

Optimierungspotentiale in der urbanen Logistik

Lieferroboter in der Last-Mile-Delivery

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science (M. Sc.)“ im Studiengang
Wirtschaftswissenschaft der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der
Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Agathe Kleinschmidt

durchgeführt am
Institut für Wirtschaftsinformatik (IWI), Hannover

Prüfer der Arbeit: Prof. Dr. Michael H. Breitner

Hannover, 2. Oktober 2017

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
1.3 Forschungsmethodik	5
2 Theoretische Grundlagen der urbanen Logistik	8
2.1 Begriffsabgrenzungen	8
2.1.1 Urbane Logistik	8
2.1.2 Grüne Logistik	10
2.1.3 City Logistik	11
2.1.4 Smart City	11
2.2 Zentrale Akteure	13
2.3 Urbane Güternachfrage	15
2.3.1 Relevanz des Onlinehandels	15
2.3.2 E-Grocery in der letzten Meile	19
2.3.3 Einordnung des Güterwirtschaftsverkehrs	20
2.4 Herausforderungen	22
2.4.1 Logistische Herausforderungen	22
2.4.2 Ökologische Herausforderungen	23
2.5 Elektromobilität als Chance	25
3 Lieferroboter als Optimierungspotential	28
3.1 Optimierungsansätze in der urbanen Logistik	28
3.1.1 Regularien und Raumplanung	28
3.1.2 Infrastruktur	30
3.1.3 Finanzielle Anreize	31
3.1.4 Technologien und Equipment	31
3.2 Literaturanalyse nach Webster und Watson	33

3.3	Lieferroboter in der Last-Mile-Delivery	39
3.4	Roboterbasiertes Geschäftsmodell von <i>K-Robotics</i>	41
4	Marktanalyse zum Einsatz von Lieferrobotern	43
4.1	Vorgehensweise	43
4.1.1	Ziel der Marktanalyse	43
4.1.2	Untersuchungsobjekt der Marktanalyse	44
4.1.3	Methodik	46
4.1.4	Vorstellung der aktiven Marktteilnehmer	46
4.2	Ergebnisse der Marktanalyse	47
4.2.1	Dispatch	47
4.2.2	Marble	49
4.2.3	Starship Technologies	51
4.2.4	Genehmigungsverfahren in Deutschland	61
4.3	Ergebnisdiskussion	62
4.3.1	Vergleich der aktiven Marktteilnehmer	62
4.3.2	Chancen und Einsatzmöglichkeiten	66
4.3.3	Herausforderungen	66
5	Optimierungsmodell eines roboterbasierten Lieferkonzepts	68
5.1	Modellanforderungen des Geschäftsmodells	68
5.2	Wissenschaftliche Einordnung	69
5.3	Electric Location Routing Problem with Time Windows and Battery Swapping	73
5.3.1	Modellannahmen	73
5.3.2	Notation	74
5.3.3	Formalmathematisches Modell	76
5.3.4	Zusätzliche Ausgabewerte	79
5.4	Technische Implementierung in GAMS	80
5.5	Modelldiskussion	81
6	Implementierung des Lieferkonzepts in einem Anwendungsfall	84
6.1	Hannover als Anwendungsfall	84
6.2	Parameterwertfestlegung	85
6.3	Ergebnispräsentation der Ausgangssituation	92
6.4	Sensitivitätsanalysen	92
6.4.1	Anzahl der Compartments	93
6.4.2	Akkureichweite	94
6.4.3	Nachfrage	95
7	Kritische Würdigung	96
7.1	Implikationen	96
7.2	Limitationen und Handlungsempfehlungen	98
8	Fazit und Ausblick	106

