

**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 –

vorgelegte Dissertation

von

M.Sc. Max Leyerer



2020

## **Danksagung**

*Diese Dissertation widme ich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Heike und Rudolf, und meiner Partnerin Tabea. 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 Bewohner<sup>1</sup>, 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

---

<sup>1</sup> 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.

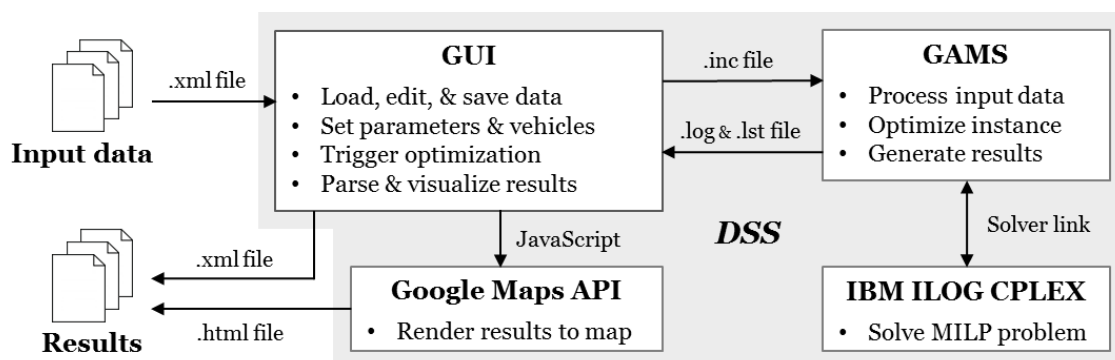


Abbildung 1. Systemarchitektur und Datenflüsse des EUS

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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Emissionen angegeben.

Tabelle 1. Benchmarks für verschiedene Obergrenzen des CO<sub>2</sub>-Flottendurchschnitts

Emissionslimit [gCO <sub>2</sub> /km]	Gesamtkosten [€/Monat]	Anzahl Hubs [#]	Anzahl Fahrzeuge [#]							Geschätzte Distanz [km/Tag]			Gesamte Emissionen [gCO <sub>2</sub> /Tag]	Durchsch. Flottenemissionen [gCO <sub>2</sub> /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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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.

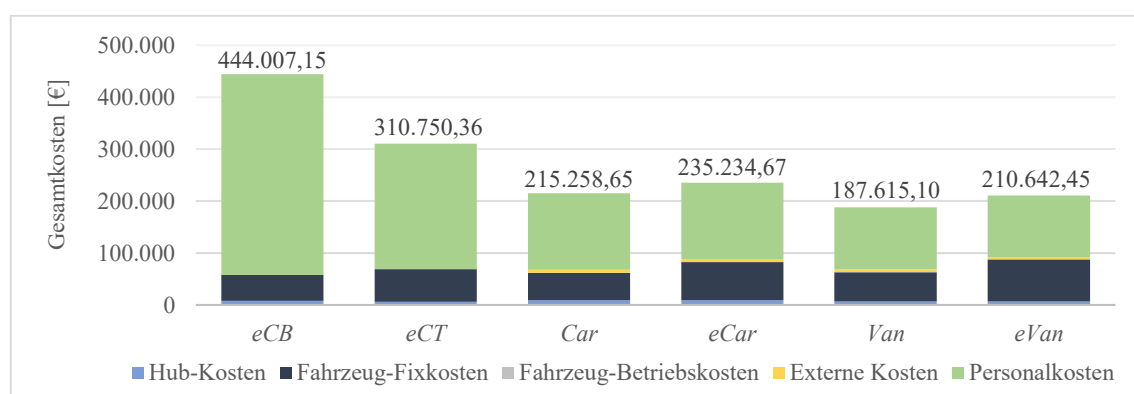


Abbildung 2. Benchmarks für die alleinige Nutzung einzelner Fahrzeugtypen

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 Lastenfahrräder 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.

