

# Masterarbeit

## Ein Konzept zur Umsetzung eines kollaborativen Tourenplanungsansatzes in einem datengetriebenen Supply-Chain-Simulationsmodell

verfasst von

Astrid Klüter

Matrikel-Nr.: 102771

Studiengang: Logistik

astrid.klueter@tu-dortmund.de

Ausgegeben am: 15.09.2015

Eingereicht am: 01.03.2016

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe

Gutachter: Felix Dross, M.Sc. Software Engineering



# Vorwort

Logistik ist die Basis für Globalisierung und Wettbewerbsfähigkeit. Ohne sie lässt sich keine erfolgreiche Wirtschaft oder ein modernes Leben gestalten. Für die jetzige und zukünftige Lebensqualität der modernen Gesellschaft ist ein verantwortungsvolles und auf nachhaltige Wirtschaftsformen ausgerichtetes Handeln gefordert. Diesen Sachverhalt haben auch die Vertreter der Logistikbranche erkannt, welche deshalb verstärkt zusammen mit Partnern aus der Forschung, Industrie und Politik unterschiedliche Lösungskonzepte für die dringlichen Probleme der heutigen Zeit erarbeiten. Dies trifft auch auf die vorliegende Masterarbeit zu, welche im Rahmen meiner Tätigkeiten als wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl IT in Produktion und Logistik (ITPL) der TU Dortmund entstanden ist. Die Motivation zu der behandelten Problemstellung wurde aus der Mitarbeit in dem EU-Forschungsprojekt „U-TURN“ abgeleitet.

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Vorwort</b>   | <b>I</b>  |
| <b>Inhaltsverzeichnis</b>  | <b>II</b> |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2 Logistischer Kontext</b>  | <b>5</b>  |
| 2.1 Citylogistik . . . . .   | 5         |
| 2.1.1 Gesetzliche Maßnahmen . . . . .  | 6         |
| 2.1.2 Transportlogistische Konzepte von Unternehmen . . . . .                    | 7         |
| 2.1.3 Gemeinschaftsprojekte . . . . .  | 8         |
| 2.2 Tourenplanung . . . . .  | 8         |
| 2.3 Kollaborationen im Supply Chain Management . . . . .                         | 12        |
| 2.3.1 Begriffsbestimmung . . . . .   | 12        |
| 2.3.2 Ausprägungen von Kollaborationen . . . . .                                 | 14        |
| 2.3.3 Beispiele von Kollaborationen . . . . .                                    | 16        |
| 2.4 Vehicle Routing Probleme . . . . .   | 17        |
| 2.4.1 Überblick über Arten des Vehicle Routing Problems . . . . .                | 17        |
| 2.4.2 Lösungsansätze für das Vehicle Routing Problem . . . . .                   | 20        |
| <b>3 Ereignisdiskrete Simulation zur Bewertung von Tourenplanungen</b>           | <b>28</b> |
| 3.1 Grundlagen der Simulation . . . . .  | 29        |
| 3.2 Einsatz zur Bewertung von Verkehrs- und Tourenplanungen . . . . .            | 31        |
| 3.3 Einsatz zur Bewertung von Ansätzen kollaborativer Tourenplanung . . . . .    | 33        |
| 3.4 Simulationswerkzeug SimChain . . . . .                                       | 34        |
| 3.4.1 SimChain-Datenmodell . . . . .   | 35        |
| 3.4.2 Simulationsmodell . . . . .  | 38        |
| <b>4 Modelle von kollaborativen Tourenplanungsansätzen</b>                       | <b>41</b> |
| 4.1 Problemformulierung . . . . .  | 41        |
| 4.2 Konzeptuelle Modelle der kollaborativen Tourenplanung . . . . .              | 43        |
| 4.2.1 Entwicklung von Kollaborationsmodellen . . . . .                           | 43        |
| 4.2.2 Gegenüberstellung der Modelle . . . . .                                    | 47        |
| 4.3 Überlegungen zur Lösungsumsetzung . . . . .                                  | 57        |
| 4.3.1 Mathematische Formulierung . . . . .                                       | 59        |
| 4.3.2 Umsetzung ausgewählter Kollaborationsmodelle . . . . .                     | 61        |
| <b>5 Vorschlag für die Umsetzung eines kollaborativen Tourenplanungsansatzes</b> | <b>67</b> |
| 5.1 Vorstellung des Fallbeispiels . . . . .                                      | 67        |
| 5.1.1 Annahmen . . . . .   | 70        |
| 5.1.2 Planung von Touren und Routen . . . . .                                    | 73        |
| 5.1.3 2-opt-Verfahren . . . . .  | 75        |
| 5.2 Empfehlungen für Änderungen in SimChain . . . . .                            | 76        |

---

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b> | <b>79</b> |
| <b>Sachwortverzeichnis</b>            | <b>82</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>           | <b>82</b> |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>          | <b>91</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>            | <b>92</b> |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>          | <b>93</b> |
| <b>Gleichungsverzeichnis</b>          | <b>94</b> |
| <b>Algorithmenverzeichnis</b>         | <b>95</b> |
| <b>Eidesstattliche Versicherung</b>   | <b>96</b> |

# 1 Einleitung

Die steigende Bevölkerungsdichte in Städten stellt eine große Herausforderung in der heutigen Zeit dar. Die Urbanisierung schreitet so schnell voran wie nie zuvor in der Geschichte und lässt sich weltweit beobachten. In dem von DHL veröffentlichten Logistics Trend Radar 2014 wird vorausgesagt, dass in weniger als fünf Jahren mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in städtischen Gebieten leben wird (Bubner et al. 2014). Im Jahr 2100 wird dieser Wert laut Prognosen der Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD (2015)) sogar auf 85% steigen.

Die steigende Bevölkerungsdichte hat verschiedene, teils gravierende, Auswirkungen. So führt sie beispielsweise unweigerlich zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen. Daraus ergibt sich für Wirtschaftsakteure und politische Entscheidungsträger auf nationaler und lokaler Ebene die Aufgabe, die Vorteile der Urbanisierung zu steigern und negative Folgen zu verringern. Erste Konzepte wurden bereits erarbeitet um den steigenden Anforderungen in städtischen Gebieten gerecht zu werden. Beispiele hierfür sind der Ausbau von E-Mobilität oder die Verbreitung von Paketstationen. Auch Stadtentwickler berücksichtigen vermehrt den zunehmenden Verkehr und die damit verbundenen Belastungen. So wurde vor einigen Jahren in zahlreichen europäischen Innenstädten die Einführung von Umweltzonen realisiert (Lehmacher 2015).

Angesichts dieser Entwicklungen sind insbesondere die Entscheidungen und Aktivitäten von Logistikern mit einer großen gesellschaftlichen Verantwortung verbunden. Die Logistik muss sich stets dem Wandel anpassen, um unter den gegebenen Bedingungen eine wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit dauerhaft zu gewährleisten und effiziente Prozesse gestalten zu können. Aufgrund des wachsenden Onlinehandels und der zunehmenden Belieferungen frei Haus (Home Delivery)(vgl. Bubner et al. 2014), ist prozessual besonders die letzte Meile betroffen, auf der für Logistiker hohe Kosten entstehen (DHL 2008). Die Versorgung der stetig wachsenden Städte erfordert deshalb innovative Logistikkonzepte. Gleichzeitig müssen die Logistikhösungen dabei an die spezifischen Anforderungen der städtischen Gebiete angepasst werden. Hierbei besteht zum einen die Verpflichtung, die Anforderungen der Gesetzgeber einzuhalten, zum anderen wird von den Kunden eine leistungsfähige Logistik gefordert.

Eine kürzlich erschienene Studie der McKinsey&Company (2014) prognostizierte eine enorme Entwicklung für die Zustellung von Waren noch am Tag der Bestellung, eine sogenannte Same Day Delivery. Diese Entwicklung erfordert eine hohe Produktverfügbarkeit und eine hohe Transparenz, z.B. über die Warenbestände. Um auch zukünftig den steigenden Anforderungen der Kunden gerecht werden zu können, ist für Logistikunternehmen die

stetige Optimierung und Weiterentwicklung der Prozessqualität notwendig. Da die betrieblichen Prozessabläufe, insbesondere in der Fertigung, bereits einen hohen Grad an Optimierung aufweisen, verspricht die weitere Betrachtung dieses Feldes nur noch geringe Effekte (Faltin 2012). Eine vielversprechende und innovative Forschungsfrage zielt deshalb nicht auf ein einzelnes Unternehmen ab, sondern versucht die Distributionslogistik mehrerer Unternehmen effektiv miteinander zu verknüpfen. Das Besondere hierbei ist, dass diese Unternehmen nicht Bestandteile einer Supply Chain (SC) sind, sondern in der Endstufe unterschiedlicher SCs miteinander konkurrieren.

In der stark umkämpften Distributionslogistik ist die Sicherstellung einer hohen Kundenzufriedenheit ein entscheidender Faktor, welcher beispielsweise durch eine zeitnahe Befriedigung der Kundenaufträge erreicht wird. Ein Unternehmen kann es sich aufgrund des starken Konkurrenzdrucks im Allgemeinen nicht leisten, ein wesentlich schlechteres Lieferserviceangebot als die Konkurrenz zu offerieren (Dietel 1997). Um diese Serviceleistungen für den Kunden sicherzustellen, lassen sich jedoch Leerfahrten oft nicht vermeiden.

Die Motivation der vorliegenden Arbeit wird durch die Überlegung hervorgerufen, dass eine kollaborative Zusammenarbeit der Logistikunternehmen bei der Tourenplanung zu einer Kostenreduktion und einer höheren Lieferfähigkeit führen kann. Zudem können Kollaborationskonzepte ein hervorragendes Mittel zur Bewältigung der zukünftigen Herausforderungen der Citylogistik darstellen (Gonzalez-Feliu 2011) und ihre Auswirkungen sowohl die Umwelt als auch die Straßennetze schonen. Durch die Teilnahme an Kollaborationsmodellen besteht für die Distributionslogistiker, deren Lieferorte in der ganzen Stadt verteilt sind, die Möglichkeit, ihre Kundenaufträge miteinander zu verknüpfen, um insbesondere die Erschwernisse auf der letzten Meile zu überwinden. Kollaborationen im Logistikbereich könnten somit die Erfüllung von ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Zielen miteinander vereinen.

Um die Potentiale einer kollaborativen Tourenplanung zu überprüfen, wird in dieser Arbeit ein beispielhaftes Szenario einer Supply Chain entwickelt. Anstelle der Endkundenbelieferung mit einer geringen Kapazitätsauslastung der Fahrzeuge von den verschiedenen Warenlagern aus, soll ein Fahrzeug zunächst alle Warenlager anfahren, um nach und nach Waren einzuladen. Anschließend wird eine optimale Route zur Erreichung aller Kunden festgelegt.

Die Umsetzung eines solchen Konzepts ist in der Regel mit einem bedeutenden organisatorischen Aufwand verbunden. Dieser Umstand lässt sich nicht nur mit der Novität dieser Art der Zusammenarbeit begründen. Die Herausforderung liegt ebenfalls in der Berücksichtigung der vielfältigen Einflussgrößen und Wechselwirkungen des vorgestellten Konzepts, welche nur schwer zu erfassen sind.

Zur Untersuchung dieser Wirkungszusammenhänge wird in dieser Arbeit die Simulation als ein geeignetes Analyse- und Prognosewerkzeug (März und Weigert 2011) verwendet. Die Simulation hat sich als wichtige Analysemethode in der Produktion und Logistik etabliert (Rabe und Hellingrath 2001; Rabe et al. 2008; Wenzel et al. 2008). Durch das Erzeugen von „What-If“-Szenarien leistet sie einen wichtigen Beitrag zur Leistungsbeurteilung und

Entscheidungsorientierung in dynamischen und stochastischen Systemen (Botta-Genoulaz et al. 2008; Domschke et al. 2015). Anhand des hier verwendeten Szenarios einer Supply Chain kann die Umsetzung einer kollaborativen Tourenplanung mit Hilfe der Simulation bewertet werden. Eine Bewertung erfolgt, indem unterschiedliche Maßnahmen untersucht werden und somit Aussagen über die Auswirkungen der Maßnahmen getroffen werden können. Die Auswirkungen werden zum Beispiel durch Kosten- oder Streckeneinsparungen oder eine Veränderung des Servicelevels sichtbar. Mit Hilfe dieser Kennzahlen könnte Vertretern aus Politik und Wirtschaft aufgezeigt werden, dass Kollaborationen einen Nutzen mit sich bringen und eine tatsächliche Umsetzung in der Praxis zu empfehlen ist.

Das Gesamtziel dieser Arbeit liegt darin, ein Konzept zur Umsetzung eines kollaborativen Tourenplanungsansatzes in einem Simulationswerkzeug entwickeln, welches eine integrierte Betrachtung von Netzwerk- und innovativen Tourenplanungen gewährleistet. Als Ergebnis wird ein Vorschlag zur Lösungsumsetzung in dem datengetriebenen Simulationsmodell SimChain unterbreitet. Die Erfüllung des Gesamtziels setzt das Erreichen von mehreren aufeinander aufbauenden Teilzielen voraus. Das erste Teilziel liegt in der Ausarbeitung von konzeptuellen Modellen bezüglich einer kollaborativen Tourenplanung. Durch die Bewertung der Modelle hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile kann eine Empfehlung für ihre praktische Eignung ausgesprochen werden. Als nächstes Teilziel wird ein Konzept für die Implementierung dieser kollaborativen Tourenplanungsansätze in einem Simulationswerkzeug erarbeitet. Weiter soll die Tauglichkeit des Konzepts an einem Fallbeispiel gezeigt werden. Dabei sollen als nachgelagertes Ziel neben den notwendigen Änderungen an den generischen Supply-Chain-Bausteinen von SimChain auch die notwendigen Änderungen am Datenmodell erörtert werden.

Die methodische Vorgehensweise dieser Arbeit gliedert sich in mehrere Teile. Zunächst wird eine Einführung in die Thematik der Citylogistik gegeben, um die Notwendigkeit von Kollaborationen aufzuzeigen. Dabei wird insbesondere das Konzept von Kollaborationen im Detail erläutert. Anschließend erfolgt eine systematische Analyse von verschiedenen Arten des Tourenplanungsproblems und deren Lösungsansätzen. Dies ist darin begründet, dass kollaborative Tourenplanungsansätze bereits existieren könnten und die vorhandenen Ansätze als Grundgerüst für die spätere, eigene Ausarbeitung eines Konzepts dienen könnten. Der Themenbereich der Tourenplanung wird außerdem in Verbindung mit der ereignisdiskreten Simulation analysiert. Hier wird insbesondere untersucht, ob die Simulation bereits zur Bewertung der (kollaborativen) Tourenplanung eingesetzt wurde. Diese Untersuchung findet ebenfalls in der Darstellung der theoretischen Grundlagen Berücksichtigung. Durch die Berücksichtigung sowohl der berichteten praktischen Ansätze als auch der theoretischen Grundlagen wird eine präzise und anwendungsbezogene Modellierung des Zusammenspiels von kollaborativer Tourenplanung und der ereignisdiskreten Simulation ermöglicht. Die Erkenntnisse werden als Basis für die spätere Lösungsumsetzung des Tourenplanungsansatzes in dem datengetriebenen Simulationsmodell benötigt. Im Kapitel 4 werden verschiedene Modelle zur kollaborativen Tourenplanung anhand eines beispielhaften SC-Netzwerks ausgearbeitet. Es beinhaltet vier Warenlager mit jeweils fünf Endkunden. Um die Vorteile und potentielle Schwierigkeiten bei der praktischen Umsetzung der Kollaborationsmodelle systematisch zu analysieren, werden Bewertungskriterien



---

formuliert. Die Kollaborationsmodelle werden anhand dieser Kriterien diskutiert und gegenübergestellt. Die Resultate der Auswertung dienen zu einer Beurteilung der Modelle hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit in der Praxis. Darauf aufbauend werden Überlegungen zur Lösungsumsetzung angestellt, welche beispielhaft mit Hilfe von zwei verschiedenen Kollaborationsmodellen erörtert werden. Als Ergebnis wird ein Konzept zur Implementierung eines kollaborativen Tourenplanungsansatzes in dem datengetriebenen Simulationstool SimChain entwickelt, welches als Grundlage für eine technische Umsetzung dienen kann. Das erarbeitete Lösungskonzept wird im Anschluss noch einmal im Detail beschrieben. In Kapitel 5 wird die Umsetzung des kollaborativen Tourenplanungsansatzes anhand eines Fallbeispiels konkretisiert. Methodisch greift die Lösungsumsetzung anhand dieses Fallbeispiels auf die Ergebnisse der zuvor behandelten Abschnitte zu. In diesem Zuge wird explizit aufgezeigt, wie die Umsetzung in SimChain erfolgt und welche notwendigen Änderungen berücksichtigt werden müssen. In einer abschließenden Zusammenfassung werden die methodischen und inhaltlichen Ergebnisse der Arbeit zusammengetragen. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick darüber, welche Aspekte noch genauer untersucht werden können und welche Erweiterungen der betrachteten Problemstellung in Zukunft vorstellbar sind.

## 2 Logistischer Kontext

In diesem Kapitel werden die für das Verständnis der Arbeit notwendigen Thematiken eingeführt. Um die Aufgabenstellung „Konzeptentwicklung eines kollaborativen Tourenplanungsansatzes“ zu realisieren, ist es von entscheidender Bedeutung, zunächst die Ursachen für den Bedarf nach neuen Logistikkonzepten nachvollziehen zu können. Hierfür wird ein Einblick in das gegenwartsbezogene Themenfeld der Citylogistik gegeben. Anschließend werden grundlegende Konzepte der Tourenplanung aufgezeigt und zugehörige Begrifflichkeiten definiert. Um aus der Vielzahl der in der Literatur betrachteten Modelle (siehe z.B. Domschke und Drexl 2010), die für die Bearbeitung der Aufgabenstellung relevanten Modelle herausgreifen zu können, wird im Abschnitt 2.4.1 eine Klassifikation von Standardproblemen der Tourenplanung vorgenommen. Das Kapitel schließt mit einer Vorstellung von geeigneten Lösungsverfahren für diese Problemstellungen (vgl. Abschnitt 2.4.2) ab.

### 2.1 Citylogistik

Erstmals im Jahre 2007 lebten weltweit mehr Menschen in der Stadt als in ländlichen Regionen (Lehmacher 2015). Und die Tendenz nimmt weiter zu: Experten schätzen, dass monatlich circa sechs Millionen Menschen in die Städte ziehen (Lehmacher 2015). Das stetige Wachstum der Städte in Verbindung mit weiteren Trends wie E-Commerce führt in den kommenden Jahrzehnten zwangsläufig zu einem deutlich erhöhten urbanen Verkehrsaufkommen, welches gegenwärtig bereits messbar ist. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes stieg das Transportaufkommen im Jahr 2014 gegenüber dem Vorjahr um 2,9% auf 4,5 Milliarden Tonnen. Davon wurden auf der Straße rund 3,5 Milliarden Tonnen und damit 3,7% mehr befördert als im Jahr 2013 (Statistisches Bundesamt 2015). Diesen Trend bestätigt auch die europäische CIVITAS Initiative. Diesen Verkehr zu managen, wird eine zunehmende Herausforderung, da der Raum, um Straßennetze weiter zu entwickeln, oft begrenzt oder nicht vorhanden ist (Civitas Wiki consortium 2015).

Momentan schenken Vertreter aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft der Citylogistik hohe Beachtung. Der Duden (2016) bezeichnet Citylogistik als die „Kooperation von (meist unabhängigen) Unternehmen zur Belieferung eines Stadtzentrums mit Gütern“. Diese Definition ist allerdings nicht umfassend genug, was das folgende Kapitel verdeutlichen wird. Eine geeignetere Definition bietet Thoma (1995) an: „Unter dem Begriff Citylogistik werden verschiedene transportlogistische Ansätze diskutiert und teilweise erprobt, die zum einen zur Verkehrsentlastung in den Städten beitragen und zum anderen die Produktivität der Transportmittel erhöhen sollen“. Daraus folgt, dass die Logistik von Städten als

urbane Logistik bezeichnet wird, die speziellen Logistikkonzepte der Städte werden unter dem Begriff Citylogistik zusammengefasst. Diese Konzepte erfahren große Resonanz, da sie Ziele der Ökonomie und Ökologie in Einklang bringen können (Thoma 1995). Somit kann trotz der Urbanisierung eine hohe Lebensqualität und Mobilität gewährleistet werden.

Im Folgenden werden zunächst Herausforderungen und negative Auswirkungen des Stadtverkehrs problematisiert, die den Handlungsbedarf seitens der Gesetzgeber für regulatorische Maßnahmen aufzeigen. Auch die Logistik-Industrie versucht mit den Entwicklungen Schritt zu halten und mit Hilfe innovativer Ideen und unter Verwendung von neuen Technologien, die Versorgung der Städte unter Berücksichtigung von ökonomischen und ökologischen Aspekten zu gewährleisten. Diese Konzepte sind im Abschnitt 2.1.2 beschrieben.

### 2.1.1 Gesetzliche Maßnahmen

Europäische Städte stehen vor einer Vielzahl an Herausforderungen, die mit dem städtischen Verkehr in Verbindung stehen oder sogar von ihm hervorgerufen werden. Um die negativen Auswirkungen der städtischen Güterverkehrs zu minimieren, versuchen Behörden den städtischen Güterverkehr zu kontrollieren. Sie veranlassen Bestimmungen, die die Möglichkeiten, Waren innerhalb der Stadtgebiete zu bewegen, beeinflussen und steuern. Die meisten tödlichen oder schweren Straßenverkehrsunfälle unter Beteiligung besonders gefährdeter Verkehrsteilnehmer ereignen sich in der Stadt. Mit „besonders gefährdete Verkehrsteilnehmer“ sind Fußgänger oder Radfahrer gemeint, welche 50% der Verkehrstoten in der Stadt ausmachen. In der Europäischen Union sterben jedes Jahr insgesamt circa 11 000 Menschen im Stadtverkehr (Europäische Kommission 2013). Einrichtungen für Fußgänger, Radwege und Radstellplätze wetteifern um Platz auf den städtischen Straßen und die Städte müssen dieser konkurrierende Nachfrage je nach lokalen Prioritäten und Gegebenheiten gerecht werden. Transportlogistik ermöglicht auf der einen Seite wirtschaftliches Wachstum, auf der anderen Seite verursacht sie jedoch negative Auswirkungen auf die Umwelt. Als Beispiele lassen sich Umweltverschmutzungen, insbesondere der CO<sub>2</sub>-Ausstoß und Lärmbelästigung, nennen. Transportvorgänge sind für 23% des gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verantwortlich (Europäische Kommission 2013). Besonders aus Umweltaspekten ist die Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Relevanz, da die negativen Auswirkungen auf die Umwelt wiederum einen Einfluss auf die Infrastruktur haben. Denn die Abgase der Fahrzeuge gelten auch als Ursache für den Klimawandel. Das U.S.-Außenministerium postuliert, dass der Klimawandel eine Reihe von miteinander verbundenen Herausforderungen besonders für die dicht besiedelten Stadtregionen darstellt (U.S. Department of State 2014). Ein Beispiel ist die Zerstörung von Straßen durch enorme Kälte- oder Hitzewellen. Die Kosten dieser Zerstörungen wird auf 80 Millionen Euro jährlich geschätzt (Europäische Kommission 2013).

Durch zielgerichtete Vorschriften kann der Zugang von Fahrzeugen zu den Städten optimiert, die Luftqualität verbessert und ein Beitrag zu dem Ziel, mit konventionellen Kraftstoffen betriebene PKW bis 2050 aus den Städten zu verbannen, geleistet werden (Europäische Kommission 2013). Beispiele hierfür sind Zugangsregeln für bestimmte Zonen, z.B. bei alten Brücken oder sogenannte Umweltzonen. Nur durch den Besitz einer ent-

sprechenden Umweltplakette wird eine Zufahrtsgenehmigung für die Umweltzone erteilt (Lehmacher 2015). Eine zusätzliche Restriktion bezüglich dieser Zonen ist die Vorschrift, Lieferungen nur in bestimmten Zeiträumen durchzuführen. Dies findet beispielsweise in Fußgängerzonen Anwendung. Zeitliche Begrenzungen finden außerdem durch Zeitfenstern statt, z.B. die Erlaubnis oder das Verbot von nächtlichen Auslieferungen oder Beschränkungen der Be- und Entladezeit (Quak 2008). Andere Lösungen sind Park- oder Mautgebühren. Des Weiteren existieren Fahrzeugbegrenzungsmaßnahmen, die die verschiedenen Fahrzeugeigenschaften wie Achsendruck, Höhe, Länge und Breite betreffen (Quak 2008). Um das urbane Straßennetz zu schonen, werden öffentliche Verkehrsmittel zuverlässiger gestaltet und die Angebote weiter ausgebaut. Die europäische Umweltagentur spricht die Empfehlung aus, dass Mitgliedstaaten bis zum Jahr 2030 30% des Straßengüterverkehrs bei Streckenlängen von mehr als 300 Kilometer auf die Schiene oder Wasserwege verlagern sollten (European Environment Agency 2013). Eine weitere Herausforderung sind die begrenzten Verkehrsräume in Städten. Gerade im Innenstadtbereich lässt sich diese Problematik besonders deutlich anhand eines Beispiels erläutern: In den kleinen Gassen einer Altstadt versuchen Anwohner, Touristen, Logistikdienstleister, Verkäufer- und Einkäufer ihre jeweiligen Ziele zu erreichen. Auf diese Weise ballen sich hier die unterschiedlichsten Mobilitätsinteressen auf kleinstem Raum. Dies führt besonders zu einer Erhöhung der Parkanforderungen. Damit Stadtzentren so zugänglich wie möglich werden, wurden Entscheidungen über die Nutzung des städtischen Raums getroffen. Diese beinhalten die Einführung von speziellen Be- und Entladezonen, speziell ausgewiesene Parkplätze oder separate Busspuren. Die erläuterten negativen Auswirkungen des Stadtverkehrs und die damit verbundenen Herausforderungen sind eng miteinander verflochten. Beispielsweise verursacht die Zunahme des Verkehrs innerhalb des begrenzten Stadtraums Staus, welche wiederum eine erhöhte Abgasemission erzeugen (Ehmke 2012).

### 2.1.2 Transportlogistische Konzepte von Unternehmen

Um die Kundenzufriedenheit auf einem möglichst hohen Level zu halten, muss eine flächendeckende Versorgung von Gütern in Städten gewährleistet werden. Gleichzeitig zählen Effektivität der Prozesse und eine Maximierung der Produktivität zu den Bestrebungen der Unternehmen. Um diese Zielsetzungen zu erreichen, entstehen von Seiten der Unternehmen unterschiedliche Konzepte. Ein Beispiel sind Abholstationen oder Pickup and Drop-Off Automation Solutions (PUDOs). Kunden können sich ihre Bestellungen zu diesen Stationen liefern lassen, um sie dort abzuholen. Die Stationen offerieren einen jederzeitigen Zugriff, so dass die Zeit der Abholung selbst festgelegt werden kann und sich die Kunden nicht nach Öffnungszeiten richten müssen. Stationen neuerer Generation verfügen zusätzlich über fortschrittlichere Funktionen, wie gekühlte Fächer für verderbliche Waren oder die Kopplung mit Smartphones (Bubner et al. 2014). Ergänzend lassen sich einige Pilotprojekte von Unternehmen nennen. Der Onlineversandanbieter Amazon arbeitet zurzeit an einem zukünftigen Zustellkonzept durch den Einsatz von Dronen (Amazon 2016). Von den Mitbegründern des Unternehmens Skype wurden Roboter für die Zustellung von Waren

entwickelt (Curtis 2015), und Zustellboten des Unternehmens Toys“R“ starten Versuche für die Belieferung auf Rollschuhen in Paris (Davis 2015).

### 2.1.3 Gemeinschaftsprojekte

Beim Ausbau der Citylogistik werden Wirtschaft und Politik von der Wissenschaft unterstützt. So befasst sich beispielsweise die Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Supply Chain Services (SCS) mit der Analyse der Herausforderungen der Urbanisierung sowie der Entwicklung von Lösungskonzepten (Lehmacher 2015).

Ein innovativer Ansatz ist die Nutzung von bereits vorhandenen Infrastrukturen für die Citylogistik. Ein Beispiel hierfür ist „eBase4Mobility“. Das bis 2013 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Forschungsprojekt hat sich mit der 24-stündigen Nutzung eines Innenstadt-Parkhauses beschäftigt. Eine Mehrfachnutzung des vollautomatischen Parkhauses wird erreicht, indem tagsüber die Fahrzeuge ähnlich wie bei einem Hochregallager auf Tablaren in einem Parkregalsystem verstaut werden, nachts fungiert es als Umschlagsbasis mit Möglichkeiten zur Kommissionierung und Warenauslieferung. Um der Lärmbelastung entgegenzuwirken, empfehlen die Forscher hierfür die Nutzung von Elektrofahrzeugen (Schaumann 2013).

Kawamura (2015) geht davon aus, dass die Einbeziehung von Kanälen und Flüssen in europäischen Städten für Auslieferungskonzepte zunehmen wird. Außerdem existiert die Überlegung, auf öffentliche Transportmittel zurückzugreifen und diese für den Gütertransport zu verwenden. Mit Hilfe von S-Bahnen könnte der Schienenverkehr als zusätzliche Möglichkeit zur Warenverteilung zwischen den Stadtteilen von Großstädten dienen und Straßen- oder U-Bahnen könnten für die nächtliche Auslieferung von Waren innerhalb der Stadt genutzt werden. Der Schienenverkehr ist umweltfreundlich und schont die Straßennetze. Dem gegenüber lassen sich jedoch höheren Kosten und eine geringe Flexibilität als beim Straßengüterverkehr nennen. In Amsterdam wurde ein Projekt für Fracht-Straßenbahnen des Unternehmens City Cargo Nederland sogar bis 2008 umgesetzt. Das Projekt musste aus wirtschaftlichen Gründen jedoch eingestellt werden, da beispielsweise der Bau von zusätzlichen Schienen für die Straßenbahn von der Regierung nicht mitfinanziert wurde (Visser 2015).

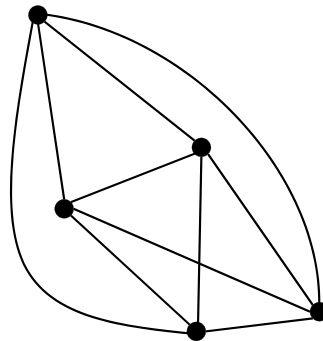
Eine innovative Praxis ist die der kollaborativen Zusammenarbeit von Unternehmen. Diese Zusammenarbeit kann vielschichtig ausfallen und wird in Abschnitt 2.3 im Detail erläutert. Hierfür bedarf es allerdings zunächst eine Einführung in den Themenbereich der Tourenplanung.

## 2.2 Tourenplanung

Das Problem der Tourenplanung findet sich in diversen Anwendungsgebieten wieder. Eine große Rolle spielt es bei Unternehmen, die ihre Kunden beliefern, beispielsweise Paketdienstleister oder Zeitungsverlage. Aber auch innerhalb von Unternehmen findet die

Tourenplanung im Logistikbereich Anwendung, beispielsweise in der Materialflussplanung zwischen Zentral- und Distributionslagern oder Warenverteilzentren. Die Tourenplanung kann als ein Teilbereich der Distributionslogistik angesehen werden, die nach Kotler und Bliemel (2001) als „Prognose, Durchführung und Kontrolle der physischen Bewegungen von Materialien und Endprodukten vom Ursprungsort zum Verwendungsort, um den Bedarf der Kunden gewinnbringend befriedigen zu können“ definiert werden kann. Die Tourenplanung spielt somit auf den unterschiedlichen Stufen einer Supply Chain eine wichtige Rolle.

In der deutschsprachigen Logistikk-literatur wird der Begriff „Supply Chain“ mit Logistikkette oder Wertschöpfungskette übersetzt (Fleischmann 2008). Die Skizze 2.1 einer SC verdeutlicht jedoch, dass eine SC treffender durch die Modellierung eines Netzwerks abgebildet werden kann (Mattfeld und Vahrenkamp 2014).



**Abbildung 2.1: Beispielhaftes Netzwerk einer Supply Chain**

Das Supply Chain Management (SCM) ist nach Günther et al. (2005) ein Prozess zur Verwaltung der Transaktionen und Aufträge zwischen den verschiedenen Stufen der SC. Mattfeld und Vahrenkamp (2014) postulieren, dass die Kanten und Knoten des Netzwerks unterschiedliche Bedeutungen haben können, je nachdem, welche Relationen abgebildet werden. In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Sichtweise einer physischen Relation, bei der die Netzwerkknoten Orte darstellen und die Kanten Verkehrswege zwischen diesen Orten sind. Wird im folgenden Verlauf dieser Arbeit der Netzwerkknoten als „Kunde“ bezeichnet, so ist damit der Wohnsitz oder die Niederlassung des Kunden gemeint.

Das Tourenproblem lässt sich in eine grundlegende Klassifikation unterteilen, welche sich nach der räumlichen Verteilung der Kunden richtet. Bei einem knotenorientierten Tourenproblem sind die einzelnen Knoten des Tourennetzes räumlich eindeutig voneinander getrennt. Ein Beispiel hierfür ist die Existenz von Hubs. Das kantenorientierte Tourenproblem wird auch als Briefträgerproblem bezeichnet. Dieses Problem tritt auf, wenn eine große Anzahl von Kunden existiert, sodass die Waren praktisch flächendeckend verteilt werden, wie bei Briefzustellungen an Haushalte. Ein anderes Beispiel ist die Tourenplanung für Winterräumdienste (Irnich et al. 2014), da in diesem Fall keine einzelnen Knoten sondern Teilgebiete eines Netzwerks betrachtet werden.

Bei der Tourenplanung ist eine Menge von Kunden bekannt, die von einem Depot aus von Fahrzeugen beliefert werden sollen. Hierfür soll ein Tourenplan erstellt werden, der die Fahrzeuge definierten Touren zuteilt. Eine Tour besteht üblicherweise aus mehreren

Aufträgen und einem Fahrzeug, welches das Depot als Start- und Endpunkt hat. Die Tourenplanung erfolgt unter Berücksichtigung von Restriktionen, wie beispielsweise Belieferungszeitfenstern oder Servicezeiten. Erfolgt die Planung mit bekannten fixen Daten, so handelt es sich um eine statische Tourenplanung. Bei der dynamischen Tourenplanung werden während der Planung und Ausführung einer Tour ankommende Neuaufträge bestmöglich mit berücksichtigt. Die Entscheidungen, die innerhalb der Tourenplanung getroffen werden, lassen sich in Planungskategorien unterteilen (vgl. Tabelle 2.1):

**Tabelle 2.1: Planungskategorien nach Wenger (2010)**

| zeitlicher Bezug | Planungskategorie   |
|------------------|---|
| strategisch      | Standortplanung sowie Abgrenzungsplanung von Liefergebietsgrenzen |
| taktisch         | Rahmentourenplanung in zeitlicher und kapazitiver Hinsicht        |
| operativ         | eigentliche kurzfristige Tourenplanung sowie deren Anpassungen    |

Die Planung betrifft beispielsweise die Aufteilung der Ressourcen, d.h. die Tourenplanung erfolgt unter Berücksichtigung von den eingegangenen Kundenaufträgen, der Fahrzeugkapazität oder des angestrebten Servicelevels. Strategische Entschlüsse betreffen die Optimierung oder Planung der geographischen Lage der Depots. Die Ressourcenplanung wird auf der taktischen Ebene umgesetzt. Hier erfolgen die Bestimmung des Lieferzyklus, der Anzahl der Fahrzeuge und Fahrer inklusive deren Einsatzzeiten sowie die Einteilung der Belieferungsgebiete. Zu den operativen Zielen lassen sich die Minimierung von Einsatzzeiten und Verspätungen und die Berechnungen der Tourenlänge zuordnen. Hierzu ist allerdings anzumerken, dass der Übergang von der taktischen zur operativen Ebene fließend ist, sodass beispielsweise die Planung der Anzahl an Touren auf beiden Ebenen stattfinden kann (vgl. Wenger 2010).

Die Verwendung des Begriffs der Tourenplanung in der letzten Spalte der Tabelle 2.1 ist nicht zielführend. Auf der operativen Ebene ist wahrscheinlich die Routenplanung gemeint. Zur Entflechtung der Bezeichnungen wird im Folgenden ein Überblick über wichtigsten Begrifflichkeiten im Kontext der Tourenplanung gegeben.

**Definition 2.1. Tour:** Angabe der Menge aller Kunden, Kanten bzw. Pfeile, die auf ein und denselben, in einem Depot beginnenden und in einem Depot endenden Fahrt „bedient“ werden (Domschke und Drexl 2010, S.198). Ein Beispiel ist die Mengenangabe {Kunde A, Kunde B, Kunde C}.

**Definition 2.2. Depot:** Der Ort, an dem Auslieferungs-, Sammel-, Ver- oder Entsorgungsfahrten beginnen und enden (Domschke und Drexl 2010, S.198).

Der Begriff Depot stammt aus dem Französischen (dépôt) und wird fälschlicherweise überwiegend mit dem deutschen Wort „Lager“ übersetzt. Die Verwendung der Begriffe als Syn-

onyme ist allerdings nicht korrekt, wie die folgende Definition 2.3 des Begriffs „Lager“ verdeutlicht.

