p.
- Arnott, D., Pervan, G. 2012. Design science in decision support systems research: An assessment using the Hevner, March, Park, and Ram guidelines. *Journal of the Association for Information Systems* (13:11), pp. 923-949.
- Awasthi A., Chauhan S.S., Goyal S.K. 2011. A multi-criteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty. *Mathematical and Computer Modelling* (53:1-2), pp. 98-109.

- Baldacci, R., Battarra, M., Vigo, D. 2008. Routing a heterogeneous fleet of vehicles. In: *Operations Research/Computer Science Interfaces Series*, Golden, B.L., Raghavan, S., Wasil, E.A., Eds., The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges, Springer: New York, NY, USA (43), pp. 3-27.
- Barceló J., Grzybowska H., Orozco J.A. 2018. City logistics. In: *Handbook of Heuristics*, Martí R., Pardalos P.M., Resende M.G.C., Eds., Springer, Cham, Switzerland, pp. 887-930.
- Barreto, S.S. 2004. Analysis and modelling of location-routing problems. *Ph.D. Thesis*, Aveiro University, Aveiro, Portugal.
- Baykasoğlu A., Subulan K., Taşan A.S., Dudaklı N. 2019. A review of fleet planning problems in single and multimodal transportation systems. *Transportmetrica A: Transport Science* (15:2), pp. 631-697.
- Belenguer, J.M., Martinez, M.C., Mota, E. 2000. A lower bound for the split delivery vehicle routing problem. *Operations Research* (48:5), pp. 801-810.
- Bielli M., Bielli A., Rossi R. 2011. Trends in models and algorithms for fleet management. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* (20), pp. 4-18.
- Boccia M., Crainic T.G., Sforza A., Sterle C. 2018. Multi-commodity location-routing: Flow intercepting formulation and branch-and-cut algorithm. *Computers & Operations Research* (89), pp. 94-112.
- Bouhana A., Chabchoub H., Abed M., Fekih A. 2013. A multi-criteria decision making approach based on fuzzy theory and fuzzy preference relations for urban distribution centers' location selection under uncertain environments. *2013 International Conference on Advanced Logistics and Transport*, IEEE, pp. 556-561.
- Bräysy, O., Gendreau, M. 2005. Vehicle routing with time windows, part 1: Route construction and local search algorithms. *Transportation Science* (39:1), pp. 104-118.
- Breitner, M.H. 2008. Optionen und andere Derivate bepreisen und optimieren: Die WARRANT-PRO[®] Suite. <https://docplayer.org/2205362-Optionen-und-andere-derivate-bepreisen-und-optimieren-die-warrant-pro-suite.html> (Letzter Zugriff am 26.01.2020).
- Caceres-Cruz, J., Riera, D., Juan, A., Arias, P., Guimarans, D. 2015. Rich vehicle routing problem: Survey. *ACM Computing Surveys* (47:2), pp. 1-29.

- Castrellón-Torres J.P., Chaparro J.S.T., Barrera N.E.M., Acosta J.H.T., Jaimes W.A. 2018. Information technology in city logistics: A decision support system for off-hour delivery programs. In: *Exploring intelligent decision support systems*. Valencia-García R., Paredes-Valverde M.A., Pilar Salas-Zárate M., Alor-Hernández G., Eds., Springer, Cham, Switzerland, pp. 221-238.
- Cattaruzza, D., Absi, N., Feillet, D. 2016. The multi-trip vehicle routing problem with time windows and release dates. *Transportation Science* (50:2), pp. 676-693.
- Cattaruzza, D., Absi, N., Feillet, D., González-Feliu, J. 2017. Vehicle routing problems for city logistics. *EURO Journal on Transportation and Logistics* (6:1), pp. 51-79.
- Cepolina E.M., Farina A. 2015. Optimization of the FURBOT urban freight transport scheme. *Transportation Research Procedia* (5), pp. 119-131.
- Ceselli, A., Righini, G., Salani, M. 2009. A column generation algorithm for a rich vehicle-routing problem. *Transportation Science* (43:1), pp. 56-69.
- Chan Y., Carter W.B., Burnes M.D. 2001. A multiple-depot, multiple-vehicle, location-routing problem with stochastically processed demands. *Computers & Operations Research* (28:8), pp. 803-826.
- Ćirović G., Pamučar D., Božanić D. 2014. Green logistic vehicle routing problem: Routing light delivery vehicles in urban areas using a neuro-fuzzy model. *Expert Systems with Applications* (41:9), pp. 4245-4258.
- Clarivate Analytics 2019. Welcome to Journal Citation Reports. <https://jcr.clarivate.com/IC2JCRDownload.action> (Letzter Zugriff am 02.03.2020).
- Clewlow, R.R., Mishra, G.S. 2017. Disruptive transportation: The adoption, utilization, and impacts of ride-hailing in the United States. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, Research Report UCD-ITS-RR-17-07.
- Coelho, V.N., Grasas, A., Ramalhinho, H., Coelho, I.M., Souza, M.J.F., Cruz, R.Z. 2016. An ILS-based algorithm to solve a large-scale real heterogeneous fleet VRP with multi-trips and docking constraints. *European Journal of Operational Research* (250:2), pp. 367-376.
- Cordeau, J.-F., Gendreau, M., Laporte, G. 1997. A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. *Networks: An International Journal* (30:2), pp. 105-119.

- Cordeau, J.-F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J.V., Semet, F. 2002. A guide to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research Society* (53:5), pp. 512-522.
- Cordeau, J.-F., Maischberger, M. 2010. A parallel iterated tabu search heuristic for vehicle routing problems. *Computers & Operations Research* (39:9), pp. 2033-2050.
- Crainic T.G., Ricciardi N., Storchi G. 2004. Advanced freight transportation systems for congested urban areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* (12:2), pp. 119-137.
- Crainic, T.G., Crisan, G.C., Gendreau, M., Lahrichi, N., Rei, W. 2009a. A concurrent evolutionary approach for rich combinatorial optimization. In: *Proceedings of the 11th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation Conference*, Montreal, QC, Canada, 8–12 July 2009, pp. 2017-2022.
- Crainic, T.G., Crisan, G.C., Gendreau, M., Lahrichi, N., Rei, W. 2009b. Multi-thread integrative cooperative optimization for rich combinatorial problems. In: *Proceedings of the 23rd IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*, Rome, Italy, 23–29 May 2009, 8p.
- Dantzig G.B., Ramser J.H. 1959. The truck dispatching problem. *Management Science* (6:1), pp. 80-91.
- De Oliveira L.M., Morganti E., Dablanc L., de Oliveira R.L.M. 2017. Analysis of the potential demand of automated delivery stations for e-commerce deliveries in Belo Horizonte, Brazil. *Research in Transportation Economics* (65), pp. 34-43.
- Dedrick, J. 2010. Green IS: Concepts and Issues for Information Systems Research. *Communications of the Association for Information Systems* (27:1), pp. 173-184.
- Dell’Amico, M., Deloof W., Hadjidimitriou N.S., Vernet G., Schoenewolf W. 2011. CityLog – Sustainability and Efficiency of City Logistics: The M-BBX (Modular Bento-Box System). *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*, pp. 132-135.
- Demir E., Bektas T., Laporte G. 2014. The bi-objective pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research* (232:3), pp. 464-478.
- Derigs, U., Kurowsky, R., Vogel, U. 2011. Solving a real-world vehicle routing problem with multiple use of tractors and trailers and EU-regulations for drivers arising in air

- cargo road feeder services. *European Journal of Operational Research* (213:1), pp. 309-319.
- Derigs, U., Pullmann, M., Vogel, U. 2013. A short note on applying a simple LS/LNS-based metaheuristic to the rollon–rolloff vehicle routing problem. *Computers & Operations Research* (40:3), pp. 536-546.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) 2011. Modellregion Elektromobilität Berlin/Potsdam, E-City-Logistik. https://www.dlr.de/vf/en/desktopdefault.aspx/tabid-958/4508_read-28668/ (Letzter Zugriff am 19.01.2020).
- DHL 2017. DHL expands green urban delivery with city hub for cargo bicycles. http://www.dhl.com/en/press/releases/releases_2017/all/express/dhl_expands_green_urban_delivery_with_city_hub_for_cargo_bicycles.html (Letzter Zugriff am 14.12.2019).
- Diabat A., Simchi-Levi D. 2009. A carbon-capped supply chain network problem. *2009 IEEE international conference on industrial engineering and engineering management*. IEEE, Hong Kong, pp. 523-527.
- Díaz-Madroñero M., Peidro D., Mula J. 2015. A review of tactical optimization models for integrated production and transport routing planning decisions. *Computers & Industrial Engineering* (88), pp. 518-535.
- Digiesi S., Fanti M.P., Mummolo G., Silvestri B. 2017. Externalities reduction strategies in last mile logistics: A review. *2017 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*. IEEE, Bari, pp. 248-253.
- Drexl M. 2012. Rich vehicle routing in theory and practice. *Logistics Research* (5:1-2), pp. 47-63.
- Dürkoop, M., Leyerer, M., Breitner, M.H. 2019. Lastenfahrräder im urbanen Wirtschaftsverkehr: Anforderungen von Handwerkern und Apothekern. *IWI Diskussionspapier #87*, 37 p.
- Ehrler V.C., Hebes P. 2012. Electromobility for city logistics - The solution to urban transport collaps? An analysis beyond theory. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* (48), pp. 786-795.
- Eksioglu, B., Vural A.V., Reisman, A. 2009. The Vehicle Routing Problem. A Taxonomic Review. *Computers & Industrial Engineering* (57:4), pp. 1472-1483.

- El Fallahi, A., Prins, C., Wolfler Calvo, R. 2008. A Memetic Algorithm and a Tabu Search for the Multi-Compartment Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research* (35:5), pp. 1725-1741.
- Emeç, U., Çatay, B., Bozkaya, B. 2016. An Adaptive Large Neighborhood Search for an E-Grocery Delivery Routing Problem. *Computers & Industrial Engineering* (69), pp. 109-125.
- Europäische Kommission (EUK) 2011. White paper on transport - Roadmap to a single European transport area - Towards a competitive and resource-efficient transport system. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Europäische Kommission (EUK) 2013. A call to action on urban logistics. European Commission Staff Working Document, Brussels.
- Fedoseeva, S., Herrmann, R., Nickolaus, K. 2017. Was the Economics of Information Approach Wrong all the Way? Evidence from German Grocery R(E)tailing. *Journal of Business Research* (80), pp. 63-72.
- Feess, E. 2019. Definition: Externer Effekt. Gabler Wirtschaftslexikon. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/externer-effekt-34801/version-372602> (Letzter Zugriff am: 13.12.2019).
- Figliozzi M., Tipagornwong C. 2017. Impact of last mile parking availability on commercial vehicle costs and operations. *Supply Chain Forum: An International Journal* (18:2), pp. 60-68.
- Figliozzi M.A. 2010. Vehicle routing problem for emissions minimization. *Transportation Research Record* (2197:1), pp. 1-6.
- Fikar, C. 2018. A Decision Support System to Investigate Food Losses in E-Grocery Deliveries. *Computers & Industrial Engineering* (117), pp. 282-290.
- Fosshem K., Andersen J. 2017. Plan for sustainable urban logistics—comparing between Scandinavian and UK practices. *European Transport Research Review* (9:52), 13 p.
- Gardi, F., Benoist, T., Darlay, J., Estellon, B., Megel, R. 2014. Local Search for 0-1 Non-linear Programming. In: *Mathematical Programming Solver Based on Local Search*, Gardi, F., Benoist, T., Darlay, J., Estellon, B., Megel, R., Eds., John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, pp. 29–51.

- Gayialis S.P., Tatsiopoulou I.P. 2004. Design of an IT-driven decision support system for vehicle routing and scheduling. *European Journal of Operational Research* (152:2), pp. 382-398.
- Gebski, S.A., Czerwinski, P., Leyerer, M., Sonneberg, M.-O., Breitner, M.H. 2018. Ein Entscheidungsunterstützungssystem zur Tourenplanung am Beispiel eines innovativen Lebensmittel-Lieferkonzeptes. *Tagungsband der Multikonferenz Wirtschaftsinformatik (MKWI) 2018*, Lüneburg, Deutschland, pp. 21-32.
- Gevaers R., van de Voorde E., Vanelslander T. 2009. Characteristics of innovations in last-mile logistics - Using best practices, case studies and making the link with green and sustainable logistics. *Association for European Transport and contributors 2009*.
- Gholami, R., Watson, R.T., Molla, A., Hasan, H., Bjørn-Andersen, N. 2016. Information systems solutions for environmental sustainability: How can we do more? *Journal of the Association for Information Systems* (17:8), pp. 521-536.
- Gianessi P., Alfandari L., Létocart L., Wolfler Calvo R. 2015. The multicommodity-ring location routing problem. *Transportation Science* (50:2), pp. 541-558.
- Goel, A. 2010. A column generation heuristic for the general vehicle routing problem. *4th International Conference on Learning and Intelligent Optimization*, Venice, Italy, 18-22 January 2010, pp. 1-9.
- Guastaroba G., Speranza M.G., Vigo D. 2016. Intermediate facilities in freight transportation planning: A survey. *Transportation Science* (50:3), pp. 763-789.
- Handelsverband Deutschland (HDE) 2019. Online Monitor 2019.
- Hartl, M. 2015. Ruby on rails tutorial: learn Web development with rails. Addison-Wesley Professional.
- Hartl, R.F., Hasle, G., Janssens, G.K. 2006. Special issue on rich vehicle routing problems. *Central European Journal of Operations Research* (14:2), pp. 103-104.
- Hasle, G., Kloser, O. 2007. Industrial vehicle routing. In: *Geometric Modelling, Numerical Simulation, and Optimization*, Hasle, G., Lie, K.-A., Quak, E., Eds., Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 397-436.
- Hassan, N.R. 2014. Value of IS research: Is there a crisis? *Communications of the Association for Information Systems* (34), pp. 801-816.

