

Masterarbeit

Anwendung von System Dynamics zur Bewertung von Belieferungs- strategien im Kontext der City-Logistik

Stephan Kullik

Matrikelnummer: 149262

Studiengang: Maschinenbau

Stephan.Kullik@tu-dortmund.de

ausgegeben am:
22.01.2019

eingereicht am:
04.10.2019

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe

Zweitgutachterin: M.Sc. Astrid Klüter

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis	I
Formelverzeichnis.....	II
Abkürzungsverzeichnis.....	III
1 Einleitung	1
2 City-Logistik im Kontext der Zukunftsentwicklung	3
2.1 Zukunftsentwicklungen von Städten	3
2.2 City-Logistik.....	5
2.3 Konkrete Entwicklungen einer Beispielstadt.....	13
3 Simulation als Analyseinstrument für City-Logistik-Ansätze	19
3.1 Grundlagen der Simulation.....	19
3.2 System Dynamics als Analyseinstrument.....	20
3.3 Abläufe der Modellbildung und Abstraktion.....	25
3.4 Durchführung von Simulationen mit System Dynamics	28
3.5 Ergebnisauswertung der Simulation und Erarbeitung von Kennzahlen	33
4 Theoretische Aufarbeitung von Belieferungsstrategien und Bewertungskriterien.....	36
4.1 Unternehmen und ihre Belieferungsstrategien	36
4.2 Kriterien für die Bewertung von Belieferungsstrategien.....	39
5 Konzepterarbeitung zur Bewertung von Belieferungsstrategien.....	41
5.1 Modellbildung eines Simulationsmodells zur Bewertung	41
5.2 Formelhinterlegungen im Simulationsmodell	44
5.3 Herleitung von Bewertungskriterien zur Bewertung von Belieferungsstrategien ...	48
5.4 Simulationsdurchführung zur Systemanalyse.....	50
5.5 Auswertung der Simulationsergebnisse mit der Kennzahlenermittlung und dem Punktbewertungsverfahren	54
6 Konzeptumsetzung zur Evaluation an einem Fallbeispiel.....	56
6.1 Vorstellung des Fallbeispiels.....	56
6.2 Modellbildung und Abstraktion der Unternehmensdistribution.....	58
6.3 Simulationsdurchführung bestehender und neuartiger Belieferungsstrategien	72
6.4 Ergebnisauswertung der Simulation mit der Kennzahlenermittlung für das Punktbewertungsverfahren	80
7 Evaluation für die Verwendung von SD zur Bewertung von Belieferungsstrategien	95

8 Zusammenfassung und Zukunftsausblick	99
Literaturverzeichnis	101
Anhang.....	110
Eidesstattliche Versicherung.....	226

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Darstellung der Bausteine in der System Dynamics Modellbildung	22
Abbildung 3.2: Vereinfachtes Causal Loop Diagramm von einem Wachstumsprozess.....	22
Abbildung 3.3: Flussdiagramm von einem Wachstumsprozess und Visualisierung der Simulationsergebnisse	23
Abbildung 3.4: Screenshot mit Vensim Beispieldarstellung	23
Abbildung 3.5: Räuber Beute Modell als Flussdiagramm	27
Abbildung 3.6: Simulationsergebnis für das Räuber Beute Modell.....	35
Abbildung 5.1: Beispieldarstellung eines Konfidenzintervalls.....	55
Abbildung 6.1: Haupteffektdiagramm für die laufenden Kosten, Teil 1	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Luftunreinheiten in Athen.....	16
Tabelle 3.1: Ausschnitt der Faktorausprägungen im $2k$ Factor-Design Ansatz	31
Tabelle 4.1: Beispieltabelle für das Punktbewertungsverfahren	40
Tabelle 5.1: Wirkzusammenhänge und Farbcodierungen im Simulationsmodell.....	44
Tabelle 5.2: Zuordnung der Berechnungsformeln mit Erklärung im Simulationsmodell.....	46
Tabelle 5.3: Entitäten als Eingangsfaktoren im Simulationsmodell und ihr Definitionsbereich	50
Tabelle 5.4: Beispiel der Struktur eines Versuchsplans für Experimente an Belieferungsstrategien	52
Tabelle 5.5: Kennzahlen und die Bepunktung für das Punktbewertungsverfahren	55
Tabelle 5.6: Bewertungskriterien und die Priorisierung für das Punktbewertungsverfahren	55
Tabelle 6.1: Unternehmensdaten mit Durchschnittswerten von Logistikabläufen	57
Tabelle 6.2: Vorgehensschritte und Besonderheiten der Datenaufbereitung	59
Tabelle 6.3: Aufbereitete Unternehmensdaten für Einzelfahrten.....	62
Tabelle 6.4: Aufbereitete Unternehmensdaten für Routenfahrten	63
Tabelle 6.5: Anpassung des Simulationsmodells an die Stadt	63
Tabelle 6.6: Anpassung des Simulationsmodells an das Unternehmen	68
Tabelle 6.7: Fallunterscheidungen im Simulationsmodell: Fahrten.....	72
Tabelle 6.8: Fallunterscheidungen im Simulationsmodell: Unterhaltskosten.....	73
Tabelle 6.9: Fallunterscheidungen im Simulationsmodell: Entladezeiten	73
Tabelle 6.10: Kennzahlen und ihre Bepunktung für die Bewertung im Fallbeispiel	89
Tabelle 6.11: Priorisierung der Bewertungskriterien für die Bewertung im Fallbeispiel	89
Tabelle 6.12: Bewertungstabelle der einzelnen Belieferungsstrategien.....	94

Formelverzeichnis

(3.1) Faktorisierung: Kombinationen nach Anzahl und Ausprägung der Faktoren	30
(3.2) Faktorisierung: Kombinationen nach Anzahl der Faktoren im 2^k Factor-Design	31
(3.3) Faktorisierung: Formel der Effektivitätsbestimmung von Faktoren	31
(3.4) Faktorisierung: Beispiel der Effektivitätsbestimmung von einem Faktor	31
(3.5) Faktorisierung: Kombinationen nach Anzahl der Faktoren im 2^{k-p} Factor-Design ...	32

Abkürzungsverzeichnis

BIB	Bruttoinlandsprodukt
BG	Bestandsgröße
BNE	Bruttonationaleinkommen
BS	Belieferungsstrategie
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DGL-System	Differenzialgleichungssystem
EU	Europäische Union
EFB	Einfahrbeschränkung
E-Kfz	Elektrisch angetriebene Kraftfahrzeuge
FG	Flussgröße
FP	Fuhrpark
FPF	Fuhrparkfahrzeug
Kfz	Kraftfahrzeug
Lkw	Lastkraftwagen
NO ₂	Stickstoffdioxid
N. r. t. P.	Nicht rechtzeitig transportierte Paletten
PBV	Punktbewertungsverfahren
PM	Particulate Matter
Pkw	Personenkraftwagen
ÖPNV	Öffentlichen Personennahverkehr
SD	System Dynamics
SGW	Schadstoffgrenzwert
SW	Schadstoffwert
SO ₂	Schwefeldioxid
Tkm	Tonnenkilometer
UN	United Nations

1 Einleitung

Veränderungen in der weltweiten Wirtschaft, der Gesellschaft sowie der Politik führen dazu, dass Unternehmen ihre Belieferungsstrategie (BS) regelmäßig hinterfragen und anpassen müssen, um im Wettbewerb miteinander bestehen zu können (Castellani et al. 2018). Nach Zehle (1997) wird die Logistik in der Stadt durch das Wachstum der Stadt vor Herausforderungen gestellt. Bei den Herausforderungen sind zwei Ausgangsfaktoren zu berücksichtigen. Zum einen ist die *Urbanisierung*, mit einer „...Ausbreitung und Verstärkung städtischer Lebens-, Wirtschafts- und Verhaltensweisen...“ (Bähr und Gans 2010, S. 59) zu beachten. Zum anderen ist die *Verstädterung*, welche zu einer „...Vergrößerung von Städten nach Zahl, Fläche oder Einwohnern sowohl absolut als auch im Verhältnis zur ländlichen Bevölkerung...“ (Bähr und Gans 2010, S. 59) führt, relevant bei der Betrachtung. Wenn die Urbanisierung und Verstädterung wie prognostiziert weiter voranschreitet, werden im Jahr 2100 bis zu 85 Prozent der Bevölkerung in Stadtgebieten leben (OECD 2015). Problematisch angesichts dieser Entwicklungen bei knappem Verkehrsraum für viele Menschen sind die in der Folge entstehende Verkehrsüberlastung und Luftverschmutzung. Mit weltweiten gesellschaftspolitischen Umbrüchen und strengeren Luftreinhalteplänen der Europäischen Union (EU) ergeben sich für Mitgliedsländer der EU verbindliche Umweltauflagen für den Straßenverkehr (EU 2001). Im Fall von Grenzwertüberschreitungen werden daher politische Maßnahmen getroffen, wie die Verhängung von Mautgebühren oder Einfahrbeschränkungen (EFBen) (OECD 2015). Die Maßnahmen äußern sich nach Lehmacher (2015) und OECD (2015) durch höhere Fahrzeiten und steigende Kosten bei Logistikprozessen, was eine Herausforderung für die Logistik darstellt. Die Herausforderungen werden verstärkt durch ein erhöhtes Konsumverhalten der Bürger, was zu einem wachsenden Güterverkehr führt. Die Wünsche der Bürger in der Stadt sind die Wahrung der Lebensqualität, Ressourcen und dem Klimaschutz. Die resultierende Problemstellung ist die schwerer werdende Vereinigung der Wünsche der Bevölkerung und der Zielführung eines wirtschaftenden Logistikdienstleisters im Bereich der Stadt. Als Ausgangslage wird ein Teil der Logistikdienstleister Anpassungen an der eigenen BS vornehmen müssen (Castellani et al. 2018). Für die Logistik in der Stadt werden unter dem Sammelbegriff der *City-Logik* unterschiedliche BSn für die Bewältigung der beschriebenen Ausgangslage gesucht (Schulte 1999, S. 49 ff.).

Zur Analyse, wie die BSn und Logistiksysteme mit ihren Wirkzusammenhängen miteinander vereinbart werden können, wird ein Hilfswerkzeug benötigt. In dieser Arbeit wird aufgrund der Eigenschaften die Simulationsmethodik *System Dynamics* (SD) als ein mögliches computerbasiertes Analyseinstrument verwendet. Nach Weber (1979) gleicht der Modellaufbau und die Funktionsweise von SD dem Aufbau der Bauelementen der Regelungstechnik, mit der Verwendung von Rückkopplungen. Durch den vernetzten Modellaufbau lassen sich mit SD die Wirkzusammenhänge einer BS eines Logistiksystems bei einer übergeordneten Systemdarstellung simulieren (Dürschmidt 2001, S. 78 f.; Weber 1979). Mit der Fähigkeit ein Logistiksystem abzubilden ist SD als ein Hilfsmittel bei einer Bewertung von BSn verwendbar.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Bewertung von BSn im Kontext der City-Logistik mithilfe von SD. Zum Erreichen dieses übergeordneten Ziels ist die Arbeit in mehrere Teil-

ziele gegliedert. Ein Teilziel ist die Identifikation sowohl der bestehenden BS bei einem Unternehmen auf Grundlage der Unternehmensdaten als auch möglicher alternativen BSn. Mit einer Gegenüberstellung der Effektivität von BSn wird eine Bewertung zwischen den BSn ermöglicht. Für die Bewertung werden mithilfe von SD Simulationsexperimente durchgeführt und Prognosen der BSn mit ihren Auswirkungen auf das System erstellt. Die in den Experimenten prognostizierten Umsätze werden zu vereinfachten quantitativen Zahlen zusammengefasst. Durch die große Bedeutung einzelner Zahlen für das System werden sie als Kennzahlen in die Bewertung aufgenommen. Mit der Gegenüberstellung der Kennzahlen und der weiteren Herleitung von Bewertungskriterien nach wirtschaftlichen, technischen, organisatorischen und rechtlichen Kriterien, wird die Bewertung der BSn ermöglicht. Die Bewertung ist ein weiteres Teilziel. Als Ergebnis werden die Teilziele für die Bewertung von BSn in einem Konzept zusammengefasst, bevor mithilfe eines Fallbeispiels eine Evaluation des Konzeptes durchgeführt wird.

Zum Erreichen der Zielsetzung ist das methodische Vorgehen dieser Arbeit in acht aufeinander aufbauende Schritte gegliedert. Um ein Verständnis für die Notwendigkeit der Anpassungen der BS und Kernwissen für die Anpassung eines Modells zu vermitteln, werden im Kontext der City-Logistik relevante Zukunftsentwicklungen von Städten näher beschrieben. Mit der weiteren Beschreibung, welche genauen Einflüsse und Auswirkungen die Zukunftsentwicklungen auf die Stadt und die City-Logistik haben, wird die Grundlage für die Erstellung eines Simulationsmodells mit allen relevanten Entitäten gelegt. Mit der Beschreibung einer Beispielstadt wird das zuvor dargestellte an einem Praxisbeispiel verdeutlicht und gleichzeitig die Grundlage geschaffen für eine spätere Evaluation des erarbeiteten Konzeptes. Für die Entwicklung eines Konzeptes zur Bewertung von BSn müssen drei weitere Theoriebereiche beschrieben werden. Zum einen sind unterschiedliche BSn als Vergleichsgrundlage nötig und zum anderen werden Bewertungskriterien gebraucht, um BSn effektiv bewerten zu können. Über die Darstellung unterschiedlicher BSn werden mögliche Untersuchungsfälle für Simulationsexperimente zusammengetragen. Mit der Erläuterung zu Bewertungskriterien werden die Randbedingungen für eine möglichst objektive Bewertung von BSn dargelegt. Für die Analyse der Problemstellung in der City-Logistik, wird ein Analyseinstrument benötigt, welches die komplexen Wirkzusammenhänge, die in einem Logistiksystem vorliegen, entsprechend in einem Simulationsmodell wiedergeben und untersuchen kann. Als Analyseinstrument wird die Simulationsmethodik SD näher erläutert. Neben der Darstellung allgemeiner Bausteine von SD erfolgt auch die Erklärung von Simulationsschritten, um bei der späteren Beschreibung eines Konzeptes, auf diese Erklärungen zurückgreifen zu können. Mit der Erarbeitung eines Konzeptes zur Bewertung von BSn beginnt der Eigenanteil dieser Arbeit. In diesem Teil wird auf die zuvor erarbeiteten theoretischen Kapitel zurückgegriffen, um eine Vorgehensweise für den Simulationsdurchlauf zu beschreiben. Für die Beschreibung des Konzeptes ist insbesondere die Erstellung des Simulationsmodells und die Herleitung der für die Bewertung verwendeten Kennzahlen bedeutend. Über die Auswertung des Zukunftsszenarios wird das Erstellen von zusammengefassten qualitativen Umsatzzahlen ermöglicht, die als Kennzahlen für die Bewertung verwendet werden können. Zur Evaluation des erarbeiteten Konzeptes wird ein Fallbeispiel eingeführt, mit dessen Daten das Konzept durchlaufen wird. In einer Evaluation werden die Erfahrung zur Anwendung und etwaige beim Durchlaufen des Konzeptes identifizierte Mängel aufgeführt.

2 City-Logistik im Kontext der Zukunftsentwicklung

In diesem Kapitel wird die Ausgangslage des in der Masterarbeit behandelten Themas näher beschrieben. Das umfasst insbesondere die Erläuterungen der Zukunftsentwicklungen von Städten, mit den resultierenden Herausforderungen und den Korrelationen zur City-Logistik. Das Wissen um den Themenbereich ist für die Modellierung relevant, um abzubildende Elemente identifizieren und deren weitere Entwicklung abschätzen zu können. Besondere Logistikverhältnisse und Herausforderungen, die aus den Korrelationen mit der City-Logistik entstehen, werden daher näher beschrieben. Für das bessere Verständnis wird zuerst eine allgemeine Beschreibung der Urbanisierung und Verstädterung vorgenommen, bevor die Zukunftsentwicklung in einer Beispielstadt erläutert wird.

2.1 Zukunftsentwicklungen von Städten

Die Entwicklung der Wohn- und Verhaltensweisen von Menschen unterliegt seit der Industrialisierung oder spätestens seit der Einführung von Kraftfahrzeugen (KFZ), mit der Individualisierung des Verkehrs, einem grundlegenden Wandel (Bähr und Gans 2010). Nach der Studie der OECD (2015), werden bis zum Jahr 2100 bis zu 85 Prozent der Weltbevölkerung in Städten leben. Im Jahr 1950 lebte ein Bevölkerungsanteil von 30 Prozent in den Städten (751 Mio. Menschen). Dieser Anteil ist bis zum Jahr 2018 auf 55 Prozent (4,2 Mrd. Menschen) angestiegen und soll im Jahr 2030 einen Zwischenstand von 60 Prozent erreichen (DESA 2018). Neben dem allgemeinen Wachstum der Bevölkerung ist für den Verlauf der weiteren Entwicklung auch das anteilige Wachstum der Städte bei einer Untersuchung zu beachten. Bei den Entwicklungen sind die Urbanisierung und die Verstädterung zu unterscheiden. Die *Urbanisierung* beschreibt einen sozial-geografischen Prozess (Paesler 1976) der „...Ausbreitung und Verstärkung städtischer Lebens-, Wirtschafts- und Verhaltensweisen...“ (Bähr und Gans 2010, S. 59), wohingegen die *Verstädterung* eine Prozess der „...Vergrößerung von Städten nach Zahl, Fläche oder Einwohnern sowohl absolut als auch im Verhältnis zur ländlichen Bevölkerung...“ (Bähr und Gans 2010, S. 59) beschreibt. Die Benennung des Begriffes der Urbanisierung ist innerhalb des Themenbereiches nicht einheitlich geregelt. (Heineberg 2017). Die Begriffe Verstädterung und Urbanisierung werden z. T. synonym verwendet. Die Begriffsnähe ist nach Heineberg (2017, S. 30 ff.) zurückzuführen auf die mangelnde Trennung der Begriffe in der englischen, spanischen oder französischen Sprache. Der Bereich der Kernstadt und das angrenzende suburbane Umland werden zusammenfassend als Agglomerationsraum beschreiben (Gaebe 1987). Die Entwicklung der Verstädterung in einem Agglomerationsräumen ist mit dem vier Phasenmodell von Gaebe (1987) beschreibbar. In dem Modell ist die beschriebene Unschärfe des Ausdrucks der Urbanisierung zu berücksichtigen. Die einzelnen Schritte des Modells nach Gaebe (1987) lauten:

1. Urbanisierung (Wachstum der Bevölkerung im Kernbereich der Stadt)
2. Suburbanisierung (Bevölkerungswachstum im Stadtumland)
3. Desurbanisierung (Bevölkerungsabnahme in allen Bereichen der Stadt)
4. Reurbanisierung (erneute Bevölkerungszunahme im Kernbereich der Stadt).