**Definition 2.3. Lager:** Räume oder Flächen zum Aufbewahren von Materialien und Gütern zwecks Bevorratung, Pufferns und Verteilens sowie zum Schutz vor äußeren, ungewollten Einflüssen (z.B. Witterung) und Eingriffen (z.B. unberechtigte Entnahme). Je nach Lagertyp dient ein Lager vorrangig zur Überbrückung einer Zeitdauer, zum Ausgleich von Ein- und Ausgangsströmen oder zur Strukturveränderung zwischen Zu- und Abgang (ten Hompel und Heidenblut 2011, S.166).

Aus diesen Definitionen lässt sich schließen, dass ein Lager nur dann als Depot bezeichnet werden kann, wenn von dort aus Touren starten und enden. Auf der anderen Seite ist ein Depot nicht zwangsläufig immer ein Lager, beispielsweise wenn es nur für kurzfristige Konsolidierungsmaßnahmen und nicht der Aufbewahrung von Waren dient. Im Fall von Auslieferungslagern oder Fahrzeugdepots sind allerdings beide Bezeichnungen (Depot und Lager) zulässig (vgl. Domschke und Drexl 2010). In der vorliegenden Arbeit stellt ein Depot ein Warenlager oder ein Fahrzeugdepot dar.

In der Literatur ist die Tourenplanung eng mit dem Begriff „Hub“ verbunden. Unter einem Hub wird ein Umschlagplatz an Hauptverkehrswegen zur Warenübergabe an regionale Verteiler verstanden (ten Hompel und Heidenblut 2011).

Nicht zu verwechseln mit der Tourenplanung ist die Routenplanung. Nach Domschke und Drexl (2010) und Suhl und Mellouli (2013) wird die Reihenfolge, in der die Kunden einer Tour zu bedienen sind, als Route bezeichnet. Die folgende Abbildung 2.2 macht diesen Sachverhalt deutlich.

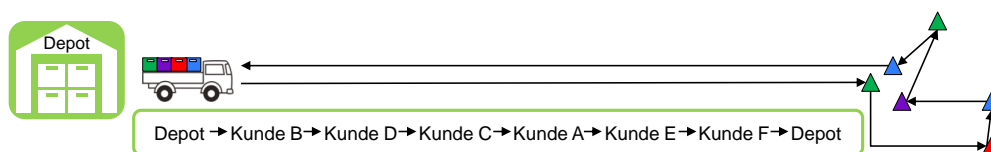


Abbildung 2.2: Beispiel für eine Route

Im operativen Bereich wird die Bildung von Routen oft unter der Zuhilfenahme von Navigationssoftware umgesetzt. Somit kann die Ermittlung der bestmöglichen Fahrstrecke in Bezug auf minimale Entfernungen, minimale Kosten oder eine minimale Fahrzeit umgesetzt werden. Teilweise werden hierfür sogar aktuelle Verkehrseinschränkungen, wie gesperrte Straßen, Staus oder Baustellen, mit einkalkuliert. Jedoch kann die Nutzung von Ausweichrouten Auswirkungen auf die Servicequalität und Kosten der Lieferung haben (Ehmke 2012).

Trotz ihrer Bedeutung sowohl in Bezug auf Kosten und Service, werden Transportprozesse bei der Optimierung von Supply Chains oft vernachlässigt (Quinn 2000). Potter (2005) eruiert, dass der Fokus zwar auch auf einer Minimierung der Transportkosten liege, jedoch immer nur innerhalb der Einschränkungen, die die Supply Chain auferlege. Eine Möglich-



keit zur Kostensenkung sind Kollaborationen. In Hinblick auf die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit konstatieren Gonzalez-Feliu et al. (2013), dass Kollaboration in der Distributionslogistik nicht explizit in der Literatur definiert ist. Da es sich um einen neuen Untersuchungsgegenstand handelt, existieren weder Typologie noch Charakterisierung. Im folgenden Abschnitt 2.3 wird dennoch versucht, Kollaborationen in der Transportlogistik zu analysieren.

## 2.3 Kollaborationen im Supply Chain Management

Kollaboration ist eines der vielversprechendsten Forschungsfelder im Supply Chain Management und relativ neue Konzept in der Forschung (Gonzalez-Feliu 2011). Ansätze der kollaborativen Tourenplanung beschäftigen sich mit der Fragestellung, wie durch die Kooperation mehrerer Partner und einer gemeinsamen Ressourcennutzung weitere Potenziale genutzt werden können. Das Potential von Kollaboration liegt in der Teilung von Kosten, Risiken und Verantwortung durch potentielle Rationalisierungen. Durch die Zusammenlegung von redundanten Aktivitäten können weitere Nutzensvorteile erzielt werden. Des Weiteren kann eine Effizienzsteigerung der Auslieferungsprozesse durch die Hilfestellung der Kollaborationsteilnehmer bei vorherrschenden Engpässen erzielt werden. Kollaborationen stellen außerdem ein Lösungskonzept für die zukünftigen Herausforderungen der wachsenden Städte dar (vgl. Abschnitt 2.1). Die steigende Bevölkerungsdichte in Städten führt zu einem Engpass der Infrastruktur. Zusätzlich rücken Nachhaltigkeits- und Umweltaspekte in den Fokus, beispielsweise durch Umweltzonen oder Gewichtseinsparungen. In den letzten Jahren scheinen Kollaborationen bei der Transportlogistik eine gute Alternative zum klassischen UCC (vgl. Abschnitt 2.3.2) zu sein, aber im Moment sind diese noch in der Entwicklungsphase (Gonzalez-Feliu 2011). Auch Kimms und Kozeletskyi (2015) attestieren, dass Literatur zum Thema horizontale Kollaborationen in der Tourenplanung kaum vorhanden ist.

### 2.3.1 Begriffsbestimmung

In der Literatur werden die Begriffe „Kooperation“ und „Kollaboration“ häufig synonym verwendet. Dies liegt darin begründet, dass der englische Begriff „collaboration“ allgemein mit der Bezeichnung „Zusammenarbeit“ übersetzt wird. In dieser Arbeit wird jedoch eine Differenzierung vorgenommen. Um eine Abgrenzung der Begriffe herzustellen, werden im Folgenden beispielhafte Definitionen aufgeführt.

Nach Polenske (2004) bestehen kooperierende Beziehungen, wenn zwei oder mehr Akteure durch formelle oder informelle Vereinbarungen Informationen teilen. Krapfel et al. (1991) postulieren, dass sich ein kooperativer Modus auf höchster Ebene durch eine sehr offene, vertrauensvolle Kommunikation und eine hohe Dichte an Informationsaustausch auszeichne. Dieser Fall trete nur dann ein, wenn die Bedrohung des opportunistischen Verhaltens eines Kooperationspartners sehr niedrig ist, z.B. in einem ausgewogenen Machtverhältnis. Wenn die Beziehungen bereits langfristig bestehen und Vertrauen aufgebaut wurde, kön-

nen Interessengemeinschaften über Unternehmensgrenzen hinweg existieren. Staudt (1992) bezeichnet Kooperation als eine Funktionsorientierung oder –ausgliederung zwischen Unternehmen, um Innovationsengpässe zu überwinden, wobei weder die rechtliche noch die wirtschaftliche Selbstständigkeit verloren gehen. Nach Müller und Goldberger (1986) besteht eine Kooperation, „wenn zwei oder mehr Partner in einzelnen Unternehmensfunktionen (Entwicklung, Beschaffung, Produktion, Vertrieb, etc.) auf der Grundlage kollegialer Entscheidungen zusammenarbeiten, ohne dabei aber ihre wirtschaftliche Selbstständigkeit im Verhältnis zueinander aufzugeben“.

Die angeführten Definitionen des Kooperationsbegriffs zeigen deutlich, dass der Aspekt des Informationsaustauschs bei gleichzeitiger Erhaltung der Selbstständigkeit und der rechtliche Verantwortung die Literatur dominiert. Ein Beispiel für Kooperationen in der Logistik ist die Einigung auf einheitliche Verpackungsgrößen bzw. Ladungsträger im Rahmen der Efficient Consumer-Response (ECR), einer Initiative zur Zusammenarbeit zwischen Herstellern und Händlern. Eine Literaturübersicht zur Thematik von Kooperationen in Transport und Logistik wurde von Cruijssen et al. (2007) zusammengestellt.

Wenn zwei oder mehr Akteure direkt am Prozess der Entwicklung, Herstellung oder Vermarktung eines Produkts bzw. Prozesses beteiligt sind, besteht nach Polenske (2004) eine Kollaborationsbeziehung. Die getroffenen Vereinbarungen veranlassen Unternehmen dazu, in Teams zu arbeiten oder Partnerschaften zu bilden. Der Aufbau solcher Beziehungen dauert in der Regel weit länger als bei Kooperationen. In der folgenden Definition 2.4 wird der Aspekt der gemeinsamen Verantwortung explizit aufgeführt.

**Definition 2.4. Kollaboration:** „Collaboration is a process to reach goals that cannot be achieved acting singly (or, at a minimum, cannot be reached as efficiently). [...] Collaboration includes all of the following elements: jointly developing and agreeing to a set of common goals and directions; sharing responsibility for obtaining those goals; and working together to achieve those goals, using the expertise of each collaborator“ (Bruner 1991, S.6).

In weiteren Ausführungen seiner Definition nennt Bruner (1991) auch negative Aspekte von Kollaborationen. Weil diese Art der Zusammenarbeit gemeinschaftliche Verantwortung beinhaltet, darf die Konsensbildung nicht hierarchisch erfolgen. Das Durchschauen der jeweiligen Rollen und Verantwortlichkeiten der Mitarbeiter sowie die eigene Position zu determinieren ist zeitaufwendig. Neben den eigentlichen Aufgaben müssen die Mitarbeiter zusätzlich die Routine für Zielsetzungen und Entscheidungsbeteiligungen in Gruppen erwerben. Kollaborationen in der Distributionslogistik können wie folgt beschrieben werden: „Collaborative logistics is achieved when two or more carriers or shippers form partnerships to optimize their transportation operations by sharing vehicle capacities and delivery tasks in order to cut empty back hauls and to increase vehicle utilization rate“ (Dai und Chen 2009).

Aus den aufgeführten Begriffserklärungen lässt sich konkludieren, dass die beiden Begriffe Kollaboration und Kooperation das Merkmal des „Teilens“ zum Gegenstand haben.

Lindawati et al. (2014) beschäftigten sich mit den Beweggründen für eine Kollaborationsteilnahme und deren Hindernisse aus Sicht der potentiellen Kollaborationsteilnehmer. Als entscheidendes Kriterium wird der wahrgenommene Nutzen einer Kollaboration genannt. Denn es bestehen Zweifel daran, dass die Kosten und Gewinne gerecht unter den beteiligten Partnern aufgeteilt werden können. Kollaborationsteilnehmer befürchten außerdem den Verlust von Wettbewerbsvorteilen durch den Austausch an Informationen oder sogar das Risiko einer Weitergabe von Firmengeheimnissen.

### 2.3.2 Ausprägungen von Kollaborationen

Je nach Betrachtungsschwerpunkt lassen sich verschiedene Ausprägungen von Kollaborationen abgrenzen. In den folgenden Ausführungen wird zwischen horizontaler und vertikaler Kollaboration, gemeinsamer Ressourcennutzung und urbaner Konsolidierung unterschieden. Zusätzlich werden Beispiele für Kollaborationen genannt.

**Arten** Kollaborationen existieren auf unterschiedlichen Ebenen und betrachteten Zeiträumen (Gonzalez-Feliu und Morana 2011). Nach Gonzalez-Feliu et al. (2013) können im Allgemeinen zwei Arten von Kollaboration unterschieden werden: Vertikale und horizontale Kollaboration.

Unter horizontaler Kollaboration wird eine Zusammenarbeit zwischen Konkurrenten der gleichen Produktions- bzw. Wertschöpfungsstufe bezeichnet, „die vergleichbare oder substituierbare Waren offerieren“ (Völker und Neu 2008). Dies ist meist dann der Fall, wenn die Kollaborationsteilnehmer in der gleichen Branche tätig sind.

Bei vertikalen Kollaborationen arbeiten Unternehmen unterschiedlicher Wertschöpfungsstufen und oft auch unterschiedlicher Branchen zusammen (Wertz 2000). Die Leistungsbereiche lassen sich dabei oftmals nicht genau abgrenzen. Wettbewerbsrechtliche Gesichtspunkte sind im Allgemeinen bei der vertikalen Kollaboration nicht zu beachten, da die Unternehmen nicht miteinander im Wettbewerb stehen (Völker und Neu 2008).

In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Kollaborationen zwischen Logistikunternehmen in der Endstufe der Supply Chain, also in der gleichen Stufe, untersucht. Wird die Erläuterung zur horizontalen Kollaboration betrachtet, lässt sich schlussfolgern, dass diese Bezeichnung genau diesen Betrachtungsgegenstand abdeckt. Somit ist aus dem Themenfeld der Kollaboration lediglich der Themenbereich der horizontalen Kollaboration für eine tiefer gehende Betrachtung von Interesse.

**Gemeinsame Ressourcennutzung** Gonzalez-Feliu und Morana (2011) beobachteten einzelne Projekte in der Entwicklungsphase, welche sich mit einer gemeinsamen Ressourcennutzung befassen. In der Logistik sind die wichtigsten gemeinsamen Ressourcen Informationen, Infrastruktur, Fahrzeuge und Personal (Gonzalez-Feliu und Morana 2011). Das Teilen von Informationen gilt als zentraler Bestandteil. Ohne einen Informationsaustausch können die anderen Ausprägungen der gemeinsamen Ressourcennutzung nicht umgesetzt werden (Gonzalez-Feliu und Morana 2011). Im Kontext der Logistik wird Infrastruktur

definiert als der Unterbau der Prozesse, der einerseits diese überhaupt ermöglicht, andererseits aber auch Rahmenbedingungen für deren Planung und Vollzug setzt. Schieck (2008) unterscheidet zwischen personeller und physischer Infrastruktur. Diese Unterscheidung ist vergleichbar mit den Ressourcen „Infrastruktur“ und „Personal“ von Gonzalez-Feliu und Morana (2011). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Unterscheidung von Schieck (2008) übernommen, da das Personal die Definition der Infrastruktur erfüllt und ihr somit zugewiesen werden kann. Zur personellen Infrastruktur lassen sich die Akteure zuordnen, die zur Abwicklung der jeweiligen Prozesse erforderlich sind. Zur physischen Infrastruktur gehören materielle Produktionsfaktoren wie Betriebsmittel, Gebäude und bauliche Anlagen. Unter der gemeinschaftliche Nutzung von einem oder mehreren Fahrzeugen im Unternehmensumfeld versteht man das „Corporate Carsharing“. Diese Fahrzeuge werden als „Poolfahrzeuge“ bezeichnet. Ein Poolfahrzeug ist ein Fahrzeug, welches nicht der alleinigen Nutzung eines Mitarbeiters vorbehalten ist. Vielmehr gehört es zu einem Fahrzeugpool des Arbeitgebers und ist dazu gedacht, von mehreren Personen gefahren zu werden (Schönfeld und Plenker 2015). Für die Verwendung von Poolfahrzeugen existieren unterschiedliche Möglichkeiten, beispielsweise in Bezug auf Privatnutzungsrechte. Auf diese Regelungen wird nicht weiter eingegangen, da sie größtenteils steuerrechtlich relevant sind, können aber in Schönfeld und Plenker (2015) nachgelesen werden. Ein wichtiger Aspekt für diese Arbeit ist jedoch, dass in Deutschland die Nutzung von Poolfahrzeugen erst ab einer 80%-igen Auslastung aufgrund von Versteuervorschriften rentabel ist (Firmenauto.de 2011).

**Urbane Konsolidierungszentren** Ein bekanntes Vorhaben für nachhaltige Citylogistik bis zur letzten Meile ist die Bündelung von Gütern in sogenannten urbanen Konsolidierungszentren (Urban Consolidation Centre, UCC). In der folgenden Abbildung 2.3 ist das Prinzip eines UCCs dargestellt.

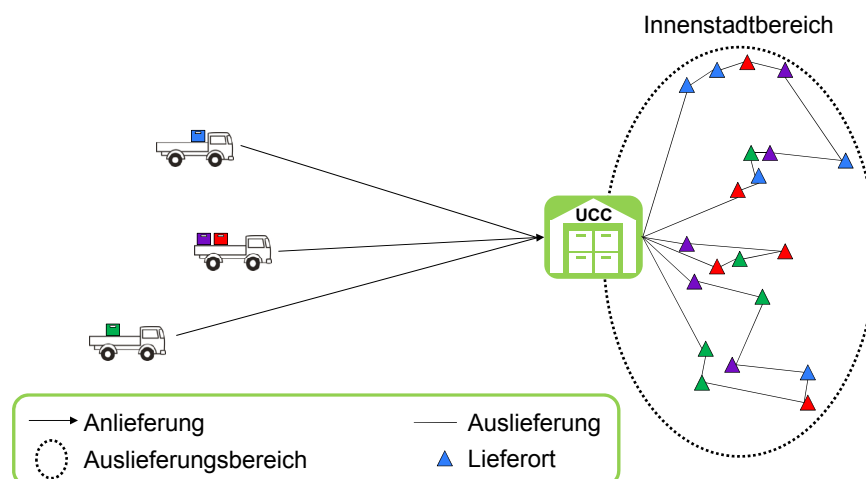


Abbildung 2.3: Konzept eines UCCs nach Quak (2008)

Ein UCC hat seinen Standort jenseits der Stadt und stellt eine Einrichtung für die Konsolidierung der Güterströme dar. Dabei werden alle Lieferungen für einen Kunden, beispielsweise Sendungen an ein Krankenhaus, eine Behörde, ein Hotel oder ein Flughafen,

innerhalb des UCCs zusammengefasst. Dieses Bündel aus Sendungen wird in einer Zustellfahrt ausgeliefert, so dass die Anzahl der Zustellungen zu den einzelnen Kunden reduziert wird (Lehmacher 2015). In der Fachdisziplin der Logistik ist die folgende Definition 2.5 anerkannt.

**Definition 2.5. Urban Consolidation Centre:** A logistics facility that is situated relatively close to the area that it serves (be that a city centre, an entire town or a specific site) from which consolidated deliveries are carried out within that area (Allen et al. 2007, S.18).

Das UCC dient als zentrale Planungsinstitution und bildet eine Verbindung von Politik und Wirtschaft, da es ein von beiden Seiten angestrebtes Konzept darstellt. Politiker sehen in dem Konzept eine Möglichkeit, um die Anzahl an Fahrzeugen zu senken um das Straßennetz und die Umwelt zu schonen. Laut Stathopoulos et al. (2012) ist die Angst vor einem Kontrollverlust jedoch sehr präsent. Außerdem sind aus rechtlicher Sicht Regelungen zur Haftung noch nicht abgeschlossen.

### 2.3.3 Beispiele von Kollaborationen

Das Konzept eines UCCs wurde bereits in Deutschland, Stockholm, Dubai, Kuala Lumpur, Istanbul und am Flughafen London Heathrow umgesetzt. (Bubner et al. 2014). Ergänzend führt Lehmacher (2015) die niederländische Stadt Nimwegen mit einem ähnlichen Konzept an, in der seit 2008 die Geschäfte in der Innenstadt von einem Zentrallager aus beliefert werden.

RegLog<sup>®</sup> stellte ein Projekt der Citylogistik dar, welches durch die Bündelung von Belieferungstouren in die Regensburger Altstadt den Straßengüterverkehr deutlich reduzierte. Nach 14 Jahren Laufzeit wurde das Projekt aus wirtschaftlichen Gründen jedoch eingestellt, da es nur durch Subventionen durchgeführt werden konnte. Ein weiterer Faktor, der zur Projektbeendigung führt, war der „generelle Fachkräftemangel in der Speditionsbranche. Dieser führte sowohl beim Frachtführer als auch bei den Kooperationspartnern zu personellen Engpässen (Interessensgemeinschaft RegLog 2012).

Fleischmann (1999) beschäftigte sich mit verschiedenen Bündelungsstrategien des Lieferverkehrs in der Augsburger Innenstadt. Es zeigte sich, dass sich zwei Drittel der Fahrten vermeiden lassen. Eine Umsetzung der Überlegungen erfolgte jedoch nicht, da es bei den Einzelhändlern keine Nachfrage gebe (Krog 2010).

Eine Kollaboration zwischen Unternehmen unterschiedlicher Supply Chains findet momentan als ein Pilotprojekt in München statt. Dort liefert Amazon in den Kofferraum von Audi-Fahrzeugen von ausgewählter Kunden. Hierfür versorgt Audi die Paketboten mit der nötigen Technik und der zugehörigen Zugriffsberechtigung, um über eine App den Wagen öffnen zu können (Hecking 2015).

## 2.4 Vehicle Routing Probleme

Das Vehicle Routing Problem (VRP) wird in der Literatur als Standardproblem der Tourenplanung bezeichnet (Berger 2009; Domschke und Drexl 2010) und wurde 1959 erstmalig von Dantzig und Ramser erwähnt. Das Problem beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie Fahrzeuge, Routen und Aufträge unter einer Zieldefinition aufgeteilt werden können. Das Ziel könnte beispielsweise geringe Kosten, geringe Wartezeiten oder ein hoher Kundenerfüllungsgrad sein (Dantzig und Ramser 1959). Vehicle Routing Probleme sind eines der meisten untersuchten und bekanntesten Probleme der kombinatorischen Optimierung und finden besonders in der Distributionslogistik ihre Anwendung. Im folgenden Abschnitt erfolgt eine Übersichtserstellung der verschiedenen Arten des VRPs um zu überprüfen, ob ein spezialisiertes VRP für eine kollaborative Tourenplanung bereits entwickelt wurde. In Abschnitt 2.4.2 werden Ansätze aus der Optimierung zur Lösung des VRP vorgestellt. Wie Simulation und Optimierung in der vorliegenden Arbeit zusammenhängen, wird in Kapitel 3 erläutert.

### 2.4.1 Überblick über Arten des Vehicle Routing Problems

Tausenden von Unternehmen und Organisationen sind jeden Tag mit dem VRP konfrontiert, sobald die Anlieferung und Abholung von Waren oder Personen betroffen sind (Cordeau et al. 2007). Die einschlägige Literatur ist sehr umfassend und vielfältig, sowohl in Bezug auf die Arten der VRPs, als auch im Hinblick auf die Lösungsansätze (Cherif-Khettaf et al. 2015; Gendreau 2003; Laporte et al. 2014). Braekers et al. (2016) identifizierten 277 Artikel zwischen 2009 und 2015, welche den Begriff „Vehicle Routing Problem“ im Titel enthalten (Braekers et al. 2016). Aufgrund der Vielzahl an Büchern und Veröffentlichungen wird zur allgemeinen Problematik des VRPs lediglich ein kurzer Überblick gegeben. Des Weiteren werden lediglich Arten des VRPs aufgegriffen, welche im Kontext der Fragestellung dieser Arbeit von Bedeutung sind.

Eine Unterkategorie des VRPs ist das Traveling Salesman Problem (TSP). Das TSP beschäftigt sich mit einem bildhaften Handelsreisenden, der eine Anzahl von Städten zu besuchen hat und anschließend zum Ausgangspunkt zurückkehrt (Ohr 2008). In der Literatur wird zwischen symmetrischen und asymmetrischen TSPs entschieden. Wird der Netzwerkbegriff aus Abschnitt 2.2 mit der dazugehörigen Abbildung 2.1 aufgegriffen, so bilden die zu bereisenden Städte die Knoten des Netzwerks und die Verbindungen der Städte werden als Kanten dargestellt. Bei einem symmetrischen TSP wird bei einer Menge von  $n$  Knoten und Strecken für jedes Paar von Knoten eine Rundreise gesucht, welche mit minimaler Gesamtlänge jeden Knoten genau einmal besucht. Hierbei ist der Abstand von dem Knoten  $i$  zu  $j$  und der Abstand vom Knoten  $j$  zum Knoten  $i$  identisch. Bei einem asymmetrischen Fall kann der Abstand von dem Knoten  $i$  zu Knoten  $j$  und der Abstand vom Knoten  $j$  zum Knoten  $i$  unterschiedlich sein.

Beim klassischen Vehicle Routing Problem steht eine Fahrzeugflotte zur Belieferung einer Menge von Kunden mit bekannten Nachfragemengen zur Verfügung. Dabei wird ein Kunde

von exakt einem Fahrzeug beliefert (Archetti und Speranza 2008). Dieses Standardproblem der Tourenplanung (vgl. Abschnitt 2.2) ist ein knotenorientiertes, nur eine Periode und ein Gut betrachtendes Eindepot-Tourenproblem. Neben dem Hauptziel dieser Problemlösung liegen meist diverse Nebenbedingungen vor. In der Praxis wird dieses Standardproblem durch die Kombination von unterschiedlichen Restriktionen und Unterscheidungsformen erweitert, welche die grundsätzliche Art des VRPs festlegen.

Häufig bestehen Beschränkungen bezüglich der Gesamtstrecken, Zeitfenster von Warenlagern oder Fahrzeugkapazitäten. Des Weiteren können Klassifikationen nach der Organisation der Belieferungen (Pickup and Delivery) oder der Unternehmensressourcen vorgenommen werden. Letztere können beispielsweise nach der Anzahl der Depots (Mehrdepotproblem vs. Eindepotproblem) oder der Art der Fahrzeugflotte unterschieden werden. Zusätzlich existieren eine Vielzahl von spezialisierten Sonderformen. Eine grobe Einordnung der Vehicle Routing Probleme wird in der folgenden Abbildung 2.4 vorgenommen.

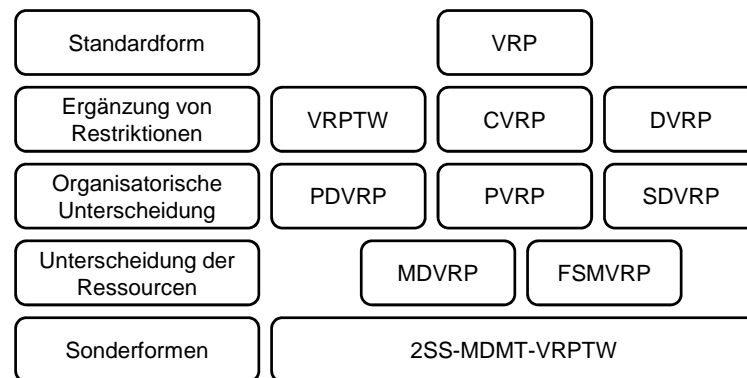


Abbildung 2.4: Beispielhafte Vehicle Routing Probleme

**VRP with Time Window Constraints (VRPTW):** Für jede Kundenbelieferung existiert ein bestimmtes Zeitfenster, innerhalb dessen die Auslieferung an den Kunden erfolgen muss (Irnich et al. 2014).

**Capacity-Constrained VRP (CVRP):** Für jedes Fahrzeug wird eine Kapazität angenommen, sodass eine Tour nur so gebildet werden kann, dass die Warenmengen nicht überschritten werden (Kindermann 2012).

**Distance-Constrained VRP (DVRP):** Beim distanzbeschränkten VRP werden die Entladezeiten beim Kunden berücksichtigt. Die Zeitdauer einer Gesamttour darf eine fest definierte Obergrenze nicht überschreiten (Kek et al. 2008).

**Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery (PDVRP):** Pickup and Delivery wird als simultanes Einsammeln und Ausliefern verstanden. Die Fahrzeuge fahren von Punkt zu Punkt (Irnich et al. 2014). In ein und derselben Tour werden Kunden beliefert und gleichzeitig Güter beim Kunden eingesammelt. Darüber hinaus existiert die Erweiterung VRP with Simultaneous Pickup and Delivery (VRPSPD), bei dem zwei Transportaufträge pro Kundenauftrag vorliegen. Diese unterteilen sich in eine Lieferung vom Depot zum Kunden und eine Abholung vom Kunden für das Depot. Beide Transportaufträge werden

simultan von einem Fahrzeug und durch einen Besuch beim Kunden durchgeführt (Irnich et al. 2014).

**Periodic Vehicle Routing Problem (PVRP):** Bestimmte Planungssituationen verlangen eine Tourenplanung innerhalb einer zu betrachtenden Periode, wie z.B. eine wöchentliche Planung. Das Planen dieser Touren für einen vorgegebenen Planungshorizont unter Einhaltung von Restriktionen wird als periodisches Tourenplanungsproblem bezeichnet. Als Beispiele lassen sich die Belieferung von Öl oder Benzin, die Müllabholung oder die Einsammlung von Rohmilch aufführen (Scheuerer 2004).

**Split Delivery Vehicle Routing Problem (SDVRP):** Die Besonderheit dieser Problemstellung ist, dass ein Kunde mehrmals von verschiedenen Fahrzeugen angesteuert werden kann. Somit liegt keine Kapazitätsrestriktion vor, da die Nachfrage eines Kunden die Kapazität des Fahrzeugs übersteigen darf (Archetti und Speranza 2008).

**Multi Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP):** Die Berücksichtigung von mehreren Depots führt zu einem Mehrdepotprobleme. Häufig stehen einem Unternehmen mehrere Depots zur Verfügung, von denen aus die Kunden beliefert werden (Pooley 1994; Salhi und Sari 1997). Ist es erlaubt, dass die Fahrzeuge in der betrachteten Planungsperiode mehrere Depots ansteuern dürfen, so besteht das zu lösende Tourenplanungsproblem darin, eine Zuordnung von Kunden zu Depots und die Bestimmung von Touren und Routen für alle Depots vorzunehmen.

**Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem (FSMVRP) und Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Vehicles (VRPHE):** Oft ist eine Differenzierung der verschiedenen Fahrzeugtypen vorhanden. Dieser Umstand findet beim Tourenplanungsproblem mit heterogenen Fahrzeugen Beachtung. Beim VRPHE ist die Anzahl an verfügbaren Fahrzeugen je Typ begrenzt. Das Ziel besteht darin, eine optimale Ausnutzung der vorhandenen Fahrzeugflotte zu gewährleisten. Dahingegen ist die Zielsetzung beim FSMVRP eine Menge gegebener Fahrzeugtypen optimal für eine Fahrzeugflotte einzuteilen (Scheuerer 2004).

Außerdem existieren eine Vielzahl an spezialisierten VRPs. Das gleichzeitige Lösen des Vehicle Routing Problems für die private, eigene Flotte und das Problem des optimalen Einsatzes von Subunternehmern ist bekannt als integrierte, operative Transportdisposition Integrated Operational Transportation Planning (IOTP) (Ziebuhr und Kopfer 2014). Bei einem steistufigen VRP (Two-Echelon Vehicle Routing Problem, 2E-VRP) erfolgt die Zustellung der Güter von einem Depot an die Kunden über ein zwischengeschaltetes Depot namens Satellit, welches der Konsolidierung der Güter dient (Crainic et al. 2010). Wenn ein Fahrzeug mehr als zwei oder drei Satelliten während einer einzigen Tour anfährt, oder wenn der Fuhrpark in seiner Größe limitiert ist, wird dies als ein „scheduling multidepot multiple-tour VRPTW“, also ein planmäßiges, Mehrdepot, Mehrfachtouren VRP mit Zeitfenster, bezeichnet. Dieses Problem ist nicht unabhängig. Denn wenn das Fahrzeug die Depots und Kunden in einem vorgegebenen Zeitfenster erreichen soll, so muss eine Synchronisierung der Aktivitäten der Depots erfolgen. Deshalb erfolgt meist eine Ergänzung des Adjektivs „synchronized“ (Chen und Raghavan 2008).



Wie aufgezeigt, lassen sich die verschiedenen Arten des VRPs miteinander kombinieren. Beispielsweise ist die Erweiterung um die Restriktionen von Zeitfenstern oder Kapazitäten stets möglich. Eine Kombination aus dem CVRP und dem DVRP ergibt das Capacitated Vehicle Routing Problem with Distance Constraints (DCVRP), welches noch weitgehend ungeklärt ist (Panou et al. 2013). Eine Verknüpfung des 2E-VRP und des synchronized, scheduled multidepot multiple-tour VRPTW ergibt ein two-echelon, synchronized, scheduled, multi-depot, multi-tour, heterogeneous routing problem with time windows (2SS-MDMT-VRPTW) (Chen und Raghavan 2008). Zusätzlich existieren keine klaren Abgrenzungen zwischen den Arten. Ein Beispiel ist das MDVRP: Existiert bereits eine Einteilung der Kunden und Fahrzeuge zu den Depots, so kann das MDVRP in mehrere Standard-VRPs zerlegt werden, welche individuell gelöst werden können. Weiterhin können Modelle für das VRPTW beispielsweise auch auf das PDPTW angewandt werden (Desrochers et al. 1988).

Um die verschiedenen Ausprägungen des VRPs zu lösen, werden sie zunächst mathematisch formuliert, um Anschluss die passenden Lösungsverfahren (vgl. Abschnitt 2.4.2) zu verwenden.

## 2.4.2 Lösungsansätze für das Vehicle Routing Problem

In diesem Kapitel erfolgt ein Überblick über Lösungsverfahren für Vehicle Routing Probleme. Nach Domschke und Drexl (2010) lässt sich ein VRP unterscheiden durch:

- Zielfunktion
- Depot- und Kundencharakteristik
- Fahrzeugcharakteristik
- Problem- oder Zusatzcharakteristik

Die Charakteristiken eines VRPs wurden im vorherigen Kapitel 2.4 bereits textuell beschrieben. Die vier verschiedenen Unterscheidungskategorien lassen sich jedoch auch mathematisch formulieren. Das folgende generelle VRP-Modell wurde von Fisher und Jaikumar (1981) formuliert. Aufbauend auf dieser Veröffentlichung und mehrfachen Abwandlungen der Modellformulierung wurden die im hinteren Teil dieses Kapitels vorgestellten Lösungsverfahren entwickelt. Hierbei werden folgende Konstanten verwendet:

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $K$                     | Anzahl der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge                     |
| $n$                     | Anzahl der zu beliefernden Kunden                                |
| $V_k = \{1, \dots, n\}$ | Menge aller Kunden, die mit dem $k$ -ten Fahrzeug bedient werden |
| $U_k$                   | Fahrzeugkapazität  |
| $m_i$                   | Von Kunde $i$ nachgefragte Menge                                 |
| $c_{ij}$                | Transportkosten für die Strecke zwischen Kunde $i$ und $j$       |
| $i = 1, \dots, n$       | Laufindex für den zu beliefernden Kunden                         |
| $j = 1, \dots, n$       | Laufindex für den benachbarten zu beliefernden Kunden            |
| $k = 1, \dots, K$       | Laufindex für das genutzte Fahrzeug                              |

Die Variablen  $x$  und  $y$  sind definiert als:

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{falls Kunde } i \text{ von Fahrzeug } k \text{ beliefert wird} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{falls Fahrzeug } k \text{ direkt von Kunde } i \text{ zu Kunde } j \text{ fährt} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.2)$$

Zu minimieren ist die Zielfunktion 2.3.

$$\min \left( \sum_i^n \sum_j^n c_{ij} \sum_k x_{ijk} \right) \quad (2.3)$$

Hierbei müssen die Kapazitätsrestriktionen der Fahrzeuge beachtet werden:

$$\sum_{ijk} m_i y_{ik} \leq U_k. \quad (2.4)$$

Ein Kunde wird lediglich einmal von einem Warenlager aus angefahren, das Depot kann jedoch von allen Fahrzeugen angefahren werden:

$$\sum_{ik} y_{ik} = \begin{cases} k & i = 0 \\ 1 & i = 1 \dots n. \end{cases} \quad (2.5)$$

Außerdem existieren Bedingungen für zusammenhängende Touren:

$$\sum_{ijk} x_{ijk} = y_{ik} \quad (2.6)$$

$$\sum_{ijk} x_{ijk} = y_{jk} \quad (2.7)$$

Gleichung 2.8 verhindert Subtouren. Subtouren sind mehrere kleinere, nicht zusammenhängende Touren.

$$\sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} x_{ij} \leq |Q| - 1 \quad Q \subset V_k \quad (2.8)$$

Generell lassen sich die Lösungsverfahren in exakte Verfahren und Heuristiken unterscheiden. Das Ziel von exakten Verfahren ist es, die Distanzen jeder einzelnen Tour zu berechnen, sodass die geringste Distanz ausgewählt werden kann. Das VRP gehört jedoch einer Klasse von Optimierungsproblemen an, für die man bislang keinen Algorithmus kennt, der eines der Probleme garantiert mit polynomialem Rechenaufwand optimal löst. Deshalb wird das VRP in der Informatik auch als „schwieriges“ oder „schwer lösbares“ Problem bezeichnet (Domschke et al. 2015), da der Aufwand für die Berechnung aller möglichen Lösungen bei einer großen Menge an zu verarbeitenden Daten zu hoch ist (Domschke 2007). Schon bei unter 100 Knoten im Netzwerk (z.B. zu beliefernde Kunden) ist die Anzahl der zu berechnenden Iterationen und somit die Rechenzeit nicht mehr akzeptabel (Laporte et al. 2014). Aufgrund der Komplexität von heutigen Problemstellungen der Tourenplanung finden exakte Verfahren kaum noch Anwendung.