- He Z., Haasis H.D. 2019. Integration of urban freight innovations: Sustainable inner-urban intermodal transportation in the retail/postal industry. *Sustainability* (11:1749), 25 p.
- Heinzl, A., Schoder, D., Frank, R. 2008. WI-Orientierungslisten. *Wirtschaftsinformatik* (50), pp. 155-163.
- Hemmelmayr, V., Doerner, K.F., Hartl, R.F., Rath, S. 2013. A heuristic solution method for node routing based solid waste collection problems. *Journal of Heuristics* (19:2), pp. 129-156.
- Hennig-Thurau, T., Sattler, H., Dyckhoff, H., Franke, N., Schreyögg, N. 2015. Liste der Fachzeitschriften in VHB-JOURQUAL3. <https://vhbonline.org/vhb4you/vhb-jourqual/vhb-jourqual-3/gesamtliste> (Letzter Zugriff am 02.03.2020).
- Hevner, A. R. 2007. A three cycle view of design science research. *Scandinavian Journal of Information Systems* (19:2), pp. 87-92.
- Hevner, A.R., March, S.T., Park, J., Ram, S. 2004. Design science in information systems research. *Management Information Systems Quarterly* (28), pp. 75-105.
- Holguin-Veras, J., Hodge, S., Wojtowicz, J., Singh, C., Wang, C., Jaller, M., Aros-Vera, F., Ozbay, K., Weeks, A., Replogle, M. et al. 2018. The New York City off-hour delivery program: A business and community-friendly sustainability program. *INFORMS Journal of Applied Analytics* (48:1), pp. 70-86.
- Holland, C., Levis, J., Nuggehalli, R., Santilli, R., Winters, J. 2017. UPS optimizes delivery routes. *INFORMS Journal of Applied Analytics* (47:1), pp. 8-23.
- Holzapfel, A., Hübner, A., Kuhn, H., Sternbeck, M.G. 2016. Delivery Pattern and Transportation Planning in Grocery Retailing. *European Journal of Operational Research* (252:1), pp. 54-68.
- Hsu, C.-I., Chen, W.-T. 2014. Optimizing Fleet Size and Delivery Scheduling for Multi-Temperature Food Distribution. *Applied Mathematical Modelling* (38:3), pp. 1077-1091.
- Hübner, A., Kuhn, H., Wollenburg, J. 2016. Last Mile Fulfilment and Distribution in Omni-Channel Grocery Retailing: A Strategic Planning Framework. *International Journal of Retail & Distribution Management* (44:3), pp. 228-247.

- Ibeas, A., Moura, J.L., Dell'Olio, L. 2009. Planning school transport: Design of routes with flexible school opening times. *Transportation planning and technology* (32:6), pp. 527-544.
- Institute of Grocery Distribution (IGD). 2018. Leading Global Online Grocery Markets to Create a \$227bn Growth Opportunity by 2023. <https://www.igd.com/articles/article-viewer/t/leading-global-online-grocery-markets-to-create-a-227bn-growth-opportunity-by-2023/i/20396> (Letzter Zugriff am 02.02.2020).
- Internationales Verkehrswesen. 2017. Grüne Zustellung: Micro-Depots in Münchens Innenstadt. <https://www.internationales-verkehrswesen.de/zustellung-ab-micro-depots/> (Letzter Zugriff am 17.01.2020).
- Iwan, S., Kijewska, K., Lemke, J. 2016. Analysis of Parcel Lockers' Efficiency as the Last Mile Delivery Solution – The Results of the Research in Poland. *Transportation Research Procedia* (12), pp. 644-655.
- Jabir, E., Panicker, V.V., Sridharan, R. 2015. Multi-objective optimization model for a green vehicle routing problem. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* (189), pp. 33-39.
- Kitchenham, B., Brereton, O.P., Budgen, D., Turner, M., Bailey, J., Linkman, S. 2009. Systematic literature reviews in software engineering — A systematic literature review. *Information and software technology* (51:1), pp. 7-15.
- Klose A., Drexl A. 2005. Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research* (162:1), pp. 4-29.
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., Laporte, G. 2016. The impact of depot location, fleet composition and routing on emissions in city logistics. *Transportation Research Part B: Methodological* (84), pp. 81-102.
- Kommune Oslo, 2019. Car free city life in Oslo. <https://www.oslo.kommune.no/english/politics-and-administration/green-oslo/best-practices/car-free-city> (Letzter Zugriff am 02.02.2020).
- Korzhenevych, A., Dehnen, N., Bröcker, J., Holtkamp, M., Meier H., Gibson G., Varma V., Cox V. 2014. Update of the handbook on external costs of transport: Final report. European Commission - DG Mobility and Transport, Oxfordshire.

- Kovacs, A.A., Golden, B.L., Hartl, R.F., Parragh, S.N. 2015. The generalized consistent vehicle routing problem. *Transportation Science* (49:4), pp. 796-816.
- Kritzinger, S., Doerner, K.F., Hartl, R.F., Kiechle, G., Stadler, H., Manohar, S.S. 2012. Using traffic information for time-dependent vehicle routing. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* (39), pp. 217-229.
- Lahyani, R., Khemakhem, M., Semet, F. 2015. Rich vehicle routing problems: From a taxonomy to a definition. *European Journal of Operational Research* (241:1), pp. 1-14.
- Lahyani, R., Coelho, L.C., Khemakhem, M., Laporte, G., Semet, F. 2014. A multi-compartment vehicle routing problem arising in the collection of olive oil in Tunisia. *Omega* (51), pp. 1-10.
- Lanzinger, R. 2019. Fahrermangel verschärft sich - BGL fürchtet Versorgungsengpässe. <https://www.eurotransport.de/artikel/fahrermangel-verschaerft-sich-bgl-fuerchtet-versorgungsengpaesse-10919947.html> (Letzter Zugriff am 16.01.2020).
- Laporte, G. 2009. Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science* (43:4), pp. 408-416.
- Laporte, G. 1992. The vehicle routing problem. An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research* (59), pp. 345-458.
- Lenstra, J.K., Kan, A.H.G. 1981. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks* (11:2), pp. 221-227.
- Leyerer, M., Sonneberg, M.-O., Breitner, M.H. 2018. Decision Support for Urban E-Grocery Operations. *Proceedings of the 24th Americas Conference on Information Systems (AMCIS) 2018*, New Orleans, USA, 10 p.
- Leyerer, M., Sonneberg, M.-O., Heumann, M., Breitner, M.H. 2019b. Decision Support for Sustainable and Resilience-Oriented Urban Parcel Delivery. *EURO Journal on Decision Processes* (7:3), pp. 267-300.
- Leyerer, M., Sonneberg, M.-O., Heumann, M., Breitner, M.H. 2020. Shortening the Last Mile of e-Grocery: Optimizing a New Logistics Concept for Urban Areas. *Smart Cities*, (3:3), pp. 585-603.

- Leyerer, M., Sonneberg, M.-O., Heumann, M., Kammann, T., Breitner, M.H. 2019a. Individually Optimized Commercial Road Transport: A Decision Support System for Customizable Routing Problems. *Sustainability* 2019 (11:5544), 21 p.
- Li F., Liu T., Zhang H., Cao R., Ding W., Fasano J.P. 2008. Distribution center location for green supply chain. *2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, IEEE, Beijing, China, pp. 2951-2956.
- Li J.Q., Borenstein D., Mirchandani P.B. 2007. A decision support system for the single-depot vehicle rescheduling problem. *Computers & Operations Research* (34:4), pp. 1008-1032.
- Libert, L. 2017. Paris rolls out color-code stickers for cars to curb pollution. <https://www.reuters.com/article/us-france-pollution/paris-rolls-out-color-code-stickers-for-cars-to-curb-pollution-idUSKBN1572DO> (Letzter Zugriff am 02.02.2020).
- Lin C., Choy K.L., Ho G.T.S., Lam H.Y., Pang G.K.H., Chin K.S. 2014. A decision support system for optimizing dynamic courier routing operations. *Expert Systems with Applications* (41:15), pp. 6917-6933.
- Lin, C., Choy, K.L., Ho, G.T.S., Chung, S.H., Lam, H.Y. 2014. Survey of green vehicle routing problem. Past and future trends. *Expert Systems with Applications* (41:4), pp. 1118-1138.
- López-Sánchez, A.D., Hernández-Díaz, A.G., Vigo, D., Caballero, R., Molina, J. 2014. A multi-start algorithm for a balanced real-world open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research* (238:1), pp. 104-113.
- Malhotra, A., Melville, N.P., Watson, R.T. 2013. Spurring impactful research on information systems for environmental sustainability. *Management Information Systems Quarterly* (37:4), pp. 1265-1274.
- Martín, J.C., Pagliara, F., Román, C. 2019. The Research Topics on E-Grocery: Trends and Existing Gaps. *Sustainability* (11:2) pp. 1-15.
- McLoed S., Schapper J.H.M., Curtis C., Graham G. 2019. Conceptualizing freight generation for transport and land use planning: A review and synthesis of the literature. *Transport Policy* (74), pp. 24-34.

- Metzger, J., Kollmann, T., Sjurts, I. 2018. Definition: E-Commerce. Gabler Wirtschaftslexikon. [https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/e-commerce-34215/ version-257721](https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/e-commerce-34215/version-257721) (Letzter Zugriff am 06.12.2020).
- Mkansi, M., Eresia-Eke, C., Emmanuel-Ebikake, O. 2018. E-Grocery Challenges and Remedies: Global Market Leaders Perspective. *Cogent Business & Management* (5:1), pp. 1-28.
- Moutaoukil A., Neubert G., Derrouiche R. 2015. Urban freight distribution: The impact of delivery time on sustainability. *IFAC PapersOnLine* (48:3), pp. 2368-2373.
- Murray C.C., Chu A.G. 2015. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* (54), pp. 86-109.
- Nataraj S., Ferone D., Quintero-Araujo C., Juan A., Festa P. 2019. Consolidation centers in city logistics: A cooperative approach based on the location routing problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations* (10:3), pp. 393-404.
- Nowak, A. und Leymann F. 2018a. Definition: Ökonomische Nachhaltigkeit. Gabler Wirtschaftslexikon. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/oekonomische-nachhaltigkeit-53449/version-276538> (Letzter Zugriff am 17.01.2020).
- Nowak, A. und Leymann F. 2018b. Definition: Ökologische Nachhaltigkeit. Gabler Wirtschaftslexikon. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/oekologische-nachhaltigkeit-53450/version-276539> (Letzter Zugriff am 17.01.2020).
- Nowak, A. und Leymann F. 2018c. Definition: Soziale Nachhaltigkeit. Gabler Wirtschaftslexikon. [https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/soziale-nachhaltigkeit-53451/ version-276540](https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/soziale-nachhaltigkeit-53451/version-276540) (Letzter Zugriff am 17.01.2020).
- Oppen, J., Løkketangen, A., Desrosiers, J. 2010. Solving a rich vehicle routing and inventory problem using column generation. *Computers & Operations Research* (37:7), pp. 1308-1317.
- Osaba, E., Yang, X.-S., Diaz, F., Onieva, E., Masegosa, A.D., Perallos, A. 2017. A discrete firefly algorithm to solve a rich vehicle routing problem modelling a newspaper distribution system with recycling policy. *Soft Computing* (21:18), pp. 5295-5308.

- Pamučar D., Gigović L., Ćirović G., Regodić M. 2016. Transport spatial model for the definition of green routes for city logistics centers. *Environmental Impact Assessment Review* (56), pp. 72-87.
- Perl, J., Daskin, M.S. 1985. A Warehouse Location-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological* (19:5), pp. 381-396.
- Pisinger, D., Ropke, S. 2007. A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers & Operations Research* (34:8), pp. 2403-2435.
- Prescott-Gagnon, E., Desaulniers, G., Rousseau, L.-M. 2014. Heuristics for an oil delivery vehicle routing problem. *Flexible Services and Manufacturing Journal* (26:4), pp. 516-539.
- Prins, C., Prodhon, C., Ruiz, A., Soriano, P., Wolfler Calvo, R. 2007. Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative lagrangean relaxation-granular tabu search heuristic. *Transportation Science* (41), pp. 470-483.
- Prins, C., Prodhon, C., Wolfler Calvo, R. 2006. A memetic algorithm with population management (MA| PM) for the capacitated location-routing problem. *Proceedings of the European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, Budapest, Hungary, 10–12 April 2006, Gottlieb, J., Raidl, G.R., Eds., Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2006, pp. 183-194.
- Prodhon, C., Prins, C. 2014. A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research* (238:1), pp. 1-17.
- Quintero-Araujo, C.L., Gruler, A., Juan, A.A., Faulin, J. 2019. Using horizontal cooperation concepts in integrated routing and facility-location decisions. *International Transactions in Operational Research* (26:2), pp. 551-576.
- Rademeyer, A.L., Lubinsky, D.J. 2017. A decision support system for strategic, tactical and operational visit planning for on-the-road personnel. *South African Journal of Industrial Engineering* (28:1), pp. 57-72.
- Rais, A., Alvelos, F., Carvalho, M.S. 2014. New mixed integer-programming model for the pickup-and-delivery problem with transshipment. *European Journal of Operational Research* (235:3), pp. 530-539.