A	Interviewpartner	108
A.1	Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation der Stadt Hamburg	108
A.2	Hermes	109
A.2.1	Pilotprojekte	109
A.2.2	Regulatorische Rahmenbedingungen	110
A.3	Foodora	111
A.4	Marathon Targets	111
A.5	Media Markt	111
A.6	Postmates	113
A.7	Robby Technologies	113
A.8	Starship Technologies	114
A.9	Swiss Post	117
A.10	TeleRetail	118
A.11	Wolt	119
A.12	ZMP	120
B	Gams-Code	121
B.1	GAMS-Code	121
B.2	Input File	127
	Glossar	131
	Literaturverzeichnis	132
	Ehrenwörtliche Erklärung	149

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die urbane Logistik befasst sich mit der zunehmenden Besiedlung von städtischen Gebieten und den damit einhergehenden Auswirkungen wie einer steigenden Anzahl an Fahrzeugen, welche zu Luftverschmutzung, Lärm und Staus führen können [vJD15, 3]. Der urbane Bevölkerungsanteil ist seit 1950 von etwa der Hälfte auf fast drei Viertel der gesamten Bevölkerung angestiegen. Es wird erwartet, dass sich dieser Trend fortsetzt, sodass bis 2050 ein urbaner Bevölkerungsanteil von 82 Prozent erwartet werden [Jon17, 7]. Durch die wachsende Bevölkerung in Städten steigt auch die Nachfrage nach Gütern in diesen Ballungsgebieten. Dies hat Einfluss auf die Bereiche Online-Handel sowie die durch die Logistik verursachten Emissionen.

Darüber hinaus boomt der Online-Handel, sodass das Verkehrsaufkommen durch Lieferdienste, die den Kunden bis zur Haustür auf der sogenannten letzten Meile beliefern, weiter zunimmt [vGW⁺16, 15]. Mit dem zunehmenden E-Commerce steigt auch der Kundenwunsch, die bestellten Produkte so schnell wie möglich zu erhalten. Dieser Wunsch geht mit den Kundenforderungen einer Zustellung am Tag der Bestellung (Same-Day Delivery) oder einer Sofortlieferung (Instant Delivery) einher, sodass der Markt für Same-Day und Instant Delivery, der 2016 bei weniger als einem Prozent lag, bereits im Jahr 2025 rund ein Fünftel des Umsatzes mit Standardpaketen ausmachen soll. Die steigende Lieferhäufigkeit der Kunden führt außerdem zu immer kleinteiligeren Sendungen und somit zu einem höheren Sendungsaufkommen, welches sich laut einer McKinsey-Studie aus dem Jahr 2016 in Deutschland bis 2025 sogar verdoppeln soll. Die Belieferung der letzten Meile ist von entscheidender Bedeutung, da diesem letzten Lieferabschnitt etwa 50 Prozent der Lieferkosten eines Standardpakets und bis zu 90 Prozent bei einer Same-Day Delivery zugeordnet werden können [McK].

Die Logistik und der Straßenverkehr betragen etwa 5,5 Prozent der durch menschliche Aktivitäten erzeugten jährliche Treibhausgasemissionen. Unter Betrachtung der Zielsetzung der Europäischen Kommission, bis 2050 Kohlenstoffdioxid (CO_2)-freie Stadtzentren zu erhalten, sollen in Zukunft insbesondere elektrisch betriebene Fahrzeuge eingesetzt werden [Eur11a, 4]. Eine emissionsfreie Logistik ist daher vor allem in urbanen Gebieten verstärkt in den

Fokus des öffentlichen Interesses getreten. Die EU-Zielsetzung führte gemeinsam mit den in vielen Städten bereits überschrittenen Emissions-Grenzwerten zu stärkeren städtischen Regulierungen des Transports. So setzen beispielsweise viele Städte Niedrigemissionszonen oder sogar ein vollständiges Verbot von Dieselmotoren um, die sich systematisch auf die Logistikbranche auswirken und diese in ihrer Belieferungsart einschränken [Jon17, 4].