Um anwendbare Lösungen in einer akzeptablen Zeit zu erlangen, werden Heuristiken eingesetzt. Heuristiken liefern zwar nicht immer die optimale Lösung, aber eine annähernd gute, welche mit geringen Aufwand berechnet werden können. In den früheren Jahren wurden spezialisierte Heuristiken entwickelt um komplexe, kombinatorische Optimierungsprobleme zu lösen (Gendreau et al. 2008). Darauf aufbauend wurden immer mehr problemunabhängige Lösungsverfahren ausgearbeitet.

Eine Vorstellung aller Verfahren geht über den Rahmen dieser Arbeit hinaus. In den folgenden Ausführungen werden deshalb einige ausgewählte Heuristiken erläutert, die für die praktische Umsetzung der Problemstellung von Bedeutung sind. Dies sind vor allem die klassischen, bereits vielfach angewandte Heuristiken, die sich gut auf verschiedene Problemstellungen übertragen lassen.

Neben der großen Anzahl an Lösungsverfahren existieren auch mehrere unterschiedliche Klassifizierungen der Verfahren. Aus den vorangegangenen Ausführungen ergibt sich die Unterteilung in problemspezifische und problemunabhängige Heuristiken. Solomon (1987) nimmt beispielsweise eine Einteilung in sequentielle und parallele Methoden vor. Alternativ findet eine Klassifizierung in deterministische und zufallsgesteuerte Heuristiken statt (Kistner 2003). Erfolgt eine Unterteilung der Lösungsverfahren nach der Methodik, so unterscheiden Bott und Ballue (1986) vier verschiedene Klassen heuristischer Verfahren zur Lösung des Vehicle-Routing-Problems:

Sukzessiv-Verfahren:

- Cluster first, Route second
- Route first, Cluster second

Parallelverfahren:

- Savings- oder Insertions-Verfahren
- Exchange- oder Improvement-Verfahren

Wie in Domschke und Drexl (2010) dargelegt, wird beim Cluster first, Route second zunächst die Menge aller Kanten in Teilmengen zerlegt. Danach wird für jede Tour eine Route ermittelt. Diese Reihenfolge wird beim Route first, Cluster second vertauscht. Diese schrittweise Anwendung zählt jedoch zu den älteren Verfahren (Domschke und Drexl 2010). Foulds und Wilson (1997) gehen davon aus, dass eine nicht adäquate Zuordnung zu einem schlechten Routing führt, wenn die erste Einteilung bereits Fehler enthält.

Beim Route first, Cluster second ist diese Vorgehensweise umgekehrt. Als eine bekannte Methode lässt sich das Sweep-Verfahren aufführen.

**Sweep-Verfahren** Der Sweep-Algorithmus wurde von Gillett und Miller (1974) entwickelt. Das Verfahren sieht vor, dass zunächst alle anzufahrenden Knoten in x- und y-Koordinaten auf einer euklidischer Ebene angeordnet werden. Das Depot wird im Ursprung des Koordinatensystems platziert. Das Ziel besteht darin, die Ebene so in Kreissegmente zu zerlegen, dass alle Knoten in einem Kreissegment zu einer Tour zusammengeführt werden können. Ungünstig für den Sweep ist somit ein Depot, das am Rand des Tourenplanungsgebiets liegt. „Der Sweep liefert also dann gute Ergebnisse, wenn das Depot zentral liegt“ (König 1995). Im Pseudocode 2.1 wird deutlich, dass der Algorithmus genügend Speicherplatz, insbesondere für den aktuell besten Tourenplan und die Gesamtstrecke  $D$  der Routen, benötigt.

---

#### Algorithmus 2.1: Sweep-Verfahren nach Domschke und Drexl (2010)

---

```

1 Start:
2   Das Depot liegt im Ursprung eines Koordinatensystems;
3   die Kunden  $i = 1, \dots, n$  sind nach steigenden Polarwinkeln sortiert;
4   euklidische Entfernungsmessung,
5    $D := \infty$ 
6
7 Iteration  $i = 1, \dots, n$ :
8   Bilde den  $i$ -ten Tourenplan  $TP_i$  wie folgt:
9     Nimm die Kunden in der (zyklischen) Reihenfolge
10     $[i, i + 1, \dots, n, 1, \dots, i - 1]$  in die einzelnen Touren auf.
11    Jede Tour wird durch aufeinanderfolgende Kunden so
12    lange erweitert, bis durch den nächsten Kunden die
13    Kapazität  $U$  überschritten würde.
14
15    Ist die Länge  $D := D(TP_i)$  des  $i$ -ten Tourenplans
16    kleiner als  $D$ , so speichere den Plan als aktuell
17    besten Tourenplan und setze  $D := D_i$ .
18
19 Ergebnis:
20 Ein suboptimaler Tourenplan mit der Länge  $D$ .
```

---

Neben der suboptimalen Vorgehensweise sind diese Verfahren für den vorliegenden Anwendungsfall inhaltlich unpassend. Bei der Clusterung werden räumlich beieinander liegende Kundenaufträge zusammengefasst. In der vorliegenden Arbeit ist die Clusterbildung nicht von Relevanz, da die Kollaborationsmöglichkeiten von wenigen Warenlagern und nicht die Belieferungen von einer großen Anzahl an Endkunden betrachtet wird. Der Fokus wird deswegen auf die beiden letzten Klassen von Bott und Ballue (1986) gelegt, welche der Einteilung in „Eröffnungsverfahren“ und „Verbesserungsverfahren“ nach Domschke (2007) entsprechen.

#### 2.4.2.1 Eröffnungsverfahren

Eröffnungsverfahren bilden eine erste Route. Häufig werden diese durch eine stufenweise Festlegung von Lösungselementen konstruiert, weshalb sie auch vereinzelt Konstruktionsverfahren genannt werden (Domschke und Scholl 2006).

**Savings-Verfahren** Das Savings-Verfahren wurde von Clarke und Wright (1964) für die Lösung des Tourenplanungsproblems entwickelt. Suhl und Mellouli (2013) stellen die Vermutung auf, dass es das am häufigsten in der Praxis eingesetzte Verfahren ist. Hierbei wird zunächst für jeden Kunden eine eigene Tour angelegt, welche von einem Startpunkt zum Kunden und wieder zurückführt. Anschließend werden systematisch Touren miteinander verknüpft, sodass Ersparnisse (sogenannte Savings) entstehen. Die Savings werden wie folgt berechnet:

$$s_{i,j} = d_{i,rck} + d_{j,rck} - d_{i,j} \quad (2.9)$$

Durch diese Rechenweise können negative Savings entstehen, wenn die Verbindungsstrecke zwischen  $i$  und  $j$  größer ist als die Hin- und Rückstrecken vom Depot zu den Kunden  $i$  und  $j$ . Im Folgenden wird der Savings-Algorithmus in Form eines Pseudocodes vorgestellt (vgl. 2.2), um das Schema der Berechnung aufzuzeigen.

---

#### Algorithmus 2.2: Savings-Verfahren

---

```

1 Start:
2   Anfangslösung mit Route  $[0, i, 0]$  für jeden Kunden  $i = 1, \dots, n$ 
3   Berechne Savings für alle Kundenpaare  $(i, j)$  mit  $i < j$ 
4   Sortiere sämtliche Ersparnisse  $(s_{ij})$  nach abnehmenden Werten
5
6 Iteration:
7   while Es existiert ein Kundenpaar  $i$  und  $j$  mit positivem Saving
8   und  $i$  und  $j$  sind Endkunden zweier verschiedener Routen do
9     Wähle das größte Element der Liste; es sei  $s_{ij}$ 
10    Sei  $d_{i,j}$  das Tourenpaar mit dem größten Saving
11    While Der Gesamtbedarf der erweiterten Tour ist  $< U$  do
12      Verbinde die Kunden  $i$  und  $j$  und damit deren Routen
13
14 Abbruch:
15   Die Liste ist leer; d.h. alle positiven  $s_{ij}$  sind überprüft

```

16

17 Ergebnis:

18 Ein suboptimaler Tourenplan

---

Das Savings-Verfahren wurde von Paessens (1988) um die Einführung von zusätzlichen Variablen zur Gewichtung von Savings erweitert. Weitere Modifikationen finden sich in Nelson et al. (1985). Betrachtet man allerdings die Rechenleistung von heutigen Computern und die Robustheit des Algorithmus, erscheint eine Modifikation nicht mehr gerechtfertigt (Laporte et al. 2014).

**Nächster-Nachbar** Die einfachste und wahrscheinlich älteste Heuristik ist die Nächster-Nachbar-Heuristik (Grünert 2005). Zu Beginn wird ein arbiträrer Knoten im Netzwerk ausgewählt und eine Verbindung mit der nächstgelegenen Knoten hergestellt, welcher als nächstes in der Tour besucht wird. Anschließend wird unter den verbleibenden Knoten den zur zweiten Stadt nächstgelegenen usw. Diese Methode ist sehr einfach zu implementieren. Sie hat allerdings den Nachteil, dass zum Ende des Verfahrens sehr große Distanzen zurückgelegt werden müssen. „Die Qualität der Nächster-Nachbar-Heuristik kann eher als schlecht bezeichnet werden“ (Grünert 2005).

**Insertion-Heuristik** Der Grundgedanke einer Insertion- oder Einfügeheuristik besteht darin, eine erste kleine Initialtour iterativ durch das Einfügen neuer Knoten zu ergänzen, bis alle Knoten in die Tour mit aufgenommen wurden (Grünert 2005). Es existieren verschiedene Methoden der Insertion-Heuristik. In der Nearest-Insertion-Heuristik wird überprüft, ob sich Knoten in der Nähe der Verbindungslinien zwischen zwei Knoten befinden. Ist ein solcher Knoten gefunden, wird er zwischengeschaltet. Bei der Cheapest-Insertion wird der Knoten eingefügt, der die geringste Zunahme der Tourlänge bewirkt. Eine zufälliger Knoten wird bei der Methode der Random-Insertion hinzugefügt.

#### 2.4.2.2 Reine Verbesserungsverfahren

Der Einsatz von Verbesserungsverfahren zielt darauf ab, eine Verbesserung der bereits bestehenden Routen durch Modifikationen zu erreichen.

„Sie gehen von einem gegebenen Tourenplan aus und verbessern ihn im Hinblick auf die zu verfolgende Zielsetzung. Verbesserungen können entweder durch Ermittlung kürzerer Routen für die aktuellen Touren oder auch durch die Ermittlung veränderter Touren (und Routen) erzielt werden. Es handelt sich zumeist um Vertauschungsverfahren.“ (Domschke und Drexel 2010).

Je nach Anwendungsfall werden diese Verfahren mit heuristischen Metastrategien wie Simulated Annealing und Tabu Search kombiniert (Domschke und Drexel 2010). Durch Glover (1986) wurde die Bezeichnung „Metaheuristik“ geprägt, welche eine Kombination aus Verbesserungsverfahren und Strategien darstellen. Metaheuristiken zeichnen sich zwar durch ihre geringeren Rechenzeiten aus (vgl. Glover und Kochenberger 2003), die Betrachtung

von Metaheuristiken ist für den vorliegenden einfachen Anwendungsfall jedoch nicht zielführend. Dies liegt daran, dass die Nachvollziehbarkeit der Metaheuristiken in der Regel erhebliche Kenntnisse voraussetzt und ferner bei der Verwendung von Metaheuristiken ein relativ großer Anpassungsaufwand an das genaue Problem entstehen kann und eine genaue Justierung von Verfahrensparametern erforderlich ist (Richter 2005). Beim Simulated Annealing ist es z. B. aufgrund vielfältiger Möglichkeiten der Vorgabe von Parametern zur Steuerung des Abkühlungsprozesses schwierig und aufwendig, günstige Kombinationen zu finden, die bei geringer Rechenzeit zu guten Lösungen führen (Domschke und Scholl 2006). Verbesserungsverfahren lassen sich in zwei verschiedene Vorgehensweisen unterscheiden. Im ersten Fall werden Kunden in andere Touren positioniert oder Kunden verschiedener Touren werden gegeneinander oder zyklisch getauscht (Domschke und Drexl 2010). Diese Möglichkeit wird unter der Zuhilfenahme von Simulation in Abschnitt 3.3 beschrieben. Im zweiten Fall werden innerhalb einzelner Routen Kanten oder Knoten ausgetauscht (Domschke und Drexl 2010). Diese Vorgehensweise wird im folgenden Abschnitt 2.4.2.2 detailliert beschrieben.

**k-opt-Verfahren** Beim k-opt-Verfahren werden Kundenpaare (2-opt) oder Abschnitte einer Route ( $k > 2$ ) miteinander vertauscht, um eine Verbesserung der Ausgangslösung zu erzielen. Dabei ist zu beachten, dass das 2-opt-Verfahren nur für symmetrische und das 3-opt-Verfahren für unsymmetrische TSPs verwendet werden darf. Der folgende Algorithmus 2.3 stellt die Vorgehensweise des Verfahrens vor.

---

**Algorithmus 2.3: 2-opt-Verfahren nach Suhl und Mellouli (2013)**

---

```

1 Start:
2   Distanzmatrix  $D = (d)$  mit  $n$  Kunden und eine Tour
3   mit Route  $[d_1, \dots, d_n, d_1]$ .
4   Die (neue) Route  $R$  im Algorithmus wird anfangs auf diese Route
5    $[d_1, \dots, d_n, d_1]$  gesetzt.
6
7 Iteration:
8   Die Kunden von  $i = 1, 2, \dots, n$  nummeriert gemäß der neuen Route  $R$ 
9   for  $i := 1$  to  $n - 2$  do
10    for  $j := i + 2$  to  $n - 1$  do
11      if  $d_i d_{i+1} + d_j d_{j+1} > d_i d_j + d_{i+1} d_{j+1}$  then
12        Bilde neue Tour mit Route  $R := [d_1, \dots, d_i, d_j, d_{j-1}, \dots, d_{i+1}, d_{j+1}, \dots, d_n, d_1]$ 
13        Beginne erneut mit der Iteration (Änderung der Knotennummern!)
14      end if
15    end for
16    if  $d_i d_{i+1} + d_n d_1 > d_i d_n + d_{i+1} d_1$  then
17      Bilde neue Tour mit Route  $R := [d_1, \dots, d_i, d_n, d_{n-1}, \dots, d_{i+1}, d_1]$ 
18      Beginne erneut mit der Iteration (Änderung der Knotennummern!)
19    end if
20  end for
21 Ende Iteration
22
23 Abbruch:

```

---

24 Die Iteration bringt keine Verbesserung mehr  
25  
26 Ergebnis:  
27 Ein verbesserter Tourenplan

---

### 2.4.2.3 Software zur Lösung des Vehicle Routing Problems

Der Bereich der Tourenplanung hat sich in den letzten Jahren rasant entwickelt. Hierfür wurden Methoden des Operations Research für die Lösung von praxisnahen Problemstellungen verwendet. Immer mehr Software-Pakete wurden entwickelt (Domschke und Drexl 2010). Aufgrund der Vielzahl der verschiedenen Arten von VRPs und den dazugehörigen Lösungsansätzen werden im Folgenden beispielhaft einige Anwendungen genannt.

Beispielsweise ist Jsprit ein javabasiertes, SYMPHONY ein in C programmiertes Open-Source-Projekt zur Lösung der bekanntesten Arten des VRPs (COIN 2016; jsprit 2014). Außerdem werden kommerzielle Anwendungen angeboten, wie das ILOG CPLEX Optimization Studio, häufig informell einfach als „CPLEX“ bezeichnet, des Unternehmens IBM. CPLEX ist ein Optimierungssoftware-Paket um Vehicle Routing Probleme zu modellieren und sie mit Methoden der mathematischen Optimierung und der Constraint-Programmierung zu lösen (IBM 2016).



### 3 Ereignisdiskrete Simulation zur Bewertung von Tourenplanungen

Simulation dient als ein Analyse- und Prognosewerkzeug für komplexe Systeme (März und Weigert 2011). Die kollaborative Tourenplanung in der Endstufe der Supply Chain ist aufgrund der Vielzahl an Variablen und Einflussmöglichkeiten ein solches komplexes System. Darüber hinaus wird die Bedeutung der rechnergestützten Simulation „aufgrund ihrer unbestreitbaren Vorzüge in Zukunft weiter zunehmen“ (VDI Richtlinie 3633 Blatt 1 2014). Simulation kann verwendet werden, um mit niedrigen Kosten und in einer kurzen Zeitperiode kritische Situationen zu identifizieren. Im vorherigen Abschnitt 2.3 wurde bereits dargestellt, welche Herausforderungen bei Kollaborationen bestehen. Mit Hilfe der Simulation können die Vorteile einer kollaborativen Tourenplanung aufgezeigt werden. Denn der Einsatz von Simulation dient der Entscheidungsorientierung, wenn keine analytischen Hilfsmittel verfügbar sind (Rabe et al. 2008) oder diese nicht angewendet werden können. Mitrani (1982) sowie Poole und Szymankiewicz (1977) merken an, dass die Problemstellung zu vielschichtig sein könnte, als dass sie durch ein analytisches Verfahren in der notwendigen Exaktheit behandelt werden könnte. Des Weiteren ist der Einsatz von Simulation sinnvoll, wenn die Durchführung von Experimenten an dem Realsystem nicht möglich ist. Dieser Fall tritt ein, wenn das Realsystem nicht existiert, was auf den anvisierten Zustand der kollaborativen Tourenplanung zutrifft. Experimenten am Realsystem können außerdem nicht durchgeführt werden, wenn in ein bestehendes System nicht eingegriffen werden darf, z.B. bei einer laufenden Produktion. Des Weiteren kann der Einsatz von Simulation pragmatische Gründe haben: Auf Grundlage von analytischen Modellen, die wenig Anschaulichkeit aufweisen und schwer zu durchdringen sind, ist die Führungsebene von Industrieunternehmen oft nicht bereit, Entscheidungen zu treffen (Mitrani 1982; Poole und Szymankiewicz 1977).

Die vorgestellten Begebenheiten, die den Einsatz von Simulation begründen, treffen auf das betrachtete System der kollaborativen Tourenplanung zu. Somit stellen sie ausschlaggebende Argumente für die Entscheidung für den Einsatz der Simulation dar. Für den konkreten Anwendungsfall bringt die Simulation zusätzlich noch weitere Vorteile mit sich, welche im Folgenden vorgestellt werden.

In ihren Prozessen fokussieren Logistikunternehmen die Steigerung der Rentabilität bei einer gleichzeitigen Einhaltung von Umweltrestriktionen. Kollaborationen sind in der Tourenplanung ein vielversprechender Ansatz zur Erreichung von ökonomischen und ökologischen Zielen. Grundsätzlich lässt sich jedoch keine pauschale Aussage darüber machen, ob dieses Vorhaben gelingt. Rodrigue et al. (2001) merken an, dass durch Kollaborationen eine

Reduzierung der Kosten erreicht werden kann. Doch selbst wenn dieses Ziel nicht erreicht werden kann, führen Maßnahmen der Umweltschonung zu einer Verbesserung des Images und der Reputation. Mit Hilfe eines Simulationsmodells und der Durchführung von Experimenten können Ergebnisse unterschiedlicher Szenarien untersucht werden. Ein Vergleich der Ergebnisse aus diesen Szenarien ermöglicht eine Beurteilung, welches Vorgehen eine positive Bilanz verspricht und die Verluste niedrig hält (Liebl 1995). Die Simulation bietet somit ein hilfreiches Analyse- und Entscheidungstool, um Aussagen über die Möglichkeiten und die Rentabilität von Kollaborationsmodellen zu treffen. Ein weiterer Vorteil der Simulation ist, dass durch die Verwendung von statistischen Verteilungsfunktionen zufällige Schwankungen von z.B. Lieferzeiten und Nachfragen in das Modell integriert werden (Liebl 1995). Darüber hinaus kann die Simulation als ein zuverlässiges Mess- und Kontrollinstrument während der Durchführung von Kollaborationen eingesetzt werden. Zunächst werden beispielsweise Bestellmengen, Transportkosten, Kapitalbindungskosten oder die Auslastung der Transporte erfasst. Außerdem besteht die Möglichkeit zur Abbildung von Materialflussmatrizen und Lagerbestandsaufnahmen. Auf Grundlage dieser Daten kann mit Hilfe einer Leistungskalkulation eine gerechte Aufteilung der Kosten und Gewinne aller Kollaborationsteilnehmer gewährleistet werden um potentielle Zweifel oder empfundene Ungerechtigkeiten auszuschließen. Dieser Aspekt wurde bereits in Abschnitt 2.3 in Hinblick auf die Hindernisse von Kollaborationen thematisiert.

In der vorliegenden Arbeit soll ein Konzept zur Umsetzung eines kollaborativen Tourenplanungsansatzes in einem Simulationswerkzeug entwickelt werden. Für die Realisierung dieser Aufgabe müssen zunächst die theoretischen Grundlagen der Simulation aufgearbeitet werden. Anschließend erfolgt eine Verknüpfung zwischen Simulation und der in Kapitel 2 erläuterten Tourenplanung. Das Kapitel schließt mit einer Beschreibung des Simulationswerkzeugs SimChain ab, welches in dieser Arbeit Anwendung findet.

### 3.1 Grundlagen der Simulation

Neben der grundlegenden Einführung in das Themenfeld der Simulation ist die Begriffsklärung das Ziel dieses Abschnitts, um ein einheitliches Verständnis der Nomenklatur sicherzustellen. Die folgenden Definitionen stammen aus der vom Verein Deutscher Ingenieure veröffentlichten VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, da diese dem anwendungsbezogenen und technisch geprägten Verständnis der Simulation in dieser Arbeit entsprechen.

**Definition 3.1. Simulation:** „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (VDI Richtlinie 3633 Blatt 1 2014).

Diese Definition beinhaltet alle Merkmale, mit denen sich die Simulation kennzeichnen lässt. Zunächst wird das reale System abstrahiert und in einem (Computer-)Modell abgebildet. Unter Abstraktion wird das Weglassen von Einzelheiten verstanden und bedeutet für die Modellierung, dass im Modell, im Vergleich zum realen System, die Struktur oder das Verhalten des Systems mit einem geringeren Detaillierungsgrad abgebildet werden

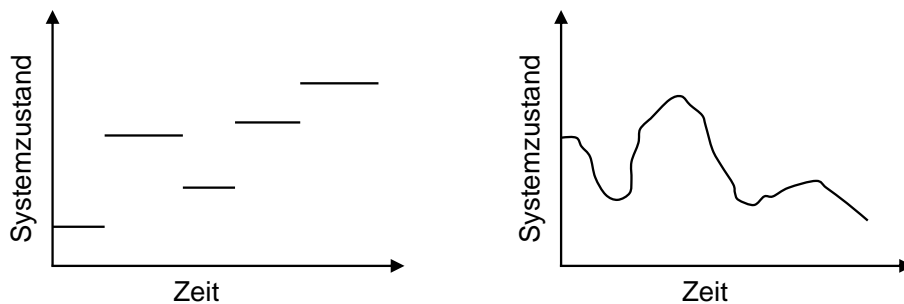
(Rose und März 2011). Durch das Experimentieren werden Simulationsergebnisse produziert, mit denen sich Rückschlüsse auf das reale System ziehen lassen. Die verwendeten Begriffe „experimentierbar“ und „Modell“ aus der Definition 3.1 bedürfen einer Klärung, welche durch die folgenden Definitionen 3.2 und 3.3 umgesetzt wird.

**Definition 3.2. Modell:** Vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System (VDI Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S.3).

Willis und Jones (2008) vertritt die Ansicht, dass Simulationsmodelle konstruiert werden, um die komplexen Merkmale der realen Welt abzubilden. Somit können gute Näherungen für die relevanten Leistungsparameter getroffen werden.

**Definition 3.3. Simulationsexperiment:** Gezielte empirische Untersuchung des Verhaltens eines Modells durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischer Parameter- oder Strukturvariation (VDI Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S.3).

Nach Law und Kelton (2000) kann grundsätzlich zwischen diskreter und kontinuierlicher Simulation unterschieden werden. Bei der diskreten Simulation verändern sich die Zustandsvariablen unmittelbar zu bestimmten Zeitpunkten. Bei der kontinuierlichen Simulation ändern sich die Zustandsvariablen kontinuierlich, unter Umständen können jedoch auch Sprungfunktionen enthalten sein. In Abbildung 3.1 sind die idealtypischen Verläufe von Systemzustandsänderungen der diskreten und kontinuierlichen Simulation im Vergleich skizziert.



**Abbildung 3.1: Systemzustandsänderungen der diskreten und kontinuierlichen Simulation nach Banks et al. (2005)**

Während kontinuierliche Systeme zu jedem beliebigen Zeitpunkt definiert und messbar sind, z.B. die kontinuierliche Bewegung eines Pendels (Bossel 1992), sind die Systemzustände von diskreten Systemen deutlich voneinander abgegrenzt (Banks et al. 2005). Die diskrete Simulation lässt sich in zeitdiskrete und ereignisdiskrete Simulation gliedern. Bei der zeitdiskreten Simulation erfolgt eine Zustandsveränderung jeweils zu einem bestimmten Zeitpunkt. Bei der ereignisdiskreten Simulation erfolgen die Zustandsänderungen sprunghaft durch das Eintreten eines „Ereignisses“ (Banks et al. 2005), wie z.B. der Eingang eines Kundenauftrags.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der ereignisdiskreter Simulation (Discrete Event Simulation, DES), die sich heute in fast allen Logistikbereichen zur Planung, Bewertung, Verbesserung und Steuerung von Systemen und Prozessen etabliert hat (Rabe und Hellingrath 2001; Rose und März 2011; Wenzel et al. 2008). Wenn in dieser Arbeit der Begriff der Simulation verwendet wird, dann ist damit die DES gemeint. Dies liegt darin begründet, dass ereignisdiskrete Simulationsmodelle prädestiniert sind, logistische Systeme abzubilden (Eley 2012). DES ist eine leistungsfähige, computergestützte Technik zur Untersuchung dynamischer stochastischer Systeme (Willis und Jones 2008). Auch für die Tourenplanung lässt sich DES einsetzen. Die logistischen Ereignisse wie die Abfahrt oder das Erreichen von wichtigen Routenpunkten haben eine wichtigere Bedeutung als die kontinuierliche Bewegung eines LKWs auf seiner Route (Ortskoordinaten) (Schröder et al. 2015).

In Kapitel 2.4 wurden die Ausdrücke „Methoden der mathematischen Optimierung“, „Ansätze aus der Optimierung“ oder „Optimierungsproblem“ zur Erklärung von Tourenplanungsheuristiken verwendet. Simulation und Optimierung können auf unterschiedliche Arten miteinander gekoppelt werden. In der vorliegenden Arbeit ist die Optimierung in die Simulation integriert. „Bei der hierarchischen Architektur ist eine Methode dominant und steuert die andere Methode. Im Falle, dass die Simulation das führende System ist, löst die Optimierung in Abhängigkeit des aktuellen Status des Simulationsmodells die ihr übertragene Aufgabenstellung und spielt die Ergebnisse an die Simulation zurück“ (März und Krug 2011). Mittels Simulation, die implizit die Wirkzusammenhänge durch Abbildung der signifikanten Verhaltensregeln ergreift, kann die Optimierungslösung auf Plausibilität geprüft werden (März und Krug 2011).

In den folgenden Abschnitten 3.2 und 3.3 erfolgt eine Analyse, ob die ereignisdiskrete Simulation bereits zur Bewertung von (kollaborativen) Tourenplanungen eingesetzt wird. Falls Lösungsansätze erarbeitet werden können, könnten sie als Basis für die spätere Lösungsumsetzung des kollaborativen Tourenplanungsansatzes in dem datengetriebenen Simulationsmodell dienen.

## 3.2 Einsatz zur Bewertung von Verkehrs- und Tourenplanungen

Im folgenden Abschnitt erfolgt eine Verknüpfung der zuvor eingeführten Themen „Tourenplanung“ und „Simulation“. Die Simulation von Verkehrs- bzw. Transportströmen ist bereits mit unterschiedlichen Fragestellungen durchgeführt worden (Erdmann 1999). Hierfür werden verschiedene Simulationsmodelle oder -werkzeuge vorgestellt, die sich mit der Planung von Touren und des Verkehrswesens beschäftigen. Unter einem Simulationswerkzeug wird ein Softwarewerkzeug verstanden, „mit dem ein Modell zur Nachbildung des dynamischen Verhaltens eines Systems und seiner Prozesse erstellt und ausführbar gemacht werden kann“ (VDI Richtlinie 3633 Blatt 1 2014).

Gonzalez-Feliu und Routhier (2012) analysieren die verschiedenen Konzepte zum Aufbau von Modellen und deren Weiterentwicklungen im Kontext der urbanen Warenbewegung (Urban Goods Movement, UGM). Im Zuge dessen wird eine Klassifizierung der UGM-

Modelle definiert, welche sich in vier Gruppen einteilen lässt: Modelle, die die aktuelle Situation analysieren, Modelle, die eine Situation simulieren, Optimierungsmodelle und diskrete Ereignissimulation, die eine verlässliche Ergebnisprognose für die Zukunft erstellen. Als Ergebnis empfehlen die Autoren eine Strategie zur Schaffung von Meta-Modellen, indem die bestehenden Modelle miteinander kombiniert werden. Durch die Entstehung von Synergieeffekten sei dies ein vielversprechenderer Ansatz als der Versuch, die Modelle zu optimieren.

Kokkinogenis et al. (2011) betrachteten mehrere Verkehrssimulationswerkzeuge, welche in die vier Ebenen makroskopisch, mesoskopisch, mikroskopisch und nanoskopisch unterteilt werden können. Die ausgearbeitete Übersicht beschreibt sieben Simulationswerkzeuge in Hinblick auf den Fokus der Simulation und Funktionalitäten, die verwendet werden könnten um den Stadtverkehr zu beurteilen. Mit Hilfe dieser Werkzeuge können die Wechselwirkungen zwischen Verkehrsteilnehmern und der Infrastruktur analysiert und Verkehrsmanagementsysteme sowie Infrastrukturplanung besonders für städtische Gebiete verbessert werden (Krajzewicz et al. 2012). Die Autoren van der Vorst et al. (2009) entwickelten ein Simulationstool namens ALADINTMD, welches den Qualitätsverfall von verderblicher Ware in der Transportkette berücksichtigt. Die Bestrebungen zielen auf eine Senkung von Produktabfällen ab.

Laut Gonzalez-Feliu (2011) kann die Anzahl der Fahrzeuge, die mit den innerstädtischen Gütertransport in Zusammenhang stehen, durch Simulationswerkzeuge erfasst werden. Als Beispiele nennt der Autor die Anwendung Freturb, welches von den öffentlichen Verwaltungsbehörden in Frankreich verwendet wird, City Goods, welches in Italien zum Einsatz kommt, und die kommerzielle Software Viseba. Für eine ausführliche Beschreibung der Tools wird auf Ambrosini et al. (2008) verwiesen. URBANSIM ist eine Open-Source-Plattform, um städtische Immobilienmärkte und deren Zusammenspiel mit dem städtischen Verkehr zu simulieren. So werden Prognosen über die Stadtentwicklung ermöglicht. Die Zielgruppe der Plattform sind Immobilienkaufleute und Stadtentwickler der Städte und Landkreise.

Gevaers et al. (2014) entwickelten ein Simulationswerkzeug, welches sich auf die Kosten der letzten Meile und die verschiedenen Kosteneffekte in einem B2C Supply Chain Umfeld fokussiert. Gonzalez-Feliu und Salanova Grau (2014) beschäftigten sich mit der Frage, inwieweit sich der Standort eines UCCs auf die Lieferkosten auswirkt. Hierfür versuchten sie das in Abschnitt 2.4.1 beschriebene „two-echelon, synchronized, scheduled, multi-depot, multi-tour, heterogeneous routing problem with time windows (2SS-MDMT-VRPTW)“ zu lösen. Für die Simulation wurde ein sequentieller Algorithmus verwendet, welcher wie folgt arbeitet. Durch die Verwendung eines Sweep-Algorithmus werden die Kunden gruppiert und einem secondstage-Fahrzeug zugewiesen. Anschließend werden diese Fahrzeuge einem Satelliten zugewiesen. Sequentiell wird entweder ein Semi-Greedy oder ein genetischer Algorithmus angewandt, um die secondstage Routen zu erstellen. Entsprechend diesen Routen werden firststage Fahrzeugen definiert und unter Verwendung eines dynamischen Programmieransatzes entsprechende Routen festgelegt.

Im Bereich der Intralogistik beschäftigten sich Werth und Ullrich (2011) mit der Tourenplanung für Kommissionierstationen durch die Verwendung von unterschiedlichen Heuristiken. Mittels Simulation wurden die Auswirkungen der Anwendung der Heuristiken auf die Bedienzeit bei einem Einsatz von mehreren Kommissionierern untersucht. Als Ergebnis wurde eine Heuristik präsentiert, mit welcher ab einem Einsatz von fünf Kommissionierern die durchschnittlich geringste Kommissionierdauer erreicht wird.

### 3.3 Einsatz zur Bewertung von Ansätzen kollaborativer Tourenplanung

In Abschnitt 2.1 wurden bereits verschiedene Bestrebungen vorgestellt, um den steigenden Anforderungen der Citylogistik entgegenzuwirken. Von diesen Konzepten wurde die Kollaboration herausgegriffen und im Abschnitt 2.3 im Detail vorgestellt. Im Kontext der Simulation wurde diese Idee ebenfalls aufgegriffen und für unterschiedliche Fragestellungen, beispielsweise im Rahmen von Forschungsprojekten, weiter entwickelt. In diesem Kapitel liegt der Fokus auf Ansätze der kollaborativen Tourenplanung in der Simulation.

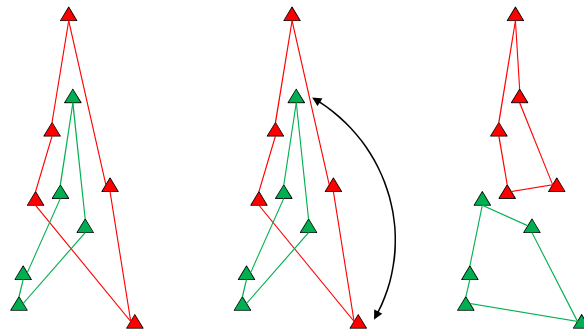
Gonzalez-Feliu (2011) stellt einen Ansatz vor um Kosten und Nutzen von Kollaborationen im Rahmen der innerstädtischen Güterverteilung zu bewerten, indem Simulation und Optimierung miteinander kombiniert werden. Anhand eines beispielhaften SC-Netzwerks werden vier unterschiedliche Szenarien simuliert. Das Netzwerk besteht aus fünf Logistikdienstleistern, welche über ein eigenes Depot und in einigen Szenarien über Satelliten verfügen. Jeder der insgesamt 408 Kunden kann von mehreren Organisationen beliefert werden. Zusätzlich findet eine Unterscheidung der Fahrzeugflotte in große und kleine Fahrzeuge statt. Große Fahrzeuge werden für lange Distanzen eingesetzt, kleine Fahrzeuge werden für die Auslieferung zwischen Satelliten und Kunden verwendet.

1. Im ersten Szenario findet keine Kollaboration der Logistikdienstleister statt, sodass fünf individuelle CVRPs gelöst werden.
2. Auch im zweiten Szenario findet keine Kollaboration der Logistikdienstleister statt. Die Warenverteilung erfolgt allerdings über Satelliten, sodass fünf individuelle 2E-VRPs gelöst werden.
3. Im dritten Fall kollaborieren zwei Dienstleister miteinander, während die anderen wie im zweiten Szenario agieren. Die Kollaborationspartner teilen sich ihre Satelliten, in denen Waren für dieselben Kunden konsolidiert werden. Somit werden insgesamt vier 2E-VRPs gelöst.
4. Im vierten Szenario kollaborieren alle Logistikdienstleister miteinander, indem sie ihre Satelliten für die Konsolidierung der Waren teilen. In diesem Fall wird ein 2E-VRP gelöst.

Gonzalez-Feliu (2011) eruiert, dass die vorgestellte Art der Kollaborationen die Wegstrecken der Distributionsdienstleister erhöhen. Allerdings wurde eine Reduktion der Durchführungszeiten festgestellt, was sich jedoch auf die vermehrten Einsätze der kleinen Fahr-

zeuge zurückführen lässt. Diese können besser in den engen Straßen der Innenstadt manövriert werden und es existieren besseren Parksituation, wodurch Entladungszeiten minimiert wurden. Als Fazit wird festgehalten, dass die Simulation keine evidenten Vorteile der Kollaboration präsentieren konnte. Mit der Bündelung von Warenströmen in einem Umschlaglager beschäftigte sich auch Erdmann (1999). Mit Hilfe von diskreter Simulation quantifizierte die Autorin Einsparungspotenziale und ging dabei auch auf die Problematik einer gerechten Leistungsverrechnung ein. Die Untersuchungen zeigten erhebliche Kostensenkungen und Emissionsreduzierungen.

Ein anderer Ansatz beschäftigt sich mit dem Austausch von Lieferaufträgen. Unabhängige Spediteure tauschen Sendungsaufträge untereinander aus oder „verkaufen“ sich diese gegenseitig, wenn die einzelnen Aufträge schlecht in die eigene Tourenplanung passen (Erdmann 1999). Dabei findet der Sendungsaustausch vor der Durchführung einer Tour statt. Ein Spediteur erwägt die Abgabe bzw. den Kauf eines Kundenauftrags jedoch nur, wenn er sich davon einen Nutzen verspricht, d.h. der erhoffte Erlös die dadurch entstandenen Kosten übersteigt. Wie diese Kosten anreizkompatibel zwischen den einzelnen Spediteuren aufgeteilt werden können, ist eine Herausforderung für den Mechanismus von Auktionen (Krajewska und Kopfer 2006). Die folgende Abbildung 3.2 verdeutlicht das Tauschprinzip von Kundenaufträgen.