- Ramudhin, A., Chaabane, A., Kharoune, M., Paquet, M. 2008. Carbon market sensitive green supply chain network design. *International Journal of Management Science and Engineering Management* (5:1), pp. 1093-1097.
- Ranieri, L., Digiesi, S., Silvestri, B., Roccotelli, M. 2018. A review of last mile logistics innovations in an externalities cost reduction vision. *Sustainability* (10:782), 18 p.
- Rao, C., Goh, M., Zhao, Y., Zheng, J. 2015. Location selection of city logistics centers under sustainability. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* (36), pp. 29-44.
- Rasmussen, M.S., Justesen, T., Dohn, A., Larsen, J. 2012. The home care crew scheduling problem. Preference-Based Visit Clustering and Temporal Dependencies. *European Journal of Operational Research* (219:3), pp. 598-610.
- Reuters, 2018. Factbox: German cities ban older diesel cars. <https://www.reuters.com/article/us-germany-emissions-factbox/factbox-german-cities-ban-older-diesel-cars-idUSKCN1NK28L> (Letzter Zugriff am 02.02.2020).
- Rieck, J., Zimmermann, J. 2010. A new mixed integer linear model for a rich vehicle routing problem with docking constraints. *Annals of Operations Research* (181:1), pp. 337-358.
- Rose, M., Tautz, S.-J., Leyerer, M., Breitner, M.H. 2019. Smart Mobility in Smart Cities: Chances and Challenges of Autonomous Passenger Transport. *IWI Diskussionspapier #92*, 47 p.
- Ruiz, R., Maroto, C., Alcaraz, J. 2004. A decision support system for a real vehicle routing problem. *European Journal of Operations Research* (153:3), pp. 593-606.
- Salhi, S., Rand, G. 1989. The Effect of Ignoring Routes when Locating Depots. *European Journal of Operational Research* (39:2), pp. 150-156.
- Santillán, C.G., Reyes, L.C., Rodriguez, M.L.M., Barbosa, J.J.G., López, O.C., Zarate, G.R., Hernández, P. 2012. Variants of VRP to optimize logistics management problems. In: *Logistics Management and Optimization through Hybrid Artificial Intelligence Systems*, Zezzatti, O., Ochoa, C.A., Chira, C., Hernandez, A., Basurto, M., Eds., IGI Global: Hershey, PA, USA, pp. 207–237.

- Santos, L., Coutinho-Rodrigues, J., Antunes, C.H. 2011. A web spatial decision support system for vehicle routing using google maps. *Decision Support Systems* (51:1), pp. 1-9.
- Savelsberg, M., Van Woensel, T. 2016. 50th Anniversary Invited Article – City Logistics: Challenges and Opportunities. *Transportation Science* (50:2), pp. 579-590.
- Schäfer, P.K., Väth, J., Bierwirth, B., Uhing, K. 2019. Analyse des Wirtschaftsverkehrs in der Innenstadt der Landeshauptstadt Wiesbaden. Frankfurt University of Applied Sciences.
- Schiffer, M., Walther, G. 2017. An adaptive large neighborhood search for the location-routing problem with intra-route facilities. *Transportation Science* (52:2), pp. 331-352.
- Schiffer, M., Walther, G. 2018. Strategic planning of electric logistics fleet networks: A robust location-routing approach. *Omega* (80), pp. 31-42.
- Schmid, V., Doerner, K.F., Laporte, G. 2013. Rich routing problems arising in supply chain management. *European Journal of Operational Research* (224:3), pp. 435-448.
- Schmidt, G., Wilhelm, W.E. 2000. Strategic, tactical and operational decisions in multi-national logistics networks: A review and discussion of modelling issues. *International Journal of Production Research* (38:7), pp. 1501-1523.
- Schneider, M., Löffler, M. 2017. Large composite neighborhoods for the capacitated location-routing problem. *Transportation Science* (53:1), pp. 301-318.
- Seidel, S., Mareš, N., Blanquart, C. 2016. Innovations in E-Grocery and Logistics Solutions for Cities. *Transportation Research Procedia* (12), pp. 825-835.
- Seitz, C., Pokrivčák, J., Tóth, M., Plevný, M. 2017. “Online Grocery Retailing in Germany: An Explorative Analysis. *Journal of Business Economics and Management* (18:6), pp. 1243-1263.
- Silva, M.M., Subramanian, A., Ochi, L.S. 2015. An iterated local search heuristic for the split delivery vehicle routing problem. *Computers & Operations Research* (53), pp. 234-249.
- Simoni, M.D., Bujanovic, P., Boyles, S.D., Kutanoglu, E. 2018. Urban consolidation solutions for parcel delivery considering location, fleet and route choice. *Case Studies on Transport Policy* (6:1), pp.112-124.

- Sonneberg, M.-O., Leyerer, M., Kleinschmidt, A., Knigge, F., Breitner, M.H. 2019a. Autonomous Unmanned Ground Vehicles for Urban Logistics: Optimization of Last Mile Delivery Operations. *Proceedings of the 52th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) 2019*, Maui, USA, 10 p.
- Sonneberg, M.-O., Werth, O., Leyerer, M., Wille, W., Jarlik, M., Breitner, M.H. 2019b. An Empirical Study of Customers' Behavioral Intention to Use Ridepooling Services – An Extension of the Technology Acceptance Model. *Proceedings of the 14th International Conference on Wirtschaftsinformatik (WI) 2019*, Siegen, Germany, pp. 83-97.
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Bektaş, T. 2015. The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations. *International Journal of Production Economics* (164), pp. 366-378.
- Statistisches Bundesamt, 2019. Statistisches Jahrbuch - Deutschland und Internationales 2019.
- Stenger, A., Schneider, M., Goeke, D. 2013. The prize-collecting vehicle routing problem with single and multiple depots and non-linear cost. *EURO Journal on Transportation and Logistics* (2:1-2), pp. 57-87.
- Talbi, E.G. 2009. Metaheuristics: From Design to Implementation, 74th ed. John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA.
- Taniguchi, E. 2014. Concepts of city logistics for sustainable and livable cities. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* (151), pp. 310-317.
- Taniguchi, E., Thompson, R.G., Yamada, T., van Duin, R. 2001. City logistics: Network modelling and intelligent transport systems. Pergamon, Oxford.
- Taniguchi, E. und Thompson, R.G. 2014. City logistics: Mapping the future. CRC Press.
- Tob-Ogu, A., Kumar, N., Cullen, J., Ballantyne, E. 2018. Sustainability intervention mechanisms for managing road freight transport externalities: A systematic literature review. *Sustainability* (10:1923), 18 p.
- Toth, P., Vigo, D. 2001. The Vehicle Routing Problem, Society for Industrial and Applied Mathematics. *Siam Monographs on Discrete Mathematics and Applications*.

- Tricoire, F., Parragh, S.N. 2017. Investing in logistics facilities today to reduce routing emissions tomorrow. *Transportation Research Part B: Methodological* (103), pp. 56-67.
- United Nations (UN), 2014. World urbanization prospects: The 2014 revision. Department of Economic and Social Affairs, New York.
- United Parcel Service (UPS), 2017. UPS launches sustainable deliveries in Frankfurt. UPS Pressemitteilung (Letzter Zugriff am 17.12.2019).
- Van Audenhove, F.-J., De Jongh, S., Durance, M. 2015. Urban Logistics: How to unlock value from last mile delivery for cities, transporters and retailers. Arthur D. Little.
- Vidal, T., Crainic, T.G., Gendreau, M., Lahrichi, N., Rei, W. 2012. A hybrid genetic algorithm for multidepot and periodic vehicle routing problems. *Operations Research* (60:3), pp. 611-624.
- Waitz, M., Mild, A., Fikar, C. 2018. A Decision Support System for Efficient Last-Mile Distribution of Fresh Fruits and Vegetables as Part of E-Grocery Operations. *Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) 2018*, Maui, USA, 9 p.
- Wang, F., Lai, X., Shi, N. 2011. A multi-objective optimization for green supply chain network design. *Decision Support Systems* (51:2), pp. 262-269.
- Wang, X., Yuen, K.F., Wang, Y.D., Teo, C.C. 2018a. An innovation diffusion perspective of e-consumers' initial adoption of self-collection service via automated parcel station. *The International Journal of Logistics Management* (29:1), pp. 237-260.
- Wang, Y., Assogba, K., Liu, Y., Ma, X., Xu, M., Wang, Y. 2018b. Two-echelon location-routing optimization with time windows based on customer clustering. *Expert Systems with Applications* (104), pp. 244-260.
- Watson, R.T., Boudreau, M.C., Chen, A.J. 2010. Information systems and environmentally sustainable development: Energy informatics and new directions for the IS community. *Manag. Inf. Syst. Q.*, 34, 23–38.
- Webster, J., Watson, R. 2002. Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. *Management Information Systems Quarterly* (26:2), pp. 13-23.

- Wen, M., Cordeau, J.-F., Laporte, G., Larsen, J. 2009. The dynamic multi-period vehicle routing problem. *Computers & Operations Research* (37:9), pp. 1615-1623.
- Werth, O., Sonneberg, M.-O., Leyerer, Breitner, M.H. 2020. Behavioral Intention to Use Ridepooling Services – Empirical Insights and Recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* (eingereicht).
- Winkenbach, M., Kleindorfer, P. R., Spinler, S. 2016. Enabling urban logistics services at La Poste through multi-echelon location-routing. *Transportation Science* (50:2), pp. 520-540.
- Wollenburg, J., Hübner, A., Kuhn, H., Trautrim A. 2018. From Bricks-and-Mortar to Bricks-and-Clicks: Logistics Networks in Omni-Channel Grocery Retailing. *International Journal of Retail & Distribution Management* (48:4), pp. 415-438.
- Wu, T.H., Low, C., Bai, J.W. 2002. Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems. *Computers & Operations Research* (29:10), pp. 1393-1415.
- Yang, P., Zeng, L. 2018. Models and methods for two-echelon location routing problem with time constraints in city logistics. *Mathematical Problems in Engineering* (2018:2549713), 9 p.
- Yao, E., Lang, Z., Yang, Y., Zhang, Y. 2015. Vehicle routing problem solution considering minimising fuel consumption. *IET Intelligent Transport Systems* (9:5), pp. 523-529.
- Yu, V.F., Lin, S.-W., Lee, W., Ting, C.-J. 2010. A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem. *Computers & Industrial Engineering* (58:2), pp. 288-299.
- Zhao, Q., Wang, W., de Souza, R. 2018. A heterogeneous fleet two-echelon capacitated location-routing model for joint delivery arising in city logistics. *International Journal of Production Research* (56:15), pp. 5062-5080.
- Zhou, L., Wang, X., Ni, L., Lin, Y. 2016. Location-routing problem with simultaneous home delivery and customer's pickup for city distribution of online shopping purchases. *Sustainability* (8:828), 20 p.
- Zmud, R. 1997. Editor's Comments. *Management Information Systems Quarterly* (21:2), pp. xxi-xxii.

Anhang

- Anhang A: Ein Entscheidungsunterstützungssystem zur Tourenplanung am Beispiel eines innovativen Lebensmittel-Lieferkonzeptes
- Anhang B: Decision Support for Urban E-Grocery Operations
- Anhang C: Autonomous Unmanned Ground Vehicles for Urban Logistics: Optimization of Last Mile Delivery Operations
- Anhang D: An Empirical Study of Customers' Behavioral Intention to Use Ridepooling Services – An Extension of the Technology Acceptance Model
- Anhang E: Lastenfahrräder im urbanen Wirtschaftsverkehr: Anforderungen von Handwerkern und Apothekern
- Anhang F: Individually Optimized Commercial Road Transport: A Decision Support System for Customizable Routing Problems
- Anhang G: Smart Mobility in Smart Cities: Chances and Challenges of Autonomous Passenger Transport
- Anhang H: Decision Support for Sustainable and Resilience-Oriented Urban Parcel Delivery
- Anhang I: Shortening the Last Mile of e-Grocery: Optimizing a New Logistics Concept for Urban Areas
- Anhang J: Behavioral Intention to Use Ridepooling Services – Empirical Insights and Recommendations

Anhang A: Ein Entscheidungsunterstützungssystem zur Tourenplanung am Beispiel eines innovativen Lebensmittel-Lieferkonzeptes

Zitation: Gebski, S.A., Czerwinski, P., Leyerer, M., Sonneberg, M.-O., Breitner, M.H. (2018). Ein Entscheidungsunterstützungssystem zur Tourenplanung am Beispiel eines innovativen Lebensmittel-Lieferkonzeptes. *Tagungsband der Multikonferenz Wirtschaftsinformatik (MKWI) 2018*, Lüneburg, Deutschland, pp. 21-32.

Link: http://mkwi2018.leuphana.de/wp-content/uploads/MKWI2018_Band1.pdf

Abstract: Die weltweite Urbanisierung führt zu einer erhöhten Nachfrage von innerstädtischen Gütertransporten, wodurch das Verkehrsnetz belastet wird. Moderne Technologie sowie die Nutzung verfügbarer GIS Daten bieten den Anreiz zur Entstehung alternativer und innovativer Lieferkonzepte. Davon betroffen sind ebenfalls urbane Lebensmittel-Lieferdienste, die durch Verwendung verfügbarer mobiler Daten Lieferungen effizienter gestalten können. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit einem innovativen Lebensmittel-Lieferkonzept. Hierzu wird ein gemischt ganzzahliges Optimierungsmodell auf Basis eines Vehicle Routing Problems (VRP) mit dem Ziel der dynamischen Zuordnung und Reihenfolgeplanung formuliert. Charakteristisch für die vorliegende Thematik ist die Existenz mehrerer Fahrer in Kombination mit offenen Touren. Die Zuordnung und Planung der Touren wird durch die Implementierung des Optimierungsmodells in ein Entscheidungsunterstützungssystem (EUS) unter Verwendung von Echtzeit Geoinformationsdaten (GIS-Daten) automatisiert und optimiert.

Anhang B: Decision Support for Urban E-Grocery Operations

Zitation: Leyerer, M., Sonneberg, M.-O., Breitner, M.H. (2018). Decision Support for Urban E-Grocery Operations. *Proceedings of the 24th Americas Conference on Information Systems (AMCIS) 2018*, New Orleans, USA.