In den letzten Jahren konnte beobachtet werden, dass vermehrt Lieferservices für Lebensmittel angeboten werden. So liefern Supermärkte wie Rewe oder Lidl eine Auswahl an Lebensmitteln direkt zum Kunden [Rewc]. Etwa 38 Millionen Personen tätigen mehrmals pro Woche einen Einkauf, wobei 42 Prozent der Einkäufe mit einem Auto erledigt werden [ND14]. Eine Fahrt zum Supermarkt besteht mit dem Auto aus einem Hin- und einem Rückweg, während ein Lieferservice die zu fahrende Wegstrecken so optimiert, dass eine geschlossene Route gefahren wird, sodass durch die Verwendung von Lieferservices CO_2 -Emissionen in urbanen Gebieten verringert werden können. Bei der Belieferung durch Lieferservices müssen Kunden allerdings ein bestimmtes Zeitfenster für die Belieferung wählen, nach welchem sich ebenfalls die Versandkosten bemessen [Rewb]. Einige Lebensmittellieferanten wie beispielsweise Lidl lassen die bestellten Produkte durch Paketdienstleister liefern, was dazu führt, dass keine Kühl- und Tiefkühlprodukte bestellt werden können, da die Kühlkette ansonsten unterbrochen werden würde [Lid]. Dies führt dazu, dass Kunden nicht alle Produkte des täglichen Lebens bestellen können und ein zusätzlicher Einkauf dennoch notwendig wird. Die meisten Lieferservices fahren die Bestellungen außerdem mit konventionell betriebene Lieferfahrzeugen aus, welche Schadstoff- und Lärmemissionen ausstoßen.

Durch die aufgeführten Herausforderungen wird deutlich, dass eine Anpassung der logistischen Abläufe nötig ist. Beispielsweise werden für die Same-Day Delivery keine großen Lagerhallen mehr benötigt, sondern vielmehr kleinteilige Lösungsansätze, die schnelle Reaktionszeiten ermöglichen. Somit müssen innovative Zustellkonzepte gefunden werden, welche eine ökonomische und ökologische Umsetzung *on demand* ermöglichen [Bul16].

Einen Lösungsansatz könnten bodenbasierte Lieferroboter darstellen, die seit 2014 entwickelt und seit 2015 in Pilotprojekten getestet werden. Lieferroboter können in einer sogenannten Basisstation mit Sendungen beladen werden, die sie anschließend autonome zu einem oder sogar mehreren Kunden transportieren. Kunden können über die genaue Position des Roboters in Echtzeit unterrichtet werden und ihre Sendung bei der Ankunft des Roboters durch Eingabe eines individuell übermittelten Codes entnehmen. Ein vollkommen autonomer Einsatz der Roboter, welcher ohne Begleitperson durchgeführt wird, hat weltweit allerdings noch nicht stattgefunden. Dies liegt insbesondere daran, dass die öffentlichen Verwaltungen einem solchen Einsatz aus rechtlichen Gründen noch nicht zugestimmt haben [Huf17]. Entscheidend für den Einsatz einer neuen Technologie in der letzten Meile ist insbesondere die Akzeptanz der Bevölkerung. Mehr als 60 Prozent der befragten Konsumenten, bei den jüngeren Befragten sind es sogar 75 Prozent, stehen neuen Technologien wie Drohnen oder Robotern positiv gegenüber. Bis 2025 könnten daher bereits bis zu 80 Prozent aller Pakete automatisiert ausgeliefert werden [McK].

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erstellung eines Konzepts, durch welches ein abgrenzbares Nachfragegebiet durch Lieferroboter beliefert werden kann. Um dieses Konzept zu entwickeln, wird zunächst eine Marktanalyse durchgeführt, die einen Überblick über den

derzeitigen Einsatz von Lieferrobotern bieten soll. Relevant für die Marktanalyse sind Lieferroboter, die öffentliche Flächen zur Fortbewegung nutzen. Somit werden Lieferroboter, die Sendungen innerhalb von Gebäuden transportieren, nicht betrachtet. Durch die Marktanalyse wird geprüft, welche Unternehmen bereits Lieferroboter entwickelt haben und diese gemeinsam mit Kooperationspartnern in Pilotprojekten testen. Darüber hinaus werden die technischen Spezifikationen dieser Roboter vorgestellt, sofern diese durch die Hersteller veröffentlicht wurden.