**Abbildung 3.2: Beispielhafter Austausch von Kundenaufträgen basierend auf Schwind und Kunkel (2009)**

Die Schwierigkeit der Problemstellung liegt in der Kalkulation von adäquaten Angebotspreisen. Schwind und Kunkel (2009) lösen das Problem mit Hilfe einer simulationsbasierten Optimierung. Hierfür wurde die Vorgehensweise einer Auktion angewandt, um Synergieeffekte zu nutzen und somit das Problem einer gerechten Verteilung zu lösen.

### 3.4 Simulationswerkzeug SimChain

Wie bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben, hilft die Simulationstechnik bei der Analyse von dynamischen Systemverhalten. Hierfür wurde das Simulationswerkzeug SimChain entwickelt, welches sich auf die komplexen Strukturen von Supply Chains spezialisiert hat. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt jedoch auf der Integration eines kollaborativen Tourenplanungsansatzes in SimChain. SimChain lässt sich der in Abschnitt 3.1 diskutierten ereignisdiskreten Simulation zuordnen. Das Simulationswerkzeug stellt einen objektorien-

tierten Bausteinkasten dar, der auf dem Simulationssystem Plant Simulation der Firma Siemens PLM Software (vgl. Siemens 2016) aufbaut. Die Zusammenhänge werden im Abschnitt 3.4.2 im Detail erläutert.

SimChain verwendet eine dreigliedrige Architektur, bestehend aus einer MySQL-Datenbank, einem Simulations Kernel (Plant Simulation) und einer webbasierten Graphical User Interface (SimChainGUI). Alle Komponenten laufen auf einem Server, auf den mit Hilfe einer LAN- oder Internetverbindung zugegriffen werden kann. Plant Simulation und somit auch SimChain arbeiten mit der Skriptsprache SimTalk, mit deren Hilfe die Verhaltensweise von Simulationsmodellen sehr viel genauer gesteuert werden kann (Eley 2012).

Das Datenmodell von SimChain ermöglicht die Modellierung einer Vielzahl von Prozessen von Supply Chains. Die Knoten der Supply Chain werden beispielsweise als Kunden, Produktions- und Lagerstandorte, oder Hubs kategorisiert. Verbunden werden diese Knotenpunkte beispielsweise durch sogenannte Sourcing Routes.

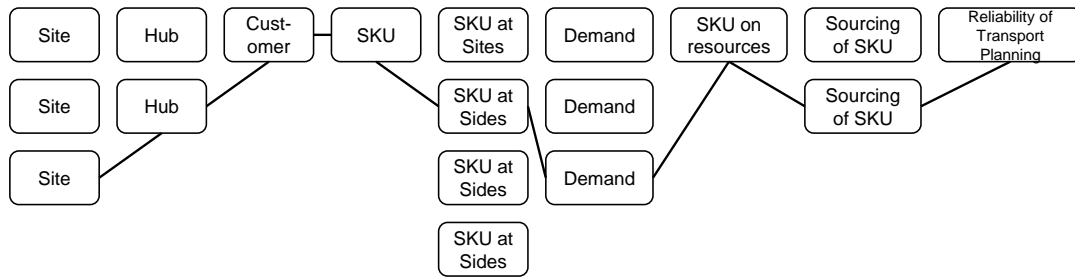
SimChain ermöglicht dem Benutzer, „What-If“-Szenarien zu erstellen. Diese lassen sich z.B. durch das Hinzufügen oder Entfernen von Supply-Chain-Knoten, einer Veränderung der Transportmöglichkeiten oder durch die Neuzuweisung von Produkten umsetzen. Die Szenarien haben einen erheblichen Einfluss auf die zuvor erwähnte Unterstützung im Entscheidungsprozess. Als Vorteil des Simulationstools lässt sich ergänzend erwähnen, dass in SimChain stochastische Faktoren berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu anderen Simulationswerkzeugen wie beispielsweise Enterprise Dynamics (vgl. INCONTROL Simulation Solutions 2016), werden keine detaillierten Produktionsprozesse oder innerbetrieblichen Materialflüsse modelliert. Der Fokus liegt auf der ganzheitlichen Betrachtung von physischen und informationstechnischen Bewegungsströmen der gesamten Supply Chain, sodass beispielsweise strategische Entscheidungsprozesse unterstützt werden können. Außerdem kann SimChain eine integrierte Betrachtung von weltweiten Netzwerken und innerstädtischen Tourenplanungen gewährleisten, sobald Änderungen am Datenmodell und an den Bausteinkästen getätigt wurden (vgl. Abschnitt 5.2). Dies verspricht zwar auch ein Simulationswerkzeug namens AnyLogic (vgl. AnyLogic Company 2016), aber Recherchen haben ergeben, dass diese Funktionen zum Zeitpunkt der Betrachtung noch nicht verfügbar sind. AnyLogic ist in der Lage, SC-Netzwerke zu modellieren und optimieren, aber es existiert lediglich eine Demoversion für die Auslieferung von Produkten. In den folgenden Ausführungen wird das Datenmodell von SimChain erörtert. Die Erklärungen werden benötigt, um ein Lösungskonzept erarbeiten zu können und die späteren Änderungswünsche in SimChain aufzeigen zu können.

### 3.4.1 SimChain-Datenmodell

In dem Datenmodell von SimChain werden alle Informationen zur Modellierung von SC-Netzwerken festgehalten. Dabei lassen sich die Tabellen des Datenmodells in Basis- und Konfigurationstabellen unterteilen. Die Basis-Tabellen werden für die Modellierung der Grundstruktur einer SC benötigt. Das Einrichten des Simulationsmodells erfolgt über Konfigurationstabellen, mit denen unterschiedliche Szenarien erstellt werden können, in-



dem verschiedene Konfigurationen miteinander kombiniert werden. Ein Beispiel für das Erstellen eines Szenarios wird in der folgenden Abbildung 3.3 dargestellt.



**Abbildung 3.3: Beispielhafte Erstellung eines Szenarios nach Fechteler und Gutenschwager (2014)**

Zur Simulation von SC-Netzwerken werden Daten, z.B. bezüglich Standorte, Güter, oder Transportbeziehungen zwischen den Standorten, benötigt. Das Simulationswerkzeug SimChain verfolgt die Vorgehensweise eines datengetriebenen Simulationsmodells, d.h. diese Daten liegen dem SimChain-Datenmodell zugrunde (Fechteler und Gutenschwager 2014). „Damit eine datengetriebene Simulation durchgeführt werden kann, müssen die verwendeten Informationen in einer systematischen Form gespeichert werden. Dazu wird eine relationale Datenbank verwendet. Die Datenstruktur wird durch Tabellen und deren logische Verknüpfungen erfasst“ (Brockhage und Witte 1992). Nach Stahlknecht und Hasenkamp (2002) wird ein zu beschreibendes Objekt als Entität und die Eigenschaften der Entität als Attribute bezeichnet. Die konkrete Beschreibung der Attribute wird als Attributwert bezeichnet. Alle gleichartigen Entitäten werden unter dem Begriff Entitätstyp zusammengefasst. Eine Übertragung dieser Beschreibungen auf ein ausgewähltes Beispiel in SimChain ist in Tabelle 3.1 abgebildet.

**Tabelle 3.1: Übertragung der Datenbankbegriffe auf SimChain**

| Entitätstyp | Entitäten       | Attribut          | Attributswerte   |
|-------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Location    | CUST_4901010005 | Type              | Plain customer   |
|             |                 | Longitude         | 7,05552          |
|             |                 | Latitude          | 50,9096          |
|             |                 | City              | Koeln            |
| Continent   | AFR             | Continent_Name_DE | Afrika           |
|             |                 | Continent_Name_EN | Africa           |
| SKU         | 1000050931      | description       | VOLLKORN 12X260G |
|             |                 | Amount            | 0                |
|             |                 | Weight            | 1,4              |

Das SimChain-Datenmodell verfügt über circa 90 Entitätstypen. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf ausgewählte Entitätstypen eingegangen, welche für das Konzept eines kollaborativen Tourenplanungsansatzes von Bedeutung sind. Wenn nicht anders angegeben, erfolgen die folgenden Erläuterungen in Anlehnung an Fechteler (2016).

Hervorzuheben lassen sich hierbei die Knotenpunkte eines SC-Netzwerks, welche in SimChain als `Location` bezeichnet werden. Diese können die Attributswerte `Plain custo-`

mer, Site, Hub oder Plain supplier annehmen. Sites können durch Produktionsstätten und/oder Warenhäuser vertreten sein; Hubs und plain Suppliers sind die Quellen von Produkten mit einer verankerten Wiederbeschaffungszeit. Des Weiteren sind Werte der Attribute Longitude, Latitude, City, Country\_IdCountry und ZIP hinterlegt. Die Angabe der geografischen Längen und Breiten werden benötigt, da SimChain mit diesen Geokoordinaten operiert.

Der Entitätstyp Stock Keeping Unit (SKU) stellt die hergestellten und zu transportierenden Güter dar. Die Attribute repräsentieren die Produkteigenschaften wie das Gewicht oder den monetären Wert. Die Kundennachfrage für die SKUs ist bekannt, aber nicht statisch. Jede SKU benötigt ein Ladehilfsmittel. Dieses wird im Datenmodell als Carrier bezeichnet. Die zugehörigen Attributswerte geben Auskunft über das Gewicht und die Maße des Carriers. Es findet allerdings keine feste Zuweisung zwischen SKU und Carrier statt, da sich die Carrier innerhalb des Materialflusses ändern können, beispielsweise für die Lagerhaltung oder den Transport.

Der Entitätstyp Means\_of\_Transport beinhaltet alle Informationen über die Art der Transportfahrzeuge und deren Eigenschaften. Ein wichtiges Attribut ist das maximale Ladungsgewicht. Der Entitätstyp Carrier\_on\_meansoftransport weist den Fahrzeugen eine maximale Anzahl an Carriern zu. Weitere wichtige Konstrukte sind die Verbindungen zwischen den Knoten des Netzwerks. In SimChain werden zwei Arten von Verbindungen unterschieden: Transportrelations und Routes. Der Entitätstyp Transportrelation stellt die Verbindung zwischen einem Start- und Zielstandort dar. Die wichtigsten Attribute sind somit Location\_Start und Location\_Target. Zusätzlich werden die Fahrzeuge durch das Attribut Means\_of\_Transport festgehalten, welche für diese Verbindung verwendet werden. Stark mit dem Entitätstypen Transportrelation ist der Entitätstyp Transporttime verbunden. Hier sind die Transportzeiten für jede Transportrelation als eine diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung parametrisiert. Die Attribute lauten Duration\_Days (Transportdauer) und Probability\_0\_100, welches eine Wahrscheinlichkeitsangabe zwischen 0 und 100 ermöglicht, welche Auskunft darüber gibt, dass die Angabe der Transportdauer eintritt. Eine Verknüpfung von mehreren Transportrelationen bildet eine Sourcing\_route, mit denen sich verschiedene Belieferungskonzepte innerhalb einer SC modellieren lassen. Sourcing\_routes sind also beispielsweise Verbindungen zwischen einer Site und einem Hub. Als zweite Möglichkeit um eine Verbindung zu modellieren, existiert der Entitätstyp Route, welcher typischerweise für die Warenauslieferung von einer Produktionsstätte oder einem Hub zu mehreren Kunden verwendet wird. Für diese Verbindung sind keine Einzelauslieferungen vorgesehen. Das Attribut LocationStartEndOfRoute gibt Auskunft darüber, welche Location als Start- und Endknoten definiert wird. Identisch zum Entitätstyp Transportrelationen werden auch für die Routen Fahrzeuge (Means\_of\_Transport) spezifiziert. Außerdem existiert das Attribut maxTourLengthSingle\_km, welches die maximale Länge der Route festlegt, und das Attribut maxNumberNodesOnTour, welches die maximale Anzahl an Knoten auf dieser Route bestimmt. Durch den Entitätstypen LocationsOnRoutes werden die Locations einer Route zugewiesen. Für jede Route kann somit eine Gruppe von Locations, z.B. Kundengruppen, definiert werden. Durch die Wertebele-

gung des Attributs **SeqNr** kann zusätzlich die Reihenfolge der **Locations** auf dieser Route festgelegt werden.

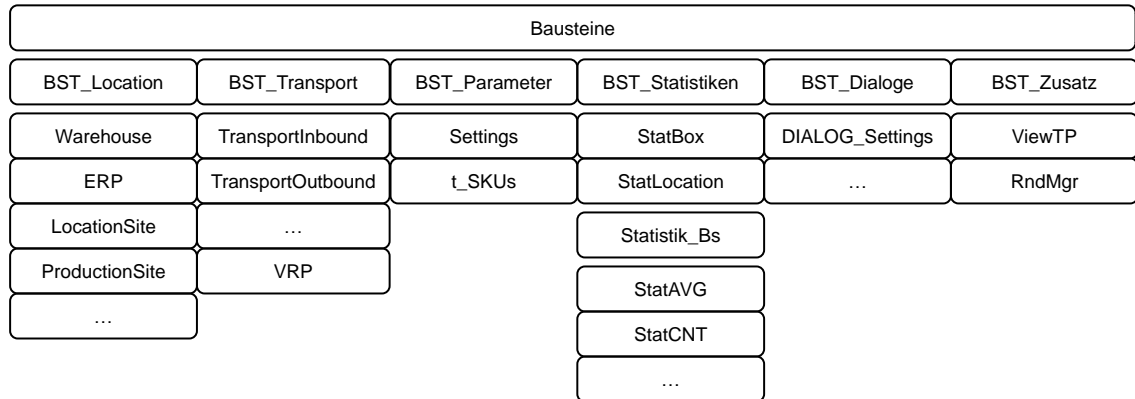
In **SimChain** stehen zwei Möglichkeiten für eine Tourenplanung zur Verfügung. Entweder kann eine Tour dynamisch während der Simulation berechnet werden, oder sie wird vorher bestimmt. Diese zwei Möglichkeiten lassen sich durch das Ausfüllen des Datenmodells festlegen: Wird das Attribut **SeqNr** des Entitätstypen **LocationsOnRoute** genutzt, so werden die **Locations** entsprechend ihrer festgelegten Reihenfolge angefahren. Liegen keine Attributswerte vor, so wird die Tour dynamisch kalkuliert.

Um die Distanzen der Verbindungen zu kalkulieren, werden mit Hilfe der Geokoordinaten zunächst die Luftlinien kalkuliert und auf diesen Wert 30 % addiert, damit die Distanzen vergleichbar mit denen eines Straßennetzes sind. Dieses Vorgehen lautet Minkowski-Formel und wird wie folgt beschrieben: „A simple, empirical optimization procedure led to the identification of the coefficients, in the Minkowski formula, that best approximate road distance and travel time, respectively. Summary statistics and cartographic representations consistently indicate the value  $p = 1.3$  as the best coefficient“ (Shahid et al. 2009). Die folgende Beschreibung macht deutlich, wie die Daten- und Simulationsmodelle zusammenhängen: „Unter datengetriebener Simulation wird eine Vorgehensweise verstanden, ein Simulationsmodell zu initialisieren und mit Daten zu versorgen. [...] Während der Simulation werden die Informationen aus einer Datenbank gelesen. [...] Das Simulationsmodell selber bleibt unabhängig von Inhalt der Daten aus der Datenbank“ (Brockhage und Witte 1992). Weiterhin werden die Ergebnisdaten der Simulationsläufe in der Datenbank gespeichert.

### 3.4.2 Simulationsmodell

Plant Simulation beinhaltet eine Bibliothek von Objekten zur Abbildung des Material- und Informationsflusses in Produktions- und Logistiksystemen. Der Bausteinkasten **SimChain** erweitert diese Bibliothek um Objekte für den Bereich der Modellierung und für die Analyse von Liefernetzwerken. Der Supply Chain Bausteinkasten hat sich durch eine Vielzahl von Logistik- und Supply-Chain-Management- Projekten stetig weiterentwickelt (SimPlan AG 2016). Wie bereits erwähnt, fungiert das Simulationspaket **PlantSimulation** als Basis von **SimChain**. Plant Simulation ist durch einen objektorientierten und hierarchisch aufgebauten Ansatz gekennzeichnet. In einer Klassenbibliothek sind standardisierte Bausteine zur Modellierung von Materialflüssen und Prozessen enthalten. Diese generell vorhandenen Bausteine reichen jedoch nicht aus, um SC-Netzwerke simulieren zu können. Plant Simulation bietet allerdings die Möglichkeit, die bereits vorhandenen Standardbausteine um zusätzliche Bausteine zu ergänzen. Deshalb wurde ein branchenspezifischer Bausteinkasten speziell für Supply Chains entwickelt, welcher durch **SimChain** Anwendung findet. Der Vorteil der vorgefertigten Bausteine liegt in der Tatsache begründet, dass kein eigener Programmcode zur Erstellung des Simulationsmodells verfasst werden muss. Jedoch können die Verhaltensweisen der Bausteine durch die Änderung von Eingabewerten manipuliert werden (Eley 2012). In den Bausteinen sind außerdem Methoden verankert, welche Prozeduren und Funktionen erstellen und in die Modelle eingebunden werden können (Eley

2012). In diesem Kapitel werden die wichtigsten Bausteine und Methoden vorgestellt, welche für die Aufgabenbearbeitung von Relevanz sind. Zusätzlich wird auf die Hierarchien innerhalb dieser Bausteine eingegangen. Ein Überblick über die SimChain-Bausteine findet sich in der folgenden Abbildung 3.4.



**Abbildung 3.4:** Ausgewählte SC-Bausteine nach Fechteler und Gutenschwager (2014)

In Abschnitt 3.4.1 wurde bereits erläutert, dass die Tourenplanung dynamisch während der Simulation erfolgen kann. Hierfür wird eine Tourenplanungsmethode verwendet, welche in einem VRP-Baustein verankert ist. Der Baustein befindet sich in der Klassenbibliothek im Unterordner `BST_Transport` des Hauptordners `Bausteine`. Wie bereits in Abschnitt 3.1 erörtert, existieren verschiedene Möglichkeiten, wie Optimierung und Simulation gekoppelt werden. Die Tourenplanungsmethode in SimChain entspricht einer Optimierung während der Simulation. In dem VRP-Baustein sind einige der in Abschnitt 2.4.2 vorgestellten Lösungsansätze als Methoden vertreten. Diese sind das Insertions-Verfahren, der Sweep- und Savings-Algorithmus sowie das 2-opt-Verbesserungsverfahren. Um eine Tourenplanung durchzuführen, werden die Entitätstypen `Route` und `LocationsOnRoute` benötigt.

In dem Grundlagenteil dieser Arbeit wurde eine Analyse von verschiedenen Arten des Tourenplanungsproblems und deren Lösungsansätzen vorgenommen. Zusätzlich wurde untersucht, ob die Simulation bereits zur Bewertung von (kollaborativen) Tourenplanungen eingesetzt wurde. Die Analyse erfolgte in der Erwartung, dass mathematische Formulierungen und potentielle Simulationsansätze einer kollaborativen Tourenplanung bereits existieren könnten und diese für die spätere, eigene Lösungsansatzarbeit aufgegriffen werden könnten.

Diese Erwartung konnte jedoch nicht erfüllt werden. Im Rahmen der Übersichtserstellung von VRP-Arten konnte keine Spezialisierung für eine kollaborative Tourenplanung gesichtet werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Kollaboration nicht von der Art des VRPs abhängt, gibt es auch keinen einheitlichen Algorithmus ausschließlich für die kollaborative Tourenplanung. Die vorgestellten Simulationsansätze zur Bewertung einer (kollaborativen) Tourenplanung können auch nicht als Basis für das eigene Simulationsmodell angewendet werden. Die vorgestellten Konzepte befassen sich zwar mit der Thematik von Kollaborationen, sie lassen sich jedoch nicht auf das eigene Konzept übertragen. Diese Problematik

wird in Abschnitt 4.3 noch einmal ausführlich begründet. Doch selbst wenn eine geeignete Veröffentlichung ausgemacht worden wäre, so läge das Problem in der geringen Informationsdichte der Veröffentlichungen. Die Quellcodes oder exakten Berechnungsverfahren, welche dem Lösungsverfahren zugrunde liegen, werden nicht zur Verfügung gestellt. Folglich ist die Implementierung schwierig nachzuvollziehen, da detaillierte Informationen über die Optimierungsmodell und die exakten Algorithmen nicht zugänglich sind.

Somit lässt sich antizipieren, dass eine Lösung erarbeitet werden muss, indem die vorliegende Problemstellung an ein bestehendes VRP angeglichen werden muss und eine passende Heuristik zur Lösung dieses VRPs entwickelt werden muss. Als Fazit lässt sich außerdem festhalten, dass die vorgestellten Simulationsansätze eine grobe Grundidee, wie Kollaborationen gelöst werden können, vermitteln. Allerdings muss auch hier eine eigenständige Ausarbeitung erfolgen. Der Vorteil besteht allerdings darin, dass auf ein existierendes Simulationswerkzeug zugegriffen werden kann. Wie bereits erläutert, ist das vorgestellte Simulationswerkzeug SimChain ein umfangreiches und hoch entwickeltes Werkzeug für die Simulation von Supply Chains und der anschließenden Bewertung der Leistung und des dynamischen Verhaltens der SC. Für die Nutzung von SimChain für die Bewertung eines kollaborativen Tourenplanungsansatzes sind jedoch einige Anpassungen nötig, welche in Abschnitt 5.2 diskutiert werden.

## 4 Modelle von kollaborativen Tourenplanungsansätzen

In diesem Kapitel werden verschiedene konzeptuelle Modelle hinsichtlich einer kollaborativen Tourenplanung ausführlich diskutiert. Das Kapitel wird in drei Teile untergliedert. Nachdem die konkrete Problemstellung in Abschnitt 4.1 noch einmal im Detail erläutert wird, folgt der zweite Teil des Kapitels. Um zu der Erkenntnis zu gelangen, wie sich die Unternehmen für eine kollaborative Tourenplanung organisieren können, werden verschiedene Kollaborationsmodelle auf einer konzeptuellen Ebene entwickelt. Um sich den Ausprägungsgrad der Kollaborationsform bewusst zu machen, werden die Kollaborationsmodelle hinsichtlich der im Grundlagenteil eingeführten Ausprägungen der gemeinsamen Ressourcennutzung (vgl. Abschnitt 2.3.2) eingeschätzt. Zusätzlich werden eigene Kriterien zur Bewertung der Modelle erhoben, um ein detaillierteres Bild über die Kollaborationsmodelle zu erlangen. Dies wird dadurch erreicht, dass anhand dieser Kriterien die Modelle argumentativ gegenübergestellt werden. Da die verschiedenen Kollaborationsmodelle realistische Szenarien abbilden, lässt sich anhand der Argumentationslinie erfassen, welche Vor- und Nachteile die praktische Umsetzung und Durchführung der verschiedenen Kollaborationsformen mit sich bringt.

Im zweiten Teil folgen Überlegungen zur Lösungsumsetzung des kollaborativen Tourenplanungsansatzes in dem datengetriebenen Supply-Chain-Simulationswerkzeug SimChain. Das SimChain-Modell bildet ein reales System in einer abstrahierten Form ab. Mit Hilfe der Simulationsergebnisse kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob eine kollaborative Zusammenarbeit der Warenlagerbetreiber die anfangs genannten ökonomischen und ökologischen Ziele (vgl. Überlegungen in Abschnitt 2.1) erreichen kann. Somit hat die Simulation eine Bewertungsfunktion inne. Aufgrund dessen werden Möglichkeiten diskutiert, wie die Kollaborationsprozesse in SimChain modelliert werden können. Dies führt zu einer Gegenüberstellung zweier Kollaborationsmodelle hinsichtlich der Umsetzungsmöglichkeiten in SimChain. Das Kapitel schließt mit einer konkreten Empfehlung für eine Lösungsumsetzung ab.

### 4.1 Problemformulierung

Zum Zeitpunkt der Betrachtung finden noch keine horizontalen Kollaborationen zwischen den Betreibern der Warenlager statt. Wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben, liegt dies meist an dem nicht vorhandenen Vertrauen gegenüber der Partner. Um die Potentiale einer kollaborativen Tourenplanung zu überprüfen, wird in dieser Arbeit ein beispielhaftes

Szenario einer Supply Chain entwickelt. Es beinhaltet vier Warenlager mit jeweils fünf Endkunden. Zum Zeitpunkt der Betrachtung agiert jedes Unternehmen isoliert indem es von ihrem Depot in Stadtnähe die Endkundenbelieferung in der Innenstadt vornimmt. In Abbildung 4.1 ist die momentane Situation dargestellt. Durch diese Handlungsweise kann nicht immer eine volle Kapazitätsauslastung der Fahrzeuge erzielt werden.

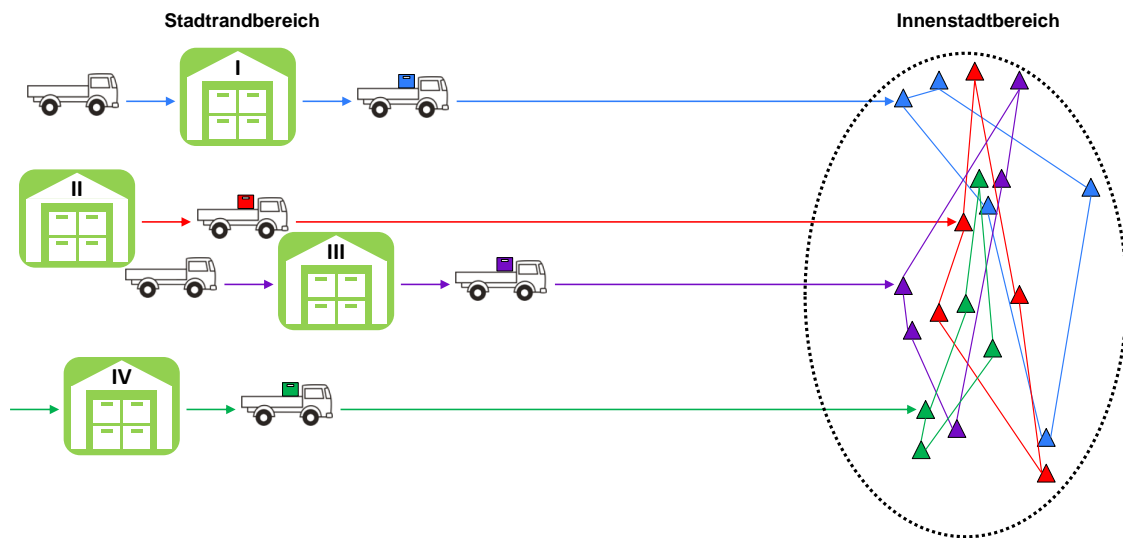


Abbildung 4.1: Darstellung des Ist-Zustands

Der Kollaborationsgedanke wird in der Abbildung 4.2 deutlich. In dem hier entwickelten Szenario fährt ein Fahrzeug zunächst alle Warenlager an um nach und nach Waren einzuladen. Von dem letzten Warenlager aus wird anschließend eine optimale Route zur Erreichung aller Endkunden in der Stadt festgelegt. Durch die Anwendung eines kollaborativen Tourenplanungsalgorithmus entsteht zunächst eine optimale Rundtour zwischen den Warenlagern. Unabhängig davon wird eine zweite Tour für die Endkundenbelieferung in der Stadt gebildet. Die Endkundenbelieferung wird allerdings nicht weiter betrachtet, da diese Art der Tourenplanung mit dem Simulationswerkzeug SimChain bereits durchgeführt werden kann.

Durch die Kollaboration kann die Anzahl der operierenden Fahrzeuge, das Fahrerpersonal und die Summe der absolvierten Gesamtstrecke der betrachteten Warenlager minimiert werden. Wie in Abschnitt 2.4.1 erläutert, existieren für diese Zielformulierungen kundenbezogene und fahrtenbezogene Bedingungen. Die Nachfrage von Kunde  $i$  beträgt in der zu betrachtenden Periode  $m_i$  Mengeneinheiten. Diese Nachfrage ist aus Kundensicht mit einer Belieferung zu erfüllen, d.h. Mehrfachbelieferungen sind nicht zulässig. Aus Unternehmenssicht darf die Fahrzeugkapazität pro Tour nicht überschritten werden. Des Weiteren startet und endet jede Fahrt im Depot, wofür beliebig viele gleichartige Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Außerdem müssen die Betriebszeiten der Warenlager eingehalten werden.

Bei der Planung von kollaborativen Touren werden zwei Aspekte berücksichtigt: Die Definition der Touren unter Beachtung der Restriktionen führt zu einem Zuordnungsproblem, indem festgelegt wird, welche Kunden auf den einzelnen Touren bedient werden. Zusätz-

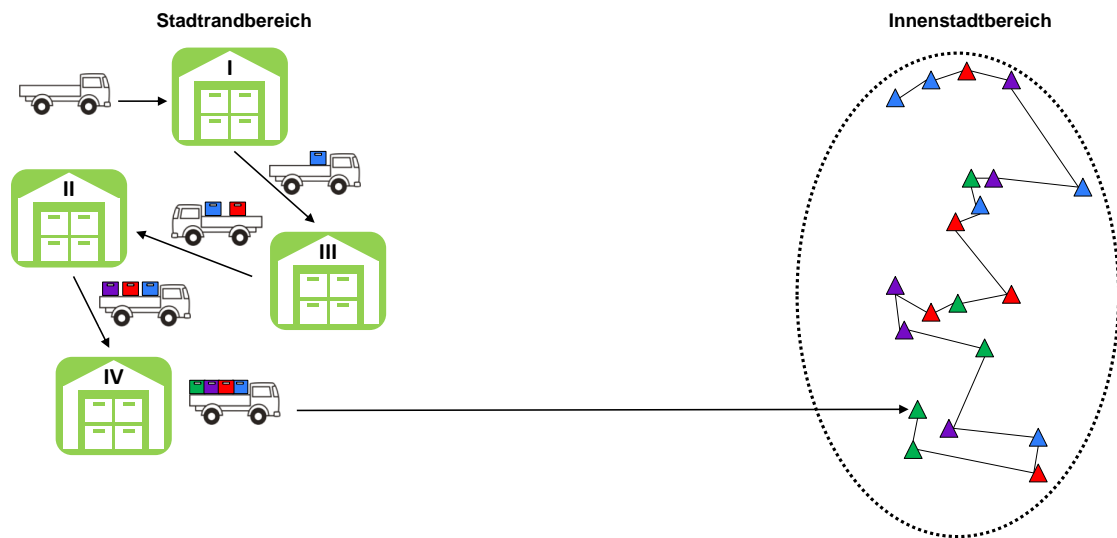


Abbildung 4.2: Darstellung des Soll-Zustands

lich liegt ein Traveling Salesman Problem vor, im Rahmen dessen die Planung der Route erfolgt. Diese bezieht sich darauf, in welcher Reihenfolge die Kunden einer Tour beliefert werden soll.

## 4.2 Konzeptuelle Modelle der kollaborativen Tourenplanung

In Abschnitt 4.1 wurde die Problemstellung dieser Arbeit noch einmal im Detail erläutert. Folgend gilt es, für diese Problemstellung Lösungsmöglichkeiten auszuarbeiten indem die Grundidee der kollaborativen Tourenplanung weiter ausgeführt wird. Zunächst werden mehrere Modelle konzeptuell erarbeitet, um sich die verschiedenen Möglichkeiten von Kollaborationen zu vergegenwärtigen. Diese konzeptuellen Modelle werden anschließend gegenübergestellt und ihre Vor- und Nachteile diskutiert, um im späteren Abschnitt 4.3 ein geeignetes Modell für die Simulation auszuwählen.

### 4.2.1 Entwicklung von Kollaborationsmodellen

Die Literaturrecherche im Grundlagenteil dieser Arbeit ergab, dass keine wissenschaftliche Betrachtung von Kollaborationsmodellen in der Tourenplanung in der vorgestellten Form vorliegt. Aufgrund der Tatsache, dass Kollaboration in der Praxis zwar schon verbreiten sind, in der Wissenschaft jedoch einen neuen Untersuchungsgegenstand darstellen (vgl. Abschnitt 2.3), wird die Konzeption der Kollaborationsmodelle selbstständig erfolgen.

In Hinblick auf den Umfang der vorliegenden Arbeit und um die Anzahl der in Frage kommenden Kollaborationsmodelle auf einem überschaubaren Level zu halten, werden zu Beginn Annahmen getroffen, die die Kollaborationsmöglichkeiten begrenzen.

Die Option einer Fremdvergabe von Belieferungen an einen externen Dienstleister wird ausgeschlossen. Dies lässt sich wie folgt begründen. Betrifft die Fremdvergabe beispielsweise



ein externes Speditionsunternehmen, so können keine Annahmen über die Auftragslage dieses Spediteurs getroffen werden. Denn es besteht eine Unsicherheit darüber, ob die vorgestellte Problemstellung aus der Abbildung 4.1 überhaupt zutreffend ist. Eventuell sind die eigenen Fahrzeugkapazitäten bereits optimal ausgenutzt, indem eine ausgewogene Auftragslage vorliegt und viele Unternehmen beliefert werden. Da aber keine Informationen über die Standorte bekannt sind, kann keine Aussage zur Routenplanung dieses Spediteurs getroffen werden. Außerdem wird in dem vorliegenden Fall lediglich die horizontale Kooperation betrachtet, ein Spediteur könnte jedoch auch Verträge mit Unternehmen unterschiedlicher Branchen abschließen. In diesem Fall lägen inhomogene Güter vor, die unterschiedliche Bedürfnisse haben, was das Kollaborationsmodell unüberschaubar gestaltet. Aufgrund dieses Arguments ist auch die Kurier-Express-Paket-Branche (KEP-Branche) in dem vorliegenden Fall nicht vertreten. Dies ist eine sehr spezielle Branche mit einzelspezifischen Merkmalen und Ausprägungen, die einzeln betrachtet werden müssten. Ergänzend dazu werden Arbeitnehmerüberlassungen ausgeschlossen. Da die Idee der Kollaboration relativ neu ist, ist es zu empfehlen, die Unternehmen in einer ersten Phase einer möglichen Umsetzung langsam an die Thematik heranzuführen und sie durch einfach zu umsetzende Konzepte für das Thema zu sensibilisieren. Betrachtet werden deshalb Konzepte, welche sich zeitnah und mit einem vergleichsweise geringen Aufwand umsetzen lassen. Die Schaffung eines UCCs erfüllt diese Bedingungen nicht, da die Umsetzung mit einem großen Aufwand verbunden ist. Des Weiteren kann zum Zeitpunkt der Betrachtung keine generelle Aussage darüber gemacht werden, ob die Kunden in der vorliegenden Problemstellung immer nur von einem oder mehreren Unternehmen beliefert werden. Die Belieferungskonzepte sind von der betrachteten Branche und der Art der Kunden abhängig. Handelt es sich beispielsweise um Paketbelieferungen eines Krankenhauses, so erhält dieses Krankenhaus mehrere große Lieferungen der unterschiedlichen KEP-Unternehmen. Wird jedoch der Lieferdienst eines Online-Bestellportals an einen Haushalt betrachtet, so handelt es sich in der Regel um eine Lieferung eines Unternehmens. Ein UCC zur Konsolidierung der Güterströme von Großkunden ist somit nur für bestimmte Branchen zweckmäßig. Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, stehen die Unternehmen außerdem einer Teilnahme an einem UCC kritisch gegenüber. Somit wird die Nutzung eines UCCs als Lösungskonzept ausgeschlossen. Des Weiteren werden nur solche Modelle ausgearbeitet, welche sich auch realistisch in der Praxis umsetzen lassen. Das heißt, dass die Modelle Sinn ergeben müssen indem sie ökonomisch effizient erscheinen. Hier spielt auch die Akzeptanz durch die Kunden eine Rolle. Da sich neuartige Konzepte wie der Einsatz von Dronen (vgl. Abschnitt 2.1) noch im Teststadium befinden, werden diese Ideen nicht betrachtet.

Somit ergeben sich insgesamt fünf unterschiedliche Kollaborationsmodelle, welche die getroffenen Annahmen erfüllen.

1. **Eigene Fahrzeugflotten** In dem ersten Modell besitzt jeder Betreiber eines Warenlagers seine eigene Fahrzeugflotte. Somit besteht die Option, jedes der Lager als Depot zu definieren, von wo aus eine Tour beginnt und endet. Die Tour wird mit der zugehörigen Fahrzeugflotte des definierten Depots absolviert. Die Fahrer der Fahrzeuge sind den Warenlagern zugeordnet und auch ausschließlich ihnen in organisa-

torischer und rechtlicher Hinsicht unterstellt. Damit eine Kollaboration umgesetzt werden kann, müssen zunächst die Informationen über die Auftragslage zusammengeführt werden. Anschließend wird eine optimale Route geplant, welche alle abzufahrenden Warenlager integriert. Unter dem Gesichtspunkt der Chancengleichheit und Gerechtigkeit erfolgt im Anschluss eine Aufteilung der entstandenen Kosten unter den Kollaborationspartnern.