Für eine Untersuchung der weiteren Entwicklung einer Stadt ist die Identifikation der Entwicklungsphase notwendig, in der sich die Stadt befindet. Im Modell können mit der Entwicklungsphase zum zukünftigen Verhalten getroffen werden. In Phase eins, der Urbanisierung, ist ein Anstieg der Bewohner in der Kernstadt zu verzeichnen. Die historischen Gründe für diese Verstädterung sind nach Heineberg (2017) allgemein hohe Bevölkerungswachstumsraten infolge einer verringerten Sterblichkeitsrate. Des Weiteren führen nach Heineberg (2017), Lange et al. (2014), Brake (2001) und Lehmacher (2015) auch aktuell noch gültige Push und Pull Faktoren zu einem Zuwachs der Bevölkerung in der Kernstadt. Der Anstieg ist begründet durch die veränderte Lebensweise in der Kernstadt. Das Landleben wirkt zunehmend unattraktiv im Vergleich zur Lebensqualität in der Stadt mit dem größeren Angebot an Kultur, ärztlicher Versorgung, Arbeitschancen und Bildung. Der Zuwachs entsteht zum einen durch Menschen, die aus dem ländlichen Umland in die Stadt ziehen und zum anderen durch den Zuzug von Menschen außerhalb der Stadtgrenzen. Die Agglomeration der Einwohner wächst in dieser Phase somit an, wohingegen die Bevölkerung im Umland rückläufig ist. Nach Brake (2001, S. 15) ist die zweite Phase der Suburbanisierung als ein Prozess zu bezeichnen, „in dem sich Städte über die Grenzen ihrer bislang erreichten Besiedlung ausdehnen“. Die Kennzeichen sind nach Gaebe (1991) eine Reorganisation der Bevölkerungsverteilung bei vergrößerter Flächennutzung mit weiteren Verdichtungsräumen. Dagegen verliert in dieser Phase der Kernbereich der Stadt an Attraktivität. Die Zahl der Arbeitsplätze im Agglomerationsraum wächst und führt zu einer steigenden Nutzungsdichte in der Stadt. Ein unzureichender Wohnungsbau in der Kernstadt und eine gut ausgebaute Infrastruktur verstärken den Prozess der Bevölkerungsverschiebung von der Kernstadt in die Vororte. Die Verschiebung betrifft sowohl Einwohner als auch Arbeitsplätze. Die Folge ist ein Rückgang oder Stagnation der Einwohnerzahlen in der Kernstadt und ein Anstieg in den Vororten. Als Effekt steigen die Einwohnerzahlen im Agglomerationsraum an (Bähr und Gans 2010; Heineberg 2017). Die Abwanderung der Arbeitsplätze und Einwohner erfolgt nicht räumlich gebunden und führt zu einer zusätzlichen Verkehrsbelastung, da Pendler nicht nur in den äußeren und inneren Stadtbereichen pendeln, sondern auch zwischen einzelnen Stadtbereichen pendeln müssen (Bähr und Gans 2010; Brake 2005; Lee et al. 2006; Gaebe 1991). In der dritten Phase, der Des- oder Deurbanisierung nimmt nach Heineberg (2017, S. 58 ff.) die Gesamtbevölkerung im Agglomerationsraum ab. Während die Bevölkerung in der Kernstadt weiter rückläufig ist, steigt sie in den Vororten vorerst an, bevor die Einwohnerzahlen ebenfalls rückläufig werden. Ursächlich für diese Phase sind strukturschwache Räume und eine geringe Bereitschaft in hoch belastete Problembezirke zu investieren oder zu siedeln. In der vierten Phase der Reurbanisierung beginnt die Gentrifizierung, wobei nach Gaebe (1991, S. 9 ff.) vernachlässigte Gebiete in der Kernstadt kostenintensiv durch Renovierungen aufgewertet werden. Bei dem Prozess erfolgt die Verdrängung der ansässigen einkommensschwachen Bevölkerung. Der genaue Ablauf der einzelnen Phasen ist in der Abbildung in Anhang 1 ersichtlich und zeigt den Verstädterungsgrad einer Stadt im idealtypischen Verlauf (Bähr und Gans 2010). Der Ablauf der einzelnen Phasen muss nicht in der dargestellten Reihenfolge erfolgen (Heineberg 2017). Die Beschreibung des Modells soll dazu dienen, die Bedeutung von einzelnen Faktoren für die Attraktivität von Städten darzustellen und Rückschlüsse auf eine vermeintliche weitere Entwicklung einer Stadt anhand von Randbedingungen wie den Push und Pull Faktoren zu ermöglichen. Neben der Verstädterung mit dem vier Phasenmodell ist die Urbanisierung zu beachten. Die steigende Kaufkraft führt zu einem höheren

Konsum von Gütern. Der Konsum steigt dadurch sowohl absolut als auch pro Stadtbewohner an (Brake 2005, S. 9 ff.). Für die Beurteilung der weiteren Entwicklung einer Stadt sind wegen dem Konsum auch die Prognosen für das Einkommen zu berücksichtigen (Heineberg 2017). Analog zum Konsum führen steigende Einkommensverhältnisse zu steigenden Kfz-Anschaffungen. Der Effekt steigender Kfz Zahlen ist selbst bei Bevölkerungsrückgängen beobachtbar, sobald ein ausreichendes Einkommen zur Verfügung steht. Für den Effekt wurde ein lineares Wachstum von 4,1 Prozent der Fahrzeuge innerhalb von 17 Jahren bei gleicher Anzahl von Menschen und einem Einkommenszuwachs von ein Prozent als charakteristischer Wachstumswert erkannt (Ritter und Vance 2012). Nach der OECD (2015) ist die wachsende Verkehrsbelastung auf dem Verkehrsträger Straße bei einer begrenzten Verfügbarkeit der Infrastruktur für die Entstehung von Staus verantwortlich. Die verlängerten Fahrzeiten sind auch für die City-Logistik relevant, da in Bezug auf die Fahrzeuge weniger Fahrten pro Tag durchgeführt werden können und in Bezug auf die Fahrer die Lohnkosten pro Ziel steigen. Nach Omnitrend (2014) sind für die Beurteilung des Verkehrsaufkommens in einer Stadt die unterschiedlichen Nutzungsverhältnisse der Einwohner nach ihren Wohnorten zu berücksichtigen. In einer charakteristischen Großstadt mit vielen Vororten, wie beispielsweise Dortmund, legen die Einwohner im Durchschnitt 31 Kilometer pro Einwohner und Tag zurück, wobei für 47 Prozent der Strecke das Kfz und zu 20 Prozent der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) verwendet wird. Die Gliederung des Kfz-Bestands in der Stadt ist gekennzeichnet durch 0,5 Kfz pro Haushalt im Innenstadtbereich und 1,0 Kfz pro Haushalt in den Vororten der Stadt. Nach BMVI (2018) wurde für die Verwendung von Transportmitteln in Deutschland nach Personenkilometer pro Tag in der Innenstadt eine individuelle Verwendung des Kfz von 70 Prozent und eine Verwendung des ÖPNV von 22,2 Prozent zur Fortbewegung festgestellt. Bei der Betrachtung der Vororte nach Personenkilometer pro Tag ändert sich die Verwendung der Fortbewegungsmittel auf 81,5 Prozent beim Kfz und 13,2 Prozent beim ÖPNV.

2.2 City-Logistik

Aus den immer größer werdenden Städten, mit einer steigenden Anzahl von Menschen und baulichen Besonderheiten, ist ein in der Logistik besonders abgegrenztes Gebiet entstanden, die City-Logistik (Zehle 1997, S. 13). Die *City-Logistik* ist ein Sammelgriff der „...logistischen Konzeptionen zu Optimierung der Güterversorgung in den Städten...“ (Schulte 1999, S. 49). Während in absoluten Zahlen mehr Menschen versorgt werden müssen, steigt auch der Bedarf von Konsumgütern der Einzelpersonen weiter an (Kiwitt 2010). In Deutschland stieg allein die Beförderungsleistung des in dieser Arbeit berücksichtigten Verkehrsträgers Straße von 346,3 Mrd. Tonnenkilometer im Jahre 2000 auf 491 Mrd. Tonnenkilometer im Jahre 2017 an (DIW 2018). Die Definition und Herausforderung der City-Logistik ist nach Wittenbrink (1995) die operationelle und dispositive Organisation von Transporten in einer Stadt über vergleichsweise kurze Strecken, aber mit hohem Verkehrsaufkommen bei begrenzten Verkehrskapazitäten und besonderen Umweltauflagen. Mit der City-Logistik sollen die Transporte zur Bereitstellung oder Entsorgung im Kontext der Stadt effektiv und kostengünstig nach Art, Menge und Zeit bewältigt werden (Kiwitt 2010; Wittenbrink 1995, S. 14 f.). Nach Schulte (1999) und Zehle (1997, S. 15 ff.) gehört der Dienstleistungs- und Serviceverkehr sowie der Transport von Personen oder der private Einkaufsverkehr nicht in den Kontext der City-Logistik. Außerdem ist zu beachten, dass im Kontext der City-

Logistik nur Lösungsvorschläge erarbeitet werden können, für Infrastrukturprobleme der betrieblichen Logistik in einer Stadt und nicht für grundsätzliche Infrastrukturprobleme einer Stadt. Die Beteiligten und Betroffenen innerhalb des Systems der City-Logistik bzw. die Einflussfaktoren des Systems sind nach Zehle (1997) die Transportwirtschaft, der Einzelhandel, der Großhandel, die Industrie, Wirtschaftsverbände, die öffentliche Hand und die Einwohner der Stadt. Schwerpunktmäßig wird in dieser Arbeit die Transportwirtschaft selbst in Verbindung mit dem Einzel- und Großhandel betrachtet. Der Einzel- und Großhandel wird in diesem Kontext als Quelle und Senke verstanden, welche über den Transportdienstleister in Verbindung treten. Weiter nach Zehle (1997) sind im Kontext der City-Logistik Korrelationen zu weiteren Beteiligten während des Transports zwischen der Quelle und Senke zu berücksichtigen. In dieser Arbeit werden Korrelationen zu weiteren Beteiligten im Straßenverkehr nur über statistische Verkehrsbelastungen berücksichtigt, aber nicht explizit untersucht. Die City-Logistik besitzt zahlreiche Schnittpunkte mit weiteren Logistikbereichen. Die *Problemkundenlogistik* oder „*Supermarktlogistik*“ ist beispielsweise eine spezialisierte Sparte der City-Logistik. Für Supermärkten und Warenhäusern, wird ein hohes Handelsvolumen bei einer relativ homogenen Transportleistung transportiert. Die Entladung der Waren erfolgt unter zeitkritischen Bedingungen, um Wartezeiten an der Rampe möglichst zu unterbinden. Weitere Schnittstellenbereiche der City-Logistik sind die *Ökologistik*, die *Regiologistik*, die *Baustellenlogistik* und die *Messelogistik* in einer Stadt (Zehle 1997, S. 43 ff.). Bei der *Ökologistik* wird nach Kreitmair und Kraus (1995) die Logistik unter ökologischen Gesichtspunkten betrachtet. Die klassische Sicht eines Logistiksystems wird für die Betrachtung um die Wechselwirkungen mit der ökologischen Umwelt erweitert. Trotz der grundsätzlich unterschiedlichen Zielsetzung wirken die Problemfelder der beiden Betrachtungen ergänzend zueinander. Für die Betrachtung der City-Logistik wird verstärkt auf die Aspekte der Supermarktlogistik und, des Bevölkerungswachstums und der Ökologistik mit Schadstoffwerten zurückgegriffen. Als Rahmenbedingungen der City-Logistik sind kommunale Restriktionen, Politik und Gesetze, Gesellschaftliche und wirtschaftliche Normen sowie die Infrastruktur zu berücksichtigen (Zehle 1997, 55 ff.).

Für die Anwendung von SD zur Bewertung von BS_n sind unterschiedliche Schwerpunkte in der City-Logistik wählbar. Ein Konzept zur Bewertung, dass alle relevanten Aspekte beinhaltet steigt mit der Komplexität deutlich an und ist für den Umfang dieser Masterarbeit zu groß. Die Ausrichtung des in dieser Arbeit zu Erarbeitenden Konzepts zur Anwendung von SD zur Bewertung von BS_n ist daher an Beispieldaten ausgerichtet. Weitere Untersuchungen mit Schwerpunkten auf weiteren dynamisch verknüpften Entitäten sind prinzipiell möglich (Bossel 2004). Beispielhaft könnte das in Logistikuntersuchungen unterrepräsentierte Reklamationsmanagement mit den verbundenen Abläufen und Wirkzusammenhängen ebenfalls in das SD Simulationsmodell im Kontext der City-Logistik eingebunden werden (Rabe und Knothe 2006)

Zehle (1997, S. 47 f.) beschreibt die Ziele der City-Logistik zusammenfassend durch:

- „Kostensenkung,
- Erhaltung marktwirtschaftlicher Prinzipien,
- Auffrischung des Marktgeschehens unter ökologisch günstigeren Rahmenbedingungen,
- Erhalt der klassischen Zielparameter des Güterverkehrs: Sicherheit und Termintreue voran, Preiswertigkeit, Mengenleistungsfähigkeit, Flexibilität und Transportzeit,

- Optimierung des Mitteleinsatzes unter Berücksichtigung externer Nutzen- und Kostenkomponenten,
- Verbesserung der regionalen Wirtschaftsstruktur durch Verminderung externer Kosten,
- Verbesserte Standortsituation gegenüber der Konkurrenz,
- Aufwertung der City durch neue Serviceleistungen,
- Leistungserbringung unter geringmöglicher Beeinträchtigung der natürlichen Ressourcen und entsprechender Netzgestaltung,
- Verkehrsmeidung bei einer höheren Wirtschaftlichkeit des städtischen Lieferverkehrs,
- Minimierung der Summe der Umwelt- und Verkehrsbelastung,
- Erhalt des Nutzermix der City,
- Verbindung von ökonomischen, ökologischen und politischen Interessen,
- Schutz vor zunehmenden Restriktionen durch die öffentliche Hand,
- Aufwertung des Wirtschaftsverkehrs innerhalb des Gesamtbildes einer Stadt“.

Gesellschaftliche Einflüsse im Kontext der City-Logistik

Ursächlich für die besonderen Herausforderungen der City-Logistik ist die Stadt selbst, welche als leistungsfähigeres Wirtschaftssystem mit einer verstärkten Nachfrage nach Waren und Produkten einhergeht. Dass bedingt für den Agglomerationsraum wiederum weiter steigende Bewohnerzahlen und höhere Einkommen (Abschnitt 2.1). Durch höhere Einkommen können mehr Konsumartikel erworben und der Lebensstandard weiter erhöht werden (Lehmacher 2015). Nach Lehmacher (2015) und Olbrich (2006) ist neben einer Erhöhung des Konsums allein durch die größere Anzahl von Menschen auch eine Steigerung des Konsums durch die veränderte Verhaltensweise der Menschen zu beobachten. Während die Verbreitung des elektronischen Handels das Kaufen von Produkten erleichtert, werden die Produktlebenszyklen vieler Produkte kürzer, wodurch Produkte in kleineren werdenden Abständen nachgefragt, angeboten, verkauft und transportiert werden. Für den resultierenden höheren Konsum müssen immer mehr Transporte durchgeführt werden, auf Straßen, die wiederum durch den wachsenden Individualverkehr, stärker ausgelastet werden (Kiwitt 2010). Neben dem Zuwachs von alltäglichen Konsumgütern wächst mit steigenden Einkommen auch die Anzahl der Kfz der Einwohner (Abschnitt 2.1). Eine Zunahme des Individual- und Transportverkehrs führt zu einem höheren Verkehrsaufkommen. Ohne ausreichende Infrastruktur bedeutet ein hohes Verkehrsaufkommen eine Zunahme von Staus innerhalb der Stadt (Lehmacher 2015). Für Einwohner und Dienstleister bedeuten Staus zeitliche Verzögerungen, weshalb Zeitpuffer einkalkuliert werden müssen (Britisches Verkehrsministerium 2015). Sollten Logistikdienstleister keine zeitlichen Puffer einplanen, würde die Servicequalität aufgrund von unpünktlichen Lieferzeiten sinken (Kiwitt 2010). Durch die von Staus verlängerten Fahrzeiten entsteht für einen Logistikdienstleister ein zusätzlich einzukalkulierender Kostenfaktor (Lehmacher 2015; Graham 2018). Als Beispiel für die Auswirkungen von Staus auf Zeitverluste, ist die Durchschnittsgeschwindigkeit aufzuführen. Nach Forbes (2008) lag in London die durchschnittliche Geschwindigkeit vor der Einführung einer sog. Staugebühr, welche das Verkehrsaufkommen senkte, bei ca. 19 km/h. In einer Hauptstadt wie Amsterdam werden dagegen 34 km/h erreicht. Trotz einer nicht autofreundlichen Verkehrsausrichtung liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit höher, aufgrund einer geringer ausgelasteten Infrastruktur. Unter anderem durch den in Städten besonders hohen Fahrzeugverkehr mit Verbrennungsmotoren entsteht eine hohe

Emission des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid (CO₂), welches zur Klimaerwärmung beiträgt (Svante 1896). Während Städte nur drei Prozent der Fläche ausmachen, sind Städte für 80 Prozent der CO₂ Emissionen verantwortlich (Dürand 2012). Für den Anteil des beim Transport in der Stadt produzierten CO₂ liegt der Anteil dagegen bei 40 Prozent im Vergleich zum beim gesamten Transport entstandenen CO₂ (Hermes 2012). Neben CO₂ entstehen bei dem Betrieb eines Verbrenner Kfz zusätzlich Schadstoffe (Hermes 2012). Nach dem Umweltbundesamt (2018, 2019) gehören zu den entstehenden Schadstoffen Schwefel- (SO₂), Stickstoffdioxide (NO₂) und Feinstäube unterschiedlicher Größe. Im Kontext der Schadstoffemissionen werden Feinstäube oder Particulate Matter (PM) in die Gruppen kleiner als 10,0 Mikrometer (PM₁₀) und kleiner als 2,5 Mikrometer (PM_{2,5}) kategorisiert. Jeder der Schadstoffe ist gesundheitlich bedenklich und durch die Politik reglementiert. Die gesellschaftliche Entwicklung geht zu einer stärkeren Eingrenzung dieser Schadstoffe und CO₂. Dagegen bedeuten mehr Fahrzeuge einen tendenziell höheren Ausstoß dieser Schadstoffe und CO₂. Nach den Verkehrszahlen wird zum jetzigen Zeitpunkt eine Entwicklung mit steigenden CO₂- und Schadstoffkonzentrationen prognostiziert, bedingt durch steigenden Zulassungszahlen und steigender Motorleistung von Kfz mit Verbrennungsmotoren (Umweltbundesamt 2019; 2018; EU 2001; 2008; Destatis 2018). Durch die zunehmend Konzentration von Schadstoffemissionen in der Stadt (Lehmacher 2015), werden für den Menschen gesundheitsschädliche Grenzwerte überschritten und vermehrt Feinstaub- oder Smogalarne auslöst (Kiwitt 2010). Aufbauend auf dem Pariser Abkommen entwickelt sich in Teilen der Bevölkerung der Wunsch zu einer Mobilitätswende. Die Mobilitätswende ist verbunden mit der Abschaffung des Verbrennungsmotors und dem Ersatz durch einen emissionsarmen Antrieb. Neben der Reduktion des CO₂ Ausstoßes basiert der Wunsch zur Mobilitätswende auch auf dem Verlangen von Teilen der Gesellschaft, eine bessere Luftqualität in den Städten zu erreichen, mit weniger Schadstoffen wie SO₂, NO₂ und PM (Römer 2017). Während Lastkraftwagen (Lkw) verstärkt für Belieferungen in der City-Logistik verwendet werden, liegt der Anteil der Fahrleistung von Lkws im gesamten Stadtverkehr nur bei einem Faktor von ca. einem Zehntel des Verkehrsaufkommens (Schulte 1999). Aufgrund von der Größe sowie der höheren Lärm- und Schadstoffemissionen im Vergleich zu einem durchschnittlichen Personenkraftwagen (Pkw) werden Lkw oftmals als unangenehm bzw. als nicht wünschenswert empfunden (Schulte 1999).

Eine weitere Entwicklung der Verstädterung ist der Mangel an Baugrund, was bei einem freien Markt, durch die steigende Nachfrage zu steigenden Grundstücks- und Mietpreisen führt (Fritzsche und Kluge 2014). Nach Fischer und Dittrich (2013) entstehen für die Logistik durch Mietpreissteigerungen höhere Lagerkosten, was Änderungen in der BS und eine Verringerung der Lagerfläche sinnvoll machen kann. Ein Lagerkapazitätsverlust muss durch logistische Maßnahmen ausgeglichen werden, um eine gleichbleibende Servicequalität zu gewährleisten. In diesem Kontext ist eine Abwägung zur Auslegung eines Lagers möglich. Im Kontext der City-Logistik wird in dieser Masterarbeit das Lager als Quelle angesehen und die Auslegung der Lagergröße nicht weiter untersucht. Die Entwicklungen beim Kunden zeigen einen Engpass an der Laderampe auf, welcher durch ein starkes Transportaufkommen, Zonen mit EFBen und zeitlich begrenzte Warenannahmen entstehen kann (Schulte 1999, S. 49 ff.). Komplexere Strukturen und höhere Kundenanforderungen führen ebenfalls zu steigenden Logistikkosten durch einen erhöhten Aufwand bei den Lieferketten (Kiwitt 2010).