Um das Konzept greifbarer zu machen, wird das roboterbasiertes Zustellkonzept für das fiktive Unternehmen *K-Technologies GmbH (K-Technologies)* konzipiert, in welchem auf nachhaltige und innovative Weise Bestellungen von Lieferrobotern ausgeliefert werden. Der Prozess der Endkundenbelieferung in urbanen Gebieten soll an die Bedürfnisse der Endkunden und an das Zeitalter der Internetökonomie angepasst werden. Kunden bestimmen ein Zeitfenster, in welchem sie von einem Lieferroboter beliefert werden. Die Roboter starten ausgehend von einer sogenannten Basisstation, in welcher die Fahrzeuge den Akku laden und mit Sendungen beladen werden. Da elektrisch betriebene Lieferroboter die Anzahl der konventionell betriebenen Transporter in städtischen Regionen verringern könnten, kann dieses innovative Zustellkonzept zu einer Verringerung der CO_2 -Emissionen insbesondere in innerstädtischen Bereichen sowie in Wohngebieten beitragen.

Anschließend wird darauf aufbauend ein mathematisches Modell entwickelt, welches die Touren für die Belieferung der Kunden ausgehend von den Basisstationen bestimmt. Darüber hinaus soll das mathematische Modell unter der Zielsetzung der Minimierung der gesamten Kosten bestimmen, welche der potentiellen Basisstationen eröffnet werden sollen. Mit diesen Zielen gehen folgende Forschungsfragen einher:

Forschungsfrage 1: *Wie und in welchem Umfang werden Lieferroboter auf öffentlich zugänglichen Flächen bereits getestet?*

Forschungsfrage 2: *Welche Parameter sind für die Entwicklung eines roboterbasierten Belieferungssystems ausschlaggebend?*

1.2 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich wie folgt: Zunächst wird die Forschungsmethodik vorgestellt, auf deren Prinzipien die gesamte Arbeit basiert. Der nach Hevner et al. (2004) angewandte *Design Science Research*-Ansatz zielt darauf ab, neue und innovative Artefakte zu schaffen, die iterativ verbessert werden sollen. Demnach wird das Forschungsobjekt an der bestehenden Wissensbasis als auch in die thematische Umgebung eingeordnet und ergänzt diese [HMPR04].

Kapitel 2 stellt zunächst die theoretischen Grundlagen der urbanen Logistik vor, um die grundlegenden Kenntnisse für den weiteren Verlauf dieser Arbeit zu bieten. Nachdem der Begriff *urbane Logistik* von ähnlichen Begrifflichkeiten abgegrenzt wird, werden die Aufgaben, Interessen und Handlungsmöglichkeiten der zentralen Akteure in der urbanen Logistik vorgestellt. Ferner wird die Relevanz des Onlinehandels hervorgehoben, dessen Entwicklung

starke Auswirkungen auf das Transportaufkommen in urbanen Gebieten hat. Im Anschluss wird das urbane Verkehrsaufkommen und insbesondere der Güterwirtschaftsverkehr sowie Lebensmittellieferungen betrachtet. Außerdem werden die logistischen und ökologischen Herausforderungen betrachtet und die Elektromobilität als besondere Chance der urbanen Logistik hervorgehoben.