2. **Gemeinsame Fahrzeugflotte im Fahrzeugdepot** In diesem Modell existiert eine gemeinsame Fahrzeugflotte der Unternehmen. Diese befindet sich in einem Fahrzeugdepot, welches sich in Stadtnähe befindet, und eine Garage oder ein angemieteter Stellplatz darstellt. Wie die Bezeichnung „Fahrzeugdepot“ bereits suggeriert, sollen die Fahrzeuge in diesem Depot planmäßig verbleiben. Das bedeutet, dass die Fahrzeuge von dort aus starten und am Ende des Tages im Depot abgestellt werden. Die Fahrzeuge sind nur für gemeinsame Zwecke gedacht. Das Personal ist der Fahrzeugflotte fest zugeordnet, sodass sich die Betreiber der Warenlager die Kosten für die Fahrzeuge, die Fahrer und das Fahrzeugdepot teilen. Ergänzend lässt sich festhalten, dass in diesem Modell alleinig die gemeinsame Fahrzeugflotte existiert. Die Verantwortlichen der Warenlager verfügen über keine eigenen Fahrzeuge mehr. Auch in diesem Modell erfolgt eine anteilmäßige Kosten- und Leistungsverrechnung.
3. **Hybridform: Eigene und gemeinsame Fahrzeugflotte** Durch die parallele Existenz der beiden vorherigen Modelle entsteht eine Hybridform. Das bedeutet, dass ein stadtnahes Fahrzeugdepot existiert, indem eine gemeinsame Fahrzeugflotte untergebracht ist. Die gemeinsame Fahrzeugflotte darf ausschließlich für kollaborative Touren eingesetzt werden. Gleichzeitig verfügen die Warenlager jedoch noch über eigene Fahrzeuge, über die sie frei verfügen und entscheiden können. Ein Einsatzgrund sind beispielsweise Großbestellungen, bei denen die Fahrzeugkapazitäten durch einen Kunden bereits ausgereizt sind.
4. **Poolfahrzeuge mit zusätzlichen Fahrzeugdepot** Eine andere Möglichkeit der Kollaboration ist die Einführung von Poolfahrzeugen. Diese Fahrzeuge sind für eine gemeinsame Verwendung der Warenlager gedacht, gleichzeitig besteht allerdings die Option, dass die Betreiber der Warenlager die Fahrzeuge für ihre eigene Zwecke verwenden. In dem vorliegenden Modell besteht die Schwierigkeit der Vereinbarkeitsproblematik. Dies bedeutet, dass klare Regeln für die Nutzung der Fahrzeuge definiert werden müssen, um die gemeinsamen und individuellen Ziele der Organisationen miteinander in Einklang zu bringen. In der Praxis wird für Poolfahrzeuge in der Regel ein Flottenmanager beauftragt, der die Vergabe der Poolfahrzeuge koordiniert. Er ist für den einwandfreien Zustand der Fahrzeuge zuständig, z.B. dass diese vollgetankt und verkehrstauglich sind. Ähnlich zum dritten Modell „Hybridform“, existiert für die Flotte zusätzlich ein Fahrzeugdepot, welches in Stadtnähe angesiedelt ist. Dieses Depot ist allerdings nur optional, d.h. die Fahrzeuge dürfen auch auf den Geländen der Warenlager abgestellt werden.
5. **Poolfahrzeuge ohne zusätzliches Fahrzeugdepot** In einer abgewandelten Variante existieren zwar die Poolfahrzeuge, jedoch kein zusätzliches Fahrzeugdepot,

sodass die Poolfahrzeuge nur auf den Geländen der Warenlager abgestellt werden können. Die im vierten Modell aufgezeigten Problematiken durch die Nutzung von Poolfahrzeugen bleiben bestehen.

Wie bereits in Abschnitt 2.3 aufgeführt, existieren verschiedene Arten der Kollaboration. Die zuvor beschriebene Modelle werden in der folgenden Tabelle 4.1 diesen Arten der Kollaboration zugeordnet. Somit wird deutlich, welche Modelle eine ausgeprägte Form der Kollaboration aufweisen und bei welchen Modellen nur sehr wenig zusammengearbeitet wird. Die Einordnung erfolgt unter der Prämisse, dass den Unternehmen für die Umsetzung der Modelle in der Praxis eine Hilfestellung offeriert wird, die aussagt, welches Modell ein sinnvolles Konzept der Kollaboration verkörpert. Die folgende Tabelle bietet somit einen ersten Anhaltspunkt, welche Modelle für die Unternehmen näher betrachtet werden sollten.

**Tabelle 4.1: Einordnung von Ausprägungen der gemeinsamen Ressourcennutzung**

| Ausprägungen der gemeinsamen Ressourcennutzung     | Personelle Infrastruktur | Physische Infrastruktur | Informationen | Fahrzeuge |
|--|--------------------------|-------------------------|---------------|-----------|
| 1. Eigene Fahrzeugflotten                          | ○                        | ○                       | ●             | ○         |
| 2. Gemeinsame Fahrzeugflotte im Fahrzeugdepot      | ●                        | ●                       | ●             | ●         |
| 3. Hybridform Eigene und gemeinsame Fahrzeugflotte | ◐                        | ●                       | ●             | ◐         |
| 4. Poolfahrzeuge mit zusätzlichen Fahrzeugdepot    | ○                        | ●                       | ●             | ●         |
| 5. Poolfahrzeuge ohne zusätzliches Fahrzeugdepot   | ○                        | ○                       | ●             | ●         |

**Legende:**

● Ausprägung vorhanden    ◐ Ausprägung teilweise vorhanden    ○ Ausprägung nicht vorhanden

Bei Betrachtung der Tabelle 4.1 fällt auf, dass die Attributsspalte „Informationen“ in jedem Modell eine Ausprägung erfährt. Dies bedeutet, dass bei allen vorgestellten Modellen Informationen ausgetauscht werden. Dieser Umstand untermauert die Aussage „das Teilen von Informationen gilt als zentraler Bestandteil der Kollaboration“ aus Abschnitt 2.3.2. Die Ausprägung des Attributs „physische Infrastruktur“ wurde durch die Existenz eines gemeinsamen Fahrzeugdepots generiert, welches in den Modellen 2, 3 und 4 vorhanden ist. Das Attribut „personelle Infrastruktur“ erfährt allein in Modell 2 eine Ausprägung, indem ein gemeinsamer Personalstamm an Fahrzeugführern unterhalten wird. Durch das Teilen von Fahrzeugen oder gar der Besitz einer gemeinsamen Fahrzeugflotte wird eine Ausprägung des Attributs „Fahrzeuge“ erzielt. Dies ist in den vier der insgesamt fünf Modelle der Fall.

Aus der Tabelle 4.1 lässt sich ableiten, dass Modell 2 „Gemeinsame Fahrzeugflotte im Fahrzeugdepot“ die höchste Form der Kollaboration darstellt, da alle Möglichkeiten zum Teilen der Logistikleistungen erschöpft sind. Beim ersten Modell „Eigene Fahrzeugflotten“ werden lediglich Informationen als eine der vier möglichen Ressourcen miteinander geteilt.

Der Austausch der Informationen ermöglicht eine hohe Transparenz der Prozesse. Da die Kollaborationsteilnehmer auf die Informationen aller Partner angewiesen sind, entsteht eine Abhängigkeit. Übergreifende Leistungsanalysen sind nahezu unmöglich, wenn die hierfür benötigte Informationen der Partner, z.B. über die Pünktlichkeit der Fahrzeuge, nicht vorliegen. Auch eine Kontrolle der Prozessausführungen der anderen Partner kann nicht erfolgen, wenn keine Daten zur Verfügung stehen.

In der Bewertung der Kollaborationsmodelle ist das zu tragende Risiko der Kollaborationsteilnehmer von herausragender Bedeutung. Risiken können einen erheblichen Einfluss auf den Erfolg der Kollaborationsperformance nehmen. Liegt eine hohe Kollaborationsausprägung vor, so müssen nicht nur die Risiken der eigenen Supply Chain berücksichtigt werden, sondern auch mögliche Risiken durch die Kollaborationspartner. Dies bedeutet, dass eine ausgeprägte Kollaboration auch immer in eine Abhängigkeit führt.

## 4.2.2 Gegenüberstellung der Modelle

Durch die vorangeführten Überlegungen wird deutlich, wie stark die Unternehmen in den jeweiligen Kollaborationsmodellen miteinander kollaborieren. Diese Erkenntnis dient als erste Hilfestellung für eine Einordnung der verschiedenen Kollaborationsmodelle. Das Ziel dieses Abschnitts besteht darin, die Vorteile, Schwierigkeiten und Zusammenhänge der Kollaborationsmodelle zu ermitteln. Dabei werden die aus der Literatur abgeleiteten Ausprägungen einer gemeinsamen Ressourcennutzung aus Tabelle 4.1 um eigene Kriterien zur Bewertung der Modelle erweitert. Somit kann ein ganzheitlicher Blick auf diese Modelle sichergestellt werden, da die Kriterien der Ressourcennutzung nur einen Teilaspekt der Kollaborationsmodelle abdecken. Zunächst werden die Kriterien, welche eine Bewertung der Modelle möglich machen, systematisch hergeleitet und definiert. Im Anschluss werden sie für eine Gegenüberstellung der Modelle angewendet.

### 4.2.2.1 Erhebung von Bewertungskriterien

Die Auswahl von Bewertungskriterien und deren Ausprägungsgrad hat einen erheblichen Einfluss auf die spätere Beurteilung der Kollaborationsmodelle. Insgesamt werden acht passende Kriterien zur Bewertung der Kollaborationsmodelle verwendet. Eine Gewichtung der Kriterien wird nicht eingeführt, da diese den Nachteil der starken Subjektivität hat. Da die Kollaborationsmodelle auf eigenen Annahmen basieren und ein falscher Umgang mit den Kriterien die Ergebnisse stark verfälschen könnte, wird lediglich eine Aussage über die Tendenz der Kriteriumsausprägung in den vier Ausprägungsstufen „sehr gut“ „gut“, „mittel/neutral“ und „schlecht“ gegeben. Im Folgenden werden die einzelnen Kriterien im Detail vorgestellt. Dazu wurden sie in drei Hauptkategorien unterteilt. Die erste Katego-

rie betrachtet erneut die Ressourcennutzung. Die Kriterien zur Infrastruktur spiegeln die Verhältnismäßigkeit der Ressourcennutzung wider. Diese Kriterien wurden ergänzend zur ersten, groben Einordnung in Tabelle 4.1 erhoben, um eine tiefergehende Diskussion zu ermöglichen und einen Vergleich mit anderen Kriterien vorzunehmen. Die zweite Kategorie enthält Kriterien, welche die Modelle aus Marketingsicht prüfen. Diese Kriterien sind das Design der Fahrzeuge und das Image der Organisationen. Die dritte Kategorie bewertet die Kollaborationsmodelle unter Verwendung von allgemeinen Kriterien wie Transparenz, Erweiterbarkeit und Flexibilität.

**Personelle Infrastruktur:** Sie bezieht sich zum Großteil auf die Fahrer der Fahrzeuge oder anderes Personal, welches direkt im Kontext mit der Einführung der Kollaboration bei der Warenauslieferung eingesetzt wird. Sind die Kollaborationspartner fähig, eine optimale Personaleinsatzplanung sicherzustellen, so nimmt das Modell einen positiven Wert an. Kann dies nicht gewährleistet werden, wird eine negative Bewertung vorgenommen.

**Physische Infrastruktur:** Sie schließt Gebäude oder Grundstücke mit ein. Bezüglich der Ausprägung der Kriterien erfolgt eine Einordnung dahingehend, ob eine zielgerichtete Ressourcennutzung der physischen Infrastruktur stattfindet. Tritt dieser Fall ein, so ist ein hoher Auslastungsgrad erreicht. Hierzu lässt sich allerdings anmerken, dass dieser Wert zwar berechnet werden kann, aber aufgrund von fehlenden Informationen auch hier lediglich eine Aussage über die Tendenz der Kriteriumsausprägung gemacht werden kann. Um die Bewertung durch das Kriterium zu vereinfachen, werden Heizkosten, Renovierungskosten, Instandhaltungskosten etc. nicht berücksichtigt.

**Laufleistung der Fahrzeuge:** Ein wichtiger Faktor zur Bewertung der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Fahrzeugnutzungsarten ist die Laufleistung. Innerhalb der Fahrzeugflotte sollte keine größere Diskrepanz vorherrschen, denn zu hohe oder zu niedrige Laufleistungen der Fahrzeuge sind nicht zweckmäßig. Ist die Zahl der absolvierten Kilometer zu hoch, so entstehen zusätzliche Wartungs- und Reparaturaufwendungen. Stehen zu viele Fahrzeuge zur Verfügung, so stellt dies ungenutztes Kapital dar. Denn ein Flottenfahrzeug hat immer den entscheidenden Nachteil, dass es auch dann Geld kostet, wenn es nicht genutzt wird. Steht es an den Wochenenden oder während der Urlaubszeit auf dem Werkgelände, so müssen Steuern und Versicherungsbeiträge trotzdem beglichen werden. Daraus folgt, dass ein mittlerer Auslastungsgrad der Fahrzeuge anzustreben ist. Wie bereits in Abschnitt 2.3.2 angemerkt, ist in Deutschland die Nutzung von Poolfahrzeugen erst ab einer 80%-igen Auslastung rentabel.

**Design der Fahrzeuge:** Werbung ist ein unverzichtbares Mittel, um die Aufmerksamkeit auf das Unternehmen zu lenken. Je größer der Aufmerksamkeitsfaktor ist, desto effektiver wirkt auch die Botschaft der Werbung. Besonders in der Distributionslogistik wird das eigene Fahrzeug bereitwillig als ein geeigneter Werbeträger verwendet. Durch eine auffällige und interessante Gestaltung der Firmenfahrzeuge können sich Unternehmen in den Fokus der öffentlichen Wahrnehmung platzieren. Das Design der Fahrzeuge spiegelt dabei auch die Unternehmensidentität wider. Wirbt das Unternehmen beispielsweise mit einer umweltschonenden Herstellung und Verpackung von Produkten, so könnte die Gestaltung des Fahrzeugs von der Natur inspiriert sein. Bei horizontalen Kollaborationen ist das De-

sign der Fahrzeuge ein sensibles Thema, da wettbewerbsrechtliche Gesichtspunkte (vgl. Abschnitt 2.3.2) eine große Rolle spielen. In der Regel versuchen die konkurrierenden Unternehmen sich durch eine Individualisierbarkeit gegenseitig voneinander abzuheben. Die Fahrzeuge der kollaborativen Tourenplanung werden jedoch mit allen beteiligten Unternehmen in Verbindung gebracht, sodass hierfür eine Lösung gefunden werden muss. Das Design der Fahrzeuge trägt zum Erscheinungsbild der Unternehmen bei, und deckt somit einen Teilaspekt des Unternehmensimages ab. Da das Fahrzeugdesign jedoch ein entscheidender Faktor bei Kollaborationen darstellt, wird dieses Kriterium getrennt vom folgenden Kriterium „Image“ betrachtet.

**Image:** Das Image eines Unternehmens spiegelt die Außenwahrnehmung der Organisation in der Öffentlichkeit wider. Es ist eine volatile Momentaufnahme und jederzeit kurzfristig veränderbar. Eine Steigerung des Images seitens der Unternehmen können durch die Durchführung von Maßnahmen wie z.B. Kampagnen erzielt werden. Dadurch können potentielle Kunden angelockt und der bereits existierende Kundenstamm stärker gebunden werden. Im Folgenden werden nur Faktoren aufgeführt, welche im direkten Kontakt zu den Prozessen der Tourenplanung und Warenauslieferung stehen. Kunden können durch eine persönliche Beziehung des Personals zum Kunden gebunden werden. Ein positiver Marketingeffekt wird erzielt, wenn die Mitarbeiter der Unternehmen das Image des Unternehmens selbst ausstrahlen. Dies kann durch das Verhalten, das Auftreten und die Kleidung des Personals umgesetzt werden. Vertritt ein Mitarbeiter jedoch gleichzeitig mehrere Unternehmen, so gestaltet sich die Umsetzbarkeit schwierig oder sie kann sogar zu Konflikten führen. Die Einhaltung von avisierten Lieferzeitfenstern stellt eine erhebliche Herausforderung im Distributionsmanagement dar. Ein gutes Image wird erzielt, wenn die Erwartungen der Kunden erfüllt werden. Die Kundenzufriedenheit spiegelt auch die Qualität der gelieferten Waren wider und ist somit wie die Termintreue ein entscheidender Einflussfaktor zur Bewertung der Distributionsausführung. Im besten Fall ist der Kunde sehr zufrieden und die Dienstleistung übertrifft seine Erwartungen, beispielsweise durch die präzise Verwirklichung der angekündigten Ankunftszeit bei einer gleichzeitig hohen Qualität der Waren. Unzufriedene Kunden buchen die Dienstleistung nicht wiederholt. Darüber hinaus wurde bereits bestätigt, dass sich ein Umweltbewusstsein positiv auf das Ansehen von Unternehmen auswirkt (vgl. Abschnitt 3). Ist die Kollaboration im höchsten Sinne ausgeprägt (vgl. Tabelle 4.1), hat dies ebenfalls positive Effekte auf das Image der Kollaborationsteilnehmer.

Die nächsten drei Kriterien sind grundsätzliche Faktoren, welche die Kollaborationsmodelle ganz im Allgemeinen bewerten.

**Transparenz:** Eine hohe Transparenz spiegelt eine gute Klarheit bei der Vorgehensweise der Kollaborationen wider. Des Weiteren macht es deutlich, wie gut die Kollaborationsteilnehmer die Prozesse und Ressourcen überblicken. Dieser Überblick wird benötigt, um eine hohe Qualität der Prozesse zu erzielen. Nur durch eine hohe Transparenz kann eine Akzeptanz durch die Kollaborationsteilnehmer erreicht werden. Neben der Transparenz spielt die Erweiterbarkeit eine wichtige Rolle bei der Beurteilung der Kollaborationsmodelle.

**Erweiterbarkeit:** Durch dieses Kriterium lassen sich Aussagen darüber machen, inwieweit das Modell eine gute Ausgangsbasis für zukünftige Erweiterungen darstellt. Da die vorgestellte Art der Kollaboration von Unternehmen eine neue Vorgehensweise in der Distribution von Waren darstellt, ist die Annahme realistisch, dass das Kollaborationsnetzwerk noch weiter wachsen wird. Die Ausprägungsstufen dieses Bewertungskriterium spiegeln wider, ob die Integration von weiteren Organisationen einen hohen oder geringen Aufwand erfordert. Eine schlechte Erweiterung liegt beispielsweise vor, wenn eine Notwendigkeit besteht, Kompromisse bezüglich der Modellstruktur einzugehen.

**Flexibilität:** Unter Flexibilität wird in erster Linie die Fähigkeit verstanden, Anforderungsänderungen zeitnah umsetzen zu können. Das Kriterium ist wichtig, da die praktische Umsetzbarkeit des Kollaborationsmodell auch davon abhängt, ob auf schwankende Auftragslagen wie sie in der Realität oft vorherrschen, reagiert werden kann. Liegt eine geringe Flexibilität vor, so entsteht ein zusätzlicher Koordinationsaufwand zur Realisierung der Änderungen. Zusätzlich ist damit eine Erhöhung des Zeitaufwands und der Mobilisierung von zusätzlichen Ressourcen verbunden. Die Flexibilität ist eng mit der Qualität der Auftragserfüllung verbunden. Sollten während der Distributionsausführung Eilaufträge eintreffen, so kann das Unternehmen entweder spontan reagieren oder nicht. Zur Flexibilität zählt auch, wie schnell eine Anpassbarkeit der Distributionsprozesse erzielt werden kann. Eng verbunden mit der Flexibilität ist die Steuerbarkeit. Sie sagt aus, in wieweit die Unternehmen den Ablauf der Prozesse oder einzelne Aktionen selbst auslösen oder beeinflussen können. Abstimmung zwischen allen beteiligten Organisationsbereichen sind erforderlich. Eine hohe Flexibilität liegt vor, wenn eine Selbstbestimmtheit für die Betreiber der Warenlager vorliegt. Die Unternehmen sind außerdem flexibler in der Gestaltung ihrer eigenen Prozesse bezüglich der kompletten SC, z.B. wirken sich Veränderungen im Einkauf wie der Wechsel eines Bezugsgebiets oder Lieferengpässe auch auf Distribution aus. In allen Bereichen, wo zusammengearbeitet wird und eine Abhängigkeit von anderen Unternehmen vorliegt, sind Einschränkungen im Handeln nicht vollständig vermeidbar. Das Kriterium der Flexibilität ist eng mit dem Ausprägungsgrad der gemeinsamen Ressourcennutzung verbunden (vgl. Tabelle 4.1). Ist der Grad der Kollaboration stark ausgeprägt, so liegt eine geteilte Verantwortung vor und die Unternehmen müssen sich bei Entscheidungen stets abstimmen, sodass kurzfristiges Handeln erschwert wird.

Um eine Bewertung der Modelle vornehmen zu können, wurden die zuvor beschriebenen Kriterien erhoben und getrennt voneinander betrachtet. Allerdings ist anzumerken, dass ein Zusammenhang zwischen den Kriterien besteht. Beispielsweise lässt sich das Kriterium „Design der Fahrzeuge“ dem Image des Unternehmens unterordnen. Da die Gestaltung des Fuhrparks allerdings ein kontroverser Diskussionspunkt im Rahmen von Kollaborationen darstellt, wurde dieses Kriterium gesondert betrachtet. Die zuvor erläuterten Kriterien können sich außerdem gegenseitig positiv beeinflussen oder miteinander konkurrieren. Beispielsweise entsteht durch die Einstellung eines Flottenmanagers mehr Personal, dafür wird allerdings ein besserer Überblick über den Fuhrpark generiert. Ein hoher Servicelevel, d.h. die Befriedigung der Kundenaufträge in dem festgelegten Zeitrahmen, wird durch eine hohe Flexibilität erreicht. Ist der Servicelevel gering, hat dies negative Konsequenzen bezüglich des Images.

Des Weiteren fällt auf, dass lediglich weiche Kriterien zum Vergleich der Kollaborationsmodelle verwendet werden. Weiche Faktoren zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht messbar sind. Dem gegenüber stehen die harten Kriterien, durch die eine ökonomische Objektivierung mit Hilfe von Kennzahlen erreicht wird. Diese harten Faktoren wurden allerdings nicht berücksichtigt. Dies liegt darin begründet, dass hierfür realistische Datensätze nötig sind und die Kollaborationskonzepte noch detaillierter betrachtet werden müssen, um Aussagen über eventuell zusätzliche anfallende Kosten oder potentielle Einsparungen vornehmen zu können. Diese Datensätze von Unternehmen wurden allerdings weder quantitativ noch in der richtigen Menge erhoben. Zu den wichtigsten Kriterien zählen Durchlaufzeiten und Transportkosten. Diese Kriterien fließen nicht mit ein, da hierzu zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Aussagen getroffen werden können. Auch die Prozesseffizienz kann erst durch die Simulation bewertet werden. Die möglichen Kosten sind auch deshalb nicht als eigenständiges Argument aufgeführt, da sie teilweise indirekt durch die bereits aufgeführten Kriterien vertreten sind und im Rahmen der Diskussionen bereits angesprochen wurden. Ist beispielsweise die Zahl der Mitarbeiter hoch, so sind die Personalkosten ebenfalls hoch. Das Betreiben einer ineffizienten, großen Fahrzeugflotte verursacht Kosten und die Nutzung einer großen physischen Infrastruktur beinhaltet erhebliche Miet- oder Pachtkosten sowie Heiz-, Renovierungs- oder Instandhaltungskosten.

#### 4.2.2.2 Bewertungsmatrix

Die im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Kriterien werden in diesem Abschnitt herangezogen, um die verschiedenen Kollaborationsmodelle zu beurteilen. Die folgende Tabelle 4.2 stellt die Bewertungskriterien und die Kollaborationsmodelle gegenüber, unter Berücksichtigung der Wertstufen der Kriterien. Die darauf folgende Diskussion der Tabelle gibt Aufschluss über die Vor- und Nachteile sowie potentiellen Schwierigkeiten der Kollaborationsmodelle.

Die Erkenntnisse der Bewertungsmatrix dienen im folgenden Abschnitt dem Aufbau einer Argumentationslinie, welche die Vor- und Nachteile der fünf verschiedenen Kollaborationsmodelle aufzeigt und die Modelle miteinander vergleicht.

##### 1. Eigene Fahrzeugflotten

Personelle Infrastruktur: Zunächst könnte der Eindruck entstehen, dass durch das Betreiben einer eigenen Fahrzeugflotte hohe Personalkosten für die zur Verfügung stehenden Fahrer entstehen. Da die Betreiber der Warenhäuser jedoch frei über den Einsatz ihres Personals entscheiden können, könnte das Überangebot an Fahrern auf andere Bereiche des Warenlagers verteilt werden. Als Umsetzungsmöglichkeit käme das System des Jobenlargements infrage, bei dem mehrere Tätigkeiten an einem Arbeitsplatz zusammengefasst werden und so das Aufgabenfeld vergrößert wird.

Physische Infrastruktur: Der Bedarf an Gebäuden oder benötigten Stellplätzen für die Fahrzeugflotte ändert sich durch die vorgestellte Art der Kollaboration nicht, sodass dieses Kriterium als neutral bewertet wurde.



Laufleistung: Da die Betreiber der Warenhäuser lediglich ihre eigene Fahrzeugflotte überblicken müssen, kann eine ausgeglichene Verteilung der Laufleistung in hohem Maße sichergestellt werden.

**Tabelle 4.2: Bewertung der Kollaborationsmodelle**

|   | <i>Personelle Infrastruktur</i> | <i>Physische Infrastruktur</i> | <i>Laufleistung der Fahrzeuge</i> | <i>Design</i> | <i>Image</i> | <i>Transparenz</i> | <i>Erweiterbarkeit</i> | <i>Flexibilität</i> |
|---|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------|--------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| 1. Eigene Fahrzeugflotten                           | ○                               | ○                              | +                                 | -             | -            | ++                 | +                      | ○                   |
| 2. Gemeinsame Fahrzeugflotte im Fahrzeugdepot       | +                               | ○                              | +                                 | +             | +            | +                  | ○                      | ○                   |
| 3. Hybridform: Eigene und gemeinsame Fahrzeugflotte | -                               | -                              | ○                                 | +             | +            | +                  | -                      | ++                  |
| 4. Poolfahrzeuge mit zusätzlichen Fahrzeugdepot     | -                               | -                              | -                                 | +             | -            | -                  | +                      | +                   |
| 5. Poolfahrzeuge ohne zusätzliches Fahrzeugdepot    | -                               | ○                              | -                                 | +             | -            | -                  | +                      | ○                   |

**Legende:**

++ sehr gut    + gut    ○ mittel    - schlecht

Die Kriterien „Design der Fahrzeuge“ und „Image“ erreichen einen schlechten Wert. Dies liegt darin begründet, dass immer nur das Warenlager bevorteilt wird, welches die Auslieferung mit dem eigenen Fahrzeug durchführt. In diesem Fall wird das eigene Firmenlogo präsentiert und dadurch das dazugehörige Marketingkonzept unterstützt. Die Zusteller fühlen sich nur dem eigenen Unternehmen gegenüber verpflichtet und repräsentieren in ihrem Handeln lediglich die eigene Firmenpolitik. Das benachteiligt alle anderen Firmen stark, was sich negativ auf die Beurteilung des Gesamtwohls aller Kollaborationsteilnehmer auswirkt.

**Transparenz:** Das Modell gewährleistet eine stark ausgeprägte Transparenz, da unter den Kollaborationspartnern lediglich ein Austausch über die zur Verfügung stehenden freien Fahrzeugkapazitäten und den Kapazitäten der Lieferaufträge stattfindet. Alle anderen Aktivitäten des Warenlagers werden eigenständig organisiert, wodurch ein guter Überblick gewährleistet ist.

**Erweiterbarkeit:** Das Modell lässt sich gut erweitern. Da der Koordinationsaufwand bei dieser Form der Kollaboration gering ist, können neue Organisationen leicht in dieses Modell integriert werden. Bei der Tourenplanung müssen lediglich die Standorte und Auftragsdaten der neuen Warenlager berücksichtigt werden, was sich ohne Schwierigkeiten umsetzen lässt.

**Flexibilität:** In diesem Modell müssen sich die Teilnehmer nicht zwangsläufig nach den Bedürfnissen der anderen Partner richten. Ist beispielsweise zu einem bestimmten Zeitpunkt der Betrachtung in dem Modell die Kapazitätsgrenze des eigenen Fahrzeugs durch die eingegangenen Kundenaufträge schon erreicht, so besteht das Einvernehmen, die Auslieferung ohne eine Kollaboration durchzuführen. Andererseits besteht die Möglichkeit, dass die anderen Partner bereits voll ausgelastet sind, und eine Kollaboration trotz der eigenen geringen Kapazitätsauslastung nicht zustande kommt.

## 2. Gemeinsame Fahrzeugflotte im Fahrzeugdepot

**Personelle Infrastruktur:** Der entscheidende Vorteil dieses Modells liegt darin, dass sich alle Kollaborationsteilnehmer Kosten und Aufwände teilen. Zudem lässt sich der Personalbedarf bei einer gemeinsamen Fahrzeugflotte gut kalkulieren.

**Physische Infrastruktur:** Die Grundstückspreise oder Mieten für Garagen oder Parkplätze in der Stadtnähe sind zwar teurer als in weiterer Entfernung, jedoch können die Kosten ebenfalls unter allen Partnern aufgeteilt werden. Des Weiteren könnte es sein, dass die Unternehmen Garagen für ihre bestehende Fahrzeugflotte bereits besitzen, die sie in Folge der Kollaboration anderweitig untervermieten können. Die Mehrkosten durch eine zusätzliche Anmietung einer Garage oder eines Stellplatzes in Stadtnähe könnten dadurch gedeckt werden oder sogar ein Gewinn erzielt werden. Da dieser Umstand allerdings nicht belegt oder widerlegt werden kann, erfolgt eine neutrale Bewertung des Kriteriums der physischen Infrastruktur.

**Laufleistung:** Für Flottenchefs ist es wichtig die Laufleistung im Auge zu behalten, denn zu viele sowie zu wenige gefahrene Kilometer belasten das Budget unnötig. Innerhalb der Flotte sollte daher keine größere Diskrepanz entstehen. Insgesamt orientiert sich die Planung idealerweise am mittleren Auslastungsgrad. Kurzfristiger Mehrbedarf wird durch Miet- oder Carsharing-Autos abgedeckt. Da die Auslastung der Fahrzeuge in diesem Modell gut koordiniert werden kann, ist die Beurteilung des Kriteriums ebenfalls „gut“.

**Design:** Ein weiterer Vorteil der gemeinsamen Fahrzeugflotte ist, dass ein gemeinsamer Kompromiss bezüglich der Gestaltung der Fahrzeuge gefunden werden kann. Zu Beginn wird es eine Herausforderung sein, die Unternehmensphilosophien aller

Unternehmen zu vereinen. Sobald eine Einigung erzielt wird, sind alle Unternehmen gleichermaßen vom Design der Fahrzeuge bevorteilt.

Transparenz: Die Transparenz dieses Modells wird mit „gut“ bewertet. Nachdem die Vorgänge und Regeln für die Verwendung einer gemeinsamen Fahrzeugflotte definiert worden sind, werden sich die Prozesse gut überblicken lassen.

Erweiterbarkeit: Grundsätzlich ist die Möglichkeit einer Erweiterbarkeit dieses Kollaborationsmodells gegeben. Das Vorgehen ist jedoch aufwendiger als im ersten Modell „Eigene Fahrzeugflotten“, da der Koordinationsaufwand durch die Integration von weiteren Warenlagern höher ist. Absprachen und Vereinbarungen müssen getroffen werden, die von allen Vertretern akzeptiert werden. Ein weiterer Nachteil könnte dadurch entstehen, dass der Standort des Fahrzeugdepots durch die Berücksichtigung von zusätzlichen Warenlagern nicht mehr optimal ist und für die Abholung der Waren somit längere Wege entstehen. Die Bewertung dieses Kriteriums ist somit lediglich „neutral“.

Flexibilität: Bei einer Sonderbestellung, wie z.B. eine kurzfristige Großbestellung eines Restaurants, kann der Kundenauftrag möglicherweise nicht befriedigt werden. Dies ist dann der Fall, wenn kein freies Fahrzeug mehr zur Verfügung steht, da alle Fahrzeuge im Rahmen der taktischen Einsatzplanung bereits anderen gemeinsamen Touren zugewiesen wurden. Der Nachteil der gemeinsamen Fahrzeugflotte besteht somit in einer Inflexibilität, da die Unternehmen nicht spontan und ohne Absprachen die Fahrzeuge für ihre eigenen Zwecke nutzen können.

### 3. Hybridform: Eigene und gemeinsame Fahrzeugflotte

Die Hybridform bündelt zwar die Vorteile der beiden zuvor vorgestellten Modelle, aber auch deren Nachteile. Deshalb wurden bei mehreren Kriterien die Ausprägungsstufe „neutral“ vergeben, da sich die Vor- und Nachteile nivellieren. Dieser Fall tritt bei der Bewertung der personellen Infrastruktur und die Auslastung der Fahrzeuge ein. Besteht ein Wachstum der Auftragslage, so können die Warenlager durch die zusätzlichen eigenen Fahrzeuge und Fahrer darauf reagieren. Der Erfüllungsgrad bei Sonder- oder Großaufträge ist durch die geringere Anzahl an eigenen Fahrzeugen begrenzt. Die Unternehmen können sich in diesem Fall jedoch gegenseitig Hilfestellung leisten, z.B. wenn Defekte an eigenen Fahrzeugen zu Ausfällen führen.

Physische Infrastruktur: Das Kriterium der physischen Infrastruktur nimmt eine schlechte Ausprägungsstufe an, da die Gesamtkosten durch zusätzlichen Mietkosten für das Fahrzeugdepot der gemeinsamen Fahrzeugflotte steigen.

Design der Fahrzeuge: In diesem Modell wird für die gemeinsame Fahrzeugflotte ein gemeinsames Design für die kollaborativen Touren verwendet. Ergänzt wird diese Fahrzeugflotte durch die eigenen Fahrzeuge der Warenlager für Sonderbestellungen oder Eillieferungen. Das Kriterium „Design der Fahrzeuge“ nimmt deshalb einen positiven Wert an, da die Firmenlogos zu jeder Zeit der Auslieferung werbewirksam präsent sind.

Image: Die Hybridform wirkt sich positiv auf das Image der Unternehmen aus. Für die kollaborativen Touren wird das gemeinsame Personal verwendet, sodass alle Kollaborationsteilnehmer angemessen repräsentiert werden können. Für Großbestellungen wird das eigene Personal der Warenlager eingesetzt, wodurch die Kunden auch weiterhin eine persönliche Beziehung zum eigenen Personal innehaben.

Transparenz: Die Transparenz ist in diesem Kollaborationsmodell gewährleistet, da die Prozesse der Kollaboration optimal in kollaborative und unternehmensspezifische Prozesse aufgeteilt werden können. Durch den guten Überblick über die Vorgehensweisen und Verantwortlichkeiten kann eine hohe Prozessqualität erfüllt werden.

Erweiterbarkeit: Aufgrund der Existenz von teilweise gemeinsamen Fahrzeugen ist die Erweiterbarkeit vergleichbar – wie im zweiten Modell „Gemeinsame Fahrzeugflotte im Fahrzeugdepot“ – mit einem hohen Aufwand verbunden. Außerdem müssen alle Entscheidungen gemeinsam als Gruppe abgesegnet werden, was den Entscheidungsprozess enorm verlangsamt.

Flexibilität: Die Flexibilität wurde bei dieser Kollaborationsform als sehr gut beurteilt. Dies liegt darin begründet, dass sich die Betreiber der Warenlager sehr gut einem Wachstum bzw. einem Rückgang der Kundenauftragsmenge anpassen können, da eine hohe Varianz an Personal und Fahrzeugen vorhanden ist.

#### 4. Poolfahrzeuge mit zusätzlichen Fahrzeugdepot

Die Beurteilung der personellen Infrastruktur steht mit dem Kriterium der Transparenz im Zusammenhang. Ein Nachteil beim Einsatz von Poolfahrzeugen besteht in der Unübersichtlichkeit. Zwar könnten zusätzlich ein Flottenmanager und eine zugehörige Software für das Fahrzeugpoolmanagement angeschafft werden, doch dies würde zusätzliche Kosten bedeuten. Außerdem besteht trotz dieser Investitionen die Möglichkeit, dass beispielsweise die Fahrer vergessen sich elektronisch abzumelden und daraufhin fälschlicherweise der Eindruck entsteht, dass sich das Fahrzeug noch in Benutzung befindet. Als einziger Vorzug in Hinblick auf die Transparenz des Modells lässt sich das Fahrzeugdepot benennen, da dieser Stellplatz einen Fixpunkt für Fahrzeuge, welche sich nicht im Einsatz befinden, darstellt. Dieser Vorteil überwiegt jedoch nicht die genannten Nachteile des Modells, sodass die Ausprägungsstufe der Kriterien „personelle Infrastruktur“ und „Transparenz“ einen negativen Wert annimmt.