Die zuvor aufgeführten Korrelationen in der Stadt, wie wachsender Einwohnerzahlen und wachsender Verkehrsteilnehmer führen zu einem steigenden Verkehrsaufkommen. Bei einem hohen Verkehrsaufkommen werden die Fahrzeiten für alle Verkehrsteilnehmer verlängert. Da für die Logistik längere Fahrzeiten mit höheren Ausgaben verbunden sind, die aber keinen zusätzlich wertschöpfenden Nutzen bringen, wird die Entität der Fahrzeit als ein bedeutender Einflussfaktor zur Bewertung von BSn verwendet (Graham 2018).

Politische und betriebliche Maßnahmen im Kontext der City-Logistik

Durch das stärkere Umweltbestreben in der Gesellschaft und das negative Gesellschaftsbild von Lkw muss ein Dienstleister in der City-Logistik mit einem verstärkten gesellschaftlichen Druck auf die Politik rechnen. Die Politik drängt Unternehmen durch gesetzliche Auflagen wiederum zu effizienteren und schadstoffärmeren Abläufen und Fuhrparkfahrzeugen (FPF). Der momentan vorherrschenden FPF mit Verbrennungsmotoren sind zunehmend widersprüchlich, zu den politischen Versprechungen einer Reduktion der CO₂-Emissionen (UN 2015). Vor der Problemstellung verschmutzter Luft und verlorener Lebensqualität ist die Politik aufgefordert worden Konzepte zur nachhaltigen Verbesserung nach ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Gesichtspunkten einzuführen und umzusetzen (Kiwitt 2010). Politische Entscheidungen sind daher für die Umsetzung von logistischen Transporten im Kontext der City-Logistik von zunehmender Bedeutung. Neben umweltpolitischen Entscheidungen tangieren auch infrastrukturpolitische Maßnahmen die City-Logistik (Schulte 1999, S. 49 ff.).

Nach Lehmacher (2015) und UMID (2011) ist eine politische Maßnahme zur Verbesserung der Luftqualität die Einführung von sog. *Umweltzonen* in stark von Feinstaub und Stickoxid belasteten Städten, zur Reduzierung von Kfz, die besonders große Mengen dieser Schadstoffe ausstoßen. Bei der Maßnahme werden stufenweise Fahrzeuggruppen aus Umweltzonen ausgeschlossen, gestaffelt nach ihren Schadstoffemissionswerten (UMID 2011; Lehmacher 2015). Weiter nach Lehmacher (2015) entsteht durch die Zufahrtsbeschränkung ein Anreiz für Privatpersonen und Logistikdienstleistern zum Fahrzeugwechsel zu schadstoffemissionsarmen oder emissionsfreien Kfz. Unternehmen versuchen aufgrund der Zufahrtsbeschränkung zum einen auf politische Vorgaben einzugehen und zum anderen auf die ohnehin schwierigeren Lieferbedingungen in der City-Logistik prozessstabilisierend einzuwirken (Hermes 2012).

Dabei ist nach Schulte (1999, S. 49 ff.) das Grundziel der City-Logistik die Bündelung von Waren in einer Sendung, um eine möglichst hohe Effizienz der Logistikprozesse zu erreichen. Für eine Effizienzsteigerung sind zwei grundlegende Lösungswegarten anwendbar. Zum einen sind *intraorganisatorische Lösungsansätze* denkbar, die innerhalb eines Einzelunternehmens für den Transport umgesetzt werden. Möglichkeiten zu Effizienzsteigerung sind Tourenplanungssysteme, ein flexibler Personaleinsatz oder Informations- und Kommunikationssysteme für das Bestands- und Lagermanagement. Zum anderen sind *interorganisatorische Lösungsansätze* denkbar, wobei horizontale und vertikale Kooperationslösungen mit anderen Unternehmen zusammen erarbeitet werden. Da die Interorganisatorischen Lösungsansätze einen größeren Wirkungsbereich abdecken, sind die mit ihnen zu erreichenden Effekte effektiver als intraorganisatorische Lösungsansätze in einzelnen Unternehmen. Beispiele für interorganisatorische Lösungsansätze sind das Zusammenfassen von Sendungen, von mehreren Absendern bei unterschiedlichen Logistikdienstleistern, die an denselben Empfänger gerichtet sind, mithilfe eines Konsolidierungszentrums außerhalb der Stadt. Durch die Kollaboration mit anderen Logistikdienstleistern sollen

Hebelkräfte vergrößert und weitere Einsparungseffekte entstehen. Die Konsolidierung lässt sich mit einer Tourenplanung für unterschiedliche Stadtbereiche verbinden und schafft durch die Kombination ein weiteres Einsparungspotential beim Logistikdienstleister. Alternativ sind ebenfalls Warenlager außerhalb der Stadt möglich, welche über Logistikdienstleister verwaltet werden und Waren in die Stadt zum Kunden transportieren. Mit der Konsolidierung lässt sich in Ballungsgebieten Lagerfläche einsparen. Ein weiterer vertikaler Lösungsansatz ist einen Informationsfluss zwischen Unternehmen und allen Teilnehmern zu gewährleisten, um den Transportablauf zu verbessern. Nicht alle Maßnahmen zur Zielerreichung der City-Logistik lassen sich problemlos in die Arbeitssysteme der Logistikdienstleister integrieren. Eine mangelnde Kundenbereitschaft für die Umsetzung dieser Maßnahmen beruht auf dem höheren Arbeitsaufwand, der mit den Maßnahmen einhergeht. Aufgrund der widersprüchlichen Ausgangslage ist eine Abwägung zu treffen, ob der zusätzliche Aufwand für den Kundenschutz, die zusätzliche Arbeitszeit, weitere Planungsaufgaben etc. die Synergievorteile kompensieren oder eine Verbesserung erreicht werden kann.

Nach Lehmacher (2015) kann durch die Vernetzung der sog. *Digitale Revolution* ein Informationsaustausch von Logistikketten, Zulieferern, Transportfahrzeugen und Verkehrsinformationsdiensten während des gesamten Logistikprozesses erleichtert werden. Mit der Verwendung von Echtzeitdaten sind neue Lösungsansätze für Logistikdienstleister denkbar. Beispielsweise sind durch intelligente Verkehrskonzepte mit der Verwendung von Echtzeitdaten Stauumfahrungen möglich. Je nach Logistikdienstleister und verwendeter BS sind Echtzeitdaten für eine variable Tourenplanung verwendbar. Im Falle der Routenplanung mithilfe von Echtzeitdaten kann durch das Wegfallen starrer Routenpläne besser auf die wechselnden Gegebenheiten des städtischen Straßenverkehrs reagiert werden.

Für die City-Logistik ist nach Kiwitt (2010) auch das Bestandsmanagement mit dem Standort und der Größe von Lagern zu berücksichtigen. Um Nachfrageschwankungen und mangelnde Termintreue auszugleichen und einen hohen Servicegrad zu gewährleisten, ist ein ausreichend großer Bestand an Waren in hinreichend geringer Entfernung notwendig. Durch große Bestände steigt jedoch sowohl der Flächenbedarf und die mit dem Flächenbedarf verbundenen Lagerkosten als auch die Kapitalbindungskosten für die größere Anzahl von zu lagernden Produkten.

Für Logistikdienstleister ist nach Lehmacher (2015) und Zehle (1997, S. 43 ff.) das letzte Stück der Belieferung mit der Warenübergabe ein zunehmendes Problem (Umgangssprachlich wird von der sog. *letzten Meile* gesprochen). Während Lieferketten oft relativ lang sind, ist ein besonders kostenkritischer Teil die Zustellung auf den letzten Metern zum Kunden. Durch nicht anzutreffende Kunden und Lieferantentaus an der Laderampe wird das Problem verstärkt. Um prozessstabilisierend einwirken zu können sind Logistikdienstleister auf der Suche nach neuen Lösungsansätzen. Einer der Ansätze ist die zuvor vorgestellte Konsolidierung, die durch die vorgelagerte Behandlung des Transportvolumens weniger Lieferfahrzeuge pro Ziel benötigt und den Engpass lösen kann.

Neben den von Betrieben getroffenen Maßnahmen, um die Ziele der City-Logistik zu erreichen, ist nach Kiwitt (2010) die problematische Ausgangslage auch mit politischen Entscheidungen verbunden. Für Logistikdienstleister ist im Kontext der City-Logistik verstärkt auf Maßnahmen der Politik zu achten. Für eine nachhaltig fungierende BS sind diese politischen Maßnahmen möglichst vorausplanend in die Erstellung der eigenen BS einzubeziehen.

Durch die Einführung der Vorgaben der EU zur CO₂ Reduktion von mindestens 40 Prozent des CO₂ Ausstoßes bis zum Jahre 2030, im Vergleich zum Wert im Jahre 1990, sind auch Kfz von CO₂ Reduktionsmaßnahmen betroffen. Des Weiteren sollen bei der Verbrennung entstehende Schadstoffe, wie Feinstaub und NO₂ reduziert werden (EU-Kommission 2019; EEA 2008). Nach Michaelis (1996) ist eine Steuererhöhung ein mögliches politisches Instrument, um die CO₂ und Schadstoffemissionen zu reduzieren. Durch die erhöhten Steuern sind für ein Unternehmen Abwägungen zu treffen, wann die Anschaffung und der Betrieb schadstoffarmer Kfz wirtschaftlicher als die weitere Verwendung des bestehenden Fuhrparks (FP) ist. Sollte europäisches Recht umgesetzt werden, müssten auch Logistikdienstleister auf Dauer ihren FP erneuern, um die Grenzwerte bei Schadstoffen und CO₂ einzuhalten (EU-Kommission 2019; EEA 2008). Nicht alle möglichen Maßnahmen der Politik führen zu Nachteilen für die Logistikdienstleister und ihre Partner. Nach Lehmann (2015) führen EU Vorgaben für die SGW nicht nur zu Einfahrtbeschränkungen und Steuererhöhungen, sondern auch zu einer verstärkten Förderung von Konzepten außerhalb des Individualverkehrs. Gefördert werden multi-modale Systeme mit Zügen, Bussen, Straßen- und U-Bahnen sowie alternative Antriebssysteme. Die Zielvorstellung der Förderung ist neben der Reduzierung von Schadstoffen in der Luft auch die Vermeidung von Staus und Zeitverlusten in Großstädten. Zum jetzigen Zeitpunkt sind die Maßnahmen oftmals nur bedingt zielführend und Umwelt- sowie Verkehrsprobleme bestehen weiterhin. Eine Reduzierung von Zeitverlusten durch eine geringere Verkehrsbelastung wäre allerdings auch für die Logistik vorteilhaft. Durch eine Um- oder Neuplanung von Verkehrssystemen entstehen auch für den Transportsektor mögliche neue Chancen für Transportkapazitätserweiterungen auf und abseits des Verkehrsträgers Straße. Mit der Einführung neuer exklusiver Lieferantenspuren könnte in Städten beispielsweise die Lieferbedingungen verbessert werden. Mit der Maßnahme können die Transportzeiten verringert und die Termintreue verbessert werden. Analog könnten Logistikdienstleister mit einer schnellen Umstellung auf emissionsarme Kfz von exklusiven Kfz-Fahrspuren für Elektromobile profitieren. Mit der Umstellung ist für einen Logistikdienstleister ein Wettbewerbsvorteil gegenüber den Mitbewerbern realisierbar, wenn Mitbewerber die Vorteile einer exklusiven Fahrspur nicht verwenden und Verbesserungen des Servicegrades oder kürzere Lieferzeiten erreicht werden. Ein Hilfestellung Lite wird nach Lehmann (2015) und Birger (2019) ebenfalls durch eine klare Regelung von exklusiven Entladebuchten für Logistikdienstleister gegeben. Die Maßnahme soll nicht nur bei kleinen Einzelhandelsgeschäften und Paketzustellungen das Parken in zweiter Reihe auf einer Straße verhindern, sondern auch Lieferzeiten verringern und Abläufe verbessern. Wenn diese Initiative von der Politik umgesetzt wird, sind Kopplungen an emissionsfreie Kfz denkbar. Eine Umsetzung ist in der Zusammenstellung nur mit erhöhten Bußgeldern oder dem Abschleppen von Falschparkern denkbar. Nach Lehmann (2015) zeigen politische Maßnahmen zur Förderung des Straßenverkehrs mit einem Ausbau der Infrastruktur keine oder kaum positive Wirkung. Umgesetzte Maßnahmen in der Infrastruktur können nicht mit dem steigenden Wachstum des Bedarfs mithalten. Bei einem Beibehalten momentaner Mobilitätskonzepte ist wegen dem Wachstum nicht von einer Verbesserung, sondern von einer Verschlechterung, der Verhältnisse auf dem Verkehrsträger Straße auszugehen. Ein Logistikdienstleister muss seine BS wegen den Entwicklungen auf dem Verkehrsträger Straße entsprechend anpassen, um trotz wachsenden Verkehrsaufkommen kosteneffektiv arbeiten zu können.

Während nach dem Umweltbundesamt (2018) der NO₂-Ausstoß mit der Verdichtungsrate in der Brennkammer des Motors ansteigt, macht eine höhere Verdichtung die Motoren auch effizienter. Mit der Entwicklung der Leistungssteigerung bei Motoren steigen auch die ausgestoßenen NO₂-Werte weiter an. Aufgrund von technischen Gegenmaßnahmen, welche oftmals politisch verordnet sind, ist der NO₂-Ausstoß seit 1986 rückläufig. Der Rückgang gilt insbesondere auch trotz der im Durchschnitt gestiegenen Motorleistung. Mit einer Erneuerung der FPFe auf den heutigen Motorenstandard sinkt der absolute Schadstoffausstoß im Verkehr somit ab. Analog zum NO₂ nimmt der Ausstoß von Feinstaub in den Partikelgröße P10 und P2,5 mit fortlaufender Zeit bei einer Erneuerung des FP ab. Zwischen 1995 und 2016 ist mit der Einführung der Euro-2 Norm (mit starker NO₂ Regulierung seit 1996) der Schadstoffausstoß des Verkehrs von 1236,5 tausend Tonnen NO₂ auf 486,2 tausend Tonnen NO₂ zurückgegangen. Der CO₂ Ausstoß ist im gleichen Zeitraum von 3513,2 tausend Tonnen auf 738,5 tausend Tonnen reduziert worden. Ebenfalls im gleichen Zeitraum ist der Feinstaub P10 (P2,5) von 79,2 (66,4) tausend Tonnen auf 39,1 (25) tausend Tonnen zurückgegangen. Bei dem Rückgang absoluter Schadstoffmengen sind die Entwicklungen von gestiegenen Kfz Zahlen zu berücksichtigen. Aus der Statistik ist ein Rückgang von Schadstoffen in absoluten Werten trotz gestiegener Kfz Zahlen ersichtlich. Für den Verlauf dieser Arbeit wird dieser Rückgang der Schadstoffwerte (SW) auf die Erneuerung der Kfz zurückgeführt (Zehle 1997, S. 22 ff.). Nach Lehmacher (2015) wird als Folge der drohenden EFBen in einzelnen Stadtbereichen durch die EU-Vorschriften ein Logistikdienstleister Entscheidungen zur weiteren Handhabung seines FP treffen müssen. Für die Erfüllung von Lieferaufträgen in der Innenstadt sind neue Regularien für Einfahrtsberechtigungen zu beachten. Die Berechtigungen sind individuell nach dem Verkehrskonzept der jeweiligen Stadt zu beachten. Eine Einrichtung mit Maut-Gebühren in der Stadt oder die Schaffung von EFBen für ausschließlich emissionsarmen Kfz in der Stadt sind beispielsweise möglich. Aufgrund der Maßnahmen werden zum einen gesetzeskonforme FPFe benötigt und zum anderen sind gleichzeitig kostentechnische Aspekte abzuwägen. Für die Abwägung werden die Aspekte der Gebühren und Steuern für Verbrennungsmotoren gegen Vergünstigungen für emissionsfreie Kfz mit den Investitionskosten abzuwägen.

Nach Busmann (2009) und BMU (2018) ist eine politische Entscheidung, die zu deutlichen Kapazitätserweiterungen in der Infrastruktur führt, ist durch den Platzmangel innerhalb einer Stadt nur bedingt zu erwarten. Eine signifikante Kapazitätssteigerung ist in der Infrastruktur nur mit Hochstraßen, Hochbahnstrecken oder neuen Untergrundbahnstrecken zu erreichen, welche hohe Investitionskosten im Vergleich zur klassischen ebenerdigen Infrastruktur benötigen. Im Folgenden ist durch die hohen Investitionskosten nicht von einer relevanten Kapazitätserweiterung der Infrastruktur im Innenstadtbereich in der nahen Zukunft auszugehen. Eine Verlagerung von einem Verkehrsträger auf ein anderes Medium ist dagegen denkbar. Eine mögliche Alternative zum Straßentransport bietet die Verlagerung von Transporten auf ein bestehendes Untergrundbahnnetz, wobei jedoch von kostenintensiven Investition für weitere Anpassung auszugehen ist (Kiwitt 2010). Nach Schulte (1999) sind Anpassungen von Unternehmen an eine sich verändernde Stadt mit Herausforderungen verbunden. Aufgaben müssen allumfassend bewertet und behandelt werden. Um eine ganzheitliche Systemfrage stellen zu können, ist auch der Zusammenschluss von Unternehmen für die Bewältigung der Herausforderungen einzubinden. Mit

dem Zusammenschluss sollen über den normalen Problemlösegedanken hinaus Fragen zu Produktionsstandorten, Energiegewinnung und Konkurrenzverhalten gestellt werden, um alle Wege innerhalb einer Stadt möglichst kurz zu gestalten, Energie effizient zu verwenden und monetäre Einsparungen zu erzielen.

Wie zuvor dargestellt sind politische Entscheidungen für die zukünftige Entwicklung der Logistikdienstleister in der City-Logistik bedeutend. Politische Entscheidungen zu einer Mobilitätswende sind nicht festgelegt und können auf unterschiedlichste Art erfolgen. Fundamentale Umstrukturierungen des Straßenverkehrs führen zu fundamental andere Lösungsansätzen. Im Verlauf dieser Arbeit können aufgrund des zu hohen Aufwands von Anpassungen abseits des Untersuchungsschwerpunktes, nur einzelne Lösungsansätze berücksichtigt werden. Im Folgenden wird daher der Ansatz verfolgt, dass der individuelle Personenkraftverkehr mit dem Pkw weitestgehend bestehen bleibt. Die zuvor beschriebenen Probleme und Möglichkeiten des Verkehrsträgers Straße sind bei der Annahme weiterhin relevant für die City-Logistik.

2.3 Konkrete Entwicklungen einer Beispielstadt

Nachfolgend werden die konkreten Zukunftsentwicklungen einer Stadt, die im Kontext der City-Logistik relevant sind anhand einer Beispielstadt dargestellt. Die Zukunftsentwicklungen werden auch als Randbedingungen für die Anpassung eines Simulationsmodells an eine konkrete Stadt benötigt (Kapitel 3) und um eine Bewertung von BSn an einem Fallbeispiel zu ermöglichen (Kapitel 6). Für die Darstellung werden relevante Entwicklungen aus der Vergangenheit, dem aktuellen Stand und zukünftigen Entwicklungen in der Stadt aufgezeigt. Wie in den Abschnitten 2.1 und 2.2 beschrieben, sind für die Modellierung die Bevölkerungsgrößen und -entwicklungen, die Einkommensentwicklungen, gesetzliche Schadstoffgrenzwerte (SGW), die Fahrzeugeigenschaften und strukturelle Randbedingungen von Bedeutung. In dem Kontext wird als Beispielstadt die größte Stadt Griechenlands verwendet, die gleichzeitig auch als Hauptstadt des Landes fungiert, die Stadt Athen (City Population 2013; Gaebe 1987). Athen hat als charakteristisch Großstadt ähnlichen Eigenschaften und Herausforderungen wie viele andere Großstädte auf der Welt (Gaebe 1987).