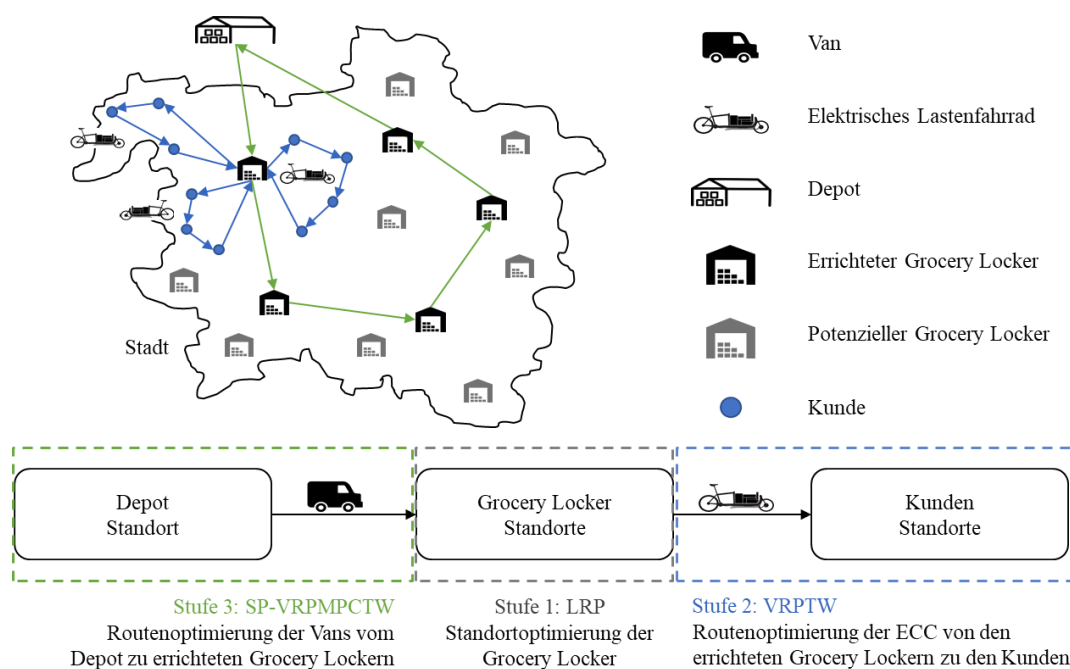


Abbildung 3. Überblick über das Logistik-Konzept für e-Grocery

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 [#]	$\Sigma$ [#]	ECC [km]	Vans [km]	Groc. Lock. [€]	ECC [€]	Vans [€]	$\Sigma$ [€]
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.

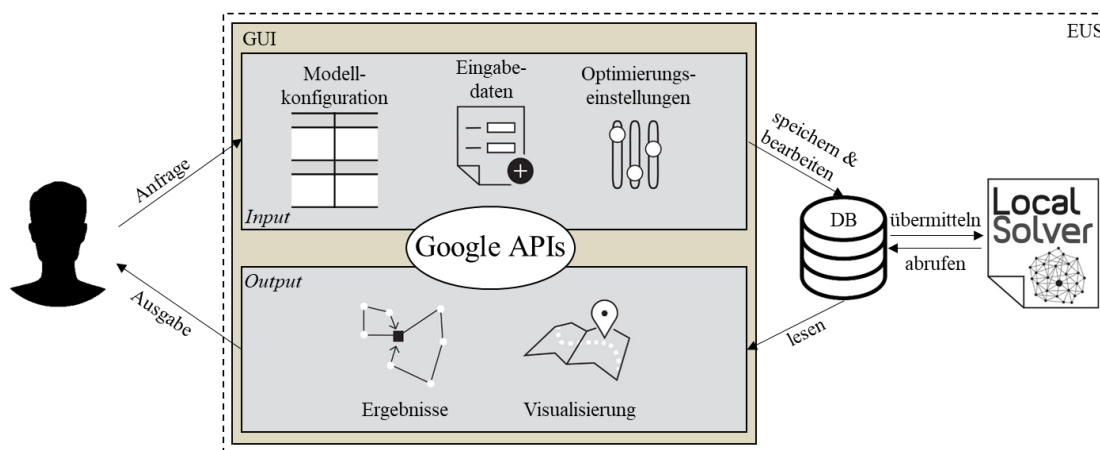


Abbildung 5. Benutzerinteraktion und Systemarchitektur des MAVRDSS

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**

<b>I. Abstract .....</b>	<b>I</b>
<b>II. Management Summary .....</b>	<b>III</b>
<b>III. Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>XV</b>
<b>IV. Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>XVII</b>
<b>V. Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>VI. Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XIX</b>
<b>VII. Überblick der Veröffentlichungen und Aufgabenverteilung.....</b>	<b>XXI</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation und Gegenstand .....	1
1.2. Forschungsmethodik .....	3
1.3. Aufbau der Dissertation .....	5
<b>2. Entscheidungsunterstützung zur Optimierung eines nachhaltigen Logistik-</b>	
<b>    Konzepts in der urbanen Paketzustellung.....</b>	<b>7</b>
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
<b>3. Optimierung eines neuen Logistik-Konzepts für e-Grocery Lieferungen im</b>	
<b>    urbanen Raum .....</b>	<b>33</b>
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

<b>4. Variable Entscheidungsunterstützung für individuelle Routenoptimierungsprobleme .....</b>	<b>54</b>
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
<b>5. Kritische Würdigung .....</b>	<b>74</b>
5.1. Diskussion der wissenschaftlichen Beiträge .....	74
5.2. Darstellung der Limitationen .....	78
5.3. Ausblick .....	82
<b>6. Fazit .....</b>	<b>84</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>85</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>103</b>
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 Ride- pooling 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