In dem dritten Kapitel werden Optimierungspotentiale vorgestellt, die Handlungspotentiale für die zentralen Akteure der urbanen Logistik bieten. Um einen weitreichenden Überblick über Optimierungsansätze zu bieten, werden diese in die vier Handlungsfelder Regularien und Raumplanung, Infrastruktur, finanzielle Anreize sowie IT-unterstützte Technologien und Innovationen kategorisiert und durch Best Practice-Praxisbeispiele belegt. Anschließend erfolgt eine umfassende Literaturanalyse nach Webster und Watson, durch die der aktuelle Stand der Forschung in Bezug auf die Optimierungspotentiale ermittelt wird. Überdies werden Lieferroboter als Optimierungspotential für die urbane Logistik näher betrachtet und in die vorgestellten Handlungsfelder eingeordnet. Ferner werden die Chancen und Herausforderungen von Lieferrobotern in der letzten Meile dargestellt, bevor das roboterbasierte Geschäftsmodell des fiktiven Unternehmens *K-Robotics* präsentiert wird.

Kapitel 4 umfasst die Marktanalyse zum Einsatz von Lieferrobotern, durch welche die erste Forschungsfrage beantwortet wird. Zunächst wird die Vorgehensweise inklusive Methodik der Marktanalyse erläutert. Um die Marktteilnehmer entsprechend des Entwicklungsstands ihrer Lieferroboter abgrenzen zu können, werden Unternehmen, die Lieferroboter entwickeln und bereits Pilotprojekte mit Kooperationspartnern in öffentlich zugänglichen Flächen durchgeführt haben, als aktive Marktteilnehmer bezeichnet. Die Ergebnisse der Marktanalyse beziehen sich auf die Unternehmen *Dispatch*, *Marble* und dem Marktführer *Starship Technologies* und bieten Informationen zu den Unternehmen und deren Lieferroboter. Der Fokus der Untersuchung liegt auf laufenden und abgeschlossenen Pilotprojekten, durch welche ein zukünftiger Einsatz unter realen Bedingungen getestet wird. Im Anschluss werden die aktiven Marktteilnehmer in Bezug auf die Dauer des Robotereinsatzes, die Investments und einige relevante Parameter verglichen, bevor die Ergebnisse diskutiert werden. Es werden Chancen und Einsatzmöglichkeiten sowie Herausforderungen betrachtet, bevor die für die Modellierung relevanten Parameter aus der Marktanalyse abgeleitet werden. Letztlich wird die Markteintrittsentscheidung von *K-Robotics* auf Basis dieser Datengrundlage erarbeitet. Anschließend wird in Kapitel 5 das mathematische Optimierungsmodell der Lebensmittelauslieferung durch Lieferroboter dargestellt, welches auf dem Warehouse Location Routing Problem und ferner auf dem Vehicle Routing Problem basiert. Die beiden mathematischen Grundmodelle werden zunächst dargestellt und anschließend um die elektrische Komponente der Lieferroboter sowie um Zeitfenster erweitert, sodass letztlich das in dieser Arbeit entwickelte *Electric Location Routing Problem with Time Windows* entsteht, welches auf die Kostenminimierung der Belieferung der letzten Meile durch Lieferroboter abzielt. Für die einzelnen Modelle werden zunächst die getroffenen Annahmen aufgezeigt und die verwendeten Symbole definiert. Anschließend wird das mathematische Modell formal dargestellt. In Kapitel 6 wird ein praxisorientierter Anwendungsfall vorgestellt, welches sich über einen fest definierten Bereich in der niedersächsischen Stadt Hannover erstreckt. Dafür werden den einzelnen Parametern des mathematischen Optimierungsmodells Werte zugewiesen. Darüber hinaus erfolgt die technische Implementierung des formalen Optimierungsproblems anhand