Hierzu zählt das Wachstum der Stadt und der Anzahl von Einwohnern, verbunden mit Randbedingungen die Grenzen beim Flächenwachstum aufzeigen, wie die Lage auf einer Halbinsel und die Umgebung durch Gebirge (Anhang 2). Mit dem Wachstum entstehen die zuvor in den Abschnitten 2.1 und 2.2 beschriebenen Probleme, wie ein erhöhtes Verkehrsaufkommen und gesteigerte SWe in der Luft (EEA 2018). Mit diesen Herausforderungen ist die Ausgangslage von Athen auf andere charakteristische Großstädte übertragbar. Lediglich die finanzielle Lage Athens, mit einer aufschwingenden Rezession zum Zeitpunkt der Untersuchung, ist untypisch (Statista 2019; Gaebe 1987). Für das Beispiel und die anzunehmende Entwicklung werden Daten der Präfektur Attika verwendet und gleich der Entwicklung des Untersuchungsraumes gesetzt. Als Untersuchungsraum wird Athen-Zentrum (1.029.520 Einwohner), Athen-Nord (591.680 Einwohner), Athen-Süd (529.826 Einwohner), Athen-West (489.675 Einwohner) und Ostattika (502.348 Einwohner) zu einem Agglomerationsraum zusammengefasst. Der Agglomerationsraum besitzt im Jahre 2011 mit 3.143.049 Einwohner einen Anteil von mehr als 82 Prozent an der Bevölkerung

der Präfektur Attika (ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΡΧΗ 2011), weshalb die Annahme von Entwicklungen der Präfektur Attika auf Athen zu schließen als legitim angenommen wird. Zu beachten ist bei der Betrachtung, dass nicht nur die Gemeinde Athen im Zentrum des Ballungsraum Athen untersucht wird. Die Wachstumsrate der griechischen Bevölkerung ist seit dem Jahre 2011 in einem negativen Bereich. Während die letzten Messwertdaten im Jahr 2018 mit -0,251 Prozent noch negativ sind, ist eine positive Tendenz zu erkennen, die auf ein positives Bevölkerungswachstum in den nächsten Jahren hinweist (World Bank 2018a). Nach den Daten der World Bank (2018a, 2018b, 2018c) ist die Rate des Bevölkerungswachstums sowohl in den ländlichen Gebieten als auch in Städten ebenfalls seit den Jahren 2009 rückläufig. Das Bevölkerungswachstum innerhalb der Städte und ländlichen Gegenden unterscheidet sich dagegen deutlich voneinander. Selbst in den schwächsten Jahren des betrachteten Zeitraums erreicht der Bevölkerungsrückgang der Städte nur geringe Negativwerte von -0,27 Prozent, und erreicht im Jahr 2016 wieder positive Wachstumswerte. Dagegen ist das Bevölkerungswachstum der ländlichen Gegenden Griechenlands bereits im Jahre 2009 mit -1,2 Prozent negativ, erreicht einen Tiefstand von -2,3 Prozent und bleibt auch nach einer gestiegenen Wachstumsrate auf einem negativen Bevölkerungswachstum von -1,8 Prozent im Jahr 2018. Für Athen selbst sind keine genauen Prognosedaten verfügbar. Ein Vergleich der Volkszählungen 2011 und 2001 weist darauf hin, dass das Bevölkerungswachstum der Stadt Athen größer ausfällt als der Landesdurchschnitt (ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΡΧΗ 2011). Für die Modellierung des Bevölkerungswachstums ist der Aspekt des stärkeren Wachstums in Athen zu berücksichtigen. In einem Rückblick auf die Jahre vor 2009 weist das Bevölkerungswachstum Werte von bis zu 1,4 Prozent Wachstum auf. Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) pro Kopf ist in Griechenland vom Jahr 2008 bis zum Jahr 2016 vor allem aufgrund der Finanzkrise stetig gefallen. Mit den im Jahr 2018 veröffentlichten Zahlen, sind erstmals wieder Anzeichen für eine Steigerung des BIP zu erkennen (Statista 2019). Mit dem der Stabilisierung des BIP steigt auch das Bruttonationaleinkommen (BNE) pro Kopf wieder an und zeigt positive Tendenzen, womit den Bürgern wieder höhere Einkommen zur Verfügung stehen. Für das Wachstum wird ein langsam steigender Wert von 1,58 Prozent pro Jahr angenommen (World Bank 2019b, 2019c). Analog zum BNE verläuft auch die Konsumententwicklung. In der Finanzkrise sank der Konsum um bis zu neun Prozent im Jahr. Im Jahr 2014 erreichte das Konsumwachstum mit 0,178 Prozent Wachstum wieder einen positiven Bereich. Vor der Finanzkrise lag das Konsumwachstum bei ca. 3,3 Prozent Wachstum (World Bank 2019a). Nach Fox et al. (2019) und World Bank (2019d) wird der außergewöhnlich starke Rückgang des Bevölkerungswachstums ab dem Jahr 2009 auf einen Rückgang der geplanten Schwangerschaften zurückgeführt aufgrund der schlechteren Arbeitsbedingungen und Einkommenssituationen in der Finanzkrise. Für das Bevölkerungswachstum wird angenommen, dass mit einer Steigerung des BNE auf das normale inflationäre Niveau auch das Bevölkerungswachstum auf alte Wachstumswerte steigen wird. Ein erneutes Bevölkerungswachstum setzt die Logistikdienstleister in der Stadt Athen erneut vor die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Herausforderungen der City-Logistik und stellt einen prozessdestabilisierenden Faktor für Logistikdienstleister dar. Neben der Geburtenrate führt auch der Zuzug aus den nicht zum Agglomerationsraum gehörenden Gebieten zu einem Bevölkerungswachstum. Während die ländliche Bevölkerung außerhalb des Agglomerationsraums das Potential für weitere Zuzüge in die Stadt dargestellt, schrumpft das Potential über die Zeit ab (UN 2018). Das Wachstum in der Stadt Athen als Agglomerationsraum findet nach Cox (2013) in den

Vororten statt. Das Bevölkerungswachstum in der Innenstadt ist dagegen leicht rückläufig. Nach dem in Abschnitt 2.1 vorgestellten Phasenmodell ist Athen in das Ende der Phase einer Suburbanisierung mit beginnender Zentralisierung einzuordnen. Durch das überdurchschnittliche Wachstum in den Vororten wächst die Verkehrsbelastung ebenfalls überdurchschnittlich an, da die Fahrleistung ansteigt. Für die City-Logistik wachsen beim Innenstadtwachstum die zu bewältigenden Herausforderungen ebenfalls an (Abschnitt 2.1). Die Dichte der Bewohner pro Fläche in den Vororten Athens ist im Vergleich zu anderen Großstädten gering. Für die zukünftige Entwicklung ist durch die weiteren Verdichtungsmöglichkeiten vorerst von einem weiterhin anhaltenden Bevölkerungszuwachs in den Vororten Athens auszugehen (Cox 2019). Die Ausdehnung der Stadt Athen ist durch die vorherrschenden geografischen Gegebenheiten beschränkt. Zum einen ist die Ausbreitung der Stadt durch angrenzende Gebirge erschwert und zum anderen ist das Wachstum durch die Lage auf einer Halbinsel am Mittelmeer nur bedingt weiter möglich (Anhang 2). Langfristig ist wegen der Randbedingungen von einer rückläufigen Suburbanisierungsphase in Athen auszugehen.

Athen ist aufgrund der Funktion als Hauptstadt Griechenlands und der kulturellen Geschichte der Stadt ein frequentiertes Touristenziel. Im Jahr 2017 sind 5,14 Mio. Touristen auf die Halbinsel Attika mit der Stadt Athen gekommen (Bank of Greece 2018). Der Anteil Athens am gesamten Tourismusverkehr in Griechenland liegt bei 16,6 Prozent. Die Entwicklung der Tourismuszahlen ist weiter ansteigend, wodurch von steigenden Einkommen für die Bevölkerung in Athen auszugehen ist (SETE 2019). Mit den steigenden Zahlen an Touristen wachsen die Herausforderungen der City-Logistik wie bei einem steigenden Bevölkerungswachstum weiter an. Als Fazit sind die rückläufigen Einwohnerzahlen in dem Innenstadtkern somit in Relation zu sehen zu den steigenden Tourismuszahlen. Obwohl die gesunkenen Einkommen und die Urbanisierung mit einer Zunahme von städtischen Lebens- und Verhaltensweisen auch in der Zukunft in Athen eine Herausforderung für die City-Logistik darstellen wird, ist durch den Touristenstrom nicht von einem modellhaften Verfall der Innenstadt auszugehen (Abschnitt 2.1).

Nach Σαρηγιάννης (2007) erlebte die Industrie in Athen in den 80er Jahren einen wirtschaftlichen Aufschwung. Mit der wachsenden Anzahl von Fabriken und größer werdenden Anzahl von Kfz war die Infrastruktur zunehmend überlastet und die Schadstoffbelastung stieg. In der Folge sank die Lebensqualität in der Stadt ab. Zur Verbesserung der Ausgangslage wurde mit einer Mobilitätsstrategie in den 90er Jahren die Infrastruktur erweitert. Die Strategie umfasste sowohl die bessere Anbindung auf der Straße mit dem Autobahnausbau als auch den verstärkten Ausbau des ÖPNV. Ein weiterer Teil des Mobilitätskonzeptes war die Vorbereitung erste Vorkehrungen von EFBen in der Athener Innenstadt. Das Mobilitätskonzept führten zu einer Verbesserung der Schadstoffbelastung in der Luft Athens (Kambezidis et al. 1995; EEA 2016). Die Konzentrationen der SW im Innenstadtbereich überschreiten verstärkt im Innenstadtbereich die SGW. Zur Verdeutlichung werden Messtationen mit ihren Messwerten zur Belastung der Luft mit den Schadstoffen NO₂ und einem Vergleichswert für Feinstaub in der Tabelle 2.1 aufgeführt. Der genaue Standort der Stationen ist in der Grafik in Anhang 3 ersichtlich. Die Standortumgebung der Stationen sechs ist geprägt durch leichte Industrie. Bei der Standortumgebung der Station zehn liegen Agra- und Wohnflächen vor. Die Stationen sieben, neun und elf sind dagegen in reinen Wohngebieten aufgestellt. Bei den Stationen eins, drei, vier und sechs liegt eine Mischung aus Wohn- und Gewerbeflächen vor. Nur die Station zwei liegt in einer reinen Gewerbefläche.

Zur Innenstadt Athens gehören die ersten drei Messstationen. Dass die drei Messstationen in der Innenstadt die höchsten SGW-Überschreitungen aufzeichnen verdeutlicht das Problem, in der Innenstadt die SGW zu unterschreiten. In der Innenstadt wurde der Grenzwert mit $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ um mehr als das doppelte des Jahresgrenzwertes und des Maximalgrenzwertes in einer Stunde überschritten. Bereiche am Rand des Agglomerationsraums sind dagegen weniger von Schadstoffen belastet. In diesen Bereichen liegen oftmals Wohnbereiche mit wenig frequentiertem Verkehr vor. Für die zukünftigen Entwicklungen bei EFBen im Kontext von SGWen wird eine vereinfachte Betrachtung von SWen in einem kritischen Bereich als ausreichend angenommen.

Tabelle 2.1: Luftunreinheiten in Athen (Nach Quelle: Ministry of Environment 1989 - 1997).

	Schwarzer Rauch * in $\mu\text{g}/\text{m}^3$		Stickstoffdioxid in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	Jahres-durchschnitt	Maximum in 24 Stunden	Jahres-durchschnitt	Maximum in einer Stunde
Empfohlene Grenzwerte **	Möglichst gering	Möglichst gering	40	200
Messstationen:				
1	102	285	95	440
2	55	188	80	338
3	43	205	77	268
4	43	199	64	253
5			46	328
6	23	103	54	321
7	27	150	51	320
9			34	351
10			24	140
11			32	231
* Referenzwert für Feinstaub, da keine genauen Messwerte vorliegen.		** Von der WHO.		

Während Athen SWe in der Luft reduzieren konnte, werden weiterhin Grenzwerte überschritten. Messungen von Feinstaub der Größe 10 PM und 2,5 PM sowie NO_2 aus dem Jahr 2000 bis zuletzt 2017 zeigen im Athener Innenstadtbereichen z. T. deutliche Überschreitungen der Grenzwerte (EEA 2018). Aktuellere Feinstaubmessungen zeigen eine Erhöhung von Feinstaubwerten in stärker bewohnten Gebieten. In Griechenland lagen im Jahr 2016 ländliche Gebiete mit statistisch $13,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ unter den Werten von Städten mit $16,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Feinstaubmessungen im Jahre 2013 in Athen zeigen dagegen dass die Stadt statistisch mit $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ genau am Rand des Grenzwertes der EU für Feinstaub bei der Größe 10 PM liegt (WHO 2016). Trotz besser werdender Tendenz sind die Messwerte kritisch zu hinterfragen. Die Aufstellorte der aktuell verwendeten Messstationen entsprechen nicht immer den Vorgaben der EU (Plusminus 2016). Wegen den Unregelmäßigkeiten bei den Aufstellorten wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit für das Schadstoffverhältnis der Luft in Athen von einer höheren Konzentration ausgegangen als in offiziellen Veröffentlichungen Griechenlands angegeben. Die SWe in Athen sind selbst nach offiziellen Zahlen in der Nähe der Grenzwerte, wodurch die Gefahr von weiteren EFBen nicht auszuschließen sind. Betroffen von den Einschränkungen wären nicht nur Privatpersonen, sondern auch Logistikdienstleister in Athen.

Nach ACEA (2019a, 2019b) liegt das Durchschnittsalter der Kfz in Griechenland über dem des EU Durchschnitt. Während Pkw (leichte Lkw und Lkw) in Griechenland im Jahr 2016 durchschnittlich 14,1 (17,1 und 18,8) Jahre alt waren, sind im EU Durchschnitt Pkw 11,0 (10,9 und 12,0) Jahre alt. Griechenland besitzt im Vergleich zur EU den mit Abstand ältesten FP bei Lkw.

Durch die hohe Laufleistung der besonders alten Fahrzeuge trägt der FP mit einem vergleichsweise hohen Maß zum Schadstoff- und CO₂ Ausstoß bei (Economopoulou und Economopoulos 2002). In Griechenland waren im Jahre 2015 5,1 Mio. Kfz auf 10,86 Mio. Griechen verteilt (OICA 2017). Die Quote von 0,47 Kfz pro Einwohner wird auch für eine Athener Verteilung von Kfz pro Einwohner angenommen. Nach ACEA (2019c) sind elektrisch betriebene Kfz (E-Kfz) in Griechenland im Jahr 2018 mit einem Anteil von 0,3 Prozent am Kfz-Bestand unterrepräsentiert im Vergleich EU Durchschnitt. Die Verbreitung von E-Kfz wird mit dem BIP eines Landes in Verbindung gebracht. Durch das vergleichsweise geringen BIP in Griechenland ist ein hoher Anteil von E-Kfz in Griechenland in der jungen Zukunft als unwahrscheinlich zu betrachten. Wie in Abschnitt 2.2 dargestellt würde eine Erneuerung des FPs oder eine Umstellung auf E-Kfz zu einer Verbesserung der CO₂- und Schadstoffkonzentrationen in der Luft von Athen führen. Nach Κανελλαΐδης et al. (2004) weist die Verkehrslast ein Wachstum von 0 bis 2,5 Prozent innerhalb von 24 Jahren im Innenstadtbereich auf, wo ohnehin eine hohe Verkehrslast bei einer gut ausgebauten Infrastruktur vorherrscht. Dagegen ist das Wachstum der Verkehrslast in den Außenbezirken Athens größer. Innerhalb von 24 Jahren wuchs die Verkehrslast bei jüngeren Verkehrsverbindungen zwischen 4,0 und 6,0 Prozent an. Für die weitere Entwicklung der Verkehrslast ist bei den gegebenen Daten von einem weiteren Wachstum auszugehen.

Nach Oasa (2019) und Stasy (2019) besitzt Athen eine weitverzweigte Infrastruktur mit dem größten ÖPNV-Netz in Griechenland. Zum Angebot des ÖPNV gehören 22 Buslinien im Innenstadtbereich der Stadt mit einem FP aus klassischen durch Verbrennungsmotor angetriebene Busse sowie über Hochspannungskabel mit Elektrizität angetriebene Oberleitungsbusse. Ebenfalls in der Innenstadt befindlich ist ein Straßenbahn- und U-Bahnnetz mit jeweils drei Linien. Die Anbindung zu weiter außen gelegenen Stadtgebieten und einem Flughafen ist mit vier S-Bahnlinien gegeben. Die Stadt Athen ist mit zwei Autobahnen an das Autobahnnetz in Griechenland angeschlossen. Die innerstädtische Infrastruktur auf der Straße ist ebenfalls durchgehend ausgebaut (Anhang 2). Nach Εθνικό Τυπογραφείο (2012) gilt aufgrund von Umweltauflagen im Innenstadtbereich Athens eine begrenzte rotierende EFB. Der einfahrbeschränkte Bereich wird auch als grüner Ring, kleiner Ring oder nachfolgend als Innenstadtring bezeichnet. In den Innenstadtring dürfen nur Fahrzeuge mit gerader Kennzeichennummer an geraden Datumstagen einfahren oder analog nur Fahrzeuge mit ungerader Kennzeichennummer an ungeraden Datumstagen. Da die Regelung für die Verbesserung SWe in der Athener Innenstadt eingeführt wurde, sind Kfz mit geringem Schadstoffausstoß von den EFBen ausgenommen. Zu den ausgenommenen Kfz gehören E-Kfz und Kfz, welche die Schadstoffbestimmungen der Euro-5 und Euro-6 Norm erfüllen. Analog sind Fahrzeuge mit Flüssiggasantrieb der Euro-4 Norm zulässig. Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht größer 2,2 Tonnen und einem Fahrzeualter von mehr als 22 Jahren sind dagegen unabhängig vom Ausstoß nicht für den Innenstadverkehr in Athen zugelassen. Für Lieferfahrzeuge und Taxifahrten gilt die generelle Einfahrbeschränkung nicht. Lieferfahrzeuge und Taxis sind nur an Tagen mit einer besonders großen Schadstoffbelastung von den EFBen betroffen und haben nach den gleichen Regeln für private Kfz mit wenig Schadstoffausstoß weiterhin freie Einfahrt in den einfahrbeschränkten Bereich des Innenstadtrings. Für die übrigen Kfz bei Lieferungen und Taxifahrten gilt im Fall hoher Schadstoffbelastungen auch das rotierende EFB nach der letzten Kennzeichennummer. Für die zukünftige Entwicklung der Infrastruktur im

öffentlichen Verkehrsnetz ist die Betrachtung der Mobilitätsagenda in Athen zu betrachten. Besonderes Wachstum erhält vor allem der ÖPNV, welcher in Zusammenarbeit mit der EU gefördert wird (EU 2017). Zur Förderung gehören Verlängerungen bestehender Straßen- und Untergrundbahnlinien mit zusätzlichen Bahnhöfen und der Anschaffung weiterer Züge. Durch eine weitere Restrukturierung des Ticketsystems im ÖPNV sollen ebenfalls Anreize für die Verwendung des ÖPNV geschaffen werden (EU 2017). Durch den Ausbau des ÖPNV könnte in Zukunft eine Veränderung der Nutzungsanteile der Verkehrsmittel die Folge sein. (EU 2017). Neben dem geförderten Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs baut der griechische Staat auch Straßenverbindungen in und um Athen weiter aus. Zu den Ausbaumaßnahmen gehören insbesondere Autobahnerweiterungen und die Schaffung neuer Anschlüsse bei bestehenden Verbindungen (Athinaikiri-viera 2019). Wegen den gegensätzlichen Entwicklungen wird für den weiteren Verlauf der Nutzungsanteile der Verkehrsmittel von einem konstanten Wert ausgegangen.