Die Kriterien „personelle Infrastruktur“ ist zusätzlich mit dem Kriterium „Laufleistung der Fahrzeuge“ eng verknüpft. Bei Poolfahrzeugen werden mehr Fahrer als Fahrzeuge benötigt, da diese durch Krankheit, Urlaub, Schulungen oder Teilzeitarbeitsmodelle nicht dauerhaft im Einsatz sind. Existieren zu viele Fahrzeuge, so bedeutet dieser Umstand ungenutztes Kapital. Die Fahrzeuge führen nur dann zu Renditen, wenn sie auch bewegt werden. Wenn sie nicht eingesetzt werden, bedeutet dies zudem zusätzliche Kosten durch Wertverluste. Zusätzlich kann es bei Poolfahrzeugen schnell zu wahrgenommenen Ungerechtigkeiten kommen, da eine ungleichmäßige Nutzung der Fahrzeuge entstehen könnte.

Physische Infrastruktur: Vergleichbar mit dem dritten Modell, der Hybridform, erweist sich ein zusätzliches Fahrzeugdepot bei einer parallelen Aufrechterhaltung der eigenen Fahrzeugstellplätze als nicht sinnvoll, da dies zu Unstimmigkeiten und zusätzlichen Kosten führt.

Design der Fahrzeuge: Ein gemeinsames Design der Fahrzeuge zur Repräsentation aller angehörigen Warenlager lässt sich bei der Nutzung von Poolfahrzeugen gut umsetzen.

Image: Mit Ausnahme von dem Design der Fahrzeuge ist die Nutzung von Poolfahrzeuge aufgrund der Argumentationslinie aus Modell 1 „Eigene Fahrzeugflotten“ nicht empfehlenswert. Es ist anzunehmen, dass sich die Fahrer nur ihrem eigenen Unternehmen gegenüber verpflichtet sehen.

Transparenz: Die Transparenz ist in diesem Modell mit schlecht zu bewerten. Bei der Existenz von Poolfahrzeugen gibt es zu viele Möglichkeiten, wie die Fahrzeuge genutzt und aufgeteilt werden können. Die Fahrzeuge können von jedem Mitarbeiter aller Unternehmen genutzt werden und entweder auf den Geländen der Warenlager oder im Fahrzeugdepot abgestellt werden. Die Prozesse sind deshalb nicht zu jeder Zeit für jeden Teilnehmer nachvollziehbar gestaltet.

Erweiterbarkeit: Im zweiten Modell „Gemeinsame Fahrzeugflotte im Fahrzeugdepot“ wurde angesprochen, dass der Standort des Fahrzeugdepots durch die Erweiterung des Modells nicht mehr optimal gewählt sein kann. Diese Problematik ist bei dem vorliegenden Modell nicht bedenklich, da das Fahrzeugdepot lediglich ein zusätzlicher Standort darstellt und die Fahrzeuge auch auf den Grundstücken der Warenlager abgestellt werden können. Somit besitzt das Fahrzeugdepot in diesem Modell einen geringeren Stellenwert. Die Erweiterbarkeit des Modells ist mit „gut“ zu bewertet, da der Fahrzeugpool ohnehin schon besteht und neue Unternehmen leicht partizipieren können.

Flexibilität: Das Kollaborationsmodell ist flexibel, da die Poolfahrzeuge für gemeinsame Touren, aber auch für die eigenen Zwecke verwendet werden dürfen. Da zudem jeder Standort über eigenes Personal verfügt, sind die Möglichkeiten zur Erfüllung von Mehraufträgen gegeben. Engpässe entstehen hier nicht.

## 5. Poolfahrzeuge ohne zusätzliches Fahrzeugdepot

Der Unterschied bei diesem Modell entsteht durch eine veränderte Bewertungen der Kriterien „physische Infrastruktur“ und „Flexibilität“. Aufgrund des Wegfalls des Fahrzeugdepots können Kosten eingespart werden, wodurch keine zusätzlichen Kosten für die physischen Infrastruktur entstehen. Dieses Kriterium hat somit eine neutrale Ausprägung. Da jedoch ein zusätzlicher Standort für die Fahrzeuge eliminiert wurde, leidet die Flexibilität des Modells.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass die Umsetzung einer effizienten Nutzung der personellen und physischen Infrastruktur die Kollaborationsmodelle vor eine große Herausforderung stellt. Im Vergleich dazu sind die Kriterien der Erweiterbarkeit und der Flexibilität

mit weniger Problemen behaftet. Die Auswertung der Bewertungsmatrix 4.2 dient nachfolgend dazu, Empfehlungen zur Umsetzbarkeit der Kollaborationsmodelle in der Praxis auszusprechen.

#### 4.2.2.3 Empfehlung für ein Modell

Die Bewertungsmatrix 4.2 unterstützt die Bewertung der verschiedenen Kollaborationsmodelle als Gesamtkonzept. Dies lässt sich leicht umsetzen, indem die verschiedenen Werte der Kriterien pro Zeile miteinander addiert werden. Hierbei zählt die neutrale Bewertung als eine Null, ein Plus wird als eine Eins gezählt und ein Minus als eine minus Eins. Aus der Bewertungsmatrix wird ersichtlich, dass die ersten drei Kollaborationsmodelle als geeignete Varianten für eine kollaborative Tourenplanung in der Praxis gelten. Sie nehmen als Gesamtergebnis die Werte 2, 5 und 2 an. Die beiden letzten Modelle haben ein negatives Ergebnis. Dies lässt sich mit dem großen organisatorischen Aufwand bezüglich der Fahrzeugeinsatzplanung und der Transparenz der Modelle begründen. Des Weiteren sind die Personalkosten zu hoch, sodass eine Umsetzung wenig Sinn ergibt. Als erstes Zwischenergebnis kann festgehalten werden, dass eine kollaborative Tourenplanung mit eigenen Fahrzeugen, einer gemeinsamen Fahrzeugflotte oder einer Mischform aus beiden für eine Umsetzung in der Praxis zu empfehlen sind. Für die konkrete Auswahl einer dieser drei Kollaborationsmodelle müssten detailliertere Informationen über die einzelnen Warenlager und deren Prozesse vorliegen. Im folgenden Abschnitt 4.3 wird ein Konzept zur Realisierung einer Simulation der Kollaborationsmodelle erarbeitet.

### 4.3 Überlegungen zur Lösungsumsetzung

Im vorherigen Kapitel wurde erläutert, welche Vor- und Nachteile die unterschiedlichen Modelle einer kollaborativen Tourenplanung beinhalten können. Das weitere Vorgehen besteht darin, die Kollaborationsmodelle in einem ereignisdiskreten Simulationsmodell ausführen zu können um verwertbare Ergebnisse zu erhalten. Das Potential für Kosteneinsparungen und Effizienzsteigerungen ist enorm. Durch die Simulation können die getroffenen Annahmen entweder bestätigt oder revidiert werden.

Zum Zeitpunkt der Betrachtung ist die Simulation einer kollaborativen Zusammenarbeit von Betreibern von Warenlagern kein Teil des Bausteinkastens des einzusetzenden Simulationswerkzeugs SimChain. Um auch zukünftig den steigenden Anforderungen der Kunden gerecht zu werden, werden die Optimierung und stetige Weiterentwicklung der Abbildungsmöglichkeiten und -qualität angestrebt. Auch sollen die zukünftigen Schwierigkeiten der Citylogistik (vgl. Abschnitt 2.1) in den Simulationsaspekt mit einbezogen werden. Anders als eine typische Routenplanungssoftware (vgl. Abschnitt 2.2), welche auf der operativen Planungsebene zum Einsatz kommt, lässt sich die Simulation der kollaborativen Tourenplanung auf der strategischen Ebene einordnen.

In Abschnitt 3.3 wurden verschiedene Lösungsansätze für die Simulation von kollaborativen Tourenplanungen vorgestellt. Zunächst wird überprüft, ob diese Lösungsansätze als Konzept für die weitere Bearbeitung der vorliegenden Problemstellung hilfreich sind.

Die Vorgehensweise in dem von Gonzalez-Feliu (2011) vorgestellten Kollaborationskonzept kann für die Lösung des Soll-Zustands (vgl. Abbildung 4.2) nicht adaptiert werden. Dieses Konzept befasst sich mit einer gemeinsamen Nutzung von Depots für die Konsolidierung von Gütern für dieselben Kunden. Der Kollaborationsansatz ist somit ein anderer, welcher mit dem Konzept eines UCCs vergleichbar ist. Dieses Konzept wurde als Lösungskonzept jedoch bereits ausgeschlossen. Ebenso verhält es sich mit den Untersuchungen von Erdmann (1999), welche die Bündelung von Waren in einem Umschlaglager betrachtet. Auch die Überlegungen zu einem Austausch von Lieferaufträgen ist nicht adaptierbar. Das Austauschprinzip soll eine Verbesserung der einzelnen Touren der Unternehmen erzielen, sodass die Touren immer noch isoliert voneinander durchgeführt werden. Für die vorliegende Problemlösung soll jedoch eine gemeinsame Tour zur Erfüllung der zusammengefassten Kundenaufträge erfolgen.

Kollaborationen auf verschiedenen Ebenen einer SC sind zwar vorherrschend in der praktischen Umsetzung, allerdings sind die Vorgehensweisen kaum wissenschaftlich untersucht und publiziert (vgl. Abschnitt 2.3). Die Analyse der Literaturrecherche aus Abschnitt 3.3 hat ergeben, dass noch keine Lösungsmöglichkeiten für die Simulation der kollaborativen Tourenplanung, so wie sie in Abbildung 4.2 skizziert ist, existieren. Im Folgenden werden deshalb eigene Überlegungen zur Lösungsumsetzung durchgeführt.

Aus dem Kontext der Aufgabe ergibt sich, dass sich die Lösungsumsetzung nur sukzessiv erarbeiten lässt. Als erste Maßnahme wird das Problem der kollaborativen Tourenplanung ausgehend von der mathematischen Formulierung in Abschnitt 2.4.1 als ein VRP-Optimierungsproblem klassifiziert und ausformuliert. Anschließend kann ein Optimierungsalgorithmus innerhalb der Simulation angewendet werden, um das Problem zu lösen. Dieser Optimierungsalgorithmus kann als eine Methode in SimChain implementiert werden, welche zu einem bestimmten Zeitpunkt innerhalb der Simulation gestartet wird. Dementsprechend besteht die erste Überlegung darin, das in Abbildung 4.2 dargestellte Vorgehen durch ein VRP auszudrücken. Dabei soll ein Fahrzeug zunächst alle Warenlager anfahren um nach und nach Waren einzuladen. Wird ein Warenlager als Depot definiert und die anderen Warenlager als seine Kunden, so führt diese Sichtweise zu einem VRP. Zusätzlich kann eine Abholung der Waren identisch zu einer Auslieferung der Waren behandelt werden, da dieser Umstand lediglich durch die Reihenfolge der Tätigkeiten bestimmt wird. Bei einer Abholung ist das Fahrzeug zunächst leer und wird nach und nach aufgefüllt. Bei einer Auslieferung der Güter ist die Reihenfolge umgekehrt. Die Anzahl der Fahrzeuge, die Kapazitäten und weitere Restriktionen werden dadurch nicht tangiert. Diese Sichtweise ist auch deshalb anwendbar, da die verschiedenen Arten eines VRPs nicht klar voneinander abgegrenzt sind. Wie in Abschnitt 2.4.1 erwähnt, kann das MDVRP in mehrere Standard-VRPs zerlegt werden oder Modelle für das VRPTW können auf das PDPTW angewandt werden. Als Ergebnis der ersten Überlegung wird ein VRP für die kollaborative Tourenplanung zwischen den einzelnen Warenlagern vor dem eigentlichen VRP zur

Endkundenbelieferung geschaltet. Im Folgenden wird eine genaue Klassifikation des zu lösenden VRPs vorgenommen. Dazu wird als Ausgangsbasis ein klassisches VRP verwendet, welches durch die Beachtung der Restriktionen erweitert und auf das vorliegende Problem angepasst wird.

Das zuvor beschriebene Problem kann auf Grundlage von Abschnitt 2.4.1 mathematisch formuliert werden. Die mathematische Formulierung macht deutlich, welche Art der in Abschnitt 2.4.1 vorgestellten VRPs vorliegt. Diese Information könnte eine Hilfestellung in der Lösungsfindung in Abschnitt 4.3 sein.

### 4.3.1 Mathematische Formulierung des kollaborativen Vehicle Routing Problems

Als Basis für die unten aufgestellten Gleichungen dient die in Abschnitt 2.4.2 aufgeführte mathematische Formulierung des Standard-VRPs. Hiervon sind alle Gleichungen, bis auf die Formulierung der Zielfunktion, auch auf das vorliegende kollaborative VRP übertragbar: Gleichung 2.4 macht zur Bedingung, dass die Kapazität des Fahrzeugs nicht überschritten werden darf. Diese Bedingung liegt auch für die kollaborative Tourenplanung vor. Kann das Einsammeln der Waren von den Warenlagern aus nicht mit einem Fahrzeug durchgeführt werden, so kommen mehrere Fahrzeuge zum Einsatz. Zusätzlich wurde in der Gleichung 2.5 die Bedingung aufgestellt, dass das Depot von allen Fahrzeugen angefahren werden kann, ein Kunde jedoch lediglich von einem Fahrzeug beliefert wird. Diese Gleichung ist für den vorliegenden Soll-Zustand aus Abschnitt 4.1 zutreffend, da keine Teillieferungen erfolgen. Gleichungen 2.6 und 2.7 legen fest, dass jeder Knoten genau einmal erreicht bzw. genau einmal verlassen wird. Des Weiteren muss die Bedingung erfüllt werden, dass keine Subtours existieren (vgl. Gleichung 2.8). Im Soll-Zustand (vgl. Abbildung 4.2) wäre eine Subtour beispielsweise eine isolierte kleine Rundtour zwischen den Warenlagern I, II und III, sodass ein Warenlager zu einem zusätzlichen Depot wird. Diese Möglichkeit muss unter allen Umständen ausgeschlossen werden, damit das entwickelte Szenario bestehend aus einem Depot und einer großen Tour vorliegt.

Allerdings müssen für das vorliegende kollaborative VRP kleinere Modifikationen der mathematischen Formulierung aus Abschnitt 2.4.2 vorgenommen werden. Zunächst muss die Zielfunktion 2.3, welche die Minimierung der Kosten vorsieht, verändert werden. Da für eine Kostenkalkulierung zum Zeitpunkt der Betrachtung die notwendigen Daten der Warenlager in der hierfür benötigten Form nicht vorliegen, besteht das Ziel des Tourenplanungsansatzes anders als in der üblichen Zielfunktionsbeschreibung darin, die Gesamtstrecke der Tour zu minimieren. Durch die Minimierung der Streckenlänge können jedoch beispielsweise Einsparungen von Treibstoffkosten, den kilometerabhängigen Wertverlusten der Fahrzeuge, Reifenabnutzungen und andere Instandhaltungskosten erwirkt werden. Somit wird indirekt eine Minimierung der Kosten vorgenommen. Die Konstante  $c_{ij}$  und die Zielfunktion 2.3 werden für die weiteren Berechnungen nicht mehr berücksichtigt. Des Weiteren werden zusätzliche Gleichungen eingeführt, welche im Folgenden beschrieben werden.



Zunächst wird die für die Streckenberechnung benötigte zusätzliche Konstante  $d$  eingeführt. Weitere zusätzliche Konstanten werden benötigt, um Bedingungen für die Einhaltung der Betriebszeiten der Warenlager formulieren zu können. In dem vorliegenden Fall der kollaborativen Tourenplanung können Warenlager als die Kunden anderer Warenlager betrachtet werden. Dieser Aspekt wird im folgendem Abschnitt 4.3.2 noch einmal aufgegriffen.

$d_{ij}$  Strecke von Kunde  $i$  zu Kunde  $j$

$$D = \sum_i \sum_j d_{ij}$$

$b_i$  Beginn der Betriebszeit des Warenlagers  $i$

$e_i$  Ende der Betriebszeit des Warenlagers  $i$

$a_i$  Aufenthaltsdauer im Warenlager  $i$

$t_i$  Ankunftszeit am Warenlager  $i$

Es gilt zu beachten, dass die Einführung der zusätzlichen Konstanten auch neue Maß- bzw. Größeneinheiten zur Konsequenz haben. Die aufgeführten Konstanten in Abschnitt 2.4.2 lassen sich allesamt in Mengeneinheiten ausdrücken. In dem vorliegenden Fall sind außerdem Längen- und Zeiteinheiten von Bedeutung. Ferner werden ergänzende Gleichungen aufgestellt: Zu minimieren ist die Zielfunktion 4.1.

$$\min D = \left( \sum_i^n \sum_j^n d_{ij} \right) \quad (4.1)$$

Die Distanzen zwischen den  $n$  Warenlagern sind in einer Distanzmatrix angegeben.

$$D = \begin{vmatrix} d_{i,j} & d_{i,j+1} & d_{i,j+2} & d_{i,j+3} & d_{i,j+4} \\ d_{i+1,j} & d_{i+1,j+1} & d_{i+1,j+2} & d_{i+1,j+3} & d_{i+1,j+4} \\ d_{i+2,j} & d_{i+2,j+1} & d_{i+2,j+2} & d_{i+2,j+3} & d_{i+2,j+4} \\ d_{i+3,j} & d_{i+3,j+1} & d_{i+3,j+2} & d_{i+3,j+3} & d_{i+3,j+4} \\ d_{i+4,j} & d_{i+4,j+1} & d_{i+4,j+2} & d_{i+4,j+3} & d_{i+4,j+4} \end{vmatrix}$$

Die Gleichungen 4.2 und 4.3 bewirken eine Berücksichtigung der Betriebszeiten der Warenlager.

$$b_i \leq t_i \quad (4.2)$$

$$e_i \geq t_i + a_i \quad (4.3)$$

Aus der mathematischen Formulierung folgt, dass die in Abbildung 4.2 dargestellte kollaborative Tourenplanung ein capacity-constrained VRP with time windows darstellt. Das entwickelte kollaborative VRP ist somit kein Spezialfall für Kollaborationen, sondern eine bestimmte Art eines VRPs, welches sich auf die kollaborative Tourenplanung übertra-

gen lässt. Die Betrachtung von Zeitfenstern führt nicht zu einem DVRP, da hierfür keine Obergrenze bezüglich der Zeitdauer festgelegt wurde.

In Bezug auf die Beschaffenheit der Fahrzeugflotte wird von einer Homogenität ausgegangen. Deshalb wurde die Art der Fahrzeugflotte in der mathematischen Formulierung nicht berücksichtigt. In der Praxis scheint diese Annahme zunächst nicht zutreffend zu sein, da die Unternehmen über verschiedene Fahrzeugarten verfügen. Für weite Distanzen, z.B. zwischen Produzent und Zentrallager, wird ein großes Fahrzeug verwendet. Für kurze Distanzen und Fahrten in der Stadt werden kleine Fahrzeuge verwendet. Da das vorliegende Problem der kollaborativen Tourenplanung allerdings nur einen Teilausschnitt der gesamten SC betrachtet, und zwar lediglich die Endstufe der SC, werden in diesem Fall nur kleine Fahrzeuge verwendet. Außerdem wird aus Gründen des Marketings, wie in Abschnitt 4.2 bereits dargelegt, stets mit der gleichen Fahrzeugart operiert. Somit ist die Annahme einer homogenen Fahrzeugflotte für den vorliegenden Anwendungsfall berechtigt. Des Weiteren findet keine Begrenzung bezüglich der Anzahl der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge statt. Dies ist darin begründet, dass in der vorliegenden Arbeit ein Konzept der kollaborativen Tourenplanung ausgearbeitet wird, welches das Potential dieser Art von Zusammenarbeit aufzeigen soll. Aus diesem Grund findet zuerst eine Planung der Touren fest und die potentiellen Kollaborationsteilnehmer werden basierend auf diesen Annahmen ihre Ressourcen festlegen.

Auch die Beschaffenheit der Güter findet in der mathematischen Formulierung keine Berücksichtigung, da die Annahme von homogenen Gütern getroffen wird. Ein Grund hierfür ist, dass lediglich die gleiche Art der Ladehilfsmittel für den Transport an die Endkunden betrachtet werden, da diese für die Kapazitätsplanung von Bedeutung sind.

### 4.3.2 Umsetzung ausgewählter Kollaborationsmodelle

Die Basis für die simulationstechnische Umsetzung der vorgestellten Kollaborationsmethoden bilden die in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen Lösungsverfahren des VRPs. Diese klassischen, problemunabhängigen Heuristiken lassen sich gut auf verschiedene Problemstellungen übertragen. Je nach Anwendungsfall sind aber nicht alle Algorithmen zweckmäßig. Im weiteren Verlauf wird ein geeignetes Optimierungsverfahren zur Lösung des ausgearbeiteten VRPs ausgewählt. Das Sweep-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.4.2) eignet sich für die Lösung von Szenarien, bei denen das Depot zentral platziert ist, sodass es für die mathematische Berechnung in den Ursprung eines Koordinatensystems gelegt werden kann. Für das vorliegende CVRPTW kann allerdings keine Aussage darüber gemacht werden, ob diese Bedingung zu jeder Zeit erfüllt ist. Es kann durchaus der Fall eintreten, dass sich das Depot am Rand des Netzwerks aus Warenlagern befindet. Da der Optimierungsmethode für alle erdenklichen Szenarien gelten soll und eine stetige individuelle Überprüfung der einzuhaltenden Bedingungen zu aufwendig ist, wird dieses Lösungsverfahren im weiteren Verlauf der Überlegungen zur Lösungsumsetzung ausgeschlossen. Die Nächster-Nachbar-Heuristik (vgl. Abschnitt 2.4.2.1) kann ebenfalls ausgeschlossen werden. Durch vielzählige Forschungstätigkeiten wurde bereits eruiert, dass dieses Verfahren diverse Schwächen offenbart und daher die Qualität eher als schlecht bezeichnet werden

kann. Für die weitere Betrachtung der Lösungsumsetzung finden somit das Savings-Verfahren und die Insertions-Heuristik Beachtung. Der Nachteil des Savings-Algorithmus ist die Tatsache, dass auch negative Savings entstehen können (vgl. Abschnitt 2.4.2.1). Da in der computergestützten Berechnung des Algorithmus jedoch festgelegt werden kann, dass nur positive Savings zu berücksichtigen sind, ist dieses Nachteil für die Simulation nicht relevant.

Der entscheidende Vorteil bei der Verwendung eines Savings-oder Insertions-Verfahrens mit einem anschließenden k-opt Verbesserungsverfahren ist die Tatsache, dass diese Lösungsansätze im VRP-Baustein von SimChain bereits für die Tourenplanung zur Endkundenbelieferung umgesetzt wurden (vgl. Abschnitt 3.4.2). Das Insertions-Verfahren wird jedoch aufgrund der schlechten Performance nicht mehr angewendet. Dieser Grund spricht für eine Wahl des Savings-Algorithmus. Dieser Algorithmus muss nicht neu programmiert werden, denn die Berechnungsvorschrift wird komplett aufrechterhalten. Dies liegt darin begründet, dass eine datengetriebene Simulation zum Einsatz kommt (vgl. Abschnitt 3.4.1), wodurch sich eine Implementierung der kollaborativen Tourenplanung in dem Simulationswerkzeug SimChain mit wenig Aufwand umsetzen lässt. Für die Implementierung der kollaborativen Tourenplanung müssen lediglich die Eintragungen im Datenmodell angepasst werden. Die Daten, welche für die VRP-Methode benötigt werden, finden sich als Entitäten und Attribute der Entitätstypen `Route` und `LocationsOnRoute` wieder. Um den Ist-Zustand aus Abschnitt 4.1 zu simulieren, sehen die Entitätstypen `Route` und `LocationsOnRoute` wie folgt aus (vgl. Abbildungen 4.3 und 4.4).

|         |     |                          |     |
|---------|-----|--------------------------|-----|
| idRoute | ... | LocationsStartEndOfRoute | ... |
| 1       | ... | Warenlager I             | ... |
| 2       | ... | Warenlager II            | ... |
| 3       | ... | Warenlager III           | ... |
| 4       | ... | Warenlager IV            | ... |

Abbildung 4.3: Entitätstyp `Route` im Ist-Zustand

Die Generierung des Soll-Zustands wird im folgenden Abschnitt 4.3.2 aufgezeigt. Der Algorithmus kann zur Umsetzung aller der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Kollaborationsmodelle verwendet werden. Beispielhaft erfolgt die Beschreibung der Lösungsumsetzung anhand der ersten beiden Kollaborationsmodelle, da diese in Abschnitt 4.2.2.3 eine sehr gute Beurteilung erfahren haben.

**Umsetzung Modell „Gemeinsame Fahrzeugflotte im Fahrzeugdepot“** Da die Endkunden nur noch von einem Depot aus beliefert werden und nicht mehr von allen Warenlagern aus, existiert nur noch das Fahrzeugdepot als Start- und Endpunkt der Route. Zusätzlich werden zwei Routen definiert, welche sich in der Abbildung 4.5 wiederfinden. Für die kol-

|            |         |     |
|------------|---------|-----|
| Location   | idRoute | ... |
| Endkunde A | 1       | ... |
| Endkunde B | 1       | ... |
| ...        | ...     | ... |
| Endkunde F | 2       | ... |
| Endkunde G | 2       | ... |
| ...        | ...     | ... |
| Endkunde K | 3       | ... |
| Endkunde L | 3       | ... |
| ...        | ...     | ... |
| Endkunde P | 4       | ... |
| Endkunde Q | 4       | ... |
| ...        | ...     | ... |

Abbildung 4.4: Entitätstyp LocationsOnRoute im Ist-Zustand

|         |     |                          |     |
|---------|-----|--------------------------|-----|
| idRoute | ... | LocationsStartEndOfRoute | ... |
| 1       | ... | Fahrzeugdepot V          | ... |
| 2       | ... | Fahrzeugdepot V          | ... |

Abbildung 4.5: Entitätstyp Route im Soll-Zustand

laborative Tourenplanung dieses Kollaborationsmodells müssen die Entitätstypen `Route` und `LocationsOnRoute` wie folgt belegt werden:

|                |         |     |
|----------------|---------|-----|
| Location       | idRoute | ... |
| Warenlager I   | 1       | ... |
| Warenlager II  | 1       | ... |
| Warenlager III | 1       | ... |
| Warenlager IV  | 1       | ... |
| Endkunde A     | 2       | ... |
| Endkunde B     | 2       | ... |
| Endkunde C     | 2       | ... |
| Endkunde D     | 2       | ... |
| Endkunde E     | 2       | ... |
| ...            | ...     | ... |

**Abbildung 4.6: Entitätstyp `LocationsOnRoute` im Soll-Zustand**

Die erste Route stellt das Einsammeln der Waren bei allen Warenlagern dar, die zweite Route ist die übliche Endkundenbelieferung. Somit werden zwei verschiedene Kundengruppen definiert, welche zwei unterschiedlichen Routen zugewiesen werden. Die Konstruktion einer kollaborativen Tour wird auf Grundlage der Berechnungsvorschrift aus Abschnitt 2.4.2.1 vorgenommen. Die Vorgehensweise lässt sich anhand der folgenden beispielhaften Abbildung 4.7 nachvollziehen. Abgebildet sind vier Warenlager und ein Fahrzeugdepot, welches stadtnah lokalisiert ist. Im Folgenden wird die Annahme getroffen, dass die Warenlager Kunden darstellen, welche vom Depot aus angefahren werden.

Im ersten Bild ist die Initialisierungsphase des Savings-Algorithmus abgebildet, in welcher vier Pendeltouren vom Fahrzeugdepot zu den einzelnen Warenlagern gebildet werden. In den folgenden Bildern zwei und drei erfolgt die schrittweise Zusammenlegung der Touren zwischen Kundenpaaren. Im vierten Bild ist die Bildung der Tour abgeschlossen. Anschließend kann die Tourenplanung der Endkundenbelieferung ausgehend vom Depot initialisiert werden. Wie bereits erwähnt, ist diese Planung jedoch schon im Simulationsbaustein umgesetzt und muss daher nicht weiter erläutert werden (vgl. Abschnitt 3.4.2). Der Algorithmus wird innerhalb der betrachteten Periode nur einmal durchlaufen. Je nach Auftragslage der Warenlager wird sich die Route in den verschiedenen Perioden verändern, da es beispielsweise dazu kommen kann, dass ein Warenlager für die betrachtete Periode keine Kundenaufträge erfüllen muss und dieses Lager somit nicht angefahren wird.

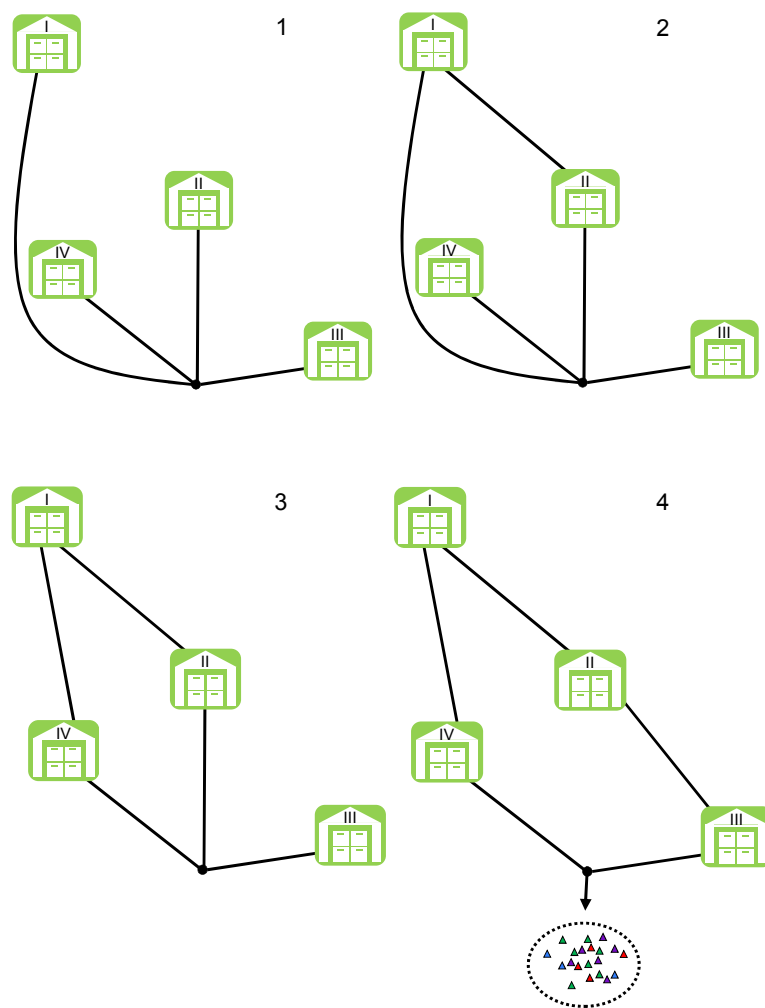


Abbildung 4.7: Konstruktion einer Rundtour mit dem Savings-Verfahren

Der demonstrierte Lösungsansatz ist nur zweckmäßig, wenn die Warenlager außerhalb der Stadt angesiedelt sind und das Fahrzeugdepot am Stadtrand platziert ist. Die Endkunden sollten sich zentriert im Stadtkern befinden. Wäre beispielsweise ein Warenlager auch am Stadtrand angesiedelt und die Kunden des Warenlagers östlich der Stadt verteilt, dann würde sich eine Kollaboration für dieses Warenlager nicht lohnen. Für die Auslieferung bestünden nur kurze Strecken und die Wege zu den anderen Warenlagern wären zu lang.

**Umsetzung Modell „Eigene Fahrzeugflotte“** Im ersten Kollaborationsmodell kommt jedes Warenlager als Depot infrage. Deshalb muss in jeder betrachteten Periode der erläuterte Lösungsansatz für jedes Warenlager durchlaufen werden. Anschließend erfolgt eine Bestimmung des Warenlagers, von dem aus die kürzeste Gesamtroute erwirkt werden kann. Im Datenmodell müssen deshalb identisch zur Abbildung 4.5 alle Warenlager als `LocationsStartEndOfRoute` eingetragen werden. Der Entitätstyp `LocationsOnRoute` entspricht allerdings der Abbildung 4.6, da die Warenlager für die kollaborative Tour als `Locations` der `Route` zugeordnet werden müssen. Der Nachteil der Umsetzung dieses Kollaborationsmodells liegt in der längeren Simulationslaufzeit, da der Algorithmus für jedes Warenlager durchgeführt werden muss, werden so viele Iterationen wie Warenlager benötigt.

Exemplarisch wird die spezifische Umsetzung des Modells „Gemeinsame Fahrzeugflotte im Fahrzeugdepot“ am Beispiel des Simulationstools SimChain in Kapitel 5 erörtert.

## **5 Vorschlag für die Umsetzung eines kollaborativen Tourenplanungsansatzes im Rahmen eines Fallbeispiels**

Die spezifische Lösungsumsetzung wird nachfolgend unter Verwendung des zweiten Kollaborationsmodells „Gemeinsame Fahrzeugflotte im Fahrzeugdepot“ an einem Fallbeispiel dargestellt. Das Beispiel wurde durch Recherchetätigkeiten und eine darauffolgende Datenerhebung selbstständig konstruiert, um ein möglichst realitätsnahes Szenario zu erschaffen. In Abschnitt 4.3.2 wurden bereits die Vorteile der Umsetzung des zweiten Kollaborationsmodells erläutert. Ein entscheidender Vorteil ist die Tatsache, dass der kollaborative Tourenplanungsalgorithmus nur einmal für die zu betrachtende Planungsperiode durchlaufen werden muss. Deshalb wurde ein Beispieldatensatz für einen Tag erhoben. Das Fallbeispiel hat das Ziel, die einzelnen Schritte der Lösungsumsetzung anhand von spezifischen Belieferungsprozessen aufzuzeigen und zu beschreiben. Darüber hinaus sollen neben den einzelnen Lösungsschritten auch kritische Punkte der Lösungsumsetzung diskutiert werden. Zur Berechnung des Fallbeispiels werden bestimmte Annahmen getroffen, die sich aus der Fachdisziplin der Logistik ergeben.

### **5.1 Vorstellung des Fallbeispiels**

Zur Konstruktion eines Fallbeispiels wurde der Fokus auf die Lebensmittelbranche gelegt. Als Beispiel eignet sich die Belieferung frei Haus von Online-Supermärkten, denn an diesem Beispiel lässt sich der in Abschnitt 4.1 vorgestellte kollaborative Tourenplanungsansatz gut anwenden. Der Hintergrund hierfür ist, dass die Online-Supermärkte Wettbewerber in derselben Branche auf der gleichen Supply-Chain-Stufe sind, wie in Kapitel 1 beschrieben. Ein weiterer Grund sind die geeigneten Standorte der Warenlager. Die Online-Supermärkte beliefern nicht aus einem Zentrallager. Hierfür werden kleinere Lager verwendet, welche vordergründig für die Belieferung der lokalen Supermärkte zuständig sind. In diesen Lagern werden auch die Warenkörbe für die Onlinekunden zusammengestellt. Unabhängig vom Unternehmen sind die Warenlager zum Großteil außerhalb der Stadt, aber trotzdem noch stadtnah angesiedelt. Würden sich die Warenlager in der Stadt befinden, so wäre eine Kollaboration nicht ratsam, denn in diesem Fall könnten die Wege für das Einsammeln der Güter innerhalb der Warenlager länger als die eigentliche Belieferung der Endkunden sein. Ein weiteres Argument ist, dass der Großteil der Online-Supermärkte die Belieferungen an die Endkunden selbst durchführt. Da Subunternehmen in dieser Betrachtung bereits aus-



geschlossen wurden (vgl. Abschnitt 4.2.1), kommen nur Unternehmen für Kollaborationen infrage, die ihre Transporte nicht fremdvergeben.

Um die in Abschnitt 4.3 vorgestellte Lösungsumsetzung durchführen zu können, müssen zunächst Standortdaten erhoben werden. Als Stadt wurde Berlin ausgewählt. Die Branche der Lebensmittelbelieferungen frei Haus ist in Deutschland noch relativ neu. Berlin wurde deshalb gewählt, weil dort viele Anbieter bereits Lieferangebote offerieren. Die folgende Tabelle 5.1 fasst die Ergebnisse der Recherchetätigkeiten zusammen.