Link: <https://aisel.aisnet.org/amcis2018/GreenIS/Presentations/5/>

Abstract: We discuss an alternative logistics concept for e-grocery operations using an urban network of refrigerated grocery lockers. Regarding the last mile delivery of food and other fast-moving consumer goods, customers either collect their orders by themselves or the products are delivered by means of electric cargo bicycles. To determine the optimal grocery locker locations and both, the routes from the lockers to the consumers as well as the routes from the depot to the grocery lockers, we propose a 2-echelon optimization model minimizing total costs. We present a Location Routing Problem (LRP) in combination with a customized Vehicle Routing Problem (VRP). With our decision support system (DSS), we react to the call of Malhotra et al. (2013) and Gholami et al. (2016) and address the lack of solution-oriented research. We contribute to the Green IS domain by extending the concept of e-grocery with an environmental and social component.

Anhang C: Autonomous Unmanned Ground Vehicles for Urban Logistics: Optimization of Last Mile Delivery Operations

Zitation: Sonneberg, M.-O., Leyerer, M., Kleinschmidt, A., Knigge, F., Breitner, M.H. (2019). Autonomous Unmanned Ground Vehicles for Urban Logistics: Optimization of Last Mile Delivery Operations. *Proceedings of the 52th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) 2019*, Maui, USA.

Link: <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/handle/10125/59594>

Abstract: In an era dominated by ongoing urbanization and rising e-commerce, the efficient delivery of goods within cities becomes a major challenge. As a new element of urban logistics, we discuss the potential of autonomous unmanned ground vehicles (AUGV) regarding the last mile delivery of shipments to customers. We propose an optimization model to minimize the delivery costs of urban shipments using AUGV. Simultaneously, best locations from a set of existing stations are selected for AUGV positioning and optimal route determination. With our developed Location Routing Problem, we provide decision support for parcel service providers, city authorities, and other relevant decision makers. Regarding the Green Information Systems domain, we tackle the lack of solution-oriented research addressing a more sustainable and locally emission free supply of goods within urban areas.

Anhang D: An Empirical Study of Customers' Behavioral Intention to Use Ride-pooling Services – An Extension of the Technology Acceptance Model

Zitation: Sonneberg, M.-O., Werth, O., Leyerer, M., Wille, W., Jarlik, M., Breitner, M.H. (2019). An Empirical Study of Customers' Behavioral Intention to Use Ridepooling Services – An Extension of the Technology Acceptance Model. *Proceedings of the 14th International Conference on Wirtschaftsinformatik (WI) 2019*, Siegen, Germany, pp. 83-97.

Link: https://wi2019.de/wp-content/uploads/Tagungsband_WI2019_reduziert.pdf

Abstract: Shared mobility services for passenger transportation become increasingly popular all over the world. As services like carsharing are already well-established and well-accepted, ridepooling services are at their early stage and currently within first implementations. The most critical success factor of such services is the customer acceptance. We investigate the acceptance of 115 German questionnaire respondents using and extending the Technology Acceptance Model. Results indicate that the success factors of the developed model serve as useful predictors of the behavioral intention to use ridepooling services. Perceived compatibility was identified to have the strongest impact whereas perceived ease of use and perceived safety are not relevant for accepting ridepooling services. Based on these findings, our paper provides management implications and recommendations to improve acceptance and success of ridepooling services in Germany.

Anhang E: Lastenfahrräder im urbanen Wirtschaftsverkehr: Anforderungen von Handwerkern und Apothekern

Zitation: Dürkoop, M., Leyerer, M., Breitner, M.H. (2019). Lastenfahrräder im urbanen Wirtschaftsverkehr: Anforderungen von Handwerkern und Apothekern. *IWI Diskussionspapier #87*.

Link: https://www.iwi.uni-hannover.de/fileadmin/iwi/Publikationen/DP/IWI_DP_k__87_.pdf

Abstract: Das Ziel des Beitrags ist es, Handwerker und Apotheker hinsichtlich ihrer Anforderungen an Lastenfahrräder zu befragen, um daraus Schlüsse über die Umsetzbarkeit, die Sinnhaftigkeit sowie die Vor- und Nachteile eines gewerblichen Einsatzes von Lastenfahrräder zu ziehen. Dafür wurden Experteninterviews innerhalb der Handwerksbranche und der Apothekenbranche durchgeführt sowie entsprechende Literatur herangezogen. Das Ergebnis der Analyse ist eine mögliche Umsetzung in beiden genannten Branchen, welche jedoch teilweise durch externe Faktoren beeinflusst wird. Bei dem Umstieg auf Lastenfahrräder ergeben sich Vorteile in Bezug auf die Kosten, die Umweltauswirkungen, die Fahr- und Parkzeit bei kurzen Strecken, der Öffentlichkeitsarbeit, der Fahrberechtigung und der Flächennutzung in der Stadt. Nachteile entstehen durch die begrenzte Reichweite, die benötigten Zeit für lange Strecken und dem Wettereinfluss. Gewerbliche Anforderungen bestehen an entsprechende Lagermöglichkeiten und eine fahradaffine Belegschaft. Außerdem sollte die städtische Infrastruktur für Fahrräder gut ausgebaut sein.

Anhang F: Individually Optimized Commercial Road Transport: A Decision Support System for Customizable Routing Problems

Zitation: Leyerer, M., Sonneberg, M.-O., Heumann, M., Kammann, T., Breitner, M.H. (2019). Individually Optimized Commercial Road Transport: A Decision Support System for Customizable Routing Problems. *Sustainability* 2019, 11, 5544.

Link: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/20/5544>

DOI: 10.3390/su11205544

Abstract: The Vehicle Routing Problem (VRP) in its manifold variants is widely discussed in scientific literature. We investigate related optimization models and solution methods to determine the state of research for vehicle routing attributes and their combinations. Most of these approaches are idealized and focus on single problem-tailored routing applications. Addressing this research gap, we present a customizable VRP for optimized road transportation embedded into a Decision Support System (DSS). It integrates various model attributes and handles a multitude of real-world routing problems. In the context of urban logistics, practitioners of different industries and researchers are assisted in efficient route planning that allows for minimizing driving distances and reducing vehicle emissions. Based on the design science research methodology, we evaluate the DSS with computational benchmarks and real-world simulations. Results indicate that our developed DSS can compete with problem-tailored algorithms. With our solution-oriented DSS as final artifact, we contribute to an enhanced economic and environmental sustainability in urban logistic applications.

**Anhang G: Smart Mobility in Smart Cities:
Chances and Challenges of Autonomous Passenger Transport**

Zitation: Rose, M., Tautz, S.-J., Leyerer, M., Breitner, M.H. (2019). Smart Mobility in Smart Cities: Chances and Challenges of Autonomous Passenger Transport. *IWI Diskussionspapier #92*.

Link: https://www.iwi.uni-hannover.de/fileadmin/iwi/Publikationen/DP/K_92_IWI_DP.pdf

Abstract: Cities account for a large share of global energy consumption and are responsible for a significant proportion of greenhouse gas emissions. Making cities “smart” is one approach to enhance the resource efficiency of transport systems in urban areas. Improvements could be achieved by generating and sharing data, information, and knowledge that influences decisions using technology to enrich vehicles, infrastructure and services. People mobility in urban areas is one of the most discussed fields of smart city research and in the course of technological progress, autonomous vehicles seem to become viable in the future. To identify the external macro forces, current market conditions, and future developments that affect smart mobility and especially autonomous passenger transport, we apply the Political, Economic, Social, Technological, Environmental, and Legal (PESTEL) framework. Besides general statements applying to the worldwide market of smart mobility and autonomous vehicles, the paper’s primary objective is to analyze the current situation in Germany and to compare it to the conditions in other countries. In general, computer-controlled transport offers enormous potential for reducing emissions and the amount of space used in cities. Germany is on a good to very good path towards integrating innovative and intelligent mobility concepts, based on the good position of the automotive industry with its existing technological advantages. Challenges are deficits in the digital infrastructure and the low acceptance of innovative mobility concepts.

Anhang H: Decision Support for Sustainable and Resilience-Oriented Urban Parcel Delivery

Zitation: Leyerer, M., Sonneberg, M.-O., Heumann, M., Breitner, M.H. (2019). Decision Support for Sustainable and Resilience-Oriented Urban Parcel Delivery. *EURO Journal on Decision Processes*, 7:3, pp. 267-300.

Link: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40070-019-00105-5>

DOI: 10.1007/s40070-019-00105-5

Abstract: The worldwide trend of urbanization, the rising needs of individuals, and the continuous growth of e-commerce lead to increasing urban delivery activities, which are a substantial driver of traffic and pollution in cities. Due to rising public pressure, emission-reducing measures are increasingly likely to be introduced. Such measures can cover diesel bans or even entire car-free zones, causing drastic effects on delivery networks in urban areas. As an option to reduce the risk of a regulation-induced shock, we present a resilience-oriented network and fleet optimization. We propose an innovative parcel delivery concept for last mile delivery (LMD) operations and develop an optimization model to support tactical planning decisions. Our model minimizes overall operating costs by determining optimal locations for micro depots and it allocates transport vehicles to them. An adjustable CO₂-threshold and external costs are included to consider potential regulatory restrictions by city authorities. We implement our model into a decision support system (DSS) that allows analyzing and comparing different scenarios. We provide a computational study by evaluating and discussing our DSS with an example of a mid-sized German city. Our results and findings demonstrate the trade-off between cost and emission minimization by quantifying the impacts of various fleet compositions. The proposed logistics concept represents an option to achieve environmentally friendly, cost-efficient, and resilient LMD of parcels.

**Anhang I: Shortening the Last Mile of e-Grocery:
Optimizing a New Logistics Concept for Urban Areas**

Zitation: Leyerer, M., Sonneberg, M.-O., Heumann, M., Breitner, M.H. (2020). Shortening the Last Mile in Urban Areas: Optimizing a Smart Logistics Concept for E-Grocery Operations. *Smart Cities*, 3:3, pp. 585-603.

Link: <https://www.mdpi.com/2624-6511/3/3/31>

DOI: 10.3390/smartcities3030031

Abstract: Urbanization, the corresponding road traffic, and increasing e-grocery markets require efficient and at the same time eco-friendly transport solutions. In contrast to traditional food procurement at local grocery stores, e-grocery, i.e., online ordered goods, are transported directly to end customers. We develop and discuss an optimization approach to assist the planning of e-grocery deliveries in smart cities introducing a new last mile concept for the urban food supply chain. To supply city dwellers with their ordered products, a network of refrigerated grocery lockers is optimized to temporarily store the corresponding goods within urban areas. Customers either collect their orders by themselves or the products are delivered with electric cargo bicycles (ECBs). We propose a multi-echelon optimization model that minimizes the overall costs while consecutively determining optimal grocery locker locations, van routes from a depot to opened lockers, and ECB routes from lockers to customers. With our approach, we present an advanced concept for grocery deliveries in urban areas to shorten last mile distances, enhancing sustainable transportation by avoiding road traffic and emissions. Therefore, the concept is described as a smart transport system.

Anhang J: Behavioral Intention to Use Ridepooling Services – Empirical Insights and Recommendations

Zitation: Der Artikel ist beim Journal *Transportation Research Part A: Policy and Practice* eingereicht und noch nicht veröffentlicht.

Abstract: Ridepooling is a new mobility service mainly for people in cities and urban areas. By matching the routes of customers with similar start and end points while driving in an optimally pooled manner, meaningful reductions in road traffic and related emissions can be achieved. Such services must meet customers' demands appropriately to achieve sustainable customer acceptance. Service providers face diverse customer expectations and prejudices that differ from those towards existing transportation modes. Today, most ridepooling trips are conducted with only one customer, confirming impressions of non-optimal operation. Using a survey-based approach, we analyzed possible relevant constructs for the acceptance of and intention to use ridepooling services. Using the technology acceptance model as the underlying framework, we performed partial least squares analysis with SmartPLS to investigate our dataset of 224 respondents. Our results suggest that perceived usefulness, perceived compatibility, and subjective norm have an influence on the behavioral intention to use ridepooling services. Our study expands the literature about the customer acceptance of ridepooling service as well as new mobility services in general. Further, we provide implications and recommendations for the development and implementation of the ridepooling concept for service providers.

Introduction

Alongside the overall growth of the world's population, the share of people living in urban areas has been increasing rapidly and is expected to reach 66% by 2050 (United Nations, 2014). Due to people's needs for individual transport, this has led to an increased demand for mobility, especially in cities. The term *urban mobility* describes passenger movement within the city environment. Besides private vehicle ownership and public transport, people can choose *Mobility-as-a-Service* (MaaS), e.g., taxi, car-, or bikesharing to carry out their daily activities (Kamargianni and Matyas, 2017). Technological progress affects almost all aspects of human life, including the way people move. Emerging developments like digitalization, high-speed computing, location data, accurate sensors, wireless connectivity, social media expansion, and new pricing schemes have enabled so called *new mobility services* (NMS), a subcategory of MaaS (Spulber et al., 2016). The following NMS are relevant in this context. *Carsharing* involves users paying money based on the required time or distance when renting a car. *Ridesharing* (or *carpooling*) involves a private vehicle being shared by individuals traveling together from similar starting points to similar destinations, organized by an intermediary company or an informal system of users. *Ridehailing* involves, a passenger determining the trip's start and end point demanding a transport service offered by a professional or part-time driver. Finally, *ridepooling* (or *shared ridehailing* or *ridesplitting*) involves users hailing a shuttle to designated pick-up points near their location such that passengers with similar routes are matched and transported together in one vehicle (Clewlow and Mishra, 2017). As urban areas faced a multitude of traffic-related challenges such as high emissions, poor air quality, large traffic volumes, and constant congestion, NMS can contribute to a reduction in road traffic and its negative impacts (Chan and Shaheen, 2012). The total number of driving and parked vehicles can be reduced because the use of shared transportation partially substitutes private car ownership, consequently reducing traffic density, travel cost and time, fuel consumption per person, and air pollution (Furuhata et al., 2013; Kuntzsky et al., 2013).