3 Simulation als Analyseinstrument für City-Logistik-Ansätze

Die in Kapitel 2 beschriebenen Herausforderungen der City-Logistik führen zu einem Anpassungsdruck auf bestehende BSn. Durch eine Anpassung bestehender oder der Verwendung einer für den Logistikbetrieb neuen BS könnten besser an die Herausforderungen angepasste Logistikabläufe in den Betrieb eingeplant werden. Um eine Einschätzung treffen zu können, welche BSn sinnvoll sind, ist eine Analyse mit anschließender Bewertung der einzelnen BSn nötig. In diesem Kapitel soll die Simulation als Analyseinstrument für die BSn im Kontext der City-Logistik erläutert werden. Für die Simulation wird die Simulationsmethodik SD vorgestellt, mit dem durch die Simulation einzelner BSn im Kontext der Zukunftsentwicklung einer Stadt Zukunftsszenarien erstellt werden können. Das zur Auswertung der Zukunftsszenarien benötigte Vorgehen, um Rückschlüsse auf einzelne BSn ziehen zu können und diese zu bewerten, wird ebenfalls theoretisch erläutert. Auf die in einer Simulationsstudie nötigen Formalien und Abläufe zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer, die nicht direkt für die Simulation nötig sind, wird nicht näher eingegangen und auf die Fachliteratur verwiesen.

3.1 Grundlagen der Simulation

Mit diesem Kapitel sollen die theoretischen Grundlegenden der Simulation kurz wiedergegeben werden, um ein besseres Verständnis für die Funktionsweise von SD zu erreichen. Die *Simulation* ist nach Bossel (1987) und Seidlmeier (2006) ein Analyseinstrument, welches vor allem in drei Bereichen verwendet werden kann. Die drei Bereiche sind das Verstehen, die Vorhersage und die Vorbereitung für eine Optimierung. Im Kontext dieser Arbeit sollen mithilfe einer Simulation Zusammenhänge verstanden, in einem Modell abgebildet und Entwicklung vorhergesagt werden, um eine weitere Bewertung von BSn durchzuführen. Ein *Modell* ist als eine abstrahierte Abbildung der Realität zu verstehen. Mit dem Modell wird eine Reihe von Eigenschaften und Abfolgen von Ereignissen in einem Zusammenhang dargestellt, um diese zu analysieren. Für die Untersuchung werden nur relevanten Eigenschaften eines Systems in verkürzter Form abgebildet, um ein gutes Aufwand-Nutzen Verhältnis zu generieren. Während mehrere Arten von Modellen existieren, ist im Kontext des Ziels dieser Arbeit nur das Prozessmodell relevant. Beim *Prozessmodell* werden Prozesse einer Organisation abgebildet und durch ihre Eingangs- und Ausgangsgrößen mit weiteren Systemvariablen verknüpft (Profos 1982). Die *Systemvariablen* oder *Systemgrößen* die als Bausteine des Modells fungieren werden nachfolgend auch als sog. *Entitäten* bezeichnet. Im Kontext dieser Arbeit ist bei dem Terminus Modell immer ein Prozessmodell gemeint. Der Terminus des *Simulationsmodells*, spezialisiert den Begriff auf ein für die Simulation erstelltes Modell. Nach Gutenschwager et al. (2017) wird mithilfe eines Simulationsmodells über das Zusammenfügen von Informationen ein Mehrwert generiert. Als Mehrwert wird in diesem Kontext ein Erkenntnisgewinn am Ende einer Analyse bewertet, der zuvor nicht direkt über das im Modell abgebildete System ersichtlich war. Der Begriff des *Systems* steht für eine „Menge miteinander in Beziehung stehender Elemente, die in einem bestimmten Zusammenhang als Ganzes gesehen und als von ihrer Umgebung abgegrenzt betrachtet werden...“ (DIN IEC 60050-351) können. Mit

der Definition gleicht das System der Struktur des Prozessmodells und lässt sich in einem Modell modellieren. Nach Rabe et al. (2008) ist für den Ablauf einer Simulation ein *Vorgehensmodell* zu verwendet, um einen strukturierten und systematischen Ablauf zu gewährleisten sowie Zwischenergebnisse zu dokumentieren. Eine Prüfung von Zwischenergebnissen mit einer Verifikation und Validierung am Ende einer jeden Phase erhöht die Qualität aller Phasenergebnisse. Das Vorgehensmodell nach Rabe et al. (2008, S. 45–92) ist in fünf zu durchlaufende Phasen mit jeweils einem Phasenergebnis gegliedert. Als Phasenergebnisse sind beispielsweise Modelle, Dokumente oder eine Kombination aus beidem anzusehen. Die erste Phase behandelt die *Aufgabendefinition*, in der die mit der Simulation zu erreichenden Aufgabenspezifikation näher definiert ist, wobei die Zielbeschreibung als Ausgangsbasis dient. In der zweiten Phase der *Systemanalyse* wird ein Konzeptmodell erstellt, wobei Entscheidungen zum Detaillierungsgrad und Abgrenzungen der Systemgrenzen für die Modellbildung zu berücksichtigen sind. In der Phase der *Modellformalisierung* wird das Konzeptmodell in ein formales Modell überführt, welches bereits das reale System abbildet. Die vierte Phase behandelt die *Implementierung*, in der das eigentliche Simulationsmodell erstellt wird, welches vom Computer für eine Simulation ausgeführt werden kann. In der letzten Phase der *Experimente und Analyse* werden mit dem Simulationsmodell bei Experimenten quantitative Simulationsergebnisse erarbeitet, welche im Anschluss analysiert werden und zum Ziehen von Schlussfolgerungen verwendet werden. Parallel zu diesen Phasen ist eine Datenbeschaffung und -aufbereitung durchzuführen, um für Experimente verwendbare Datensätze vorliegen zu haben. Mit der *Modellbildung* oder dem *Modellieren* ist nach Kramer (2008) das Erstellen eines Modells anhand eines technischen Systems gemeint. Bei der Erarbeitung des Modells ist eine der Modellierungsmethodik entsprechende *Syntax* zu verwenden, welche die Anforderungen an den Ausdruck normiert. Durch die Normierung soll ein schnelles Verständnis des modellierten Systems für einen Betrachter ohne Vorkenntnisse zum System gewährleistet werden. Für die Modellbildung eines Modells, sind nach Zirn und Weikert (2006) vier Phasen zu durchlaufen. In einer ersten Phase werden Randbedingungen gesammelt, wohingegen in einer zweiten Phase einzelne Wirkzusammenhänge zwischen Elementen untersucht werden. Durch die Wirkzusammenhänge in Verbindung mit Gleichungen kann in einer dritten Phase ein quantitatives Modell erstellt werden. In der vierten Phase werden die erarbeiteten Gleichungen in eine Standardform gebracht. Nach Rabe et al. (2008) gehören drei der fünf Phasen der Simulation mit der Systemanalyse, der Modellformalisierung und der Implementierung zu dem Begriff der Modellbildung. Wie genau eine Modellbildung abläuft, ist nicht auf ein Vorgehensmodell festgelegt. Während für das weitere Vorgehen in dieser Arbeit das Vorgehensmodell nach Rabe et al. (2008) verwendet wird, ist die Verwendung andere Vorgehensmodelle als das vorgestellte ebenfalls denkbar.

3.2 System Dynamics als Analyseinstrument

In diesem Abschnitt folgt eine Beschreibung der grundlegenden Eigenschaften und Bausteine von SD. Für die Beschreibung werden alle Bausteine dargestellt und näher erläutert, bevor auf die Wirkzusammenhänge zwischen ihnen eingegangen wird. Der Analysebereich in dem SD effektiv eingesetzt werden kann, ist bedingt durch den strukturellen Modellaufbau beschränkt (Gumzej

und Rosi 2017). Für das weitere Vorgehen wird wegen der Beschränkung nach einer grundlegenden Erklärung auch die Einschränkung des Analysebereichs mit zu verwendeten Verallgemeinerungen durch die im Modell relevante Makroebene näher begründet.

Nach Weber (1979, S. 5 ff.) und Profos (1982, 11 ff.) ist SD eine von J. W. Forrester Ende der 50er Jahre entwickelte Modellierungsmethodik. SD wurde ursprünglich entwickelt für die Untersuchung sozialökonomischer und technischer Systeme. Die Problemstellung bei der Untersuchung war das Systemverhaltens unter dem Einfluss von veränderlichen äußeren Einwirkungen und starker Vernetzung untersuchen zu können. Der von Forrester entwickelte Lösungsansatz SD ist gekennzeichnet durch komplexe, zeitdiskrete, nicht lineare, dynamische und rückgekoppelte Entitäten, die in einem System vernetzt sind. Die Rückkopplung der Entitäten wird in SD durch den Aufbau in Blockdiagrammen in Anlehnung an die Regelungstechnik ermöglicht. Für die Simulation wird angenommen, dass dynamische Systeme wie in der Regelungstechnik mit Verzögerungen und Verstärkungen reagieren, wenn rückwirkende Wirkzusammenhänge zwischen Entitäten durch sog. *Rückkopplungsschleifen* bestehen. Bei den Rückkopplungsschleifen wird zwischen zwei unterschiedlichen Arten unterschieden. Je nach Abhängigkeit der Ursache der Wirkungsbeziehungen wird zwischen positiven und negativen Rückkopplungsschleifen unterschieden. Negative Rückkopplungsschleifen, wenn „...die Rückwirkung auf die Änderung verursachte Variable der Änderung entgegengerichtet ist“ (Weber 1979, S. 5) oder positiv falls der gegenteilige Effekt mit einem exponentiellen Wachstumsprozess vorliegt.

Nach Weber (1979) besteht die Struktur von SD aus fünf Blockbausteine. Mithilfe dieser Bausteine ist die Wiedergabe eines nicht linearen Systems in einem sog. *Flussdiagramm* möglich. Dafür werden homogene Zustandsgrößen eines Systems als sog. *Level* oder *Bestandsgröße* (BG) wiedergegeben. Zu- und Abflüsse bei oder auch zwischen BGn werden mit einer sog. *Flussgröße* (FG) beschrieben. Zur Berechnung von BGn und FGn werden zusätzliche *Konstanten* und *Hilfsgrößen* (HGn) verwendet. Die Informationen zu den errechneten Werten der BGn bleiben zwischen jedem Simulationsintervall erhalten. Dagegen speichern HGn und FGn für die Berechnung keine Informationen zu einem sich verändernden Wert und sind für die Berechnung von dynamischen Zusammenhängen auf die Werte der BGn angewiesen. Wie die einzelnen Bausteine zusammen wirken wird über *gerichtete Kanten* aufgezeigt, die in zwei Kategorien verwendbar sind. *Materials- und Informationsflüssen* von einzelnen BGn oder FGn werden durch einen durchgezogenen Pfeil gekennzeichnet. *Abhängigkeiten* zwischen den FGn, BGn, Konstanten oder HGn werden dagegen mit gestrichelten Pfeilen dargestellt. Mit der Einbindung einer Quelle und Senke, in der Darstellung einer Wolkenform, ist eine Abgrenzung des Systems mit seinen Außeneinflüssen möglich. Ebenfalls möglich ist eine Darstellung mit Quellen und Senken innerhalb eines Systems, um eine höhere Übersichtlichkeit zu schaffen. Die sonst in sich geschlossenen Wirkungsschleifen werden für die Darstellung in einzelnen Flüssen abgebildet (Weber 1979). Die einzelnen Bausteine der SD Modellierung sind in der Abbildung 3.1 dargestellt. Das mit den Bausteinen abgebildete System kann bei Bedarf in Differenzialgleichungen höherer Ordnung überführt werden und besitzt die gleiche Wertigkeit wie ein Differenzialgleichungssystem (DGL-System) (Bosssel 1987, S. 92 ff.). Die Simulationsmethodik SD besitzt für die Modellierung keine klar geregelte Syntax. Andere Darstellungsweisen wie beispielsweise eine vereinfachte nach Ossimitz und Schlöglhofer (1990) ähneln der zuvor erläuterten Darstellungsweise nach Weber (1979) jedoch in der allgemeinen Verwendung der grundlegenden Bausteine und deren Zusammenschluss.

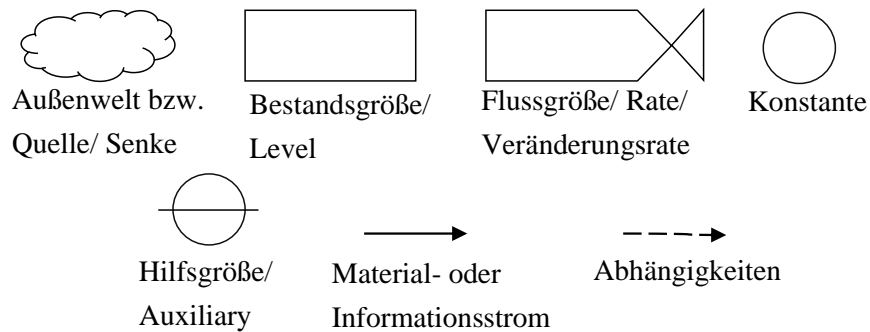


Abbildung 3.1: Darstellung der Bausteine in der System Dynamics Modellbildung (Nach Quelle: Weber 1979, S. 7).

Nach Bala et al. (2017) und Wilms (2012) ist die Darstellung von Systemen durch SD in zwei Darstellungsweisen möglich. Zum einen ist die Darstellung in einem komplexeren Flussdiagramm mit den bereits beschriebenen Bausteinen möglich. Zum anderen können mit einem vereinfachten *Rückkopplungskreislaufdiagramm* Sachverhalte vereinfacht wiedergegeben werden. Rückkopplungskreislaufdiagramme werden aufgrund des auf Wirkzusammenhänge reduzierten Informationsgehaltes auch Ursache Wirkungsdiagramm, Causal Loop Diagramm oder Kausaldiagramm genannt. Die Abbildung 3.2 zeigt ein Beispiel für ein Ursache Wirkungsdiagramm. Das Diagramm weist eine BG mit der Größe einer Bevölkerung auf. Je größer die Anzahl der Menschen ist, desto größer ist die zweite Entität mit der Anzahl der Geburten. Da die Geburten wiederum die BG der Bevölkerung vergrößern, entspricht dieses Beispiel einer positiven Rückkopplungsschleife. Aufgrund der rein beschreibenden Art dieses Modells wird diese Darstellungsart als qualitatives Modell bezeichnet. Causal Loop Diagramme werden wegen der guten Übersichtlichkeit insbesondere für das schnelle Erreichen eines Verständnisses von einem zu untersuchenden System verwendet (Ossimitz und Schlöglhofer 1990, S. 24 ff.). Als Analyseinstrument eignen sich Causal Loop Diagramme dagegen nicht. Für die Funktion eines Analyseinstruments ist auf Flussdiagramme zurückzugreifen (Wilms 2012; Bala et al. 2017).

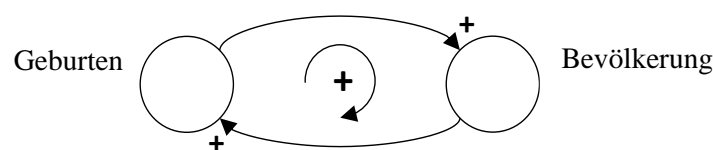


Abbildung 3.2: Vereinfachtes Causal Loop Diagramm von einem Wachstumsprozess (Nach Quelle: Ossimitz und Schlöglhofer 1990, S. 17).

Nach Ossimitz und Schlöglhofer (1990, S. 29 ff.) sowie Burkhard (2005, S. 36 ff.) können beim Flussmodell Gleichungen für Simulation eingebunden werden. Anders als bei den vereinfachten Causal Loop Diagramm wird eine Berechnung von Werten über die Zeit ermöglicht und nicht nur eine Tendenz für die Entwicklung einer Zustandsgröße wiedergegeben. Durch die genauere Darstellungsweise gehört der Modelltyp des Fließdiagramms in die Gruppe der quantitativen Modelle (Wilms 2012). Die Abbildung 3.3 zeigt eine mögliche Darstellung des gleichen Sachverhalts der Abbildung 3.2 als Flussdiagramm und dem Ergebnis des simulierten Modells. Die Anzahl der Geburten ist in diesem Beispiel nicht nur von der BG der Bevölkerung abhängig, sondern auch von der expliziten Größe der Geburtenrate, die als Konstante eingebunden wird. Die Konstante gibt die Zuwachsrate der Geburten pro Mensch und Zeiteinheit für die FG der Geburten wieder. Mit der Verwendung konkreter Eingabewerte ist im Anschluss die Ermittlung der dargestellten

Simulationsergebnisse möglich. In diesem stark vereinfachten Modell wächst die Bevölkerung mit einem zunehmenden Wachstum über die einzelnen Zeitschritte weiter an.

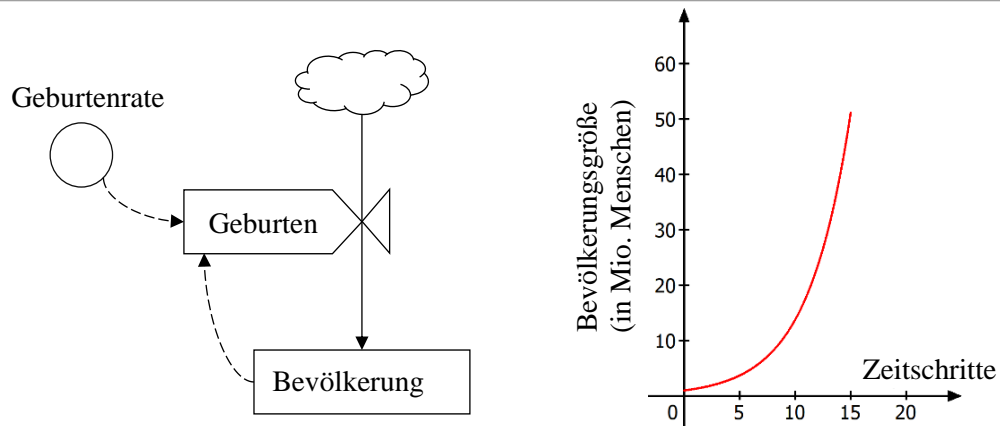


Abbildung 3.3: Flussdiagramm von einem Wachstumsprozess und Visualisierung der Simulationsergebnisse (Nach Quelle: Weber 1979, S. 8).

In der Praxis werden bei der Verwendung unterschiedlicher SD-Modellierungs- und Simulationssoftware einzelne Elemente anders dargestellt, als bei der Darstellungsweise nach Weber (1979) erläutert. Die Abbildung 3.4 zeigt einen Screenshot mit der Darstellungsweise eines Flussmodells in der SD Simulationssoftware Vensim in der funktionsreduzierten Version PLE 7.2. Oft erfolgt die Darstellung von Konstanten und HGn ohne Symbole oder Unterscheidung zwischen den Bausteinen. Die FGn sind auf die grundlegende Symboleigenschaft der zwei Dreiecke reduziert. Die gerichteten Kanten werden ebenfalls anders dargestellt. Wie im Beispiel dargestellt ist eine Darstellung von dickeren schwarzen Pfeilen für Materialflüsse und eine Darstellung von Abhängigkeiten mit dünnen blauen Pfeilen möglich. Für eine bessere Übersicht sind außerdem farbliche Codierungen aller Entitäten für ein besseres Verständnis des Modells möglich.