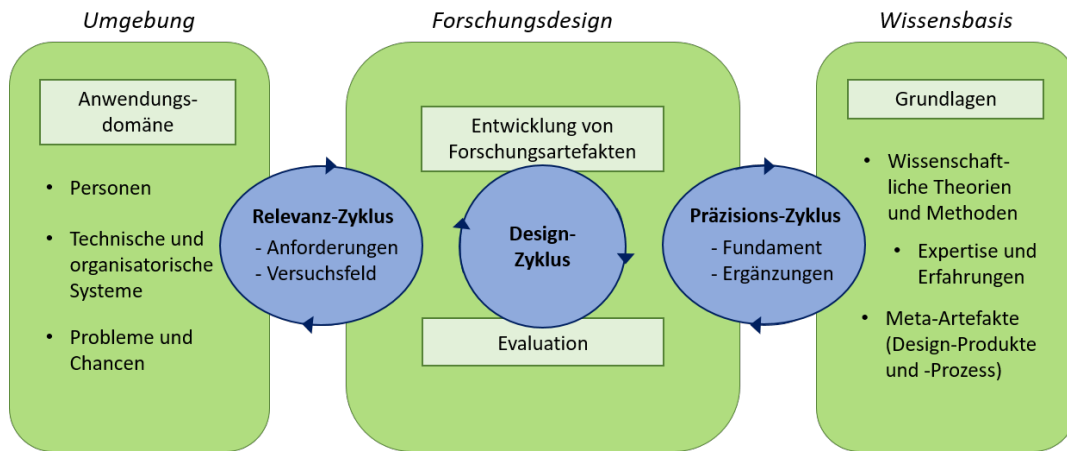


Abbildung 1.1: Design Science Research-Zyklen. Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an [Hev07, 88]

der Software GAMS (General Algebraic Modeling System), um das entwickelte Modell mittels leistungsstarker Solver zu lösen, sodass letztlich die Ergebnisse der GAMS-Software präsentiert werden.

Im Anschluss wird eine Sensitivitätsanalyse, durchgeführt, in welcher verschiedene Input-Parameter variiert und somit Veränderungsszenarios sowie deren Auswirkungen auf das Ausgangsbeispiel dargestellt werden. Somit können Erkenntnisse über die Einflüsse der einzelnen Faktoren erlangt werden. Die Resultate der Sensitivitätsanalyse werden untersucht und miteinander verglichen. Die kritische Würdigung in Kapitel 7 umfasst eine Diskussion der Ergebnisse dieser Arbeit und stellt die Limitationen vor, bevor Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Die Arbeit schließt mit dem Fazit und stellt einen Ausblick dar.

1.3 Forschungsmethodik

Die Forschung dieser Arbeit basiert auf den Prinzipien des *Design Science Research (DSR)* von Hevner et al. (2004), welche darauf abzielen, neue und innovative Artefakte zu schaffen, um die vorherrschende Umgebung zu verbessern [HMPR04]. Die Prinzipien charakterisieren das Forschungsdesign, indem sie drei eng verwandte Zyklen von Aktivitäten definieren, welche in Abbildung 1.1 dargestellt werden.

In dem zentralen Design-Zyklus wird das Forschungsobjekt entwickelt und kontinuierlich an dem Relevanz- und dem Präzisions-Zyklus ausgerichtet, sodass die Umgebung und die Wissensbasis iterativ in das Forschungsobjekt eingebunden werden. Der Forschungsprozess wird durch den Relevanz-Zyklus initiiert, welcher die Forschungsartefakte definiert. Laut Hevner (2007) beginnt gute DSR oft mit der Identifizierung und Darstellung von Chancen und Problemen in einer tatsächlichen Anwendungsumgebung. Um die Anwendungsumgebung zu erforschen, werden die Personengruppen sowie technischen und organisatorischen Systemen untersucht [Hev07, 87 ff.].

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Forschungsumgebung der urbanen Logistik vor allem durch

die in Kapitel 2 dargestellten Elemente und Akteure identifiziert. Das zunehmende Interesse der Gesellschaft an der Elektromobilität und einem nachhaltigen Belieferungskonzept für die immer stärker besiedelten städtischen Gebiete stellen die Faktoren des Relevanz-Zyklus dar. Durch den Relevanz-Zyklus werden folglich die für das Forschungsobjekt relevanten Entwicklungen betrachtet und somit wird die Umgebung miteinbezogen. Um die Innovation des Forschungsprojekts zu gewährleisten, muss ferner eine breite Wissensbasis in dem Präzisions-Zyklus identifiziert werden [Hev07, 87 ff.]. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit eine umfassende Literaturrecherche nach der Forschungsmethode von Webster und Watson (2002) durchgeführt und der Stand der Forschung analysiert [WW02]. Somit ermöglicht der Präzisions-Zyklus eine Betrachtung der bestehenden Wissensbasis und lässt eine Einordnung des in dem Forschungsprojekt neu generierten Wissens zu.