**Tabelle 5.1: Auflistung der Warenlager**

| Warenlager                              | Position            | Online-Lebensmittelanbieter | Organisation der Distribution     |
|---|---------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| ALDI GmbH & Co                          | nördlich von Berlin | nicht aktiv                 | –                                 |
| allyouneedfresh.de                      | Kassel              | aktiv                       | Paketdienstleister                |
| Food.de                                 | lokal in Berlin     | aktiv                       | selbst                            |
| Die Bringmeister von Kaiser's Tengemann | lokal in Berlin     | aktiv                       | selbst                            |
| Edeka24.de                              | Offenburg           | aktiv                       | Paketdienstleister oder Spedition |
| Lebensmittel.de                         | Bor (Tschechien)    | aktiv                       | Paketdienstleister oder Spedition |
| Lidl                                    | südlich von Berlin  | nicht aktiv                 | –                                 |
| MyTime.de                               | nicht bekannt       | aktiv                       | Paketdienstleister                |
| Netto Marken-Discount AG & Co. KG       | nördlich von Berlin | nicht aktiv                 | –                                 |
| real,- SB-Warenhaus GmbH (Metro Group)  | östlich von Berlin  | aktiv                       | selbst                            |
| Rewe Markt GmbH                         | nördlich von Berlin | aktiv                       | selbst                            |

In der ersten Spalte der Tabelle sind alle Lebensmittel-Einzelhandelsunternehmen aufgelistet, welche für eine weitere Betrachtung von Interesse sind. Die zweite Spalte gibt die ungefähren Standorte der Warenhäuser wider.<sup>1</sup> Zusätzlich wurde für die Lebensmittel-Unternehmen ermittelt, ob diese auch als Online-Supermarkt für die Bestellung von Waren vertreten sind. Die Ergebnisse sind in der dritten Spalte der Tabelle abgebildet. Wie bereits in Kapitel 4 geschildert, spielen externe Transportdienstleister in dem erarbeiteten Kollaborationsmodell keine Rolle. Im Zuge dessen wurde ermittelt, ob dieser Fall für die Unternehmen zutreffend ist. Die Informationen wurden in der Spalte „Organisation der Distribution“ festgehalten. Unternehmen, die ihre Ware über Paketdienstleister oder Speditionsunternehmen ausliefern lassen, werden aus der Analyse ausgeschlossen. Des Weiteren existieren zwei Onlineanbieter für die Lebensmittelbelieferung in Berlin, welche

<sup>1</sup>Diese Annahmen gehen aus der schriftlichen Korrespondenz mit den Anbietern der Supermärkte hervor und sind auf Nachfrage in der ITPL-Handbibliothek erhältlich

über ein eigenes Warenlager und eigene Auslieferungsfahrzeuge verfügen. Das Food.de-Team betreibt ein Warenlager in Berlin-Lichtenberg in der Rhinstraße. Auch das Lager von „Die Bringmeister von Kaiser’s Tengelmann“ ist lokal in Berlin angesiedelt.

Aus der Tabelle ergibt sich, dass insgesamt acht Online-Supermärkte in Berlin aktiv sind. Werden allerdings die Standorte und die Organisation der Distribution berücksichtigt, so kommen lediglich die Unternehmen Real und Rewe für eine weitere Betrachtung infrage. Da diese zwei Standorte zur Konstruktion eines Fallbeispiels nicht ausreichend sind, wurden zusätzlich die Unternehmen Netto und Aldi berücksichtigt. Dies ist darin begründet, dass sich die Standorte ihrer Warenlager nördlich von Berlin befinden und somit alle vier Warenlager dicht beianander angesiedelt sind. Der Umstand, dass die Unternehmen als Online-Lebensmittelanbieter noch nicht aktiv sind, spielt für ein Fallbeispiel keine Rolle, da sie die Dienste künftig noch anbieten könnten. In Tabelle 5.2 sind die konkreten Adressen der vier ausgewählten Warenlager abgebildet. Diese Information dient als Basis für die Erstellung der benötigten Distanzmatrix.

**Tabelle 5.2: Lokalisierung der ausgewählten Warenlager**

| Warenlager  | Straße             | Ort                  |
|---|--------------------|----------------------|
| I Warenlager Rewe Markt GmbH                          | Rewestraße 1       | Berlin-Oranienburg   |
| II Warenlager Netto Marken-Discount AG                | Arkenberger Damm 1 | Berlin-Buchholz      |
| III Warenlager real,- SB-Warenhaus GmbH (Metro Group) | Hönower Chaussee   | Altlandsberg         |
| IV Warenlager Aldi GmbH                               | Eichenborndamm 141 | Berlin-Reinickendorf |

Zusätzlich wird ein Fahrzeugdepot V eingeführt, welches für dieses Fallbeispiel in der Alexandrinenstraße in Berlin platziert wird. Dieser Ort wurde ausgewählt, da er sich relativ nah zu den Warenlagern, aber besonders nah an Berlin befindet. Mit Rücksichtnahme auf die Arbeitsweise des Simulationswerkzeugs SimChain müssten die Standorte mit geographischen Koordinaten (Längen- und Breitengrade) angegeben werden. Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Standorte sind allerdings die Adressangaben der Warenlager abgebildet. Die ungefähre Lokalisierung der Warenlager ist in der folgenden Abbildung 5.1 grafisch dargestellt. Die Entfernungsangaben wurden als durchschnittliche Werte aus den Angaben des Online-Kartendienstes Google Maps berechnet. In SimChain werden die Abstände in Luftlinienentfernung berechnet. Da sich im späteren Verlauf dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 5.2) diese Angaben für die Tourenplanung in der Stadt als nicht zweckmäßig ergeben, werden die Daten schon jetzt auf Grundlage von existierenden Straßennetzen erhoben.

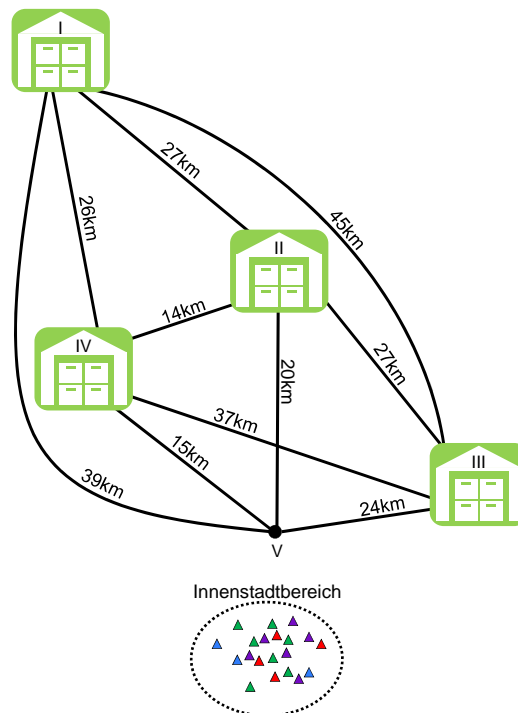


Abbildung 5.1: Darstellung der Lokalisierung der Warenlager

### 5.1.1 Annahmen

In diesem Abschnitt werden Annahmen zur Berücksichtigung der Fahrzeuge, Güter, Kapazitäten und Zeiten getroffen, welche für die weitere Erstellung des Tourenplans von Bedeutung sind. In Abschnitt 4.3.1 wurde die Diskussion einer homogenen Fahrzeugflotte bereits argumentativ dargelegt und somit abgeschlossen. In Abschnitt 4.2.1 wurde bereits aufgeführt, dass die Zweckmäßigkeit der Übertragung des Konzepts der Güterkonsolidierung von der betrachteten Branche und den Kundencharakteristiken abhängig ist. In dem vorliegenden Fallbeispiel ist eine Konsolidierung der Güter nicht zweckmäßig. Eine Begründung hierfür ist, dass es sich bei den Endkunden um private Haushalte handelt, welche haushaltsübliche Mengen bestellen. Außerdem bieten die Online-Supermärkte ein ähnliches Angebot der Produkte an, sodass in wenigen Einzelfällen bei mehreren Supermärkten gleichzeitig bestellt werden kann. Des Weiteren wurde bereits festgelegt, dass homogene Güter vorliegen. Diese Annahme wird im Folgenden begründet:

Der Zeitrahmen des Lieferservices an die Endkunden beträgt wenige Stunden. Dabei werden die bestellten Waren in speziellen Isolierboxen transportiert. Da der Fokus dieses Beispiels auf der Umsetzung einer kollaborativen Tourenplanung liegt, muss nicht jeder Artikel für sich betrachtet werden. Für die Kapazitätsberechnung ist es ausreichend, lediglich die Transportbehälter der Lebensmittel zu betrachten, welche zu allen Betrachtungszeitpunkten die gleiche Größe und Eigenschaften aufweisen. Somit kann die Annahme einer Homogenität der Güter getroffen werden. Bei gefrorenen Produkten müssen zwar zusätzlich spezielle Kühlmaterialien verwendet werden, dies tangiert jedoch den innerbetrieblichen Prozess der Verpackung und wirkt sich nicht auf die Beschaffenheit der Box aus. Jedem Anbieter wurden fünf Kundenaufträge übermittelt, wodurch im Stadtkern 20 Kunden beliefert werden müssen. Jeder Kunde bestellt im Durchschnitt Waren für zwei

Kisten, wodurch eine Gesamtnachfrage von 40 Kisten entsteht. Die Nachfrage verteilt sich für einen zufällig ausgewählten Tag wie folgt auf die Warenlager:

- I=10
- II=8
- III=18
- IV=4

Im Folgenden werden Annahmen bezüglich der zeitlichen Kapazitäten getroffen: Die Beladungszeit des Auslieferungsfahrzeugs pro Kiste beträgt zwei Minuten. Somit ergibt sich eine Aufenthaltsdauer in den jeweiligen Lagern zu:

$$\text{Anzahl Kisten} \cdot 2 \text{ Minuten.}$$

Zusätzlich wird pro Lager eine Zeitspanne von 10 Minuten addiert, welche durch das Abzeichnen von Papieren usw. entsteht. Somit ergibt sich eine Aufenthaltsdauer pro Lager wie folgt:

- I=30 Min.
- II=26 Min.
- III=46 Min.
- IV=18 Min.

In den folgenden Berechnungen werden außerdem die Betriebszeiten der Warenlager beachtet. Um die mögliche Durchführung einer Kollaboration realitätsnah und herausfordernd zu gestalten, wurden schmale Zeitfenster von lediglich 3,5 Stunden gewählt. Außerhalb dieser Zeiten dürfen die Fahrzeuge die Warenlager nicht anfahren, um Güter zu liefern oder abzuholen. Zur besseren Übersicht sind in der folgenden Tabelle 5.3 die Betriebszeiten der Warenlager, die Bestellungen der Kunden und die daraus resultierende Aufenthaltsdauer in den Warenlagern zusammengefasst.

**Tabelle 5.3: Übersicht über Einzelheiten der Warenlager**

| Warenlager | Betriebszeit  | Bestellungen (in Kisten) | Aufenthalt (in Min.) |
|------------|---------------|--------------------------|----------------------|
| I          | 11:30 – 15:00 | 10                       | 30                   |
| II         | 11:30 – 15:00 | 8                        | 26                   |
| III        | 11:30 – 15:00 | 18                       | 46                   |
| IV         | 11:30 – 15:00 | 4                        | 18                   |

Die Fahrdauer zwischen den Lagern wurde ebenfalls als durchschnittlicher Wert aus den Angaben des Online-Kartendienstes Google Maps berechnet und wird in Form einer Matrix in Tabelle 5.4 abgebildet.

**Tabelle 5.4: Fahrzeiten zwischen den Warenhäuser (in Min.)**

|     | I | II | III | IV | V  |
|-----|---|----|-----|----|----|
| I   |   | 24 | 34  | 25 | 39 |
| II  |   |    | 28  | 25 | 32 |
| III |   |    |     | 39 | 40 |
| IV  |   |    |     |    | 27 |
| V   |   |    |     |    |    |

Die Fahrzeiten zwischen den Warenlagern sind relativ gleichverteilt. Die kürzeste Fahrzeit beträgt 24 Minuten von Warenlager I zu Warenlager II. Die längste Zeit wird für die Verbindung zwischen Warenlager III und dem Fahrzeugdepot V benötigt (40 Minuten). Diese ungefähre Gleichverteilung der Fahrzeiten ist ein positiver Aspekt für eine Kollaboration. Würde ein Warenlager von allen anderen Warenlager weit entfernt liegen und beispielsweise stets über eine Stunde Fahrzeit benötigen, so wären die Betreiber der anderen Warenlager wahrscheinlich nicht zur Kollaboration bereit, da das weit entfernte Warenlager den Großteil an Kosten verursachen würde und auch für die Zeitplanung ein Risiko darstellt. Denn je länger eine Strecke ist, desto mehr Verzögerungen können auftreten. Im Folgenden werden Annahmen bezüglich der Fahrzeugkapazitäten getroffen:

Den verwendeten Lebensmittelboxen werden exemplarisch eine jeweiligen Größe von L 480 mm  $\times$  B 350mm  $\times$  H 255mm zugrunde gelegt. Damit die Box noch handhabbar ist, wird ihr ein Gewicht von 10 kg unterstellt. Dieser Wert ist realistisch, da es sich im Durchschnitt um Mischware handelt. In der Lebensmittelindustrie werden die Kisten innerbetrieblich oder zur Auslieferung in einem Lastkraftwagen (LKW) in Gitterrollwagen verstaut. Ein handelsüblicher Gitterrollwagen besitzt die Innenmaße L 540mm  $\times$  B 800mm  $\times$  H 1360mm und die Außenmaße L 600mm  $\times$  B 800mm  $\times$  H 1520mm (Mecalux Logismarket 2016).

Zur Auslieferung der bestellten Ware im Stadtbereich kommen ein Transporter oder ein LKW (7,5t) infrage. Die Lademaße eines Transporters betragen L 410cm  $\times$  B 180cm  $\times$  H 175cm und besitzen eine Nutzlast von 1200kg. Ein LKW (7,5t) bietet ein Ladevolumen von L 610cm  $\times$  B 240cm  $\times$  H 235cm mit einer Nutzlast von 2400kg (Langer-Transport-Service 2016).

In einem Transporter können somit 132 Kisten untergebracht werden. Dies geht aus der Berechnung hervor, dass sich in dem Transporter  $2 \times 11 \times 6$  Kisten unterbringen lassen, sodass immer noch ein Mittelgang von 80cm und genug Puffer in der Höhe vorhanden sind. Bezüglich der Nutzlast liegt die Kapazitätsgrenze der Boxen allerdings schon bei 100 Kisten, wenn ein Eigengewicht pro Kiste von zwei Kilogramm berücksichtigt wird. Der LKW kann zwar durch den Transport der Gitterrollwagen insgesamt circa 300 Boxen transportieren, dies ist jedoch durch die Zeitrestriktionen nicht umsetzbar. Des Weiteren könnte das Rangieren im Stadtverkehr mit einem LKW (7,5t) eingeschränkt sein.

Aus den vorangestellten Überlegungen lässt sich ableiten, dass die Tour mit einem Fahrzeug befriedigt werden kann. Selbst wenn sich die Anzahl der Kunden in der Stadt fast verdoppeln würde, könnte der Bedarf durch die Nutzung eines Fahrzeugs gedeckt wer-

den. Die Einhaltung der Kapazität muss in den folgenden Berechnungen daher nicht mehr berücksichtigt werden.

### 5.1.2 Planung von Touren und Routen

In diesem Abschnitt wird durch die Verwendung der erhobenen Standortdaten im Detail aufgezeigt, wie die kollaborative Tourenplanung mit Hilfe der ausgewählten Lösungsverfahren durchzuführen ist.

**Savings-Verfahren** Im weiteren Verlauf wird das in Abschnitt 2.4.2.1 vorgestellte Savingsverfahren durchgeführt. Die Distanzmatrix der Warenhäuser wird in der Matrix 5.5 dargestellt. In dem vorliegenden Fallbeispiel entspricht beispielsweise die Strecke von Depot V zu Warenlager II die der von Warenlager II zum Depot V. Dies bedeutet, dass ein symmetrisches TSP vorliegt (vgl. hierzu die Erläuterungen in Abschnitt 2.4.1), weshalb lediglich eine obere Dreiecksmatrix erstellt werden muss.

**Tabelle 5.5: Distanzmatrix der Warenhäuser (in km)**

|     | V | I  | II | III | IV |
|-----|---|----|----|-----|----|
| V   |   | 39 | 20 | 24  | 15 |
| I   |   |    | 27 | 45  | 26 |
| II  |   |    |    | 27  | 14 |
| III |   |    |    |     | 37 |
| IV  |   |    |    |     |    |

Zu Beginn wird die Annahme getroffen, dass vom Fahrzeugdepot aus vier Touren starten, die zu den Warenlagern hin- und wieder zurückfahren. Die summierte Fahrstrecke dieser Pendeltouren beträgt  $D := 196\text{km}$ . Nach der Berechnungsvorschrift des Savingsverfahrens (vgl. Abschnitt 2.4.2.1) wird im folgenden eine Savingsmatrix erstellt, die alle Einsparungen von möglichen Verbindungsstrecke zwischen  $i$  und  $j$  abbildet.

**Tabelle 5.6: Savingsmatrix der Warenhäuser (in km)**

|     | V | I | II | III | IV |
|-----|---|---|----|-----|----|
| V   |   |   |    |     |    |
| I   |   |   | 32 | 18  | 28 |
| II  |   |   |    | 17  | 21 |
| III |   |   |    |     | 2  |
| IV  |   |   |    |     |    |

Beispielhaft wird die Berechnung eines Eintrags in der Savingsmatrix unter Verwendung der Formel 2.9 präsentiert. Die Formel für ein Saving lautet:

$$s_{i,j} = d_{i,rck} + d_{j,rck} - d_{i,j}$$

Der Saving zwischen Warenlager II und III ergibt sich also durch die Berechnung

$$s_{II,III} = 20 + 24 - 27$$

$$s_{II,III} = 17$$

Sind alle Savings berechnet, erfolgt die Konstruktion einer Route, welche in Abbildung 4.7 nachvollzogen werden kann. Hierfür wird aus der Savingsmatrix die größte Ersparnis ausgewählt und eine Verbindungsstrecke zwischen den betroffenen Knoten gebildet. In dem vorliegenden Fall ist das die Verbindung zwischen II und I. Der zweitgrößte Savingswert wird durch die Verknüpfung der Touren von I und IV erreicht. Folgend wird der bereits erläuterte Vorgang iterativ durchlaufen. Im nächsten Schritt müssten nun Knoten II und IV verbunden werden, da dies zum nächst besten Saving führt. Die Bedingung der Subtouren 2.8 verhindert jedoch die Verknüpfung von I, II und IV zu einer in sich geschlossenen Tour. Auch die Verbindung zwischen III und I ist nicht mehr möglich, da das Warenlager I bereits mit zwei Kanten verknüpft wurde. Lediglich die Verbindung von II und III bleibt offen, welche zuletzt hergestellt wird.

Im Anschluss werden nur noch die Verbindungen zwischen dem Fahrzeugdepot V und den beiden Knoten III und IV gebildet und die Rundreise ist abgeschlossen. Durch die Addition der Teilstrecken ergibt sich eine neue Gesamtstreckenlänge von  $D := 119\text{km}$ . Da die Betriebszeiten der Warenlager in diesem Beispiel berücksichtigt werden sollen, muss überprüft werden, ob diese durch das Abfahren der konstruierten Route eingehalten wurden. Die Aufenthaltsdauer in jedem Warenlager werden in Tabelle 5.7 abgebildet. Die Fahrzeiten zwischen den Warenlager ergibt sich aus der Differenz zwischen der Abfahrtszeit von einem Warenlager und der Ankunftszeit des nächsten Warenlagers.

**Tabelle 5.7: Überprüfung der Warenlagerbetriebszeiten**

| V     | III              | II               | I                | IV               | Berlin |
|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------|
| 11:00 |                  |                  |                  |                  |        |
|       | 11:40 –<br>12:25 |                  |                  |                  |        |
|       |                  | 12:54 –<br>13:20 |                  |                  |        |
|       |                  |                  | 13:44 –<br>14:14 |                  |        |
|       |                  |                  |                  | 14:39 –<br>14:57 |        |
|       |                  |                  |                  |                  | 15:24  |

Werden diese Zeiträume mit den Betriebszeiten der Warenlager aus Tabelle 5.3 verglichen, kann festgehalten werden, dass die Zeitfenster eingehalten werden können. Wird die Bedingung getroffen, dass die Arbeitszeit des Personals der Warenlager 8 Stunden von 11:00 – 19:30 Uhr beträgt, so kann der Fahrer des Auslieferungsfahrzeugs die Belieferung der Kunden in einer Schicht erfüllen. Für die Belieferung der Endkunden in Berlin steht ein

Zeitfenster von 3,5 Stunden zur Verfügung, sodass 30 Minuten für die Rückfahrt zum Depot zur Verfügung stehen. Im Anschluss kann normalerweise noch die Richtung der Anfahrstationen festgelegt werden. Dies macht beispielsweise Sinn, wenn dadurch die Zeitfenster der Depots besser erfüllt werden können. In dem vorliegenden Fall ist die Richtung jedoch festgelegt, da die Auslieferung in der Stadt zuletzt durchgeführt werden muss und der letzte anzufahrende Knoten das Fahrzeugdepot darstellt. Als Ergebnis dieses Verfahrens wurde eine optimale Route erstellt. Wie im Algorithmus 2.2 zu erkennen, ist allerdings ein suboptimales Ergebnis bei der Verwendung des Savings-Algorithmus der Regelfall. Die vorliegende gute Lösung trifft allerdings in der Praxis selten ein und lässt sich mit der sehr geringen Anzahl an Knoten und möglichen Verbindungen begründen. Da jedoch normalerweise ein nachgelagertes Verbesserungsverfahren durchgeführt werden muss, wird dieses im folgenden Abschnitt 5.1.3 durchgeführt.

### 5.1.3 2-opt-Verfahren

Das 2-opt-Verfahren wird ausgewählt, da es sich um ein symmetrisches TSP handelt. Anderenfalls müsste ein 3-opt-Verfahren angewendet werden. Da eine Optimierung der zuvor berechneten Route nicht sinnvoll ist, wird beispielhaft eine suboptimale Route als Ausgangspunkt für ein nachgelagertes Verbesserungsverfahren gewählt.

Gegeben sei die Route  $R := [III - II - IV - I - V - III]$ , sodass das Warenlager III als Depot festgelegt wird. Die Gesamtdistanz der Route beträgt  $D := 129\text{km}$ .

Sei  $i = 1$  und  $j = i + 2$ .

Die Zahl für  $j$  wurde bewusst so gewählt, da keine benachbarten Kanten ausgetauscht werden dürfen. Gemäß der Berechnungsvorschrift in Abschnitt 2.3 wird die erste Kante und die dritte Kante der Route eliminiert, sodass  $R := [III \quad II-IV \quad I-V-III]$  entsteht. Als nächstes werden die Knoten  $i+1$  und  $j$  vertauscht und neue Kanten gesetzt. Eine neue Route  $R := [III - IV - II - I - V - III]$  wird gebildet. Die Gesamtdistanz der Route hat sich verschlechtert auf  $D := 141\text{km}$ . Deshalb wird der Vorgang weiter durchgeführt und im folgenden Schritt  $j$  um  $+1$  erhöht und die Iteration durchgeführt:

Sei  $i = 1$  und  $j = i + 3$ , sodass  $i = 1, j = 4$ .

$$R := [III \quad IV - II - I \quad V - III]$$

$$R := [III \quad I - II - IV \quad V - III]$$

Die Route  $R := [III - I - II - IV - V - III]$  mit einer Gesamtstreckenlänge  $D := 119\text{km}$  stellt eine verbesserte Lösung dar.

Zu beachten gilt, dass die Anwendung des 2-opt-Verfahrens zu einer Änderung der Kundenreihenfolge führt. Normalerweise müsste im Anschluss an dieses Verfahren eine weitere Überprüfung der Einhaltung von Zeitfenster durchgeführt werden. Da die Prüfung der Route  $R := [III - I - II - IV - V - III]$  allerdings schon in Abschnitt 5.1.2 durchgeführt wurde, ist eine erneute Überprüfung nicht nötig.



Der Vorteil bei der Verwendung dieser einfachen Heuristik ist, dass sie gut nachzuvollziehen ist. Für die Entscheidungsträger der Warenlager ist es leichter, Entscheidungen auf Grundlage von Ergebnissen zu treffen, welche für sie anschaulich und nachvollziehbar sind.

## 5.2 Empfehlungen für Änderungen in SimChain

In Kapitel 4 und im Abschnitt 5.1.2 wurde das Konzept zur Umsetzung eines kollaborativen Tourenplanungsansatzes ausführlich erörtert. Es zeigte sich, dass die Kernanwendung der kollaborativen Tourenplanung zum jetzigen Zeitpunkt bereits umsetzbar ist. Da SimChain ein datengetriebenes Simulationsmodell darstellt, wird das Simulationsmodell über die Datenbank initialisiert. Durch das Bestimmen der Warenlager bzw. des Fahrzeugdepots als Entitäten des Entitätstyps `LocationsOnRoutes` lässt sich eine kollaborative Tourenplanung durchführen. Allerdings werden im Folgenden einige Vorschläge unterbreitet, welche mehr Optionen zur Tourenplanung ermöglichen und zu einer besseren Benutzerfreundlichkeit beitragen.

In 5.1.2 wurden die Betriebszeiten der Warenlager berücksichtigt. Eine Berücksichtigung dieser Betriebszeiten, auch „Hofzeiten“ genannt, ist wichtig, um realistische Annahmen treffen zu können. Für die Planung der Touren ist die Annahme einer durchgehenden Öffnungszeit der Warenlager nicht zweckdienlich. Bei großen Warenlagern mit einem regen An- und Abfahrtsbetrieb, z.B. in der Speditionsbranche, ist es sogar üblich, dass die Betreiber der Warenlager bestimmte Zeitfenster vorgeben, in denen Waren geliefert oder abgeholt werden dürfen. Somit werden Staus auf den Grundstücken der Lager vermieden und eine reibungslose Abfertigung der Fahrzeuge gewährleistet. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die Thematik von Zeitfenstern im Datenmodell zu berücksichtigen. Dadurch können auch Belieferungszeitfenster bei den Kunden berücksichtigt werden. Für die Berücksichtigung von Zeitfenstern sollte deshalb in SimChain eine neue Basistabelle `TimeWindow` hinzugefügt werden, die jeder `Location` Zeitfenster zuweisen kann. Des Weiteren soll für diese Zeitfenster die Möglichkeit bestehen, sie für jeden Wochentag verschieden zu definieren. Im vorhandenen VRP-Algorithmus müsste dann eine zusätzliche Schleife eingefügt werden, welche für die Überprüfung der Einhaltung von Zeitfenstern zuständig ist.

Ein anderer Änderungswunsch betrifft die Zeitangaben, welche in einer anderen Zeiteinheit angegeben werden sollten. SimChain verwendet als Zeitmaßstab der Transportdauer die Einheit „Tage“. Bei Transportwegen über mehrere Ländergrenzen hinweg ist diese Zeitangabe angemessen, da eine detailliertere Angabe aufgrund der verschiedenen äußeren Einflussfaktoren nur auf groben Annahmen beruht. Bei kurzen Distanzen, wie sie bei innerstädtischen Transportwegen vorliegen, ist die Einheit der Transportdauer in Tagen jedoch obsolet. Es ist davon auszugehen, dass die Transporte in der Regel innerhalb eines Tages durchgeführt werden. Eine Lösungsoption besteht darin, die Angabe der Tage in Stunden umzurechnen. Wie in Abschnitt 3.4.1 beschrieben, enthält der Entitätstyp `Transporttime` das Attribut `Duration_Days`. Der Datentyp dieses Attributs ist „REAL“, wodurch die Angabe der Transportzeit in Dezimalzahlen bis  $10^{38}$  möglich ist. Ein Tag be-

steht aus 24 Stunden. Somit beträgt eine Stunde circa 0,04167 Tage und eine halbe Stunde 0,020834 Tage. Dieses Format ist sehr unkomfortabel und undurchsichtig. Die Darstellung in Stunden ist benutzerfreundlicher, denn dadurch würden sich auch die Grenzen der Zeitfensterangabe besser nachvollziehen lassen.

Im vorliegenden Fallbeispiel wurde die Annahme getroffen, dass homogene Güter vorliegen. Im Regelfall werden jedoch alle Lebensmittel für den Transport innerhalb einer Supply Chain in die drei Kühlstufen „fruits & vegetables“, „fresh“ und „super fresh“ kategorisiert. Im Gegensatz zu den Fahrzeugen für die Endkundenbelieferung sind die Fahrzeuge für den Transport zwischen Hersteller, Großhändler und Händler meist größer und verfügen über ein Mehrkammer-System. Das bedeutet, dass innerhalb des Fahrzeugs drei unterschiedliche Kühlzonen vorliegen. Somit wird gewährleistet, dass z.B. die gesetzlich vorgeschriebene durchgängige Kühlkette eingehalten wird. Um eine kollaborative Tourenplanung auf unterschiedlichen Stufen einer Supply Chain und nicht nur für die Endkundenbelieferung umsetzen zu können, sollte die Einhaltung der Kühlstufen Beachtung finden. Dies lässt sich umsetzen, indem für jedes Fahrzeug die Kapazität der jeweiligen Kühlkammer berücksichtigt wird und die Güter nur entsprechend ihren Kühlvorschriften den Kammern zugewiesen werden. Die Umsetzung dieses Vorschlags kann auf mehreren Arten geschehen: Eine Möglichkeit besteht darin, ein einzelnes Fahrzeug als drei Fahrzeuge zu definieren, welche die Kapazitäten der drei Kühlkammern besitzen. Dies müsste dann allerdings bei der Kalkulation der benötigten Fahrzeuge für die Tourenplanung berücksichtigt werden. Die andere Möglichkeit ist die Modifikation des Entitätstyps `Means_of_Transport`. Dieser könnte um weitere benötigte Informationen wie die Größe und das Ladegewicht der Kühlkammern erweitert werden.

In Ergänzung zu den aufgeführten Aspekten werden Vorschläge unterbreitet, welche das Simulationswerkzeug SimChain anwendungsfreundlicher gestalten. Wie bereits in Abschnitt 3.4 beschrieben, wurde SimChain für die Simulation von kompletten Supply Chains, vom Produzenten bis zum Endkunden, entwickelt. Diese Supply Chains können sich über mehrere Länder hinweg erstrecken. Der Fokus dieser Arbeit liegt jedoch auf den urbanen Transport, wofür die Abbildungen von Städten von Nöten ist. Die folgenden Änderungen betreffen deshalb diese Thematik.

Der erste Vorschlag betrifft die Visualisierung des Modells und die Forderung nach einem transparenten System um eigene Karten zu importieren. SimChain verwendet eine vereinfachte allgemein-geografische Karte, auf welcher die Knoten (z.B. „Locations“) und Kanten (Relationen) des SC-Netzwerks gemäß ihren Geokoordinaten (Angaben der Längen- und Breitengrade) abgebildet sind. Zum Zeitpunkt der Betrachtung stehen die Karten „World“, „Europe“, „Germany“ und „Bavaria“ zur Auswahl. Dieses begrenzte Angebot an Ansichten kann sich negativ auf die Visualisierung des Modells auswirken, beispielsweise wenn der Großteil der Standorte in einem kleinen Gebiet angesiedelt ist. Dies ist besonders bei der Modellierung von Städten der Fall. Beispielsweise könnte das Netzwerk von Online-Supermärkten und ihren Endkunden in Athen, Griechenland simuliert werden. Wird hierfür die Europakarte verwendet, so ist das SC-Netzwerk nicht zu erkennen. Durch ein „zoomen“ wird keine ausreichende Auflösung hergestellt. Die Funktionalität des

Systems wird dadurch nicht beeinträchtigt, da die Bausteine auch ohne die Karte im Hintergrund funktionieren. Trotzdem ist es wünschenswert, eine angemessene Visualisierung jedes SC-Netzwerks zu gewährleisten. Zwar gibt es auch jetzt schon die Möglichkeit eigenes Kartenmaterial einzubinden, jedoch ist diese Möglichkeit weder dokumentiert noch benutzerfreundlich, da tiefgreifende Kenntnisse über den Aufbau von SimChain von Nöten sind. Der Ablauf sieht vor, dass ein Bild erzeugt werden muss, bei dem die Geokoordinaten der Ecken bekannt sind. Das Bild muss in das Modell importiert werden und die Geokoordinaten müssen zusammen mit den Bilddimensionen in eine Tabelle im Modell eingetragen werden. Aus diesem Grund sollte dem Benutzer die Möglichkeit offeriert werden, eigenes Kartenmaterial ohne großen Aufwand generieren zu können. Zusätzlich könnte eine Verbesserung des Detaillierungsgrads der Karte vorgenommen werden. Auch wenn das Simulationswerkzeug nicht für die tägliche, operative Nutzung der Tourenplanung ausgelegt ist, so wäre es dennoch sinnvoll, reale Straßennetze abzubilden.

Durch die Verwendung einer Programmierschnittstelle (Application Programming Interface, API) könnten Informationen über reale Routen abgerufen werden, z.B. durch die Verwendung von OpenStreetMap. Wenn dies während der Simulation geschieht, besteht jedoch der gravierende Nachteil, dass eine Online-Verbindung sichergestellt sein muss und die Simulation stark verlangsamt wird. Außerdem ist die Anzahl der Anfragen pro Tag begrenzt.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn der Arbeit wurde die Citylogistik vorgestellt, deren weiterer Ausbau zu erwarten ist. Aus diesem Wachstum folgen Herausforderungen. Kollaborationen stellen ein Lösungskonzept für die zukünftigen Herausforderungen der wachsenden Städte dar. Es herrscht die Erwartung, dass eine kollaborative Tourenplanung zu Kosteneinsparungen durch Synergieeffekte führen kann. Unternehmen stehen der Teilnahme an einer Kollaboration jedoch kritisch gegenüber, da sie mit potentiellen Wettbewerbern kooperieren müssten. Um eine Bewertung von kollaborativen Tourenplanungen vorzunehmen und den Ängsten der Unternehmen entgegenzuwirken, dient die ereignisdiskrete Simulation (DES) als Analyse- und Entscheidungsinstrument. Der Stand der Forschung verdeutlicht, dass eine Verwendung der DES zur Bewertung von kollaborativen Tourenplanungsansätzen in der Wissenschaft bisher keine Berücksichtigung erfahren hat. Auch wenn einige Ansätze für urbane Konsolidierungscenter (UCC) oder den Austausch von Lieferaufträgen vorliegen, ließen sich diese nicht übertragen. Auch die systematische Analyse von bekannten Arten des Tourenplanungsproblems und deren Lösungsansätzen zeigte, dass noch kein formales Vehicle Routing Problem (VRP) speziell für eine kollaborative Zusammenarbeit formuliert wurde. Diese Tatsache lässt sich damit begründen, dass sich kollaborative Tourenplanungsansätze mit den Standard-VRP-Formulierungen beschreiben lassen und deshalb keine Spezialform für Kollaborationen benötigt wird.

Um ein Konzept für einen kollaborativen Tourenplanungsansatz zu entwickeln, wurden verschiedene Modelle der kollaborativen Tourenplanung ausgearbeitet. Durch die Bewertung der Kollaborationsmodelle mit Hilfe von erhobenen Kriterien wurden die Vorteile und Schwachstellen der Modelle deutlich. Erwägen Unternehmen eine Umsetzung der kollaborativen Tourenplanung in der Praxis, so bietet die Bewertung der Kollaborationsmodelle eine erste Hilfestellung. Beispielsweise ist die Anschaffung einer gemeinsamen Fahrzeugflotte aufgrund der Umsetzbarkeit eines gemeinsamen Marketingkonzepts empfehlenswert. Von der Verwendung von Poolfahrzeugen ist eher abzuraten, da dieses Modell keine Transparenz und eine unausgeglichene Ressourcenausnutzung impliziert. Aufbauend auf den verschiedenen Kollaborationsmodellen wurde ein Konzept zur Umsetzung eines kollaborativen Tourenplanungsansatzes in dem datengetriebenen Simulationsmodell von SimChain entwickelt. Als Ergebnis wurde die Empfehlung ausgesprochen, auf eine vorhandenen Tourenplanungsmethode in SimChain aufzubauen. Dieses Konzept beinhaltet die Verwendung eines Savings-Verfahrens für die Konstruktion einer kollaborativen Tour und eines 2-opt-Verfahrens zur Verbesserung dieser ersten Initiallösung. Diese Verfahren erfüllen jedoch nur die Aufgabe, einen kollaborativen Tourenplan für ein definiertes Szenario zu konstruieren. Sie wurden nicht entwickelt, um die Prozesse der Kollaborationsmo-

delle zu optimieren. Um die Tauglichkeit des Lösungskonzepts aufzuzeigen, wurde es im Anschluss anhand eines Fallbeispiels der Lebensmittelindustrie konkretisiert. Als Beispiel diente die Belieferung von Lebensmitteln an Endkunden. Es stellte sich heraus, dass die entwickelte Methode gut auf den konkreten Anwendungsfall übertragbar ist. Außerdem wurde deutlich, dass die dafür verwendeten Verfahren einfache Heuristiken sind, welche sich gut nachvollziehen lassen. Zusätzlich wurde erläutert, welche notwendigen Änderungen an den generischen Supply-Chain-Bausteinen und am Datenmodell von SimChain berücksichtigt werden müssen. Dabei zeigte sich, dass lediglich kleine Modifikationen des Datenmodells und der Bausteine vorgenommen werden müssen, da eine bereits implementierte Tourenplanungsmethode verwendet werden kann.