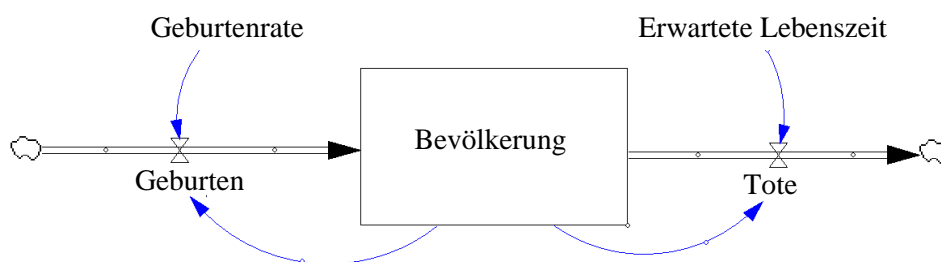


Abbildung 3.4: Screenshot mit Vensim Beispieldarstellung (Nach Quelle: Vensim PLE 7.2).

Nach Romeike und Spitzner (2013) sowie Ossimitz und Schlöglhofer (1990) ist mithilfe von SD die Erarbeitung der Lösung komplexerer Problem- oder Fragestellungen möglich, die den wesentlichen Aspekten der Simulation entsprechen. Durch eine Modellierung komplexerer Zusammenhänge in einem Computermodell kann mithilfe von SD und einer computergestützten Simulation das Verhalten von einem System untersucht werden, auch wenn die Entitäten im System in komplexen Wirkzusammenhänge miteinander stehen. Mit einem ausreichend genauen Simulationsmodell wird somit die Erstellung von Zukunftsszenarien durch SD ermöglicht, auch wenn das simulierte System selbst nur schwer zu verstehen ist. Dabei wird mit der Analyse durch SD eine Untersuchung eines realen Systems ermöglicht, ohne das bestehende System zu verändern. Eine Veränderung durch einen Modelleur am modellierten System ist dabei i. d. R. günstiger als

eine Veränderung am realen System. Des Weiteren ist mit dem Gebrauch von SD als Analyseinstrument die Vertraulichkeit bei Bewertungen eher gewährleistet, als bei Untersuchungen am realen System, wobei mit einem Analyseinstrument wie SD auch eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erreicht werden kann. Analog ist die Analyse eines noch nicht existierenden Systems mit SD möglich.

Nach Moorman (2008) und Weber (1979) ist SD bereits in mehreren Industriebereichen als computergestütztes Analyseinstrument eingesetzt worden. Als Beispiele sind die Erstellung eines Weltmodells für das Bevölkerungswachstum und die Finanzbranche zu nennen. In beiden Beispielen finden Veränderungen vor dem Hintergrund hoher Komplexität statt. Beispielsweise unterliegen Unternehmen der Finanzbranche nicht nur Einflüssen der eigenen Branche, sondern auch „im besonderen Maße politischen, regulatorischen, demografischen, technologischen und ökologischen Einflüssen“ (Moorman 2008, S. 4 ff.). Nach Moorman (2008) sind dabei alle Einflüsse nicht lokal, sondern global zu betrachten, aufgrund der starken Vernetzung von Wirtschaftsstrukturen und Kapitalströmen. Bei Untersuchungen im Kontext der komplexen Ausgangslage wird dagegen oft ein zu starker Fokus auf Einzelprobleme gelegt. Für die Problemlösung wird die Betrachtung des Gesamtzusammenhangs als zielführend betrachtet. Der Lösungsweg in der Finanzindustrie gleicht der Ausgangslage für die Bewertung von BS_n im Kontext der City-Logistik. In der Finanzindustrie ist die Betrachtung übergeordneter verallgemeinerter Zustandsgrößen sinnvoll, die in einen Zusammenhang mit vielen weiteren Zustandsgrößen gesetzt werden. Die für die Modellierung notwendige Abwägung zwischen Aufwand und Nutzen beschränkt den Detaillierungsgrad eines Modells. Analog zu der Entwicklung wurde nach Weber (1979) SD als Alternative zum neoklassischen Weltwachstumsmodell entwickelt. Die klassischen Wachstumsmodelle bildeten die Wirklichkeit nicht ausreichend genau ab. Wirtschaftliche Phänomene konnten nicht anhand der klassischen Modelle erklärt werden. Der Umstand ist darauf zurückzuführen, dass klassische Modelle zu starr und unflexibel sind. Mit dem Ansatz von SD erfolgt die Betrachtung der Entwicklungen nicht mehr isoliert, sondern in einem komplexeren System im Zusammenhang zu anderen Phänomenen. Dieser veränderte Lösungsansatz wurde gewählt da in der Realität unterschiedliche Entitäten oftmals in einem Zusammenhang stehen. Die Verwendung von SD als Analyseinstrument ist bei der Betrachtung solch übergeordneter Probleme sinnvoll. Der Fokus wird bei den Ursache Wirkungszusammenhängen auf übergeordnete bzw. verallgemeinerte Zustandsgrößen und ihr Verhalten gelegt, um einen ganzheitliche Lösungsansatz zu verfolgen. Durch die globale Betrachtung mit der Berücksichtigung von in Zusammenhang stehenden Abhängigkeiten weiterer Entitäten grenzt sich SD von anderen Analyseinstrumenten ab (Burkhard 2005). Bei der Modellierung wird im Kontext der Abgrenzung einzelner Entitäten zwischen Modellen auf der Mikro- und der Makroebene unterschieden (Kumar und Yamaoka 2007; Greve et al. 2009). Nach Greve et al. (2009) werden in der Mikroebene vor allem Prozessbausteine mit untergeordneten Prozessen in einem Unternehmen behandelt. Dagegen stehen bei der Makroebene die Organisationsschichten mit ihren Beziehungen untereinander oder zu anderen Einflüssen im Vordergrund. Weniger bedeutend sind in der Makroebene die einzelnen Prozessbausteine oder Abläufe innerhalb einer Organisationsschicht. Organisationsschichten gelten im Kontext der Makroebene als selbstorganisierend und werden als zusammengefasste Entitäten modelliert. Für die Modelle auf Makroebene sind Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Entitäten typisch.

Nach Gumzej und Rosi (2017, S. 80) ist die Mikro- und Makroebene durch die folgenden Charakteristika geprägt:

„Mikroebene

- Viele und heterogene Entitäten,
- Lokale Interaktionen zwischen Entitäten,
- Strukturierte Entitäten,
- Adaptive Entitäten.

Makroebene

- Selbstorganisation,
- Koevolution von Entitäten,
- Abhängigkeit von Verbindungen/ Transportwegen“.

Entsprechend dem Schwerpunkt von SD als Analyseinstrument mit Modellen auf der Makroebene, wird das in dieser Arbeit erstellte Konzept zur Bewertung von BSn ebenfalls auf einer verallgemeinernden Makroebene basieren. Neben dem schlechten Kosten-Nutzen-Verhältnis durch die hohe Detailtiefe bei einer Modellierung mit SD auf Mikroebene (Gutenschwager et al. 2017) ist ein weiterer Effekt zu beachten. Nach Weber (1979) und Gutenschwager et al. (2017) unterliegen alle Modellierungsmethoden einer gewissen Subjektivität des Modelleurs, wobei eine möglichst objektive Modellierung in SD mit besonderen Hindernissen verbunden ist. Durch die zahlreichen Wirkzusammenhänge die Umgebungsfaktoren auf ein System haben können, müssen mehr subjektive Entscheidungen getroffen werden, welche Faktoren als relevant zu erachten und als Entität in das Modell aufzunehmen sind. Die Subjektivität eines bereichsübergreifenden SD Modells kann daher besonders groß sein. Für die Modellbildung mit SD wird daher angeraten die Modellierung auf der Makroebene durchzuführen. Zusammenfassend wird nach Gumzej und Rosi (2017, S. 84) das „Simulationsparadigma von SD durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

- Systemorientierung
- Schwerpunktmäßige Modellierung von Systemvariablen
- Homogenität der Entitäten
- Verzicht auf Entitäten auf Mikroniveau
- Einführung von Dynamik in Systeme mittels Koppelschleifen
- Puffer und Flüsse bilden formale Modelle
- Der Zeitablauf ist kontinuierlich als Bestandteil der Systemvariablen, deren Werte sich durch Transaktionen ändern
- Modellflexibilität ermöglicht, die Struktur von Systemen außerhalb von Simulationsläufen zu verändern."

3.3 Abläufe der Modellbildung und Abstraktion

Nach Profos (1982) und Bossel (2004) ist für die Modellbildung ein möglichst tiefes Verständnis des behandelten Systems sinnvoll. Wenn möglich ist auf weitere Informationen, Grafiken oder Modellierungen außerhalb von SD zurückzugreifen, die ein Systemverständnis in kurzer Form vermitteln können. Beispielfhaft zu nennende grundlegende Maßnahmen, Diagrammtypen und Grafiken zum Erlangen eines Verständnisses eines Systems sind:

- ERM Diagramme: Zur Darstellung von Informationsflüssen und Abhängigkeiten in einem System.
- Programmablaufpläne/ EPK/ UML: Zur Verbesserung des Verständnisses der Prozessabläufe des modellierten Systems oder anhängender Prozesse.
- Karte: Zur Anschauung von Randbedingungen wie den geografischen Gegebenheiten.
- Sankey Diagramme und Tabellengrafiken: Zur Veranschaulichung von Transportflüssen zwischen Quellen und Senken.
- Mitarbeitergespräche: Systembeteiligte Mitarbeiter können Abläufe beschreiben und bei Rückfragen mögliche Unstimmigkeiten beim Systemverhalten aufklären.

Für eine möglichst objektive Modellbildung sollten informationsvermittelnden Maßnahmen vor die Modellbildung eingebunden werden. Für den weiteren Verlauf der Arbeit wird angenommen, dass Hintergrundinformationen zum abzubildenden System in großen Teilen vorliegen und nicht für die Analyse erstellt werden müssen. Des Weiteren wird der Schwerpunkt dieser Arbeit auf die Analyse mit SD gelegt und nicht auf die Datenaufbereitung mit der Informationsaufbereitung. Die Abläufe der Datenaufbereitung und der Erstellung von Infografiken werden daher nicht näher beschrieben.

Nach Gutenschwager et al. (2017) ist für die Modellbildung eines Simulationsmodells bei einem technisch komplexen System eine Abstraktion des Sachverhaltes nötig. Für die Beschränkung werden ausschließlich für den Modellzweck relevante Entitäten abgebildet. Als Modellzweck ist das Erreichen der Aufgabenspezifikationen zu sehen. Ein darüber hinausgehender Detailgrad bei der Modellierung mit weiteren Entitäten bringt ein schlechteres Aufwand-Nutzen Verhältnis, durch einen zusätzlichen und obsoleten Modellierungsaufwand. Für eine Modellbildung wird daher eine genaue Aufgabenspezifikation benötigt, nach der ein Modell erstellt wird, um eine Einschätzung der Relevanz bei abzubildenden Entitäten treffen zu können. Sofern noch keine Zielvorgabe gesetzt wurde, sollte die Zielsetzung vor oder mit der Modellbildung passieren. Wenn alle Voraussetzungen erfüllt sind, beginnt die Modellbildung mit der Systemanalyse. Das als Phasenergebnis erarbeitete Konzeptmodell enthält Informationen zu den Systemgrenzen, den Modellierungsdetailgrad, relevante Entitäten für die Erfüllung der Aufgabenspezifikation und die Beziehungen zwischen den Entitäten.

Nach Reussner und Hasselbring (2009) und der Richtlinie VDI 3633 kann für das Vorgehen bei der Systemanalyse das Bottom-up, Top-down oder Middle-out Vorgehen verwendet werden. Nach dem Bottom-Up Vorgehen werden zuerst kleine Bausteine modelliert, welche mit steigender Anzahl zu einem System heranwachsen. Dagegen wird beim Top-Down Vorgehen zuerst eine Einteilung in Teilsysteme vorgenommen. Eine genauere Modellierung der Teilsysteme erfolgt erst im Anschluss. Eine Kombination beider Verfahren ist mit dem Middle-Out Verfahren ebenfalls möglich.

Wenn ein Systemverständnis besteht und die Ziele der Modellbildung bekannt sind, können nach Gutenschwager et al. (2017) Vereinfachungen getroffen und ein Modell erstellt werden. Bei der Vereinfachung wird entschieden, welche der einzelnen Entitäten und Wirkzusammenhänge Relevanz für die Analyse besitzt. Bei einer Relevanz für die Zielerfüllung der Analyse werden die abstrakte zu Entitäten zusammengefassten Prozesse des Systems in einem Modell zielführend wiedergegeben. Im konkreten Fall von SD ist nach Bossel (1987) in der Systemanalyse mit einem

Causal Loop Diagramm ein erstes Konzeptmodell zu erstellen. Mit der Darstellung der Wirkzusammenhänge einzelner Entitäten werden bereits durch die Zusammenfassungen von Systemelementen zu Entitäten und der Berücksichtigung von nur relevanten Entitäten eine Abstraktion des Systems vorgenommen. Das Causal Loop Diagramm veranschaulicht dabei alle für die Modellierung nötigen Wirkzusammenhänge für die spätere Modellierung. Die für eine Simulation benötigten Zusammenhänge mit Formeln zur Berechnung sind beim Causal Loop Diagramm nicht in das Modell eingebunden. Rückschlüsse zum Systemverhalten sind mit dem Causal Loop Diagramm durch die Vereinfachung nur zu erahnen oder gar nicht möglich. Nach Gutenschwager et al. (2017, S. 144) ist der nächste Schritt in der Systemanalyse die Formalisierung. Bei dem Schritt werden innerhalb des Themenbereiches weitergehende Detaillierungen und veränderte Beschreibungen des Sachverhaltes bei einem Verfeinerungsprozess in das Modell eingebracht. Das aus dem Verfeinerungsprozess entstehende formale Modell zeigt die Zusammenhänge des modellierten Systems genauer auf. Das im Kontext von SD entstehende Diagramm wäre das Flussdiagramm, welches allerdings noch kein Simulationsmodell darstellt. Eine Übertragung des Flussdiagramms in ein auf dem Computer mit einer Simulationssoftware erstelltes Simulationsmodell ist aber idealer Weise möglich. Für ein Beispiel der Beschreibung der Modellbildung in SD wird auf das zuvor verwendete Wachstumsmodell in Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 zurückgegriffen. Während das dargestellte Causal Loop Diagramm nur die Wirkzusammenhänge aufzeigt, wird im formalisierten Flussdiagramm explizit auf die Variable der Geburtenrate eingegangen. Für eine erweiterte Darstellung eines prinzipiell ähnlichen Sachverhalts wird auf ein Beispiel nach von Ossimitz und Schlöglhofer (1990) zurückgegriffen, mit einem größer gefassten System in ein SD Flussdiagramm. Neben dem bereits bekannten Wachstumszyklus durch Geburten wird das Flussdiagramm erweitert mit einer maximalen Tragfähigkeit der Population und einem Populationsrückgang durch eine Umwandlung von Teilen der Population zu Beutehasen. Beutehasen werden von der ursprünglichen Population abgezogen. Eine zweite Population von Jägertieren ist mit ihrem Wachstum direkt von der ersten Population der Beutetiere abhängig. Die Abbildung 3.5 gibt die Darstellung des Flussdiagramms wieder.

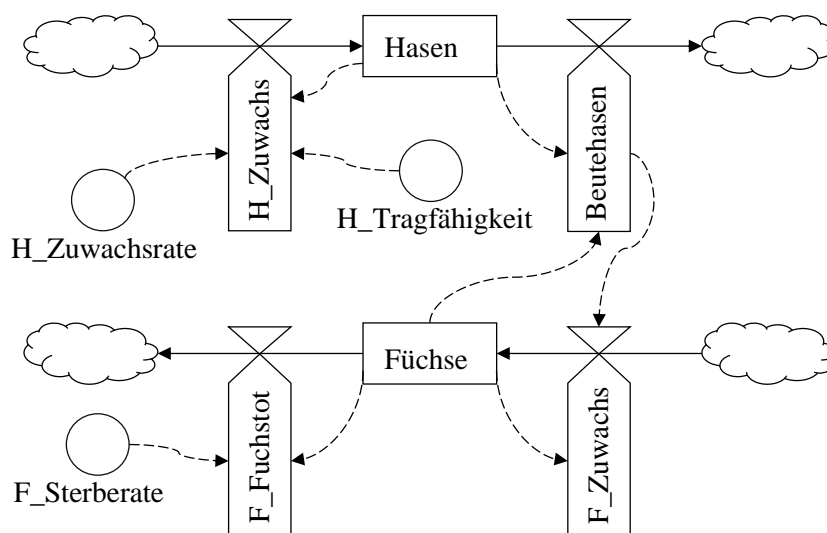


Abbildung 3.5: Räuber Beute Modell als Flussdiagramm (Quelle: Ossimitz und Schlöglhofer 1990, S. 33).

Durch die Darstellung des Systems im Flussdiagramm sind die Wirkzusammenhänge der einzelnen Entitäten und insbesondere der HGn besser ersichtlich. BG, FG und HG können voneinander unterschieden werden. Die Darstellung des Flussdiagramms beinhaltet eine genauere Systemabbildung und mehr Information im Vergleich zum Causal Loop Diagramm. Dieses Flussdiagramm in der dargestellten Form ist in ein Simulationsmodell überführbar (Ossimitz und Schlöglhofer 1990). Der letzte Schritt der Überführung in ein Simulationsmodell ist die Implementierung (Gutenschwager et al. 2017). Für die Implementierung des Flussmodells in ein Simulationsmodell sind die Bausteine mithilfe eines Computers und einer Simulationssoftware zu übertragen, wobei auf vorgefertigte Bausteine in der Simulationssoftware zurückgegriffen werden kann, die der Syntax des Flussmodells näherungsweise entsprechen sollten (Bossel 1987; Ossimitz und Schlöglhofer 1990). Analog ist die Modellierung weiterer komplexerer Systeme möglich, wie beispielsweise ein Logistiksystem innerhalb einer wachsenden Stadt.

3.4 Durchführung von Simulationen mit System Dynamics

Bevor mit einem Modell und Experimenten gearbeitet werden kann, um Rückschlüsse auf das abgebildete System ziehen zu können, ist das Modell nach Bossel (2004) an das reale System anzupassen. Das Simulationsmodell muss das System hinreichend genau abbilden. Durch das Hinterlegen von Berechnungsformeln zu den einzelnen Wirkzusammenhängen der Entitäten wird das Systemverhalten an das Verhalten des realen Systems angepasst. Bei den Berechnungsformeln können in SD die Grundrechenarten plus, minus, mal und geteilt verwendet werden. Abhängig von der verwendeten Simulationssoftware ist eine Einbindung von Anweisungen und logischen Verkettungen ähnlich denen einer höheren Programmiersprache in die Berechnungsformeln möglich. Durch die Bausteinstruktur mit Wirkzusammenhängen wird aus den einzelnen Formeln ein DGL ähnliches System erzeugt, welches das Systemverhalten abbildet. Sollte ggf. ein System beschreibendes DGL-System vorliegen, können aus dem Umformen in ein Baustein-diagramm die einzelnen Formeln der Wirkzusammenhänge ermittelt werden. Sollte kein DGL-System vorliegen, dann muss das Simulationsmodell vom Modelleur an das reale System angepasst werden. Nach Bossel (2004) und Gutenschwager et al. (2017) geschieht die Anpassung des Simulationsmodells an das reale System über die Daten einzelner Prozesse zur genauen Beschreibung einzelner Entitäten. Zur Anpassung des Simulationsmodells sind darüber hinaus Annahmen zu treffen, zur Erstellung von Formeln, die wiedergeben wie einzelne Entitäten aufeinander einwirken und in welchem Zeitintervall eine Simulation durchlaufen wird. Für die Modellbildung ist die Stimmigkeit der Dimension aller Formeln und die korrekte Umrechnung aller Parameter zu gewährleisten. Die im Simulationsmodell eingebundenen Entitäten, bei denen eine Beschreibung durch Daten erfolgt, werden als Attribute bezeichnet. Erfolgt eine Beschreibung der Attribute mithilfe von Daten von außerhalb des Simulationsmodells, werden sie stattdessen als Parameter oder Faktoren bezeichnet. Eine Parametrisierung von Attributen erfolgt beispielsweise durch die Einbindung von Daten über eine manuelle Eingabemaske oder automatisierte Einbindung aus einer Datenbank. Im Fall von SD sind Wirkzusammenhänge mit Formeln und Startwerten zu hinterlegen. Durch das Zusammenfügen der Entitäten mit den hinterlegten Formeln und Wirkzusammenhängen zwischen den Entitäten entsteht ein Simulationsmodell, das einem DGL-System gleichwertig ist.