Due to its economic, environmental, and societal advantages, ridepooling has a high potential for addressing the mobility needs of different target groups, but it is still scarcely used. Besides political and bureaucratic reasons (e.g., concessions and passenger transport laws), a notable barrier to general use appears to be the acceptance on and the ultimate usage by city dwellers themselves (Osswald et al., 2012; Sonneberg et al., 2019). For instance, the German provider *Berlkönig* had 410,000 users in the first six months of operation in Berlin (Jan–Jun 2019) with passenger pooling, achieved in 44% of the trips. As more than every second trip was undertaken by only one passenger, the demand was too low for appropriate pooling of users (Schwaer and Meyer, 2019). Regarding the environmental effect of ridepooling, one critical factor is the mode of transport the ridepooling customers usually use. In American cities, Schaller (2018) states that most users switch from non-car modes to shared rides, increasing overall vehicle mileage. Further, licensed drivers must wait for upcoming dispatches and navigate to pick-up locations without transporting passengers (Schaller, 2018). These circumstances demonstrate that the theoretical benefits of ridepooling can only be achieved if the usage is sufficiently high and there is a large demand. It would be ideal for those who otherwise drive their own cars to switch to ridepooling. As the profitability of ridepooling providers depends on appropriate supply and user demand, customer acceptance is crucial for the long-term success of the service.

In the literature, the acceptance of innovations has been investigated in various contexts (Karahanna et al., 2006). Quantitative studies have helped identifying the pertinent critical success factors (CSFs) for acceptance models. The most used and established model is the *technology acceptance model* (TAM) (Schierz et al., 2010). Sonneberg et al. (2019) investigated the acceptance of potential ridepooling customers in Germany, finding that perceived compatibility (PC) had the highest impact on (potential) customers' behavioral intention (BI) to use ridepooling services. However, as no other scientific studies focusing on the acceptance of potential ridepooling customers have been conducted so far, the field lacks further empirical evidence. We aimed to repeat and extend the study by Sonneberg et al. (2019) by investigating the constructs of environmental awareness (EA) and price value (PV) to allow for a more precise and sustainable understanding

of the acceptance of ridepooling. EA and PV have been already investigated in other mobility contexts, and were described as significant for the acceptance of mobility services (e.g., Clewlow and Mishra, 2017; Wang et al., 2019). The study extends the scientific literature about the acceptance of ridepooling services and provides new insights by conducting the first repeated study of ridepooling acceptance. The results of both studies are compared and discussed. The conducted survey reveals important insights regarding the business model of ridepooling, providing implications and recommendations for ridepooling providers. The following research question (RQ) guided the research:

RQ: Which constructs influence customers' ridepooling services acceptance, and which implications and recommendations can be drawn from the data for ridepooling providers?

The paper is structured as follows. The second section provides a theoretical background of the TAM and presents a literature review on the acceptance of transportation services. In the third section we derive our underlying hypotheses, and our methodology is presented in the fourth section. The empirical analysis and results are presented in the fifth section. The sixth section contains further discussion as well as theoretical and practical implications and recommendations. In the seventh section, we reflect on the study's limitations and give indications for further research. In the eighth section, we conclude the paper.

Theoretical Background and Related Literature

Technology Acceptance Model

High acceptance of customers using an innovation or a technology is a CSF for long-term success of underlying business models. Following Schierz et al. (2010: 210), *acceptance* is defined as the “relatively enduring cognitive and affective perceptual orientation of an individual.” The individual acceptance process depends on the interaction between effort and ultimate benefit (Davis, 1989). Investigations of the psychological processes underlying individual human behavior are complex and difficult, so several approaches have been developed to investigate individuals' technology acceptance and resulting usage (Ajzen, 1991; Madigan et al., 2017).

In the scientific literature, the TAM is the most cited model for investigating the acceptance of an innovation (Schierz et al., 2010). The TAM is an adaption of the *theory of reasoned action* (TRA), originally developed by Fishbein and Ajzen (1980) to predict human behavior. The TRA aims to explain and predict individual actions by assuming that people behave rationally and make use of all available information (Fishbein and Ajzen, 1980). Davis (1985) and Davis et al. (1989) adapted the ideas of the TRA to acceptance research in information system contexts and used it to explain the relationship between individuals' reaction to using a technology, their intention, and actual usage (Venkatesh et al., 2003). The TAM relies on BI to predict actual behavior and focuses on the identification of CSFs for adopting an innovation or technology (Taylor and Todd, 1995). Both the TAM and the TRA are based on individual beliefs, which determine attitudes towards a technology in a given situation (Giang et al., 2017). Beliefs are defined as “the person's subjective probability that performing the target behavior will result in salient consequence” (Davis, 1985: 16). These beliefs are internal psychological variables that function as mediators of all external variables, which may also affect the usage of an innovation (Agarwal and Prasad, 1999). Therefore, beliefs have an indirect effect on BI (Davis, 1985). In the TAM, beliefs consist of the two interacting factors of perceived usefulness (PU) and perceived ease of use (PEOU); in the TRA, attitude towards use (ATU) and subjective norm (SN) comprise beliefs (Wang et al., 2006). The TAM also covers the motivational variables that lead to actual system usage, reflecting a tendency that arises at the very beginning of contact with the innovation, which enables researchers to measure the acceptance of an innovation at an early stage (Davis, 1985). As the TAM was originally developed to predict technology use at workplaces, it can also be employed to predict customer behavior in other circumstances (Pavlou, 2003). For instance, the TAM has been applied

to measure the customer acceptance of innovations such as internet banking, online shopping, or mobile services (Gefen et al., 2003; Cheng et al. 2006; Lee et al., 2009). Regarding innovations within the field of mobility, Osswald et al. (2010) investigated the acceptance of car information technology, Clewlow and Mishra (2017) and Wang et al. (2018) examined customers' ridehailing acceptance, and Herrenkind et al. (2019) and Lee et al. (2019) studied the acceptance of people travelling in autonomous vehicles.

Ridepooling

Ridepooling is a comparatively young mobility concept emerging in research. Ridepooling “has not apparently promoted transportation sustainability to date” (Merlin, 2019: 1), as in today's businesses very few people are matched and mileage is ultimately added to the city streets as most users switch from non-car modes of transport (Schaller, 2018; Schwaer and Meyer, 2019). However, with the right technology and a high number of customers, ridepooling could be a sustainable transport solution for urban areas (Merlin, 2019). Shaheen (2018) made a similar suggestion, pending the realization of key policy strategies such as operative privileges for parking, toll discounts for pooled vehicles, and rewards for customers, as well as the simplification of regulations of such services at the national level (Shaheen, 2018). Further, Sanguinetti et al. (2019) discussed the possibility of automated ridepooling vehicles and their implications in the future.

Focusing on the idea and operation of ridepooling, Gilibert and Ribas (2019) developed a shared ridehailing business model drawing upon the *Business Model Canvas* by Osterwalder et al. (2005). Based on a pilot project in Barcelona and a subsequent survey, several recommendations were given. First, ridepooling prices should not be more than double the cost of local public transport, and the service must be available, reliable, and safe at all times (Gilibert and Ribas, 2019). Further, exact information for the customers in terms of waiting and travel times as well as a partnership with local transport authorities and operators is crucial for long-term success (Gilibert and Ribas, 2019). König et al. (2018) reached a similar conclusion while conducting a survey using conjoint analysis to extract the service attributes of ridepooling customers. The relevant attributes were price, walking distance, time of booking, shift of departure time, travel time, and information provision (König et al., 2018). A significant influence in these attributes is the underlying assignment of customers to vehicles and resulting matched routes. In this regard, Alonso-Mora et al. (2017) presented a mathematical model for real-time ridepooling applications that dynamically generates optimal routes with respect to online demand and vehicle locations, validated on a public taxicab dataset in New York City. With approximately 22% of the existing taxis there, 3,000 pooling vehicles equipped with four seats could theoretically satisfy 98% of the total demand with minimal customer waiting times. Chen et al. (2017), Bischoff et al. (2018), and Yu et al. (2019) presented further approaches using different methods, allowing high capacity ridepooling to ensure efficiency and sustainability at the same time. Luo and Nie (2019) presented an optimization model for integrating ridepooling into existing mass transit systems. By comparing different scenarios with and without ridepooling, they concluded that ridepooling has only a limited impact on the scale effects of the network, but slight improvements to the accessibility of the network for overall system efficiency are possible.

In terms of user analysis and acceptance studies, limited research is available on ridepooling even though the long-term success of a ridepooling service depends heavily on customer acceptance. Several NMS were investigated by Spurlock et al. (2019), who found an adoption rate of 18% and an interest in adoption of a further 20% for ridepooling in an American context. Younger people and low to middle income earners were more open to it, giving positive ratings to the predicted cost advantages and reduced environmental impact of ridepooling (Spurlock et al., 2019). Further, Sonneberg et al. (2019) used the TAM to investigate the BI to use ridepooling services. In their German study, the strongest impact on such services was PC, while PS and PEOU were not relevant.

Hypothesis Generation

Attitude towards Use & Behavioral Intention to Use

For our study, we chose BI to use ridepooling services as one of our dependent variables for acceptance measuring. As described by Lee et al. (2003), actual systems usage is difficult to measure, especially for new services, which are in the beginning of implementation. This statement also holds for the rather new service of ridepooling (Sonneberg et al., 2019). However, actual systems usage can be approximated through BI, as several studies found in different contexts (Ajzen, 1991). ATU affects the BI to use services, because if people have a positive affect towards systems, intentions to perform behaviors arise (Davis et al., 1989). For example, Giang et al. (2017) examined the effects of the intention to adopt ridesharing applications in Vietnam, finding that ATU was a strong predictor of BI to use ridesharing services. In the case of ridepooling services, this leads us to the following hypothesis:

H1: ATU has a significant positive influence on the BI to use ridepooling services.

Perceived Usefulness

Usefulness is described as the subjective chance that using an information system will increase individual performance (Davis, 1989). PU can directly influence the BI to use services. In Davis et al. (1989), people perceived that they could increase their job performance by using specific information systems. In the case of on-demand car-related services, Kim et al. (2019) examined the positive effects of PU on ATU for such services. A higher usefulness of transportation services was perceived, with a higher degree of ATU resulting in BI to use. In accordance with Sonneberg et al. (2019), we propose the following hypotheses about the PU of ridepooling services:

H2: PU has a significant positive influence on ATU ridepooling services.

H3: PU has a significant positive influence on the BI to use ridepooling services.

Perceived Ease of Use

PEOU is described as users' expectation of how easy to use a system is (Davis et al., 1989). As described by Bandura (1977), ease of use influences behaviors due to self-efficiency beliefs, and easier performance of activities strengthens self-efficiency (Bandura, 1977). Previous work has assumed that PEOU influences the PU of services and innovations (Karahanna et al., 2006). Kim et al. (2019) found a positive influence of PEOU on ATU for on-demand car-related services. Based on these statements and findings, we propose the following hypotheses for PEOU in the context of ridepooling services:

H4: PEOU has a significant positive influence on ATU ridepooling services.

H5: PEOU has a significant positive influence on the PU of ridepooling services.

Perceived Compatibility

PC refers to the "degree to which an innovation is perceived as being consistent with the existing values, needs, and past experiences of potential adopters" (Lee et al., 2013: 761). Moore and Benbasat (1991) described PC as one of the core concepts in the acceptance of novel innovations. Kim et al. (2019) suggested that new on-demand transportation services must be compatible with and deliver the same experiences as traditional transportation services. Therefore, ridepooling services must also be coherent with the values and experiences of users regarding other services (Sonneberg et al., 2019). Based on these arguments and the results from prior studies, we build the following hypotheses on PC:

H6: PC has a significant positive influence on the PU of ridepooling services.

H7: PC has a significant positive influence on ATU ridepooling services.

H8: PC has a significant positive influence on the BI to use ridepooling services.

Perceived Safety

Osswald et al. (2012: 5) define perceived safety (PS) as “the degree to which an individual believes that using a system will affect his or her well-being.” It is also described as the self-reflective perception of a situation as hazardous (Osswald et al., 2012). PS plays a decisive role in transportation services, as a shared trip with unfamiliar drivers and other passengers is necessarily compared to other modes of transport (Chowdhury and Ceder, 2016). De Souza Silva et al. (2018) found that safety concerns are the main negative influence on the decision to use shared mobility services. Therefore, higher PS leads to higher acceptance. We examine this relationship of PS on ATU for ridepooling services with the following hypothesis:

H9: PS has a significant positive influence on the ATU ridepooling services.

Subjective Norm

SN refers to a compliance effect on BI from a social actor’s (e.g., family member’s) desire that a person behave in a specific manner (Venkatesh and Davis, 2000) under threat of punishment for non-action or promise of reward for good behavior (French and Raven, 1959). BI to use ridepooling services can in this way be influenced by social actors, like the family and friends of the user. In a ridesharing study in Vietnam, Giang et al. (2017) described a positive influence of SN on BI to use ridesharing services and the corresponding apps. If related people recommend using this service, user will have a BI to use them. Building upon this finding, we also propose SN as important for ridepooling services with the following hypothesis:

H10: SN has a significant positive influence on the BI to use ridepooling services.

Environmental Awareness

Kahn (2007) proposed a direct influence of a person’s environmental ideology and ideas on their behaviors. In a more recent study, Chen and Hung (2016) suggested that high environmental knowledge is closely related to environmental behavior and awareness. Potential customers with a high EA prefer using green products and services (Bansal, 2011). Wang et al. (2019) found a significant positive relationship between EA and the BI to use ridesharing services. Therefore, insofar as ridepooling services aim to reduce emissions and traffic inside urban areas, such customers should value and use such services more highly, leading to the following hypothesis:

H11: EA has a significant positive influence on the BI to use ridepooling services.