Die konzeptionelle Gestaltung als Ziel der vorliegenden Arbeit erfordert zwangsläufig eine Fortsetzung der Forschungstätigkeit, denn zwei Aspekte bleiben zum Zeitpunkt der Betrachtung unbeantwortet: Erstens, ob sich die Implementierung des Lösungskonzepts in SimChain problemfrei umsetzen lässt und zweitens, ob die Ergebnisse der Simulation die Überlegungen zu den Vorteilen von Kollaborationen bestätigen können. Um diese Fragen eindeutig beantworten zu können, bedarf es weitere Forschungsarbeit. Für die Simulation der kollaborativen Tourenplanungsmethode sollten reale Daten verwendet werden und der Datensatz möglichst groß sein, um einen eindeutigen Beweis für die Funktionsfähigkeit des Lösungskonzepts zu ermöglichen. Sollte sich als Ergebnis der Simulation herausstellen, dass die kollaborative Zusammenarbeit positive Ergebnisse erzielt, so besteht ein wirtschaftliches und öffentliches Interesse an der tatsächlichen Umsetzung der Konzepte. Sollten Kollaborationen tatsächlich umgesetzt werden, so kann die Simulation als stetiges Kontrollinstrument eingesetzt werden. Darüber hinaus ist sie sinnvoll für Prognosen der zukünftigen Entwicklungen der städtischen Versorgung und deren Auswirkungen. Sollten sich Kollaborationen für die Unternehmen nicht rechnen, so könnte dennoch ein öffentliches Interesse an der Umsetzung bestehen, da sich Kollaborationen positiv auf die Umwelt auswirken und beispielsweise das Straßennetz weniger belastet wird. Subventionen durch den Staat könnten Anreize für Kollaborationen schaffen. Allerdings sollten Kollaborationen nicht erzwungen werden, da die Konsensbildung, wie in Abschnitt 2.3 erläutert, nicht hierarchisch erfolgen darf.

Eine zusätzliche lohnenswerte Aufgabe für zukünftige Untersuchungen ist die Ermittlung des optimalen Standorts für das Fahrzeugdepot. Dieses sogenannte „Location Allocation Problem“ lässt sich auch durch die Verwendung von SimChain umsetzen, indem mehrere Szenarien mit unterschiedlichen Standorten des Fahrzeugdepots definiert werden.

Zusätzlich eröffnet die Simulation zur Bewertung von kollaborativen Tourenplanungsansätzen eine Reihe von weiteren Fragestellungen. Um den Rahmen der vorliegenden Arbeit einzuhalten, wurden vereinfachte Annahmen getroffen und Themenfelder ausgegrenzt. Für eine konkrete Konzeptentwicklung wurden horizontale Kollaborationen in der Endstufe der Supply Chain betrachtet. Diese Sichtweisen könnten jedoch noch weiter ausgeweitet werden, sodass Modelle verschiedener Kollaborationsausprägungen simuliert werden könnten. Aufgrund ihrer speziellen Eigenarten wurden die KEP-Branche und Speditionsunternehmen ausgeschlossen. Ferner finden Tourenplanungen auch für die Beschaffung oder für

innerbetriebliche Materialflüsse statt. Eine Betrachtung von Kollaborationsmöglichkeiten wäre auch in diesem Fall vielversprechend.

# Literatur

- Allen, J.; Thorne, G.; Browne, M.: Good Practice Guide on Urban Freight Transport. Best Urban Freight Solutions: Rijswijk, Netherlands, 2007.
- Amazon: Amazon Prime Air. Amazon.com (Hg.). 2016. URL: <http://www.amazon.com/b?node=8037720011> (zuletzt geprüft am 02.22.2016).
- Ambrosini, C.; Routhier, J.-L.; Sonntag, H.; Meimbresse, B.: Urban Freight Modelling: A Review. In: Taniguchi, E.; Thompson, R. G. (Hrsg.): Innovations in city logistics. New York: Nova Science Publishers, 2008, S. 197–211.
- AnyLogic Company: AnyLogic: Mehr-Methoden Simulationssoftware. AnyLogic Company (Hg.). 2016. URL: <http://www.anylogic.de/> (zuletzt geprüft am 13.01.2016).
- Archetti, C.; Speranza, M. G.: The Split Delivery Vehicle Routing Problem: A Survey. In: Golden, B. L.; Raghavan, S.; Wasil, E. A. (Hrsg.): The vehicle routing problem. Bd. 43. Operations research/computer science interfaces series. New York und London: Springer, 2008, S. 103–122.
- Banks, J.; Carson II, J. S.; Nelson, B. L.; Nicol, D. M.: Discrete-event system simulation. 4. Aufl. Prentice-Hall international series in industrial and systems engineering. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005.
- Berger, S.: Kooperative Tourenplanung - Eine quantitative Analyse. Halle (Saale): Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Juristischen und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät, Dissertation, 2009.
- Bossel, H.: Modellbildung und Simulation: Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme; ein Lehr- und Arbeitsbuch mit Simulations-Software. Braunschweig [u.a.]: Vieweg, 1992.
- Bott, K.; Ballue, R. H.: Research perspectives in vehicle routing and scheduling. Transportation research 20 (1986) 3, S. 239–243.
- Botta-Genoulaz, V.; Lamothe, J.; Picard, F.; Riane, F.; Valla, A.: Discrete-event simulation for Supply Chain Management. In: Thierry, C.; Thomas, A.; Bel, G. (Hrsg.): Simulation for supply chain management. Control systems, robotics and manufacturing series. London und Hoboken, NJ: ISTE und Wiley, 2008, S. 69–102.
- Braekers, K.; Ramaekers, K.; van Nieuwenhuysse, I.: The vehicle routing problem: State of the art classification and review. Computers & Industrial Engineering (2016). Noch nicht veröffentlicht.
- Brockhage, J.; Witte, T.: Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. Bd. 17. Fachberichte Simulation. Berlin [u.a.]: Springer, 1992.
- Bruner, C.: Thinking Collaboratively: Ten Questions and Answers to Help Policy Makers Improve Children's Services. Bd. 3. Series on collaboration. Washington: Education and Human Services Consortium, 1991.

- Bubner, N.; Bubner, N.; Helbig, R.; Jeske, M.: Logistics Trend Radar: Delivering insight today. Creating value tomorrow! Version 2014. DHL Customer Solutions and Innovation (Hg.). DHL Trend Research: Troisdorf, 2014.
- Chen, Z.-L.; Raghavan, S.: Tutorials in operations research: State-of-the-art decision-making tools in the information-intensive age. Hanover, Md.: INFORMS, 2008.
- Cherif-Khettaf, W. R.; Rachid, M. H.; Bloch, C.; Chatonnay, P.: New Notation and Classification Scheme for Vehicle Routing Problems. *RAIRO - Operations Research* 49 (2015) 1, S. 161–194.
- Civitas Wiki consortium: Policy Note: Intelligent Transport Systems and traffic management in urban areas. 2015. URL: [http://www.civitas.eu/sites/default/files/civ\\_pol-not6\\_its\\_web.pdf](http://www.civitas.eu/sites/default/files/civ_pol-not6_its_web.pdf) (zuletzt geprüft am 30.11.2015).
- Clarke, G.; Wright, J.: Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research* 12 (1964) 4, S. 568–581.
- COIN: Welcome to the SYMPHONY development home page. 2016. URL: <https://projects.coin-or.org/SYMPHONY> (zuletzt geprüft am 16.02.2016).
- Cordeau, J.-F.; Laporte, G.; Savelsbergh, M. W.; Vigo, D.: Vehicle Routing. In: Barnhart, C.; Laporte, G. (Hrsg.): *Transportation*. Bd. 14. *Handbooks in Operations Research and Management Science*. Amsterdam [u.a.]: Elsevier, 2007, S. 367–428.
- Crainic, T. G.; Perboli, G.; Mancini, S.; Tadei, R.: Two-Echelon Vehicle Routing Problem: A satellite location analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 2 (2010) 3, S. 5944–5955.
- Crujssen, F.; Dullaert, W.; Fleuren, H.: Horizontal Cooperation in Transport and Logistics: A Literature Review. *Transportation Journal* 46 (2007) 3, S. 22–39.
- Curtis, S.: Skype founders invent self-driving robot that can deliver groceries. *The Telegraph* (Hg.). 2015. URL: <http://www.telegraph.co.uk/technology/news/11962566/Skype-founders-invent-self-driving-robot-that-can-deliver-groceries-for-1.html> (zuletzt geprüft am 22.02.2016).
- Dai, B.; Chen, H.: Mathematical model and solution approach for collaborative logistics in less than truckload (LTL) transportation. In: *IEEE (Hg.): International Conference on Computers & Industrial Engineering*. 2009, S. 767–772.
- Dantzig, G. B.; Ramser, J. H.: The Truck Dispatching Problem. *Management Science* 6 (1959) 1, S. 80–91.
- Davis, J.: France: Toys”R”Us trials rollerblading couriers in Paris. In: *Australia Post (Hg.): Post Journal*. Bd. 382. 2015, S. 28.
- Desrochers, M.; Lenstra, J.; Savelsbergh, M.; Soumis, F.: Vehicle Routing with Time Windows: Optimization and Approximation. In: Golden, B. L.; Assad, A. (Hrsg.): *Vehicle Routing*. Bd. 16. *Studies in management science and systems*. Amsterdam [u.a.]: Elsevier Science Publishers B.V. North-Holland, 1988, S. 65–84.
- DHL: Erste und letzte Meile. Deutsche Post AG (Hg.). 2008. URL: <https://www.dhl-discoverlogistics.com/cms/de/course/technologies/reinforcement/first.jsp> (zuletzt geprüft am 24.10.2015).



- Dietel, A.: Lieferserviceorientierte Distributionslogistik: Fallstudienbasierte Untersuchung in der Bauzulieferindustrie. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. und Gabler, 1997.
- Domschke, W.: Logistik: Transport : Grundlagen, lineare Transport- und Umladeprobleme. 5. Aufl. Oldenbourgs Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- u. Sozialwissenschaften. München [u.a.]: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2007.
- Domschke, W.; Drexl, A.: Logistik: Rundreisen und Touren. 6. Aufl. Oldenbourgs Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München [u.a.]: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2010.
- Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R.; Scholl, A.: Einführung in Operations Research. 9. Aufl. Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer Gabler, 2015.
- Domschke, W.; Scholl, A.: Heuristische Verfahren: Arbeits- und Diskussionspapiere der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät (Hg.). Jena, 2006.
- Duden: Wörterbuch: Citylogistik. Dudenverlag (Hg.). 2016. URL: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Citylogistik> (zuletzt geprüft am 15.02.2016).
- Ehmke, J. F.: Integration of Information and Optimization Models for Routing in City Logistics. Bd. 177. Boston, MA: Springer US, 2012.
- Eley, M.: Simulation in der Logistik: Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges „Plant Simulation“. Springer-Lehrbuch. Berlin Heidelberg: Springer, 2012.
- Erdmann, M.: Konsolidierungspotentiale von Speditionskooperationen: Eine simulationsgestützte Analyse. Gabler edition Wissenschaft. Integrierte Logistik und Unternehmensführung. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1999.
- Europäische Kommission: Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Gemeinsam für eine wettbewerbsfähige und ressourceneffiziente Mobilität in der Stadt. 2013. URL: [ec.europa.eu/transport/themes/urban/doc/ump/com\(2013\)913\\_de.pdf](http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/doc/ump/com(2013)913_de.pdf) (zuletzt geprüft am 06.11.2015).
- European Environment Agency (Hg.): Towards a green economy in Europe: EU environmental policy targets and objectives 2010-2050. Bd. 8. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
- Faltin, M.: RFID-Einsatz in fertigungstechnischen Prozessketten: Identifikation und Beurteilung von Einsatzpotentialen. Produktionstechnische Berichte aus dem FBK. Kaiserslautern: Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, 2012.
- Fechteler, T.: The bridge to reality: SimChain Supply Chain Simulation as a Service. 2016. URL: [http://www.simchain.net/images/Media/SimChain\\_Presentation\\_Website.pdf](http://www.simchain.net/images/Media/SimChain_Presentation_Website.pdf) (zuletzt geprüft am 06.01.2016).
- Fechteler, T.; Gutenschwager, K.: SimChain: Technical Dokumentation. Braunschweig, 7. Feb. 2014.
- Firmenauto.de: Fahrzeugpool: Was Fuhrparkmanager beachten sollten. Bicker, W. (Hg.). 2011. URL: <http://www.firmenauto.de/fahrzeugpool-da-gilt-es-zu-beachten-482103.html> (zuletzt geprüft am 15.02.2016).

- Fisher, M. L.; Jaikumar, R.: A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks* 11 (1981) 2, S. 109–124.
- Fleischmann, B.: Kooperation von Herstellern in der Konsumgüterdistribution. In: Engelhard, J.; Sinz, E. J. (Hrsg.): *Kooperation im Wettbewerb*. Wiesbaden: Gabler, 1999, S. 169–186.
- Fleischmann, B.: Grundlagen: Begriff der Logistik, logistische Systeme und Prozesse. In: Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. VDI-Buch. Berlin: Springer, 2008, S. 3–12.
- Foulds, L. R.; Wilson, J. M.: A variation of the generalized assignment problem arising in the New Zealand dairy industry. *Annals of Operations Research* 69 (1997), S. 105–114.
- Gendreau, M.: An Introduction to Tabu Search. In: Glover, F.; Kochenberger, G. A. (Hrsg.): *Handbook of metaheuristics*. Bd. 57. International series in operations research & management science. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003, S. 37–54.
- Gendreau, M.; Potvin, J.-Y.; Bräysy, O.; Hasle, G.; Løkketangen, A.: Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem and Its Extensions: A Categorized Bibliography. In: Golden, B. L.; Raghavan, S.; Wasil, E. A. (Hrsg.): *The vehicle routing problem*. Bd. 43. Operations research/computer science interfaces series. New York und London: Springer, 2008, S. 143–169.
- Gevaers, R.; Van de Voorde, Eddy; Vanelslander, T.: Cost Modelling and Simulation of Last-mile Characteristics in an Innovative B2C Supply Chain Environment with Implications on Urban Areas and Cities. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 125 (2014) 1, S. 398–411.
- Gillett, B. E.; Miller, L. R.: A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem. *Operations Research* 22 (1974) 2, S. 340–349.
- Glover, F.: Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research* 13 (1986) 5, S. 533–549.
- Glover, F.; Kochenberger, G. A.: *Handbook of metaheuristics*. Bd. 57. International series in operations research & management science. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- Gonzalez-Feliu, J.: Costs and benefits of logistics pooling for urban freight distribution: scenario simulation and assessment for strategic decision support. 2011. URL: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00688967> (zuletzt geprüft am 18.12.2015).
- Gonzalez-Feliu, J.; Morana, J.: Collaborative transportation sharing: from theory to practice via a case study from France. In: Yearwood, J.; Stranieri, A. (Hrsg.): *Technologies for Supporting Reasoning Communities and Collaborative Decision Making*. Hershey, PA: Information Science Reference, 2011, S. 252–271.
- Gonzalez-Feliu, J.; Morana, J.; Salanova Grau, J.-M.; Ma, T.-Y.: Design and scenario assessment for collaborative logistics and freight transport systems. *International Journal of Transport Economics* 40 (2013) 2, S. 207–240.
- Gonzalez-Feliu, J.; Routhier, J.-L.: Modeling Urban Goods Movement: How to be Oriented with so Many Approaches? *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 39 (2012) 1, S. 89–100.

- Gonzalez-Feliu, J.; Salanova Grau, J.-M.: How the location of urban consolidation and logistics facility has an impact on the delivery costs? An accessibility analysis. 2014. URL: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01053882v2> (zuletzt geprüft am 10.10.2015).
- Grünert, T.: Optimierung im Transport: Band II: Wege und Touren. Aachen: Shaker, 2005.
- Günther, H. O.; Mattfeld, D. C.; Suhl, L.: Supply Chain Management und Logistik: Optimierung, Simulation, Decision-Support. Heidelberg: Physica-Verlag, 2005.
- Güterverkehr 2014: Transportaufkommen mit 4,5 Milliarden Tonnen so hoch wie nie. 13. Feb. 2015. URL: [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2015/02/PD15\\_050\\_463.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2015/02/PD15_050_463.html) (zuletzt geprüft am 26.10.2015).
- Hecking, M.: Amazon liefert jetzt auch in den Kofferraum. manager magazin new media GmbH (Hg.). 2015. URL: <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/handel/amazon-liefert-jetzt-auch-in-den-kofferraum-a-1029962.html> (zuletzt geprüft am 20.02.2016).
- IBM: IBM ILOG CPLEX Optimization Studio: Toolkit zur Entwicklung von Optimierungsmodellen für die mathematische und Constraintprogrammierung. IBM Deutschland GmbH (Hg.). 2016. URL: [www-03.ibm.com/software/products/de/ibmilog-cpleoptistud](http://www-03.ibm.com/software/products/de/ibmilog-cpleoptistud) (zuletzt geprüft am 16.02.2016).
- INCONTROL Simulation Solutions: Enterprise Dynamics. INCONTROL Simulation Solutions (Hg.). 2016. URL: <http://www.incontrolsim.com/de/enterprise-dynamics/enterprise-dynamics.html> (zuletzt geprüft am 13.01.2016).
- Interessensgemeinschaft RegLog: City-Logistik für Regensburg. Erfolgreicher Projektverlauf, wirtschaftliche Gründe für die Beendigung. 2012. URL: [http://www.reglog.de/pdf/PM\\_20120926\\_RegLog%20Projektbeendigung.pdf](http://www.reglog.de/pdf/PM_20120926_RegLog%20Projektbeendigung.pdf) (zuletzt geprüft am 19.12.2015).
- Irnich, S.; Toth, P.; Vigo, D.: The Family of Vehicle Routing Problems. In: Toth, P.; Vigo, D. (Hrsg.): The vehicle routing problem. MOS-SIAM series on optimization. Philadelphia, PA: SIAM, 2014, S. 1–33.
- jsprit: jsprit. jsprit (Hg.). 2014. URL: <http://jsprit.github.io/> (zuletzt geprüft am 16.02.2016).
- Kawamura, K.: Urban Planning with City Logistics. In: Taniguchi, E.; Thompson, R. G. (Hrsg.): City Logistics. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015, S. 41–54.
- Kek, A. G.; Cheu, R. L.; Meng, Q.: Distance-constrained capacitated vehicle routing problems with flexible assignment of start and end depots. Mathematical and Computer Modelling 47 (2008) 2, S. 140–152.
- Kimms, A.; Kozeletskyi, I.: Shapley value-based cost allocation in the cooperative traveling salesman problem under rolling horizon planning. EURO Journal on Transportation and Logistics (2015). Noch nicht veröffentlicht, S. 1–22.
- Kindermann, P.: Tourenplanung mit Zeitfenstern für mehrere Fahrzeuge. Würzburg: Julius-Maximilians-Universität, Institut für Informatik, Diplomarbeit, 2012.
- Kistner, K.-P.: Optimierungsmethoden: Einführung in die Unternehmensforschung für Wirtschaftswissenschaftler. 3. Aufl. Physica-Lehrbuch. Berlin Heidelberg: Physica-Verl., 2003.

- Kokkinogenis, Z.; Passos, L. S.; Rossetti, R.; Gabriel, J.: Towards the next-generation traffic simulation tools: a first appraisal. 2011. URL: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5974359%5C&tag=1](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5974359%5C&tag=1) (zuletzt geprüft am 13.11.2015).
- König, B.: Heuristiken zur Ein-Depot-Tourenplanung. München: Technische Universität München, Institut für Informatik, Diplomarbeit, 1995.
- Kotler, P.; Bliemel, F.: Marketing-Management: Analyse, Planung und Verwirklichung. 10. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2001.
- Krajewska, M. A.; Kopfer, H.: Collaborating freight forwarding enterprises. *OR Spectrum* 28 (2006) 3, S. 301–317.
- Krajzewicz, D.; Erdmann, J.; Behrisch, M.; Bieker, L.: Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban MObility. *International Journal on Advances in Systems and Measurements* 5 (2012) 3, S. 128–138.
- Krapfel, R. E.; Salmond, D.; Spekman, R. E.: A Strategic Approach to Managing Buyer-Seller Relationships. *European Journal of Marketing* 25 (1991) 9, S. 22–37.
- Krog, S.: Einzelhändler stoppen City-Logistik. *Augsburger Allgemeine* (Hg.). 2010. URL: <http://www.augsburger-allgemeine.de/augsburg/Einzelhaendler-stoppen-City-Logistik-id8620091.html> (zuletzt geprüft am 22.02.2016).
- Langer-Transport-Service: Lademassee. Langer, J. (Hg.). 2016. URL: [www.langer-transport-service.de/lademasse.pdf](http://www.langer-transport-service.de/lademasse.pdf) (zuletzt geprüft am 24.01.2016).
- Laporte, G.; Ropke, S.; Vidal, T.: Heuristics for the Vehicle Routing Problem. In: Toth, P.; Vigo, D. (Hrsg.): *The vehicle routing problem. MOS-SIAM series on optimization*. Philadelphia, PA: SIAM, 2014, S. 87–116.
- Law, A. M.; Kelton, W. D.: *Simulation modeling and analysis*. 3rd ed. McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. Boston: McGraw-Hill, 2000.
- Lehmacher, W.: *Logistik im Zeichen der Urbanisierung: Versorgung von Stadt und Land im digitalen und mobilen Zeitalter*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015.
- Liebl, F.: *Simulation: Problemorientierte Einführung*. 2. Aufl. München und Wien: Oldenbourg, 1995.
- Lindawati; van Schagen, J.; Goh, M.; Souza, R. d.: Collaboration in urban logistics: motivations and barriers. *International Journal of Urban Sciences* 18 (2014) 2, S. 278–290.
- März, L.; Krug, W.: Kopplung von Simulation und Optimierung. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hrsg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. VDI-Buch*. Heidelberg: Springer, 2011, S. 41–45.
- März, L.; Weigert, G.: Simulationsgestützte Optimierung. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hrsg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. VDI-Buch*. Heidelberg: Springer, 2011, S. 3–12.
- Mattfeld, D.; Vahrenkamp, R.: *Logistiknetzwerke: Modelle für Standortwahl und Tourenplanung*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.
- McKinsey&Company: McKinsey-Studie: Ware Zustellung am selben Tag vor dem Durchbruch. 8. Apr. 2014. URL: <https://www.mckinsey.de/warenzustellung-am-selben-tag-vor-dem-durchbruch> (zuletzt geprüft am 03.12.2015).

- Mecalux Logismarket: MR 0608-3S. MECALUX GmbH (Hg.). 2016. URL: <https://11.cdnwm.com/ip/arcawa-rollcontainer-rolltainer-arcawa-katalog-gitter-rollwagen-standard-rollbehaelter-880478.pdf> (zuletzt geprüft am 24.01.2016).
- Mitrani, I.: Simulation techniques for discrete event systems. Bd. 14. Cambridge computer science texts. Cambridge und New York: Cambridge University Press, 1982.
- Müller, K.; Goldberger, E.: Unternehmenskooperation bringt Wettbewerbsvorteile: Notwendigkeit und Praxis zwischenbetrieblicher Zusammenarbeit in der Schweiz. Zürich: Verl. Industrielle Organisation, 1986.
- Nelson, M. D.; Nygard, K. E.; Griffin, J. H.; Shreve, W. E.: Implementation techniques for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research* 12 (1985) 1, S. 273–283.
- OECD: The Metropolitan Century: Understanding Urbanisation and its Consequences. Paris: OECD Publishing, 2015.
- Ohr, C.: Tourenplanung im Strassengüterverkehr. Bd. 57. Betriebswirtschaftliche Forschung zur Unternehmensführung. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler / GWV Fachverlage, 2008.
- Paessens, H.: The savings algorithm for the vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research* 34 (1988) 3, S. 336–344.
- Panou, K.; Proios, G.; Kapros, S.: Distance and Capacity Constrained Vehicle Routing in Distribution Networks: A New Branch-and-Cut-and-Price Heuristic. *Logistics & Sustainable Transport* 4 (2013) 1, S. 1–11.
- Polenske, K.: Competition, Collaboration and Cooperation: An Uneasy Triangle in Networks of Firms and Regions. *Regional Studies* 38 (2004) 9, S. 1029–1043.
- Poole, T. G.; Szymankiewicz, J. Z.: Using simulation to solve problems. London und New York: McGraw-Hill, 1977.
- Pooley, J.: Integrated Production and Distribution Facility Planning at Ault Foods. *Interfaces* 24 (1994) 4, S. 113–121.
- Potter, A. T.: The impact of supply chain dynamics on transport. Cardiff: Cardiff Business School, Dissertation, 2005.
- Quak, H. J.: Sustainability of urban freight transport: Retail distribution and local regulations in cities. Rotterdam: RSM Erasmus University, Erasmus School of Economics, Dissertation, 2008.
- Quinn, F.: Transportation: the forgotten factor. *Logistics Management* 39 (2000) 9, S. 45.
- Rabe, M.; Hellingrath, B.: Handlungsanleitung Simulation in Produktion und Logistik: Ein Leitfaden mit Beispielen für kleinere und mittlere Unternehmen. San Diego: SCS International, 2001.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken. VDI-Buch. Berlin und Heidelberg: Springer, 2008.
- Richter, A.: Dynamische Tourenplanung: Modifikation von klassischen Heuristiken für das Dynamische Rundreiseproblem (DTSP) und das Dynamische Tourenplanungsproblem (DVRP) mit der Möglichkeit der Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges. Dresden: Technischen Universität Dresden, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Dissertation, 2005.

- Rodrigue, J.-P.; Slack, B.; Comtois, C.: Green Logistics (The Paradoxes of). In: Button, K. J.; Hensher, D. A.; Brewer, A. M. (Hrsg.): Handbook of Logistics and Supply Chain Management. Handbooks of Transport. Amsterdam [u.a.]: Elsevier, 2001, S. 1–11.
- Rose, O.; März, L.: Simulation. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. VDI-Buch. Heidelberg: Springer, 2011, S. 13–19.
- Salhi, S.; Sari, M.: A multi-level composite heuristic for the multi-depot vehicle fleet mix problem. *European Journal of Operational Research* 103 (1997) 1, S. 95–112.
- Schaumann, H.: Development of a Concept for Inner-City Delivery & Supply Utilising Electromobility. In: Clausen, U.; ten Hompel, M.; Klumpp, M. (Hrsg.): Efficiency and logistics. Lecture notes in logistics. Berlin und New York: Springer, 2013, S. 121–127.
- Scheuerer, S.: Neue Tabusuche-Heuristiken für die logistische Tourenplanung bei restringierendem Anhängereinsatz, mehreren Depots und Planungsperioden. Regensburg: Universität Regensburg, Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät, Dissertation, 2004.
- Schieck, A.: Internationale Logistik: Objekte, Prozesse und Infrastrukturen grenzüberschreitender Güterströme. München und Wien: Oldenbourg, 2008.
- Schönfeld, W.; Plenker, J.: Lexikon für das Lohnbüro 2016: Arbeitslohn, Lohnsteuer und Sozialversicherung von A-Z. 58. Aufl. Heidelberg: Rehm, 2015.
- Schröder, M.; Jami, N.; Beißert, U.; Motta, M.: Konzeptionierung eines integrierten modellbasierten Ansatzes zur Prognose von transportlogistischen und intralogistischen Ereignissen in Logistiknetzwerken. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): Simulation in Production and Logistics 2015. Bd. 157. ASIM-Mitteilung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2015, S. 147–156.
- Schwind, M.; Kunkel, M.: Simulationsbasierte Optimierung kollaborativer Transportlösungen in Transportnetzwerken. 39. Jahrestag der Gesellschaft für Informatik, 2. Workshop Planung und Simulation in logistischen Anwendungen auf der Onformatik. Lübeck, 28. Sep. 2009.
- Shahid, R.; Bertazzon, S.; Knudtson, M. L.; Ghali, W. A.: Comparison of distance measures in spatial analytical modeling for health service planning. *BMC health services research* 9 (2009) 1, S. 200–213.
- Siemens: Plant Simulation: Produktübersicht. Siemens Industry Software GmbH (Hg.). 2016. URL: [http://www.plm.automation.siemens.com/de\\_de/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml) (zuletzt geprüft am 26.02.2016).
- SimPlan AG: SimChain - Supply Chain Bausteinkasten: Modellierung und Analyse von Liefernetzwerken. 2016. URL: <http://www.plant-simulation.de/bausteine/sim-chain.html> (zuletzt geprüft am 19.01.2016).
- Solomon, M. M.: Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research* 35 (1987) 2, S. 254–265.
- Stahlknecht, P.; Hasenkamp, U.: Einführung in die Wirtschaftsinformatik. 10. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer, 2002.
- Stathopoulos, A.; Valeri, E.; Marcucci, E.: Stakeholder reactions to urban freight policy innovation. *Journal of Transport Geography* 22 (2012) 1, S. 34–45.

- Staudt, E.: Kooperationshandbuch: Ein Leitfaden für die Unternehmenspraxis. Berlin und Heidelberg: Springer, 1992.
- Suhl, L.; Mellouli, T.: Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. 3. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer Gabler, 2013.
- ten Hompel, M.; Heidenblut, V.: Taschenlexikon Logistik. VDI. Heidelberg [u.a.]: Springer, 2011.
- Thoma, L.: City-Logistik: Konzeption - Organisation - Implementierung. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Dt. Univ.- Verl. und Gabler, 1995.
- U.S. Department of State: United States Climate Action Report 2014. 2014. URL: <http://www.state.gov/e/oes/rls/rpts/car6/index.htm> (zuletzt geprüft am 25. 11. 2015).
- van der Vorst, J. G.; Tromp, S.-O.; van der Zee, D.-J.: Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics. *International Journal of Production Research* 47 (2009) 23, S. 6611–6631.
- Richtlinie des Vereins der Deutschen Ingenieure 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Grundlagen. Berlin: Beuth, 2014.
- Visser, J.: Role of the Public Sector. In: Taniguchi, E.; Thompson, R. G. (Hrsg.): *City Logistics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015, S. 25–40.
- Völker, R.; Neu, J.: *Supply Chain Collaboration: Kollaborative Logistikkonzepte für Third- und Fourth-Tier-Zulieferer*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- Wenger, W.: *Multikriterielle Tourenplanung*. Wiesbaden: Gabler, 2010.
- Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. Berlin: Springer, 2008.
- Werth, F.; Ullrich, O.: Simulation ausgewählter Heuristiken zur Tourenplanung in manuellen Kommissionierstationen. In: Brenke, A. (Hg.): *Tagungsband der ASIM-Konferenz STS GMMS*. Shaker Verlag, 2011, S. 161–166.
- Wertz, B.: *Management von Lieferanten-Produzenten-Beziehungen: Eine Analyse von Unternehmensnetzwerken in der deutschen Automobilindustrie*. Gabler Edition Wissenschaft. Unternehmensführung & Controlling. Wiesbaden: Gabler, 2000.
- Willis, K. O.; Jones, D. F.: Multi-objective simulation optimization through search heuristics and relational database analysis. *Decision Support Systems* 46 (2008) 1, S. 277–286.
- Ziebuhr, M.; Kopfer, H.: The Integrated Operational Transportation Planning Problem with Compulsory Requests. In: González-Ramírez, R. G.; Schulte, F.; Voß, S.; Ceroni Díaz, J. A. (Hrsg.): *Computational logistics*. Bd. 8760. LNCS sublibrary. SL 1, Theoretical computer science and general issues. Cham [u.a.]: Springer, 2014, S. 1–15.

# Abbildungsverzeichnis

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Abb. 2.1: | Beispielhaftes Netzwerk einer Supply Chain . . . . .  | 9  |
| Abb. 2.2: | Beispiel für eine Route . . . . .   | 11 |
| Abb. 2.3: | Konzept eines UCCs nach Quak (2008) . . . . .   | 15 |
| Abb. 2.4: | Beispielhafte Vehicle Routing Probleme . . . . .  | 18 |
| Abb. 3.1: | Systemzustandsänderungen der diskreten und kontinuierlichen Simulation nach Banks et al. (2005) . . . . . | 30 |
| Abb. 3.2: | Beispielhafter Austausch von Kundenaufträgen basierend auf Schwind und Kunkel (2009) . . . . .            | 34 |
| Abb. 3.3: | Beispielhafte Erstellung eines Szenarios nach Fechteler und Gutenschwager (2014) . . . . .                | 36 |
| Abb. 3.4: | Ausgewählte SC-Bausteine nach Fechteler und Gutenschwager (2014) . .                                      | 39 |
| Abb. 4.1: | Darstellung des Ist-Zustands . . . . .  | 42 |
| Abb. 4.2: | Darstellung des Soll-Zustands . . . . .   | 43 |
| Abb. 4.3: | Entitätstyp Route im Ist-Zustand . . . . .  | 62 |
| Abb. 4.4: | Entitätstyp LocationsOnRoute im Ist-Zustand . . . . .   | 63 |
| Abb. 4.5: | Entitätstyp Route im Soll-Zustand . . . . .   | 63 |
| Abb. 4.6: | Entitätstyp LocationsOnRoute im Soll-Zustand . . . . .  | 64 |
| Abb. 4.7: | Konstruktion einer Rundtour mit dem Savings-Verfahren . . . . .   | 65 |
| Abb. 5.1: | Darstellung der Lokalisierung der Warenlager . . . . .  | 70 |



# Tabellenverzeichnis

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tab. 2.1: | Planungskategorien nach Wenger (2010) . . . . .                   | 10 |
| Tab. 3.1: | Übertragung der Datenbankbegriffe auf SimChain . . . . .          | 36 |
| Tab. 4.1: | Einordnung von Ausprägungen der gemeinsamen Ressourcennutzung . . | 46 |
| Tab. 4.2: | Bewertung der Kollaborationsmodelle . . . . .                     | 52 |
| Tab. 5.1: | Auflistung der Warenlager . . . . .                               | 68 |
| Tab. 5.2: | Lokalisierung der ausgewählten Warenlager . . . . .               | 69 |
| Tab. 5.3: | Übersicht über Einzelheiten der Warenlager . . . . .              | 71 |
| Tab. 5.4: | Fahrzeiten zwischen den Warenhäuser (in Min.) . . . . .           | 72 |
| Tab. 5.5: | Distanzmatrix der Warenhäuser (in km) . . . . .                   | 73 |
| Tab. 5.6: | Savingsmatrix der Warenhäuser (in km) . . . . .                   | 73 |
| Tab. 5.7: | Überprüfung der Warenlagerbetriebszeiten . . . . .                | 74 |

# Abkürzungsverzeichnis

|        |  |
|--------|--|
| 2E-VRP | Two-Echelon Vehicle Routing Problem                    |
| API    | Application Programming Interface                      |
| CVRP   | Capacity-Constrained VRP                               |
| DES    | Discrete Event Simulation                              |
| DVRP   | Distance-Constrained VRP                               |
| ECR    | Efficient Consumer-Response                            |
| FSMVRP | Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem             |
| GUI    | Graphical User Interface                               |
| IOTP   | Integrated Operational Transportation Planning         |
| KEP    | Kurier-Express-Paket                                   |
| LKW    | Lastkraftwagen   |
| MDVRP  | Multi Depot Vehicle Routing Problem                    |
| OECD   | Organisation for Economic Co-operation and Development |
| PDVRP  | Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery       |
| PUDOs  | Pickup and Drop-Off Automation Solutions               |
| PVRP   | Periodic Vehicle Routing Problem                       |
| SC     | Supply Chain   |
| SCM    | Supply Chain Management                                |
| SCS    | Supply Chain Services                                  |
| SDVRP  | Split Delivery Vehicle Routing Problem                 |
| SKU    | Stock Keeping Unit                                     |
| TSP    | Traveling Salesman Problem                             |
| UCC    | Urban Consolidation Centre                             |
| UGM    | Urban Goods Movement                                   |
| VRP    | Vehicle Routing Problem                                |
| VRPHE  | Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Vehicles    |
| VRPSPD | VRP with Simultaneous Pickup and Delivery              |
| VRPTW  | VRP with Time Window Constraints                       |

# Gleichungsverzeichnis

|         |                                   |    |
|---------|-----------------------------------|----|
| Gl. 2.1 | Variable $y$                      | 21 |
| Gl. 2.2 | Variable $x$                      | 21 |
| Gl. 2.3 | Zielfunktion                      | 21 |
| Gl. 2.4 | Kapazitätsrestriktion             | 21 |
| Gl. 2.6 | Zusammenhängende Touren           | 21 |
| Gl. 2.8 | Subtours                          | 22 |
| Gl. 2.9 | Savings-Gleichung                 | 24 |
| Gl. 4.1 | Zielfunktion_neu                  | 60 |
| Gl. 4.2 | Berücksichtigung von Zeitfenstern | 60 |

# Algorithmenverzeichnis

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Alg. 2.1 | Sweep-Verfahren nach Domschke und Drexl (2010) | 23 |
| Alg. 2.2 | Savings-Verfahren                              | 24 |
| Alg. 2.3 | 2-opt-Verfahren nach Suhl und Mellouli (2013)  | 26 |

# Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel „Ein Konzept zur Umsetzung eines kollaborativen Tourenplanungsansatzes in einem datengetriebenen Supply-Chain-Simulationsmodell“ selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

## Belehrung:

Wer vorsätzlich gegen eine die Täuschung über Prüfungsleistungen betreffende Regelung einer Hochschulprüfungsordnung verstößt, handelt ordnungswidrig. Die Ordnungswidrigkeit kann mit einer Geldbuße von bis zu 50.000,00 € geahndet werden. Zuständige Verwaltungsbehörde für die Verfolgung und Ahndung von Ordnungswidrigkeiten ist der Kanzler/die Kanzlerin der Technischen Universität Dortmund. Im Falle eines mehrfachen oder sonstigen schwerwiegenden Täuschungsversuches kann der Prüfling zudem exmatrikuliert werden. (§ 63 Abs. 5 Hochschulgesetz - HG - ) Die Abgabe einer falschen Versicherung an Eides statt wird mit Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft. Die Technische Universität Dortmund wird gfls. elektronische Vergleichswerkzeuge (wie z.B. die Software „turnitin“) zur Überprüfung von Ordnungswidrigkeiten in Prüfungsverfahren nutzen. Die oben stehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

---

Ort, Datum

---

Unterschrift