Nach Gutenschwager et al. (2017) ist bei der Datengewinnung zur Anpassung des Modells an reale Abläufe die Vorgehensweise zu beachten. Die Modellanpassung wird mit bekannten Systeminformationen oder über Datensätze ermöglicht. Bei Informationssystemen im Betrieb oder über veröffentlichte Statistiken sind für das Modell relevante Datensätze zu erheben und aufzubereiten. Für die Aufbereitung sind die Daten entsprechend zu benennen, einzuordnen, von Fehlern zu befreien, auf Plausibilität zu prüfen und auf ein vereinheitlichtes Datenformat zu bringen. Fehlerhafte Daten sind ggf. zu entfernen. Nicht vorhandene aber benötigte Daten sind durch Annahmen, Schätzungen und statistische Verteilungen einzubringen. Für das Abschätzen unbekannter Werte sind, wenn möglich empirische Erwartungswerte und Standardabweichungen von vergleichbaren Systemen zu verwenden. Analog erfolgt die Generierung von Zufallszahlen für die Simulation nach statistischen Mitteln, wobei Daten mit einer gewissen Streuung „der Standardabweichung“, um einen Erwartungswert in einer für das System realistischen mathematischen Wahrscheinlichkeitsverteilung wiedergeben werden (Law 2015). Aufgrund des Schwerpunkts dieser Arbeit wird nicht weiter auf die genauen Abläufe der Informationsgewinnung aus großen Datenbanken eingegangen und auf das Data-Mining mit der entsprechenden Literatur verwiesen (Siehe Ester und Sander 2000). Für die weitere Modellanpassung sind nach Gutenschwager et al. (2017) die aufbereiteten Datensätze in Trainings- und Testdatensätze zu trennen. Das Simulationsmodell wird durch mehrere Trainingsdatensätze mehrmals neu eingestellt, bis das Simulationsmodell die Realität ausreichend genau abgebildet und bei einem neuen Trainingsdatensatz keine weiteren Anpassungen mehr nötig sind. Mit den Testdatensätzen erfolgt die eigentliche Untersuchung eines Systems durch Experimente im angepassten Simulationsmodell. Mit einem angepassten bzw. trainierten Modell kann über Experimenten eine wahrscheinliche Entwicklung des Systems dargestellt werden.

Nach Gutenschwager et al. (2017) ist für einen Erkenntnisgewinn über das zu untersuchende System nicht nur eine Ausprägung von einem Faktor zu untersuchen, sondern mehrere Kombinationen von Faktoren. Zur Durchführung der Simulation wird das Modell daher mehrmals angepasst, um Erkenntnisse über das System und das zukünftige Verhalten bei gegebenen Randbedingungen zu gewinnen. Für eine effektive Untersuchung des Modells wird ein *Versuchsplan* zur Steuerung von Experimenten in der Simulation verwendet. Ein Versuchsplan besteht aus mehreren Experimenten, für die wiederum mehrere Replikationsdurchläufe durchzuführen sind. Bei dem wiederholten Durchlaufen eines Experiments können durch Zufallszahlen in einzelnen Replikationen unterschiedliche Ergebnisse entstehen und statistisch berücksichtigt werden. Im Versuchsplan wird festgelegt, wie die einzelnen Experimente durchzuführen sind. Zu den festgelegten Elementen gehört die Beschreibung, welche Parameter, in welchen Experimenten innerhalb eines bestimmten Zeitraumes zu untersuchen sind. Für die Untersuchung von einem neu zu entwickelnden System ist von einem *terminierten*, also leeren System auszugehen. Das System startet im Gegensatz zum nicht terminierten System leer, wodurch der Anfangszustand gesondert zu beachten ist. Terminierte Systeme benötigen eine Berücksichtigung der Warmlaufphase. Das System erreicht erst nach einiger Zeit die volle Leistungsfähigkeit. Rückschlüsse zum Systemverhalten sind durch die Warmlaufphase nicht über alle Zeitintervalle des Experiments möglich.

Nach Kleppmann (2016) wirken Einflussgrößen und Störgrößen auf ein System ein und beeinflussen die Zielgrößen des Systems. Bei der Untersuchung eines Systems können nicht alle

Einflussgrößen auf das System berücksichtigt werden. Dies gilt auch für die Betrachtung der Einflussgrößen in einem Simulationsmodell. Die Komplexität eines Simulationsmodells ist oftmals so hoch, dass nicht alle der Einflussgrößen untersucht werden können. Mit der Auswahl bestimmter Einflussgrößen, sog. *Faktoren* ist die Auswahl einzugrenzen. Faktoren sind für das zu untersuchende Modellziel relevante Einflussgrößen, welche für das abgebildete System eine signifikante Bedeutung besitzen. Nach Kleppmann (2016) und Gutenschwager et al. (2017) gilt bei einer Simulationsstudie, je mehr Simulationsdurchläufe durchzuführen sind, desto größer ist der Arbeitsaufwand. Um eine hohe Kosten-Nutzen Effizienz zu erzielen, ist zu versuchen die Zahl der in der Simulationsstudie nötigen Simulationsdurchläufe gering zu halten. Die Auswahl, der Einflussfaktoren, die untersucht werden, ist auf die für die Zielerfüllung des Modellierungsauftrags sinnvollen Faktoren zu beschränken.

Nachfolgend wird näher auf die Gegebenheiten der *Versuchsplanung* eingegangen wo nach Gutenschwager et al. (2017) und Kleppmann (2016) mit der Erstellung einer Tabelle auf der Basis der Faktoren, die in jeder möglichen Variation in unterschiedlicher Ausprägung permutiert werden, ein Versuchsplan erarbeitet werden kann. Der Versuchsplan wächst durch jeden einzubringenden Faktor (n) und der Anzahl von Faktorausprägungen (k) auf mehr Kombinationen an. Den Zusammenhang der Anzahl der durchzuführenden Versuchsdurchläufe, Faktorausprägungen und Faktoren wird mit der Formel (3.1) wiedergegeben. Mit der Versuchsplanung ist die Untersuchung eines komplexen Systems mit einer relativ großen Anzahl von Faktoren koordiniert möglich. Die Anzahl der nötigen Versuchsdurchläufe und Störgrößeneinflüsse werden mit dem Versuchsplan reduziert. Für die Wahl der Faktorausprägung sind zwei Wege möglich. Zum einen ist die Wahl über das zu erreichende Ziel denkbar. Die Faktorausprägungen werden in diesem Fall so gewählt, dass das Simulationsziel erreicht wird. Die Untersuchung dient dem Zweck zu bestimmen, welche Randbedingungen für das Erreichen notwendig sind. Zum anderen kann die Wahl der Faktorausprägungen nach einem „Was ist, wenn ...“ Prinzip bestimmt werden. Das Ziel dieser Untersuchung ist die Durchführung von Experimenten, um ein tieferes Verständnis zum Systemverhalten bei besonderen Eingangswerten zu erlangen.

$$\text{Anzahl Kombinationen} = m = \prod_{i=1}^n k \quad (3.1)$$

Eine mit der Formel (3.1) entstandener Versuchsplan ist durch die große Variation an Kombinationen von Faktoren für eine Untersuchung in der Simulation oft zu ausführlich. Beim sog. *Factor-Design* sollen die für die Simulation durchzuführenden Experimente reduziert werden. Für eine Begrenzung der im vollständigen Versuchsplan aufgeführten Durchläufe sind zwei Ansätze anwendbar. Beim Ansatz des *dynamischen Factor-Designs* liegt kein fester Versuchsplan vor. Stattdessen werden mithilfe eines Algorithmus die bereits getätigten Durchläufe untersucht, um eine optimale Verteilung der Faktoren für den nächsten Durchlauf zu erhalten. Der zweite Ansatz ist das *statische Factor-Design*, wobei im Gegensatz zum dynamischen Factor-Design bereits vor dem ersten Simulationsdurchlauf ein Versuchsplan vorliegt, mit allen zu untersuchenden Faktorvariationen für die jeweiligen Durchläufe. Ein *Factor-Screening* kann mit der Ermittlung besonders einflussreicher Faktoren die Erarbeitung des statistischen Factor-Designs vereinfachen. Entgegen dem Wunsch zur Minimierung der Durchläufe ist ebenfalls eine statistische Signifikanz der Ergebnisse zu gewährleisten, welche mehrere *Replikationen* benötigt. Die Ergebnisse eines Simulationsdurchlaufes werden daher in mehrmaliger Ausführung wiedergegeben.

Die unterschiedlichen Ausprägungen der Ergebniswerte von Replikationen entsteht durch unterschiedlichen Zufallszahlen in den Simulationsdurchläufen. Jeder Simulationsdurchlauf mit den gleichen Eingangswerten und anderen Zufalls- und Störgrößenwerten generiert eine neue Replikation. Falls mit einer Simulationsstudie mehrere voneinander unabhängige Simulationsziele bewertet werden, ist die Erstellung von mehreren Versuchsplänen sinnvoll.

Das Abarbeiten des Versuchsplans kann nachfolgend einzeln erfolgen mit der Variation von einem Faktor pro Simulationsdurchlauf. Alternativ ist auch der 2^k Factor-Design Ansatz wählbar. Beim 2^k Factor-Design wird eine hohe und eine niedrige Faktorausprägung pro Parameter gewählt. Die Anzahl der bei diesem Ansatz durchzuführenden Versuchsdurchläufe wird durch die begrenzte Anzahl an Ausprägungen reduziert. Die Formel in (3.1) für die notwendigen Durchläufe vereinfacht sich zu der in (3.2) beschriebenen Formel.

$$\text{Anzahl Kombinationen} = m = 2^n \quad (3.2)$$

Für das Versuchsplanschema werden hohe Faktorausprägungen mit einem + und niedrige Faktorausprägungen mit einem – bezeichnet. Entsprechend zu dem vollständigen Versuchsplan werden alle Variationen der Faktorenausprägungen + und – für jeden Faktor permutiert. Das Ergebnis der Permutation ist eine wie in Tabelle 3.1 dargestellte Verteilung von Faktorausprägungen.

Tabelle 3.1: Ausschnitt der Faktorausprägungen im 2^k Factor-Design Ansatz (Nach Quelle: Gutenschwager et al. 2017, S. 180).

Ausprägung Faktor 1	Ausprägung Faktor 2	Ausprägung Faktor 3	Mittelwert der Ergebnisse aus drei Replikationen (E_i)
–	–	–	116
–	–	+	125
–	+	–	120
–	+	+	131
+	–	–	180
...

Alle der entstehenden 2^k Faktorvariationen, die in einer Zeile aufgeführt sind, entsprechen einem Experiment und werden mit mehreren Replikationen mehrmals durchlaufen, um für jede Faktorvariation ein statistisch aussagekräftiger Mittelwert als Ergebnis des Simulationsdurchlaufes bilden zu können (E_i). Mit der Formel (3.3) kann der Einfluss eines Faktors auf den Ergebniswert bestimmt werden. Entsprechend der Ausprägung der Faktoren in der Tabelle 3.1 werden die Ergebniswerte entweder addiert oder subtrahiert.

$$\text{Einfluss des Faktors } i = e_i = \frac{\sum_{i=1}^{2^k} \pm E_i}{2^{k-1}} \quad (3.3)$$

Die Rechnung zu den in der Beispieltabelle 3.1 verkürzten Darstellung von Daten erfolgt mit der Formel (3.3) wie Folgt:

$$e_1 = \frac{-116-125-120-131+180+181+188+188}{2^{3-1}} = 61,25 \quad (3.4)$$

Mit der Berechnung der Einflüsse aller Faktoren kann über einen Vergleich der Ergebniswerte e_1 zu e_2 und e_3 die Bedeutung der Faktoren auf das Systemverhalten bewertet werden. Größere Zahlen haben einen bedeutenderen Einfluss auf die Ergebniswerte der Simulation.

Nach Kleppmann (2016), Gutenschwager et al. (2017) und Mertens (1982) können zwischen einzelnen Faktoren oder auch Faktorengruppen Wechselwirkungen bestehen. Wechselwirkungen der Faktoren sind mit in den Versuchsplan aufzunehmen, zu untersuchen und der Einfluss von

Wechselwirkungsgruppen auf das System zu bestimmen. Problematisch beim 2^k Factor-Design Ansatz sind die hohe Anzahl von Variationen, die getestet werden müssen, die mit steigender Anzahl der Faktoren exponentiell zunimmt. In einem alternativen fraktionellen Faktor-Design Ansatz, dem teilfaktoriellen Faktor-Design Ansatz wird das Ziel verfolgt, die Anzahl der nötigen Simulationsdurchläufe zu reduzieren. Aus technischer Sicht ist eine Verkleinerung der Variation sinnvoll, um Rechenleistung und Zeit einzusparen. Mit einer Reduktion der Variationen im Versuchsplan erfolgt auch ein Informationsverlust. Reduziert werden kann die Anzahl der verwendeten Faktoren um die Anzahl der additiven Faktoren P . Eine Annahme des fraktionellen Faktor-Design Ansatzes ist, dass Wechselwirkungen zwischen Faktoren mit einer steigenden Anzahl von Faktoren abnehmen. Dreifach- und Vierfachwechselwirkungen sind im Allgemeinen vernachlässigbar, aufgrund des geringen Einflusses auf das Simulationsergebnis. Weiterhin können Wirkungszusammenhänge zusammengefasst bzw. übereinandergelegt werden, nach den Regeln des orthogonalen Vektorfeldes. Die Matrix kann durch das Zusammenfassen um den Faktor $\frac{1}{2^P}$ reduziert werden. Eine Reduktion der Variationen führt zu einer vernachlässigbaren Ungenauigkeit, wenn die Variation ausreichend hoch ist. Bei der Vereinfachung ist die Identifikation, von Faktoren die einen signifikanten Effekt auf das System haben und in Wechselwirkungen höherer Ordnung vorliegen nicht mehr ohne weiteres möglich. Effekte bei Faktoren mit vielen Wechselwirkungen müssen wegen der Zusammenfassung über rationale Diagnostik begründet werden. Entsprechende der Bezeichnung des 2^k Factor-Design Ansatzes wird der teilfaktorielle Versuchsplan als 2^{k-p} Factor-Design bezeichnet. Die Formel (3.5) gibt analog zur Formel (3.2) die Anzahl der Durchläufe an, die für alle Kombinationen von Faktoren durchlaufen werden, wobei beim teilfaktoriellen Versuchsplan entsprechend weniger Durchläufe benötigt werden als beim vollständigen Versuchsplan. Analog zum 2^k und 2^{k-p} Factor-Design Ansatz, sind auch Versuchspläne höherer Ordnung untersuchbar. Beispielsweise ist das 3^k Factor-Design mit entsprechend komplexerer Methodik denkbar.

$$\text{Anzahl Kombinationen} = m = 2^{k-p} \quad (3.5)$$

Nach Weber (1979) und Bossel (2004) ist bei der Bewertung von BSn im Kontext der City-Logistik bei der Einführung von neuartigen BSn davon auszugehen, dass einzelne Systemelemente nicht sofort die volle Leistungsfähigkeit erbringen können (terminiertes System). Insbesondere bei der Einführung neuartiger BSn ist zu prüfen, ob eine Warmlaufphase zu beachten ist. Bevor mit Experimenten einzelne BSn untersucht werden, wird über einen sog. *Vergleichsdurchlauf* ein Zukunftsszenario für die Ausgangssituation erarbeitet. Über das Zukunftsszenario können Vergleichswerte zur Bewertung von BSn herangezogen werden. Durch die Reproduzierbarkeit von Simulationen können in Experimenten Rückschlüsse auf die Einflüsse der einzelnen Parameter und das Systemverhalten gezogen werden. Außerdem können über die Bewertung von BSn hinaus Handlungsempfehlungen für mögliche weitere Untersuchung zu Optimierung im untersuchten System aufgezeigt werden. Veränderungen an Parametern für einzelne Experimente sind zu dokumentieren, um Annahmen nachvollziehen zu können und eine Reproduzierbarkeit in den Experimenten mit verändertem Simulationsmodell zu gewährleisten.

Während der einzelnen Simulationsdurchläufe, sowohl bei dem Vergleichsdurchlauf als auch bei den folgenden Experimenten, werden Werte zu den Zuständen der Entitäten von der Simulationssoftware gespeichert (Vensim 2019). Die berechneten Werte werden für alle oder

ausgewählte Entitäten bei den festgelegten Zeitschritten über die Länge des Untersuchungszeitraums gespeichert. Die Berechnung der einzelnen Datensätze erfolgt automatisch unter Zuhilfenahme der zur Simulation verwendeten Software, welche computergestützt das zum modellierten System zugehörige DGL-System löst oder die Rechnungen der Modellbausteine nacheinander und wiederkehrend bearbeitet (Vensim 2019). Auf Grund der computergestützten Auswertung wird nicht näher auf die genaue Vorgehensweise der Rechnungsschritte eingegangen und auf das prinzipielle Vorgehen zur Lösung von DGL-Systemen in der Fachliteratur verwiesen (Siehe Golub et al. 1995).

Um aus den Simulationsergebnissen gezogene Rückschlüsse sicher verwenden zu können ist nach Gutenschwager et al. (2017) eine Verifikation und Validierung der Ergebnisse nötig. Für die Verifikation ist zu prüfen, ob ein Phasenergebnis korrekt in das nächste Phasenergebnis überführt wurde. Die Validierung kontrolliert dagegen wiederkehrend, ob das reale System noch ausreichend genau durch das Simulationsmodell abgebildet wird. Nach Rabe et al. (2008) ist bei der Modellierung die Verifikation und Validierung mit neun Kriterien zu beachten sind. Zu den Kriterien gehören die Vollständigkeit, Genauigkeit und Konsistenz des Modells. Außerdem muss das Simulationsmodell der Aktualität, Eignung und Plausibilität gerecht werden, um das Systemverhalten erwartbar abzubilden. Mit der Prüfung der Verständlichkeit soll das Simulationsmodell intuitiv und schnell nachvollzogen werden können. Über die Machbarkeit und Verfügbarkeit ist zu prüfen, ob notwendige Daten vorliegen oder das Modell in seiner Form für die Zieldefinition ausreichend detailliert und sinngemäß ist. Liegen für eine Validierung keine Vergleichsdaten zur Prüfung einer genauen und Konsistenten Abbildung vor, dann wird für die Validierung Expertenwissen für die Abschätzung der Entwicklungen einzelner Entitäten benötigt (Sandrock 2006). Der Vorgang ist als kostenintensiv und subjektiv anzusehen (Sandrock 2006).

3.5 Ergebnisauswertung der Simulation und Erarbeitung von Kennzahlen

Die in der Simulationsdurchführung erarbeiteten Daten liegen i. d. R. in einer tabellarischen Form vor und lassen nach Gutenschwager et al. (2017) neue Erkenntnisse zum Modell bzw. zum abgebildeten realen System erwarten. Um mit den Ergebnisdaten einen Erkenntnisgewinn zum System zu erreichen, müssen die Ergebnisdaten aufbereitet werden. Die Bearbeitung erfolgt unter der Betrachtung der Zieldefinition. Die Ergebnisdaten werden für die Auswertung entsprechend aufbereitet durch eine Verdichtung, Filterung und Verknüpfung der Ergebniswerte. Entitäten, die für Wirkzusammenhänge und die weitere Berechnung im Modell eingebunden waren, können in der Ergebnisauswertung nicht mehr bedeutend sein und müssen herausgefiltert werden. Dagegen sind Entitäten herauszustellen, die einen Rückschluss auf zuvor beschlossene Hypothesen oder zu bewertende BSn legen.