Price Value

PV is defined as the “cognitive tradeoff between the perceived benefits of the applications and the monetary costs for using them” (Venkatesh et al., 2012: 161). Clewlow and Mishra (2017) revealed that the price of parking in cities is one of the most common reasons for using ridehailing services instead of personal driving. Chen et al. (2017) ascertained the significant influence of PV on transportation usage in a Chinese context. Most recently, König et al. (2018) noted the high relevance of fares in a ridepooling context with conjoint analysis. Consequently, the PV for mobility services plays an important role for the BI to use mobility services. Thus, customers of ridepooling services can also be influenced from their perceived PV on their BI to use such services. As result, we assume the following:

H12: PV has a significant positive influence on the BI to use ridepooling services.

Methodology and Data Collection

The research model and hypotheses were tested via data collection from an online survey conducted via the open-source survey software *LimeSurvey*. We distributed the questionnaire on social media pages like *Facebook* and *LinkedIn* as well as via e-mail through our transportation research network. Data collection took place from May 2019 to June 2019. Similar to Sonneberg et al. (2019), we presented a short introduction to the topic of ridepooling services in order to ensure similar levels of understanding of the service. Demographic information was collected regarding such aspects as age, gender, and usage of ridepooling services. Confidentiality and anonymity were guaranteed with a statement of the responsible usage of the data for research purposes (Chang et al., 2010; Podsakoff et al., 2003). This approach can *ex ante* reduce the probability of bias in participants' answers because of theory-in-use prejudices (Podsakoff et al., 2003; Chang et al., 2010).

All construct items were measured on a seven-point Likert scale ranging from “strongly disagree” (1) through “neutral” (neither disagree nor agree) (4) to “strongly agree” (7). Item scales for measuring the dependent and independent constructs were carefully designed based on existing scales used in different validated publications (Chang et al., 2010). We make use of the items from Sonneberg et al. (2019) for the constructs of ATU, BI, SN, PC, PEOU, PS, and PU, which were already adapted to the ridepooling context. Furthermore, we adapted the items for the construct of EA from Madigan et al. (2017) and PV from Venkatesh et al. (2012) to the ridepooling services context. We ensured content validity by asking colleagues and doctoral students to identify potential problems with the phrasings of the questions, reducing common method variance in the implementation of our questionnaire (Podsakoff et al., 2003). Due to only being distributed in Germany, all the questionnaire items were translated from their English sources into German, and the entire questionnaire was in German. We used back-translation techniques to avoid translation bias (Brislin, 1970). The underlying codebook with all items and sources can be found in the supplemental material.

From the survey, 311 datasets were collected. After identifying incomplete responses, 87 datasets were deleted. In total, 224 complete datasets were used for the analyses, representing a response rate of 72.03%. The descriptive statistics (Table 1) show a small majority of female respondents (126) over male respondents (98), and a majority of respondents (172) were between 20 and 29 years old. The participants were mainly students (157) with a monthly net income of less than 1,000 euros. The vast majority of respondents owned a driver's license (206), but only 123 had a car available. Most of the respondents lived in the city (144). With regard to ridepooling services, 124 respondents had already heard of them, whereas only 45 respondents had already used them. As potential reasons to use ridepooling services, the participants stated leisure activities (mentioned 93 times), travel to work (83), or travel to airports (127) (see Table 1 for all replies).

Question / Reply	Number	Percentage
What is your gender?		
Male	98	43.8
Female	126	56.3
Total	224	100
What is your age?		
20-29	172	76.8
30-39	27	12.1
40-49	6	2.7
50-59	6	2.7
≥ 60	1	0.4
No Information	12	5.4
Total	224	100

What is your monthly net income?		
< 1,000 €	68	30.4
< 1,500 €	33	14.7
< 2,000 €	19	8.5
< 2,500 €	22	9.8
< 3,000 €	15	6.7
≥ 3,000 €	40	17.9
No Information	27	12.1
Total	224	100
Question / Reply	Num- ber	Percentage
Do you have a driver's license (car)?		
Yes	206	92.0
No	18	8.0
Total	224	100
Do you have a car for your own purposes available?		
Yes	123	54.9
No	101	45.1
Total	224	100
Which of the following describes your living environment the best?		
City	144	64.3
Countryside / Village	50	22.3
Suburbs	30	13.4
Total	224	100
What is your current occupation?		
Student	157	70.1
Worker	63	28.1
Other	4	1.8
Total	224	100
Have you ever heard of ridepooling services?		
Yes	124	55.4
No	100	44.6
Total	224	100
Have you already used ridepooling services?		
Yes	45	20.1
No	179	79.9
Total	224	100
For which purposes would you use ridepooling services? (multiple answers possible)		
Travel to airport	127	
Travel to nearest train station	102	
For leisure activities (e.g., visiting a bar)	93	
Travel to work	83	
Visiting friends and family	71	
Travel to university / school	59	
Travel for buying groceries	29	

Table 1. Descriptive Statistics

Empirical Analysis and Results

We performed partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) for our analysis. PLS-SEM is advantageous if the sample size is small, not normally distributed, or if the model is complex, with many estimated relationships (Hair et al., 2016). Compared with covariance-based SEM, PLS-SEM is more suitable for our purpose because of the simultaneous testing of the measurement and the structural model (Gefen et al., 2011). It is applicable in exploratory research, and it is preferred for measuring constructs with reflexive scales (Gefen et al., 2011; Xu et al., 2014; Hair et al., 2016). For our empirical analysis, we used the software package *SmartPLS* version 3.2.8 (Ringle et al. 2015). In line with Hair et al. (2016), a two-step approach was used, comprising measurement validation and model testing.

After recoding PS1 (which was a reverse item), we evaluated the reliability and validity of our measurement model by examining the factor loading of all items to the corresponding concepts. As suggested by Chin (1998), we included all items with a threshold value of 0.7 and higher to investigate indicator reliability, which means that at least 50% of the variance is shared with the corresponding construct. We excluded PC1, with a factor loading of 0.529, and SN4, with a factor loading of 0.311, from further analysis. The other factor loadings ranged from 0.643 (PS1) to 0.956 (SN1) (see supplemental material for all factor loadings). As the deletion of PS1, with a factor loading of 0.643, would not have led to an increase in composite reliability, it was retained for further analysis. We checked the constructs' Cronbach's alpha values, with 0.6 as the lower bound for internal consistency reliability (Hair et al., 2016). Our analysis found Cronbach's alpha values ranging from 0.674 (PS) to 0.938 (SN). All the composite reliability (CR) values of the constructs were over the threshold value of 0.7 as the upper bound for internal consistency reliability (Diamantopoulos et al., 2008; Hair et al., 2016). The average variance extracted (AVE) values were all above 0.5 (Hair et al., 2016), verifying the convergent validity of our data (see supplemental material). To check the discriminant validity of our dataset, we used the Fornell & Larcker criterion by comparing the square roots of the AVE values with the correlations between constructs (Fornell and Larcker, 1981). All of them were higher than the correlations between constructs (see Table 2).

Construct	Mean	SD.	CR	ATU	BI	SN	PC	PEOU	PS	PU	EA	PV
ATU	4.798	1.098	.909	.816								
BI	4.157	1.375	.926	.566	.871							
SN	4.537	1.170	.961	.517	.655	.943						
PC	4.560	1.101	.899	.570	.671	.617	.904					
PEOU	5.411	1.191	.950	.460	.338	.311	.407	.909				
PS	4.778	1.165	.822	.380	.356	.237	.318	.445	.781			
PU	4.446	1.201	.903	.706	.631	.521	.646	.385	.334	.837		
EA	4.789	1.430	.947	.199	.117	.122	.181	.175	.137	.237	.903	
PV	4.478	1.064	.946	.304	.399	.343	.364	.276	.215	.445	.212	.924

Table 2. Means, SDs, CRs, Square Roots of AVE, and Correlations between All Constructs

Due to ongoing critical discussion of the Fornell & Larcker criterion (e.g., Voorhees et al., 2016), we also investigated the heterotrait-monotrait ratio (HTMT) (Henseler et al., 2015), an estimate of the correlation between two constructs, with 1 indicating a lack of discriminant validity (Henseler et al., 2015). In our case, the confidence interval of the HTMT statistic was not 1 for any combinations of constructs, establishing discriminant validity. Table 2 above presents the means, standard deviations (SDs), CRs, square roots of AVE, and the correlations between all constructs. To analyze the structural model, we performed a bootstrapping procedure with 5,000 replications (Henseler et al., 2015), calculating the path coefficients and the coefficients of determination (adjusted R²). Five of our 12 hypotheses were not significant (p-values ≥ 0.1), and seven were (p-value < 0.1). The significant path coefficients ranged from 0.14 (PU on BI) to 0.6 (PU on ATU). Concerning the endogenous variables, the adjusted R² was 0.43 for the construct of PU, 0.55 for ATU, and 0.63 for BI; thus, the model explains 43% of PU, 55% of ATU, and 63% of BI. All the results of our path analysis and bootstrapping procedure are visualized in Figure 1.

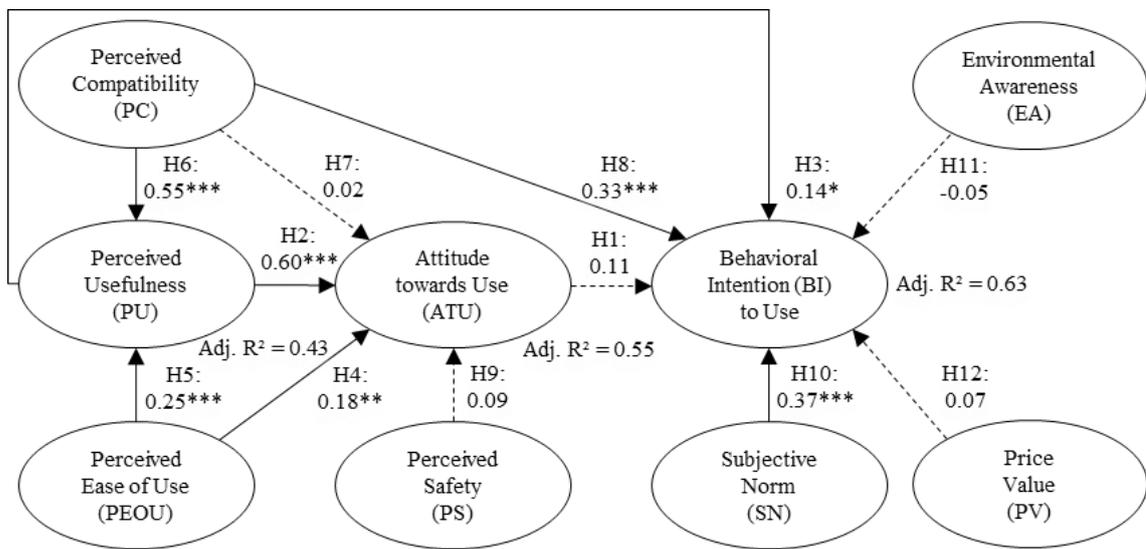


Figure 1. Results of the Bootstrapping Analysis for the Structural Model

Notes: * $p < 0.1$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; $n = 224$; dotted line represent insignificant paths

Finally, we checked the effect size (f^2) of the independent variables. Regardless of the sample size, f^2 can be used to compare different measured quantities to measure the impact of a predictor construct on independent variables (Hair et al., 2016). To evaluate whether the omitted constructs were meaningful to our research model, we made use of f^2 -values as proposed by Cohen (1988), which show the influence of exogenous variables based on increased R² values that remain unexplained with respect to an endogenous construct (Peng and Lai, 2012). An f^2 -value greater or equal to 0.35 indicates a large effect, values from 0.15 up to 0.35 represent a medium effect, and values between 0.02 and 0.15 indicate small effects (Cohen, 1988; Hair et al., 2016). According to Chin et al. (2003), a low f^2 does not indicate that the effect is not significant. Our calculated f^2 -values are presented in Table 3.

Predictor Constructs	f^2	Effect Size
Attitude towards Use → Behavioral Intention to Use	0.017	Small
Perceived Usefulness → Attitude towards Use	0.437	Large
Perceived Compatibility → Behavioral Intention to Use	0.169	Medium

Perceived Ease of Use → Attitude towards Use	0.050	Small
Perceived Ease of Use → Perceived Usefulness	0.100	Small
Perceived Compatibility → Perceived Usefulness	0.485	Large
Perceived Compatibility → Attitude towards Use	0.001	Small
Perceived Compatibility → Behavioral Intention to Use	0.169	Medium
Perceived Safety → Attitude towards Use	0.012	Small
Subjective Norm → Behavioral Intention to Use	0.224	Medium
Environmental Awareness → Behavioral Intention to Use	0.007	Small
Price Value → Behavioral Intention to Use	0.009	Small

Table 3. Effect Size of Independent Variables (f^2)

Notes: Effect size f^2 : ≥ 0.35 Large; ≥ 0.15 Medium; ≥ 0.02 Small;

$f^2 = (R^2 \text{ included} - R^2 \text{ excluded}) / (1 - R^2 \text{ included})$ (Cohen, 1988)

Discussion, Implications, and Recommendations

Our study analyzes the possible relevant constructs for the acceptance of ridepooling services. We structured this section according to the hypotheses, with a detailed discussion and analysis for each hypothesis, after which practical implications and recommendations are given. Finally, this section discusses the theoretical implications of the results.