In dem Design-Zyklus werden Forschungsartefakte entwickelt und evaluiert. Zunächst werden Designideen auf der Grundlage bestehender Modelle untersucht und angepasst, um zusätzliche Anforderungen zu erfüllen [Hev07, 87 ff.]. Der Design-Zyklus beschreibt folglich den Hauptteil dieser Arbeit. Da der Einsatz von Lieferrobotern in der Last-Mile-Delivery erst seit 2016 in Pilotprojekten näher untersucht wird, besteht noch keine große Wissensbasis für dieses konkrete Belieferungskonzept. Um ein möglichst breite Wissensbasis zu schaffen, soll ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt werden, durch den der Nischenmarkt der Lieferroboter betrachtet wird. Daher wird in dieser Arbeit im Zuge des Design-Zyklus zunächst eine Marktanalyse über den Einsatz von Lieferrobotern in der letzten Meile durchgeführt, sodass das gewonnene Wissen die Wissensbasis erweitern kann (Präzisions-Zyklus). Im Anschluss wird ein formales Optimierungsmodell für den Einsatz von Lieferrobotern in der letzten Meile entwickelt und evaluiert (Design-Zyklus).

Das entwickelte Optimierungsmodell wird basierend auf den Daten eines Anwendungsfalls in die Software *General Algebraic Modeling System (GAMS)* implementiert. In dem iterativ folgenden Relevanz-Zyklus wird die Anwendbarkeit durch verschiedene Datensätze nachgewiesen. Aufgrund der Dokumentation und Diskussion der Ergebnisse durch die Verwendung von Sensitivitätsanalysen, kann das Modell letztlich der Wissensbasis hinzugefügt werden. Somit führt dieser iterativ ablaufende Prozess im idealen Fall zu einer kontinuierlichen Verbesserung des Forschungsobjektes [Hev07, 88]. Der auf die vorliegende Arbeit angepasste DSR-Ansatz ist in Abbildung 1.2 dargestellt und visualisiert den beschriebenen Ansatz.

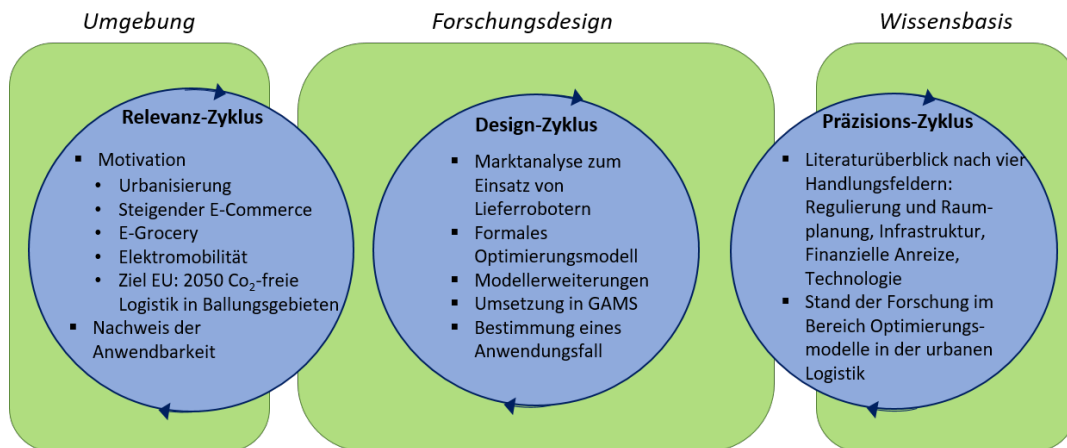


Abbildung 1.2: Angepasste Design Science Research-Zyklen. Quelle: Eigene Darstellung

Kapitel 8

Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wird eine neuartige Geschäftsidee zur Optimierung der urbanen Logistik präsentiert. Dazu wird im speziellen die Lebensmittelversorgung der Bevölkerung in urbanen Gebieten betrachtet. Durch die Geschäftsidee der Firma *K-Robotics* soll das innerstädtische Verkehrsnetz entlastet werden, während den Kunden gleichzeitig ein verbessertes Einkaufserlebnis für Lebensmittel geboten wird. Zur Umsetzung dieser Geschäftsidee wurde zunächst eine Marktanalyse durchgeführt, durch die gezeigt werden konnte, dass die Belieferung der letzten Meile durch Lieferroboter, welche Waren zur Haustür des Kunden transportieren, eine attraktive Möglichkeit für Kunden, Hersteller und Kooperationsunternehmen bietet. Aufbauend auf die durch die Marktanalyse gewonnenen Erkenntnisse wurde ein mathematisches Optimierungsmodell entwickelt, welches auf dem WLRP basiert, welches sowohl die optimale Standortbestimmung der Basisstationen als auch die optimalen Touren zur Belieferung der Kunden bestimmt. Das Modell wurde um zusätzliche Restriktionen für die mathematische Darstellung der Akkureichweite und Zeitfenster erweitert und letztlich als ELRP-TW bezeichnet. Die Funktionsweise des an die Besonderheiten dieser Geschäftsidee angepassten formalmathematischen Modells konnte durch realitätsnah hergeleiteten Daten und der Implementierung in die Modellierungssoftware GAMS gezeigt werden.

In Sensitivitätsanalysen wurde zudem der Einfluss einzelner Parameter auf die Lösungsmenge untersucht und anschließend diskutiert. Dabei zeigt sich, dass die Anzahl der Compartments einen großen Einfluss auf die Tourenplanung hat, da diese die Anzahl der auf einer Tour maximal zu beliefernden Kunden darstellt. Ferner wurde gezeigt, dass die Nachfrage die Tourenplanung und darüber hinaus auch die Standortbestimmung der Basisstationen beeinflusst.

In der kritischen Würdigung wird gezeigt, dass der Nutzen der Kombination von Standortbestimmung und Tourenplanung vor dem Hintergrund des dargestellten Geschäftsmodells kritisch betrachtet werden sollte. Hier müssen die grundsätzlich zeitraumunterschiedlichen Kosten der Standortbestimmung und der Touren aneinander angeglichen werden. Nachfragemengen- und orte sowie die resultierenden Touren müssen als dafür hinreichend repräsentativ für einen längerfristigen Planungshorizont angenommen werden, was eine Abstraktion von der Realität darstellt.

Lieferroboter stellen in Kombination mit menschlichen Zustellern oder Beladern eine realisti-

sche Option für die Belieferung von privaten Empfängern in der letzten Meile dar. Insbesondere abseits von Metropolen und in städtischen Gebieten ist der Einsatz von Lieferrobotern für die partielle Zustellung von Sendungen sinnvoll. Dafür sind rechtliche Rahmenbedingungen sowie die gesellschaftliche Akzeptanz der Lieferroboter notwendig. In den bisherigen Pilotprojekten erhielten die Roboter positive Reaktionen der Passanten und wurden häufig gar nicht mehr von Passanten beachtet. Sobald die Fahrzeuge vollständig alleine unterwegs wären, muss allerdings mit vermehrten negativen Reaktionen in Form von Vandalismus und Diebstahl gerechnet werden. Die Akzeptanz der Passanten hängt außerdem von der Anzahl der Lieferroboter ab, denen sie begegnen. Somit müsste bei der Schaffung von rechtlichen Rahmenbedingungen die zulässige Anzahl der Roboter innerhalb eines bestimmten Radius beachtet werden.