Based on our results, we examined that ATU has no influence on the BI to use ridepooling services (H1), because it is slightly above the requisite significance levels ($\beta = 0.11$; p-value: 0.113). As this is one of the major relationships in the TAM, this result is rather surprising. Davis et al. (1989) stated that people's ATU for a service positively influences their behavior. As mentioned in the hypothesis generation section, Giang et al. (2017) determined that ATU was a strong predictor of BI to use ridesharing services. Our data do not support this relationship, indicating that customers' ATU for a service is not a prerequisite for BI to use that service. Yang and Yoo (2004) called for a more diverse analysis of attitude, with a separation of cognitive and affective ATU, finding that cognitive attitude has an influence on BI but affective attitude does not (Yang and Yoo, 2004). Perhaps, the construct ATU calls for a more differentiated measurement in the context of ridepooling services. Unlike our results, Sonneberg et al. (2019) found a strong effect of ATU on BI to use ridepooling services. Therefore, the measurement of ATU in ridepooling services may require continuous and more differentiated observation involving cognitive and affective attitudes separately (Yang and Yoo, 2004).

Consistent with Sonneberg et al. (2019), we found a high positive influence of PU on ATU (H2). In other words, higher PU of ridepooling services leads to a higher ATU for such services. We found the same relationship between PU and the BI to use (H3), in contrast to Sonneberg et al. (2019). Our findings confirm that PU is an important factor in both ATU and BI to use ridepooling services, as indicated by some research (e.g., Prekumar and Bhattacharjee, 2008). Therefore, to achieve continuous usage of ridepooling, providers must be aware about the PU of the customers and deliver a perceived usefully service.

In contrast to Sonneberg et al. (2019), we found that PEOU has a positive influence on the PU and ATU for ridepooling services (H4 and H5). We also cannot confirm Lee et al.'s (2003) partially identified doubtfulness of the construct of PEOU in the measurement of customer acceptance, but it is notable and worth discussing that two studies with identical interviews of identical subjects obtained partly different results regarding this construct. Our study is in line with Giang et al. (2017), who found a positive relationship of PEOU an ATU in a ridesharing context. For ridepooling providers, this implies that, PEOU is an important predictor for usefulness and

the attitude towards ridepooling. Only if customers perceive ridepooling services easy to use, they will perceive a usefulness of this service and build up an attitude towards such services. Therefore, providers must be aware of the benefits of a simple and clear booking process (e.g., through a mobile application) as well as an intuitive and easily understandable handling of the usage of the ridepooling service itself.

Next, we found that PC has an influence on PU and BI to use ridepooling services (H6 and H8), consistent with Sonneberg et al. (2019). In contrast to this study, however, we found no significant influence of PC on ATU (H7). Ridepooling services must be perceived as compatible to generate a BI to use and to be perceived as useful, being appropriate for the living conditions of the individual and delivering at least the same result as other transport services (Kim et al., 2019). Therefore, ridepooling services must provide a clear outcome for users, namely the transportation to a desired destination, and be useful in different life situations.

Based on our analysis, the construct of PS has no significant influence on ATU for ridepooling services (H9). In line with Sonneberg et al. (2019), we found that safety aspects are not relevant to the usage of ridepooling. Contrary to this, however, a study in the Brazilian market revealed a significant safety aspect in the context of ridehailing (de Souza Silva et al., 2018). Our German respondents seem to not be concerned with such aspects, so unfamiliar drivers or other passengers do not play a crucial role in their ATU for relevant transportation services.

We found a strong influence of SN on BI to use ridepooling services (H10), similar to the results of Sonneberg et al. (2019). This indicates that word of mouth and recommendations from social actors like family and friends are important in the adoption of ridepooling. As ridepooling is a new concept, early adopters articulate their feelings and opinions to others in their social networks. Early adopters play an important role in the diffusion of innovations, as late adopters tend to imitate them (Fratini et al., 2013). Therefore, ridepooling providers must be keenly aware of generating positive feelings about their service in early adopters due to their influence on late adopters and therefore new customers.

No significant influence of EA (H11) on the BI to use ridepooling services was found, in contrast to other researchers' findings in the NMS context (e.g., Wang et al., 2019). Our data indicates that customers' environment-friendly inclinations are not significantly associated with the use of ridepooling services. In contrast to our findings, Luo and Nie (2019) found slightly positive environmental aspects of ridepooling services, as they are used as a feeder service to public transportation stations. With a higher awareness that ridepooling can have positive effects on overall traffic performance, an environmentally friendly view of the service would be achieved, attracting more customers (Luo and Nie, 2019). This public relations measure could also attract customers using zero-emission vehicles (Shaheen, 2018). Based on our data, ridepooling providers must not highlight environmental aspects of their service. Due to these contradictory findings, a more detailed investigation of EA of ridepooling is necessary.

Further, we found no significant influence of PV (H12) on the BI to use ridepooling services. This is surprising, as other studies (e.g., Chen et al., 2017) have found that this construct is relevant in the transportation context. As can be seen from the descriptive statistics in Table 1, our respondents tend to use ridepooling for leisure activities rather than for regular transportation (e.g., commuting), leading to the assumption that ridepooling is a service for short and occasional rides, whereas ridesharing is used for longer trips between cities. Ridesharing services feature higher prices and are affected by the price pressures of other transportation modes, like trains. The majority of the respondents in our sample were students, who already have a discounted seasonal ticket for local transportation in the city, explaining why PV is not relevant to them for short and occasional trips. This explains why PV is not a necessary construct for the BI to use ridepooling services.

Overall, our results indicate a lower adjusted R^2 for the dependent variables (PU, ATU, and BI) than those in Sonneberg et al. (2019). There may be several reasons for this. Our sample differed

from that of Sonneberg et al. (2019), as fewer respondents in our survey had knowledge of ridepooling services (55.4%, as shown in Table 1, vs. 67.0% (Sonneberg et al., 2019)). However, both studies had similar percentages of participants who had not previously used ridepooling (79.9% in our study, as shown in Table 1, vs. 79.0% in Sonneberg et al. (2019)). Further unknown variables that may be important for the acceptance of ridepooling services are missing in our model.

We mainly compared our results with those of Sonneberg et al. (2019) due to their theoretical contribution, expanding the limited literature about ridepooling. Moreover, our study is the first repeated study of a rather new mobility concept. Regular observation and analysis of the acceptance and diffusion of new concepts is crucial for, among other things, appropriate marketing activities (Peres et al., 2010). We also tested the TAM and evaluated further possible relevant constructs related to the BI to use such services. Despite this, our study was limited in certain ways and raises further pertinent questions, which we describe in the next section.

Limitations and Future Research Directions

One limitation of the study is the use of the TAM. Though it is a frequently used theory in the transportation context (e.g., Giang et al., 2017; Ruangkanjanases and Techapoolphol, 2018; Sonneberg et al., 2019; Wang et al., 2019), it is criticized for the over-simplicity of its constructs, such as PU (Benbasat and Barki, 2007). Though the TAM measures users' PU, it does not clarify which components of the new technology or service the customers perceive as useful or not. Other researchers have called for a more parsimonious usage of the TAM and more research on poorly understood constructs like PU (Straub and Burton-Jones, 2007). While one of the intentions of our study was to replicate and extend the study of Sonneberg et al. (2019), we would suggest the usage of more recent theoretical frameworks to measure customers' acceptance of ridepooling services, such as the unified theory of acceptance and use of technology 2 (UTAUT2) (Venkatesh et al., 2012) or combining the TAM with expectation disconfirmation theory (e.g., Prekumar and Bhattacharjee, 2008) as the underlying theoretical foundation. The usage of other theories may better identify the influences of moderation effects and lead to a better understanding of vague constructs like PU.

Most of our respondents had not used ridepooling services, and our dataset is restricted to mostly students in the age range of 20-29 (see Table 1). As ridepooling is a relatively new mobility concept, constant observation and analysis of CSFs for the acceptance of such services is crucial. Based on our results, the new constructs in our study (EA and PV) do not have a significant influence on the BI to use ridepooling services. However, for PV, other studies (see König et al., 2018) have implied that the price level plays a key role in using ridepooling services. Further research on a more diverse dataset with respondents from different age groups, occupations, and ridepooling experience is needed to clarify this. This could also indicate the influences of age-specific and cultural aspects on new service adoption.

As our study is only a static measure of the acceptance of ridepooling services, possible future research may consist in the continuous observation and analysis of the acceptance and success of ridepooling. As ridepooling is a relatively new mobility concept in Germany, it is not clear how the diffusion and adoption of the service will develop. Diffusion of innovations theory suggests that innovations spread through communication channels and social networks over time (Rogers, 1995). To examine the CSFs for the diffusion of ridepooling services, future research can use and expand the information systems diffusion variance model for quantitative studies, which is based on variables from the TAM (Cooper and Zmud, 1990; for an example in the motor carrier context, see Crum et al., 1996). Continuous observations and measurements of these aspects can lead to greater understanding for both service providers and scientists in this research area.

Conclusion

There has been a rapidly growing interest worldwide in NMS like ridepooling because they can lead to meaningful reductions of emissions and traffic in urban areas. Service providers face various expectations, customer prejudice, and low degrees of capacity utilization. To achieve long-term success, they must meet customers' demands appropriately and generate sustainable customer acceptance. Using a survey-based approach, we examined the possible relevant constructs for the acceptance of ridepooling services using the TAM as the underlying theoretical framework. We found that PU, PC, and SN have a significant positive influence on the BI to use ridepooling services. Our study expands the literature about service acceptance factors, indicating several implications and recommendations for ridepooling providers and enriching the ongoing academic and practical discussion on the acceptance and rationales of new mobility concepts like ridepooling.

References

1. Ajzen, I. (1991): The theory of planned behavior. *Organization Behavior and Human Decision Processes* 50(2), pp. 179-211. [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T)
2. Alonso-Mora, J., Samaranayake, S., Wallar, A., Frazzoli, E., Rus, D. (2017): On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(3), pp. 462-467. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611675114>
3. Bandura, A. (1977): Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change. *Psychological Review* 84(2), article 191.
4. Bansal, G. (2011): E-book usage: Role of environmental consciousness, personality and past usage. *Journal of Computer Information Systems* 52(2), pp. 93-104. <https://doi.org/10.1080/08874417.2011.11645544>
5. Benbasat, I., Barki, H. (2007): Quo vadis TAM? *Journal of the Association for Information Systems* 8(4), article 7.
6. Bischoff, J., Kaddoura, I., Maciejewski, M., Nagel, K. (2018): Simulation-based optimization of service areas for pooled ride-hailing operators. *Procedia Computer Science* 130, pp. 816-823. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.069>
7. Brislin, R.W. (1970): Back-translation for cross-cultural research. *Journal of Cross-Cultural Psychology* 1(3), 185-216. <https://doi.org/10.1177/135910457000100301>
8. Chan, N.D., Shaheen, S.A. (2012): Ridesharing in North America: Past, present, and future. *Transportation Reviews* 32(1), pp. 93-112. <https://doi.org/10.1080/01441647.2011.621557>
9. Chang, S.J., Van Witteloostuijn, A., Eden, L. (2010): From the editors: Common method variance in international business research. *Journal of International Business Studies* 41(2), pp. 178-184. <https://doi.org/10.1057/jibs.2009.88>
10. Chen, S.C., Hung, C.W. (2016): Elucidating the factors influencing the acceptance of green products: An extension of theory of planned behavior. *Technological Forecasting and Social Change* 112, pp. 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.08.022>
11. Chen, Y., Salmanian, W., Akram, A. (2017): User acceptance in sharing economy - A study of transportation network companies in China. In: *Proceedings of the Mediterranean Conference on Information Systems*, article 24.
12. Chen, M.H., Jauhri, A., Shen, J.P. (2017): Data driven analysis of the potentials of dynamic ride pooling. In: *Proceedings of the ACM SIGSPATIAL Workshop on Computational Transportation Science*, pp. 7-12. <https://doi.org/10.1145/3151547.3151549>
13. Cheng, T.C.E., Lam, D.Y.C., Yeung, A.C.L. (2006): Adoption of internet banking: An empirical study in Hong Kong. *Decision Support Systems* 42(3), pp. 1558-1572. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2006.01.002>
14. Chin, W.W. (1998): Issues and opinion on structural equation modeling. *Management Information Systems Research Quarterly* 29(3), pp. vii – xvi.

15. Chin, W.W., Marcolin, B.L., Newsted, P.R. (2003): A partial least squares latent variable modeling approach for measuring interaction effects: Results from a Monte Carlo simulation study and an electronic-mail emotion/adoption study. *Information Systems Research* 14(2), pp. 189-217. <https://doi.org/10.1287/isre.14.2.189.16018>
16. Chowdhury, S., Ceder, A.A. (2016): Users' willingness to ride an integrated public-transport service: A literature review. *Transport Policy* 48, pp. 183-195. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.03.007>
17. Clewlow, R.R., Mishra, G.S. (2017): Disruptive transportation: The adoption, utilization, and impacts of ride-hailing in the United States. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, Research Report UCD-ITS-RR-17-07.
18. Cohen, J. (1988): Statistical power analysis for the behavioral sciences. Abingdon, United Kingdom: Routledge
19. Cooper, R.B., Zmud, R.W. (1990): Information technology implementation research: A technological diffusion approach. *Management Science* 36(2), pp. 123-139. <https://doi.org/10.1287/mnsc.36.2.123>
20. Crum, M.R., Premkumar, G., Ramamurthy, K. (1996). An assessment of motor carrier adoption, use, and satisfaction with EDI. *Transportation Journal* 35(4), pp. 44-57. <https://www.jstor.org/stable/20713289>
21. Davis, F.D. (1985): A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems: Theory and results. Doctoral Dissertation, Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.
22. Davis, F.D. (1989): Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *Management Information Systems Research Quarterly* 13(3), pp. 319-340. <https://doi.org/10.2307/249008>
23. Davis, F.D., Bagozzi, R.P., Warshaw, P.R. (1989): User acceptance of computer technology: A comparison of two theoretical models. *Management Science* 35(8), pp. 982-1003. <https://doi.org/10.1287/mnsc.35.8.982>
24. de Souza Silva, L.A., de Andrade, M.O., Maia, M.L.A. (2018): How does the ride-hailing systems demand affect individual transport regulation? *Research in Transportation Economics* 69, pp. 600-606. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2018.06.010>
25. Diamantopoulos, A., Riefler, P., Roth, K.P. (2008): Advancing formative measurement models. *Journal of Business Research* 61(12), pp. 1203-1218. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2008.01.009>
26. Doll, W.J., Hendrickson, A., Deng, X. (1994): Using Davis's perceived usefulness and ease-of-use instruments for decision making: A confirmatory and multigroup invariance analysis. *Decision Sciences* 29(4), pp. 839-869. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1998.tb00879.x>
27. Eggers, F., Eggers, F. (2011): Where have all the flowers gone? Forecasting green trends in the automobile industry with a choice-based conjoint adoption model. *Technological Forecasting and Social Change* 78(1), pp. 51-62. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.06.014>
28. Fishbein, M., Ajzen, I. (1980): Understanding attitudes and predicting social behavior. Upper Saddle River, New Jersey: Routledge.
29. Fornell, C., Larcker, D.F. (1981): Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *Journal of Marketing Research* 18(1), pp. 39-50. <https://doi.org/10.1177/002224378101800104>
30. Frattini, F., Bianchi, M., De Massis, A., Sikimic, U. (2014). The role of early adopters in the diffusion of new products: Differences between platform and nonplatform innovations. *Journal of Product Innovation Management* 31(3), pp. 466-488. <https://doi.org/10.1111/jpim.12108>
31. French, J.R.P., Raven, B. (1959): The bases of social power. In: *Studies in Social Power*, D.P. Cartwright (ed.), Ann Arbor, MI: Institute for Social Research, pp. 150-167.
32. Furuhata, M., Dessouky, M., Ordóñez, F., Brunet, M.E., Wang, X., König, S. (2013): Ridesharing: The state-of-the-art and future directions. *Transportation Research Part B* 57, pp. 28-46. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.08.012>

33. Gefen, D., Karahanna, E., Straub, D.W. (2003): Trust and TAM in online shopping: An integrated model. *Management Information Systems Research Quarterly* 27(1), pp. 51-90. <https://doi.org/10.2307/30036519>
34. Gefen, D., Rigdon, E. E., Straub, D. (2011): Editor's comments: An update and extension to SEM guidelines for administrative and social science research. *Management Information Systems Research Quarterly* 35(2), pp. iii-xiv. <https://doi.org/10.2307/23044042>
35. Giang, P.T., Trang, P.T., Yen, V.T. (2017): An examination of factors influencing the intention to adopt ride-sharing applications. A case study in Vietnam. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research* 3(10), pp. 618-623.
36. Gilibert Junyent, M., Ribas Vila, I. (2019): Main design factors for shared ride-hailing services from a user perspective. *International Journal of Transport Development and Integration* 3(3), pp. 195-206. <http://dx.doi.org/10.2495/TDI-V3-N3-195-206>
37. Hair Jr., J.F., Hult, G.T.M., Ringle, C., Sarstedt, M.J. (2016): A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). 2nd edition, Thousand Oaks, California: SAGE Publications.
38. Herrenkind, B., Brendel, A.B., Nastjuk, I., Greve, M., Kolbe, L.M. (2019): Investigating end-user acceptance of autonomous electric buses to accelerate diffusion. *Transportation Research Part D* 74, pp. 255-276. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.003>
39. Henseler, J., Ringle, C.M., Sarstedt, M.J. (2015): A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. *Journal of the Academy of Marketing Science* 43(1), pp. 115-135. <https://doi.org/10.1007/s11747-014-0403-8>
40. Kahn, M.E. (2007): Do greens drive Hummers or hybrids? Environmental ideology as a determinant of consumer choice. *Journal of Environmental Economics and Management* 54(2), pp. 129-145. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2007.05.001>
41. Karahanna, E., Agarwal, R., Angst, C.M. (2006): Reconceptualizing compatibility beliefs in technology acceptance research. *Management Information Systems Research Quarterly* 30(4), pp. 781-804. <https://doi.org/10.2307/25148754>
42. Kamargianni, M., Matyas, M. (2017): The business ecosystem of mobility-as-a-service. In: Proceedings of the Annual Meeting of the Transportation Research Board, article 6538.
43. Kim, N., Park, Y., Lee, D. (2019): Differences in consumer intention to use on-demand automobile-related services in accordance with the degree of face-to-face interactions. *Technological Forecasting and Social Change* 139, pp. 277-286. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.11.014>
44. König, A., Bonus, T., Gripenkoven, J. (2018): Analyzing urban residents' appraisal of ride-pooling services attributes with conjoint analysis. *Sustainability* 10(10), article 3711. <https://doi.org/10.3390/su10103711>
45. Kuntzky, K., Wittke, S., Herrmann, C. (2013): Car and ride sharing concept as a product service system – Simulation as a tool to reduce environmental impacts. In: The philosopher's stone for sustainability, Y. Shimomura, K. Kimita (eds.), Berlin / Heidelberg, Deutschland: Springer, pp. 381-386. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32847-3_64
46. Lee, M.-C. (2009): Factors influencing the adoption of internet banking: An integration of TAM and TPB with perceived risk and perceived benefit. *Electronic Commerce Research and Applications* 8(3), pp. 130-141. <https://doi.org/10.1016/j.elerap.2008.11.006>
47. Lee, Y., Kozar, K.A., Larsen, K.R. (2003): The technology acceptance model: Past, present, and future. *Communications of the Association for Information Systems* 12(1), article 50. <https://doi.org/10.17705/1CAIS.01250>
48. Lee, J., Lee, D., Park, Y., Lee, S., Ha, T. (2019): Autonomous vehicles can be shared, but a feeling of ownership is important: Examination of the influential factors for intention to use autonomous vehicles. *Transportation Research Part C* 107, pp. 411-422. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.08.020>
49. Luo, S., Nie, Y.M. (2019): Impact of ride-pooling on the nature of transit network design. *Transportation Research Part B* 129, pp. 175-192. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.09.007>
50. Madigan, R., Louw, T., Dziennus, M., Graindorge, T., Ortega, E., Graindorge, M., Merat, N. (2017): Acceptance of automated road transport systems: An adaptation of the UTAUT

- model. *Transportation Research Procedia* 14, pp. 2217-2226. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.237>
51. Merlin, L.A. (2019): Transportation sustainability follows from more people in fewer vehicles, not necessarily automation. *Journal of the American Planning Association* 85(4), pp. 501-510. <https://doi.org/10.1080/01944363.2019.1637770>
 52. Moore, G.C., Benbasat, I. (1991): Development of an instrument to measure the perceptions of adopting an information technology innovation. *Information Systems Research* 2(3), pp. 192-222. <https://doi.org/10.1287/isre.2.3.192>
 53. Osswald, S., Wurhofer, D., Trösterer, S., Beck, E., Tscheligi, M. (2012): Predicting information technology usage in the car: Towards a car technology acceptance model. In: *Proceedings of the International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, pp. 51-58. <https://doi.org/10.1145/2390256.2390264>
 54. Osterwalder, A., Pigneur, Y., Tucci, C.L. (2005): Clarifying business models: Origins, present, and future of the concept. *Communications of the Association for Information Systems* 16, article 1. <https://doi.org/10.17705/1CAIS.01601>
 55. Pavlou, P.A. (2003): Consumer acceptance of electronic commerce: Integrating trust and risk with the technology acceptance model. *International Journal of Electronic Commerce* 7(3), pp. 101-134. <https://doi.org/10.1080/10864415.2003.11044275>
 56. Peng, D.X., Lai, F. (2012): Using partial least squares in operations management research: A practical guideline and summary of past research. *Journal of Operations Management* 30(6), pp. 467-480. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2012.06.002>
 57. Peres, R., Muller, E., Mahajan, V. (2010): Innovation diffusion and new product growth models: A critical review and research directions. *International Journal of Research in Marketing* 27(2), pp. 91-106. <https://doi.org/10.1016/j.ijresmar.2009.12.012>
 58. Podsakoff, P.M., MacKenzie, S.B., Lee, L.-Y., Podsakoff, N.P. (2003): Common method biases in behavioral research: A critical review of the literature and recommended remedies. *Journal of Applied Psychology* 88(5), pp. 879-903.
 59. Premkumar, G., Bhattacharjee, A. (2008): Explaining information technology usage: A test of competing models. *Omega*, 36(1), pp. 64-75. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.12.002>
 60. Ringle, C.M., Wende, S., Becker, J.-M. (2015): *SmartPLS 3*. Boenningstedt, Germany: SmartPLS GmbH.
 61. Rogers, E.M. (1995): *Diffusion of Innovations*. 4th edition, New York, NJ: Free Press.
 62. Ruangkanjanases, A., Techapoolphol, C. (2018): Adoption of e-hailing applications: A comparative study between female and male users in Thailand. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering* 10, pp. 43-48.
 63. Sanguinetti, A., Kurani, K., Ferguson, B. (2019): Is it ok to get in a car with a stranger? Risks and benefits of ride-pooling in shared automated vehicles. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, Research Report UC-ITS-2018-20. <https://doi.org/10.7922/G27M064Z>
 64. Schaller, B. (2018): The new automobility: Lyft, Uber and the future of American cities. Available online <http://www.schallerconsult.com/rideservices/automobility.pd>, accessed 21.11.2019.
 65. Schierz, P.G., Schilke, O., Wirtz, B.W. (2010): Understanding consumer acceptance of mobile payment services: An empirical analysis. *Electronic Commerce Research and Applications* 9(3), pp. 209-216. <https://doi.org/10.1016/j.elerap.2009.07.005>
 66. Schwaer, H., Meyer, C. (2019): Why ride-pooling providers in Germany have a hard time [in German: Warum sich ride-pooling-anbieter in Deutschland schwer tun]. Available online <https://www.gruenderszene.de/business/ride-pooling-probleme>, accessed 21.11.2019.
 67. Shaheen, S. (2018): Shared mobility: The potential of ridehailing and pooling. In: Sperling, D., editor. *Three Revolutions*. Washington, D.C.: Island Press, pp. 55-76. https://doi.org/10.5822/978-1-61091-906-7_3
 68. Spulber, A., Dennis, E.P., Wallace, R., Schultz, M. (2016): The impact of new mobility services on the automotive industry. Ann Arbor, MI: Center for Automotive Research.
 69. Spurlock, C.A., Sears, J., Wong-Parodi, G., Walker, V., Jin, L., Taylor, M., Duvall, A., Gopal, A., Todd, A. (2019): Describing the users: Understanding adoption of and interest in shared,

- electrified, and automated transportation in the San Francisco Bay Area. *Transportation Research Part D* 71, pp. 283-301. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.01.014>
70. Straub, D., Burton-Jones, A. (2007): Veni, vidi, vici: Breaking the TAM logjam. *Journal of the Association for Information Systems* 8(4), article 5. <https://doi.org/10.17705/1jais.00124>
71. Sonneberg, M.-O., Werth, O., Leyerer, M., Wille, W., Jarlik, M., Breitner, M.H. (2019): An empirical study of customers' behavioral intention to use RIDEPOOLING SERVICES - An extension of the technology acceptance model. In: *Proceedings of the International Conference on Wirtschaftsinformatik*, pp. 83-97.
72. Taylor, S., Todd, P.A. (1995): Understanding information technology usage: A test of competing models. *Information Systems Research* 6(2), pp. 144-176. <https://doi.org/10.1287/isre.6.2.144>
73. United Nations (2014): 2014 revision of the world urbanization prospects. Available online <https://www.un.org/en/development/desa/publications/2014-revision-world-urbanization-prospects.html>, accessed 19.11.2019.
74. Venkatesh, V., Davis, F.D. (2000): A theoretical extension of the technology acceptance model: Four longitudinal field studies. *Management Science* 46(2), pp. 186-204. <https://doi.org/10.1287/mnsc.46.2.186.11926>
75. Venkatesh, V., Morris, M.G., Davis, G.B., Davis, F.D.(2003): User acceptance of information technology: Toward a unified view. *Management Information Systems Research Quarterly* 27(3), pp. 425-478. <https://doi.org/10.2307/30036540>
76. Venkatesh, V., Thong, J.Y.L., Xu, X. (2012): Consumer acceptance and use of information technology: Extending the unified theory of acceptance and use of technology. *Management Information Systems Research Quarterly* 36(1), pp. 157-178. <https://doi.org/10.2307/41410412>
77. Voorhees, C.M., Brady, M.K., Calantone, R., Ramirez, E. (2016): Discriminant validity testing in marketing: An analysis, causes for concern, and proposed remedies. *Journal of the Academy of Marketing Science* 44(1), pp. 119-134. <https://doi.org/10.1007/s11747-015-0455-4>
78. Wang, Y.S., Lin, H.H., Luarn, P. (2006): Predicting consumer intention to use mobile service. *Information Systems Journal* 16(2), pp. 157-179. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2575.2006.00213.x>
79. Wang, Y., Wang, S., Wang, J., Wei, J., Wang, C. (2018): An empirical study of consumers' intention to use ride-sharing services: Using an extended technology acceptance model. *Transportation* (in press, online first). <https://doi.org/10.1007/s11116-018-9893-4>
80. Xu, J.D., Benbasat, I., Cenfetelli, R.T. (2014): The nature and consequences of trade-off transparency in the context of recommendation agents. *Management Information Systems Research Quarterly* 38(2), pp. 379-406.
81. Yang, H.-D., Yoo, Y. (2004): It's all about attitude: Revisiting the technology acceptance model. *Decision Support Systems* 38(1), pp. 19-31. [https://doi.org/10.1016/S0167-9236\(03\)00062-9](https://doi.org/10.1016/S0167-9236(03)00062-9)
82. Yu, X., Shen, S. (2019): An integrated decomposition and approximate dynamic programming approach for on-demand ride pooling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (in press, online first). <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2934423>