Für die Auswertung von Simulationsergebnissen sind aufbereitete Kennzahlen zu verwenden. Der Gebrauch von Kennzahlen dient der schnellen Übersicht und der Vergleichbarkeit der Ergebnisse (Gutenschwager et al. 2017). Für die Auswertung von Simulationsergebnissen im Kontext der City-Logistik ist keine allgemeingültige Nennung von Kennzahlen möglich. Stattdessen sind an die Zieldefinition angepassten Kennzahlen zu verwenden (Weigert et al. 2010). Allerdings sind nach Weigert et al. (2010) wiederkehrende Kennzahlenkategorien in der Logistik

zu erkennen in den Bereichen des Durchsatzes, des Bestands, der Durchlaufzeit und der Auslastung. Ebenfalls auftretend sind Kennzahlen in den Bereichen der Termintreue innerhalb eines Zeitintervalls und die Ausbeute mit dem Verhältnis von brauchbaren Teilen zur Gesamtproduktion. Durchsatzbezogene Kennzahlen geben den Durchlauf von Einheiten in einem Zeitintervall an. Die Durchlaufzeit gibt dagegen die Zeit an, wie lange eine Einheit für das Durchlaufen einer Prozesskette von der Quelle bis zu der Senke benötigt. Bestandsbezogene Kennzahlen geben eine Anzahl von Einheiten zu einem Zeitpunkt oder Zeitintervall in einem System oder in einem Systemabschnitt an. Auslastungsbezogene Kennzahlen beschreiben die prozentuale Arbeitsrate von Prozessen in Systemen. Die Ermittlung von Kennzahlen erfolgt über den Untersuchungszeitraum hinweg, um Einblicke über die Entwicklung der Kennzahlen über die Zeit zu erhalten. Schwankungen im Systemverhalten oder ein unnatürliches Wachstumsverhalten werden durch die Betrachtung ersichtlich. Ausreißer können identifiziert und für Trendanalysen ausgeschlossen oder gezielt untersucht werden. Für einen Vergleich von einzelnen Experimenten kann dagegen eine Vereinfachung der Kennzahlen auf Durchschnittswerte sinnvoll sein. Durch die Durchschnittswerte bei Ergebnissen wird ein Vergleichen zwischen den Experimenten erleichtert. Nach Gutenschwager et al. (2017) ist bei den Ergebnissen aus statistischer Sicht eine tiefer gehende Untersuchung notwendig. Mit Konfidenzintervallen ist zu untersuchen, ob die unterschiedlichen Parameterkonfigurationen in den Experimenten auch zu statistisch signifikanten Ergebnissen kommen. Nicht signifikante Ergebnisse entstehen durch den Einfluss von zufälligen Ereignissen während der Simulation, die zu starken Schwankungen der Ergebnisse führen. Für die Untersuchung werden Konfidenzintervallgrenzen aus den Ergebniswerten der Replikationen eines Experimentes für ein festgelegtes Signifikanzniveau gebildet und in Diagrammen um den Mittelwert der jeweiligen Experimente dargestellt. Bei einem Überschneiden der Konfidenzintervalle einzelner Experimente kann keine signifikante Aussage zu der Unterscheidung der betroffenen Experimente gemacht werden. Die ermittelten Ergebnisse liegen innerhalb eines möglichen Schwankungsbereichs, der keine sichere Aussage zulässt. Nach Gutenschwager et al. (2017) sollte bei einer Analyse mit Nullsummenhypothesen ein Sicherheitsfaktor bedacht werden für die Einführung einer neuen BS. Erst wenn eine Veränderung der BS zu einer signifikanten Verbesserung in den Kennzahlen führt, im Vergleich zur Ausgangssituation, sollte eine Einführung in Erwägung gezogen werden.

Nach Gutenschwager et al. (2017) dient die Verwendung von Visualisierungen der transparenten Verdeutlichung der erarbeiteten Ergebnisse, wofür angemessene, effektive und expressive Darstellungswege zu wählen sind. Durch die Visualisierung soll ein intuitives Verständnis bei vertretbarem Aufwand erreicht werden. Mögliche Darstellungswege für Simulationswege sind Tabellen und Balkendiagramme für die Darstellung einfacher statischer Visualisierungen. Für dynamischere Darstellungen können beispielsweise Sankeydiagramme, Box-Plots und Animationen verwendet werden. Bei Sankeydiagrammen werden über Pfeilgrößen Transportströme mengenbehaftet dargestellt. Mithilfe von Box-Plots können prozentuale Zustandsanteile visualisiert werden. Für die Behandlung der Visualisierung in SD wird als Beispiel auf das zuvor in Abbildung 3.5 dargestellten Räuber Beute Modell zurückgegriffen. Die Darstellung der Ergebnisse der Simulation ist in einem zweidimensionalen Diagramm mit der Hasenpopulation auf der X-Achse in Korrelation zur Fuchspopulation auf der Y-Achse darstellbar. Die Darstellung der Zeit geschieht entlang des Graphen, wobei der Startpunkt mit einem Kreis gekennzeichnet

wird. Eine entsprechende Visualisierung der Simulationsergebnisse ist in der Abbildung 3.6 dargestellt. Zu Beginn der Simulation ist die Population der Hasen größer als ihre Tragfähigkeit, wodurch kurzzeitig ein starker Rückgang eintritt. Durch die Korrelation zwischen Hasen- und Fuchspopulationen stehen zu diesem Zeitpunkt ausreichend Beutehasen zur Verfügung, wodurch die Fuchspopulation weiter anwächst und die Hasenpopulation schrumpft. Durch das Wachstum der Fuchspopulation steigt der Bedarf an Beutehasen an. Wenn der Bedarf den Bestand an Hasen übersteigt, ist der Hungertod von vielen Füchsen die Folge. Nachdem sich die Hasenpopulation durch die verringerte Fuchspopulation erholen konnte, wiederholt sich der prinzipielle Ablauf mit einer verringerten Schwingungsamplitude. Letztendlich läuft das System einen Konvergenzpunkt entgegen, der dem Gleichgewichtspunkt zwischen den beiden Entitäten entspricht. Durch die Visualisierung werden als Simulationsergebnis das Einschwingverhalten und die Abhängigkeit der beiden Entitäten zueinander dargestellt. Die Visualisierung ermöglicht das intuitive Verständnis der Ergebnisse.

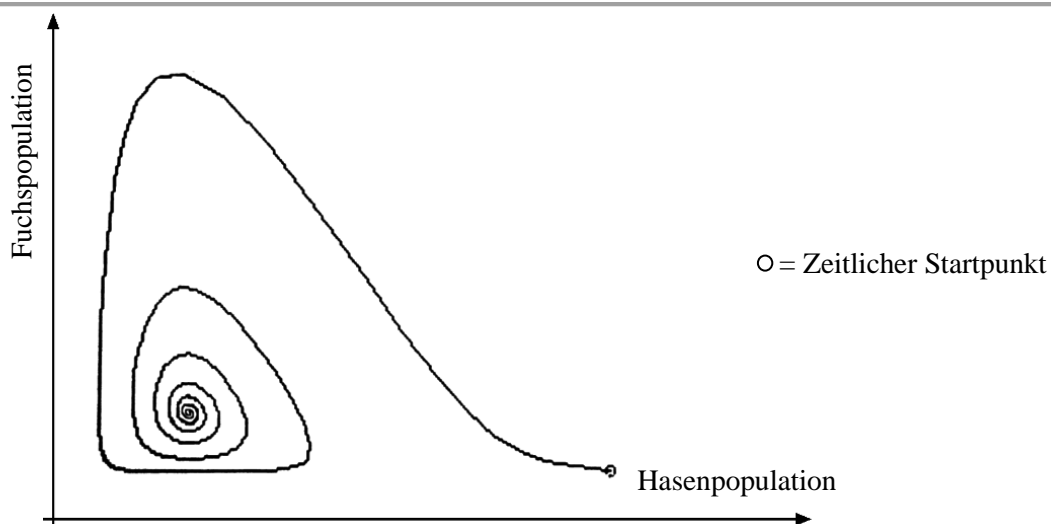


Abbildung 3.6: Simulationsergebnis für das Räuber-Beute-Modell aus Abbildung 3.5 (Nach Quelle: Bossel 1987, S. 67).

Neben der in der Abbildung dargestellten Gegenüberstellung zweier BGn sind zahlreiche weitere Darstellungen denkbar. Beispielhaft zu nennen ist die Untersuchung oder Visualisierung der einzelnen FGn über die Zeit. Die Auswahl einer passenden Visualisierung ist von der Zieldefinition, dem zu untersuchenden System und den in der Simulation gewonnenen Erkenntnissen abhängig.

Die Ergebnisse der Simulation haben nach Gutenschwager et al. (2017) einen allgemeinen Nutzen für:

- Das Erzielen eines Gesamtverständnisses eines Systems,
- Eine höhere Planungssicherheit,
- Eine höhere Qualität der Planungsergebnisse,
- Eine verkürzte Anlaufphase bei Neueinführungen,
- Eine Reduktion von laufenden Kosten in einem System,
- Die Suche nach kostengünstigen Lösungen.

4 Theoretische Aufarbeitung von Belieferungsstrategien und Bewertungskriterien

Bisher wurde ein näheres Verständnis aufgebaut zur City-Logistik, der weiteren Entwicklung von Städten und der Anwendung von SD als Simulationsmethodik. Zur Erstellung eines Konzeptes zur Bewertung von BSn im Kontext der City-Logistik sind weitere Kenntnisse notwendig. Daher werden in diesem Kapitel BSn für Unternehmen behandelt, und als Grundlage für die weitere Untersuchung verwendet. Für die Bewertung der BSn werden auch Kriterien benötigt. In diesem Kapitel werden auch die theoretischen Grundlagen für die Erstellung der Bewertungskriterien erläutert, die zur Bewertung von BSn verwendet werden.

4.1 Unternehmen und ihre Belieferungsstrategien

Mögliche intraorganisatorische Lösungsansätze wie Tourenplanungssysteme, ein flexibler Personaleinsatz oder Informations- und Kommunikationssysteme für das Bestands- und Lagermanagement wurden bereits als mögliche Ansätze im Abschnitt 2.2 aufgeführt. Für die Modellierung mit SD wurde die Einbindung von Entitäten auf der Mikroebene als nicht zielführend befunden (Kapitel 3). Die Intraorganisatorischen Lösungsansätzen werden zur Mikroebene zuzuordnenden und für die Bewertung zurückgestellt oder nicht genauer untersucht. Von den intraorganisatorischen Lösungsansätzen wird allerdings ein flexibler Personaleinsatz für die Untersuchung angenommen und bei der Tourenplanung werden zwei unterschiedliche Fälle betrachtet.

Nach Wiendahl (1989), Werner (2013) und Schulte (1999) gehört zu den Strukturentscheidungen, die ein Unternehmen treffen muss, die Wahl einer BS. Die Strategieentscheidungen werden zur nachhaltigen logistischen Ausrichtung getroffen, um eine kostengünstige Erfüllung der Logistikdienstleistungen zu ermöglichen. Trotz der möglichst kostengünstigen Ausrichtung sind z. T. widersprüchliche logistische Kenngrößen wie eine hohe Auslastung von Maschinen oder Fahrzeugen, niedrige Bestände, kurze Lieferzeiten und eine hohe Liefertreue weitestgehend zu erfüllen. Individuelle Vorgaben an ein System sind ebenfalls zu beachten. Die Wahl einer individuellen angepassten BS ist daher für ein wirtschaftendes Unternehmen ratsam. BSn beschreiben in diesem Kontext von welchem Lager welcher Kunde wie beliefert werden soll. Zur Auswahl einer effektiven BS ist die Betrachtung mehrerer Möglichkeiten notwendig. Allgemeine Beispiele für BSn sind Direktbelieferungen, Milkrun-Fahrten und die Lagerhaltung. Bei Direktbelieferungen erfolgt der Transport von Ware direkt aus dem Werk zum Kunden, wodurch die Lagerkosten gering und die Distributionskosten hoch sind. Bei Milkrun-Fahrten werden mehrere Lieferanten und Kunden entlang einer festen Route angefahren. Durch die verbesserte Fahrzeugauslastung ist die Milkrun-Fahrt auf kurzen Distanzen ökonomischer und kann die Kosten pro Tonnenkilometer verringern. Im Kontext dieser Arbeit werden Milkrun-Fahren nachfolgend als Routenfahrten bezeichnet. Für Unternehmen sind außerdem Entscheidungen zur Lagerhaltung zu treffen. Durch Zwischenlager wird eine Verbesserung der Lieferzeit und Liefertreue ermöglicht, wobei mit steigenden Lagerkosten zu rechnen ist. Nachfolgend werden explizite BSn behandelt, die im Kontext der City-Logistik für eine Bewertung relevant sind. Nach Lehmacher (2015) ist ein Grundziel der City-Logistik die Kollaboration von mehreren Unternehmen (Abschnitt 2.2). Egoistische Eigen-

interessen der Unternehmen sind zu überwinden, um ganzheitliche Ziele in einem Konglomerat an Unternehmen in einer Stadt zu erreichen, mit Vorteilen für alle Unternehmen. Vorausgesetzt wird das wirtschaftliche, politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen erfüllt sind. Nach Schulte (1999, S. 50) ist eine grundsätzliche Maßnahme der City-Logistik die Einplanung der Konsolidierung in die Distributionslogistik, wobei eine Kollaboration von Unternehmen vorausgesetzt wird. Durch die Bündelung von Sendungen mit dem gleichen Grundziel soll in der Konsolidierung die Auslastungen von Fahrzeugen gesteigert, Fahrten eingespart, Wegstrecken verkürzt und letztendlich Distributionskosten eingespart werden. Nach Kiwitt (2010) und Lehmacher (2015) wird die Bündelung von Ware für die Konsolidierung außerhalb der Stadt in Konsolidierungszentren durchgeführt. Bei dem Prozess wird branchenübergreifend Ware für mehrere Kunden von mehreren Logistikdienstleistern in einem Fahrzeug zusammengefasst. In dem Kontext der durch die Konsolidierung entstehenden Freistellung von Transportkapazitäten ist auch die Anpassung der Größe des FPs auf den tatsächlichen Bedarf zu überprüfen, sowohl einmalig als auch in wiederkehrenden Zeitabschnitten. Für die regelmäßige Fuhrparkanpassung sind die Zeitabschnitte der Anpassung ein zu bestimmender Faktor. Für die Lagerlogistik ist die Anzahl der Lager und Lagerstandorte zu überprüfen. Eine Verlagerung an den Stadtrand kann Kostenersparnisse trotz längerer Fahrzeiten generieren. Mehrere Lager können dagegen die Fahrzeiten verkürzen und die Liefertreue steigern. Einzelne BSn sind ebenfalls miteinander zu einer einzelnen BS kombinierbar. Bei der Bündelung von Sendungen werden noch Lieferfahrten benötigt, wodurch eine zusätzliche Anpassung des Transportweges oder des Transportmittels in die Strategie eingebunden werden kann. Eine Möglichkeit der Anpassung beim Transportmittel selbst ist nach Jüchter (2011) und NOW (2011) mit einer Umstellung auf E-Kfz gegeben. E-Kfz besitzen eine höhere gesellschaftliche Akzeptanz, setzen für eine Umstellung des FPs aber ein hohes zur Verfügung stehendes Investitionsvolumen und eine ausreichende Ladeinfrastruktur voraus. Durch bauartbedingte Einschränkungen ist das betriebliche Nutzungsverhalten von E-Kfz nicht mit konventionell betriebenen Kfz vergleichbar. Aufgrund der schweren Stromspeicher im Fahrzeug sind nur vergleichsweise geringere Nutzlasten oder Reichweiten im Vergleich zum klassischen Kfz realisierbar. Das Fehlen einer schnellen Akkuwechsellmöglichkeit macht lange Ladevorgänge nötig. Die Haltedauer eines Paketzulieferers beträgt im Durchschnitt weniger als zehn Minuten. Öffentliche Ladestationen haben für das Laden von E-Kfz bei der geringen Haltedauer im Kontext von Paketzulieferungen keine Bedeutung. Die Verwendung von E-Kfz ist durch die langen Ladezeiten nur bedingt im Mehrschichtbetrieb möglich. Nach Lehmacher (2015) können mit E-Kfz die in Kapitel 2 beschriebene Problemstellungen der City-Logistik im Kontext von Luftreinhalteplänen umgangen werden. Durch die geringen Schadstoffemissionen sind E-Kfz von EFBen ausgenommen und können frei in die Innenstädte einfahren. Alternative Technologien wie wasserstoffbetriebene Kfz oder hybride Kfz sind in dem Kontext individuell angepasst an die jeweilige Gesetzeslage ebenfalls zu berücksichtigen. Als Ausgangslage ist zu untersuchen, inwieweit sich die Möglichkeit zum Einfahren und nicht einfahren in einer Stadt auf die transportierbaren Mengen und die entstehenden Kostenverhältnisse auswirkt.

Nach Kiwitt (2010) ist die Verlagerung von einem Verkehrsträger auf einen anderen Verkehrsträger ebenfalls ein möglicher Lösungsansatz in der City-Logistik. Eine mögliche Alternative zum Straßentransport bietet die Verlagerung von Transporten auf ein bestehendes Eisen- oder U-Bahnnetz. Die speziellen Anforderungen mit einem weitverzweigten und spezialisierten inner-

städtisch Transportnetzwerk in der City-Logistik würden einhergehen mit kostenintensiven Investitionen. Die bestehenden Netzlinien sind i. d. R. nicht ausreichend verzweigt, um eine ausreichende Netzabdeckung für alle Kunden zu gewährleisten. Die parallele Verwendung eines Bahnnetzes für den ÖPNV und Logistikdienstleister scheint wegen den Investitionskosten nur bei der Verwendung als Maßnahme in neuen Planstädten sinnvoll, bei denen die Einbindung der BS von vornerein eingeplant werden kann. Für die Untersuchung in einer bestehenden Stadt wird dieser Ansatz aufgrund der nicht verhältnismäßigen Kosten für eine nachträgliche Umstellung als nicht zielführend erachtet. Für Logistikdienstleister die nicht im Kontext der City-Logistik agieren und ein hohes Liefervolumen zwischen einzelnen wenig verzweigten Betrieben transportieren, könnte die Verlagerung auf dem Verkehrsträger Schiene sinnvoll sein (Lehmacher 2015). Während die Idee ganze Untergrund Zugstrecken für die City-Logistik zu verwenden zu großen Investitionskosten führt, ist nach Lehmacher (2015) und Graham (2018) ein weniger kostenintensiver Lösungsansatz in kleinerem Maßstab möglich. Bei dem sog. *Cargocap* Konzept werden unterirdische Rohrleitungen für elektrische Kleinstzüge gebaut. Die Ladung dieser Kleinstzüge beträgt maximal zwei Europaletten mit einer Ladungshöhe von bis zu 1,25 Metern und 1,5 Tonnen Transportgewicht. Durch den kleineren Maßstab werden notwendige Investitionskosten signifikant. Während das System energiesparender als Straßenbahnen agiert, ist die Durchschnittsgeschwindigkeit mit 36 km/h i. d. R. höher als die Durchschnittsgeschwindigkeit auf den Straßen in Städten mit einem hohen Verkehrsaufkommen. Aufgrund unterirdisch verlaufender Röhren wird von einem führerlosen System ausgegangen, welches abgesehen von wenigen Arbeitnehmern im Kontrollraum keinen Fahrer benötigt. Für eine Bewertung ist zu untersuchen, ob ein Wechsel der BS mit der Umstellung vom klassischen Transport auf der Straße zu einem unterirdischen System langfristig kosteneffizienter arbeiten kann.

Nach Graham (2018) entstehen durch starke Schwankungen im Verkehrsaufkommen Staus, die auch bei Logistikdienstleister zu steigenden Fahrzeiten und daher steigenden Lohnkosten führen. Durch den Einsatz von zeitlich flexibleren Arbeitszeiten bei Arbeitnehmern bei ausreichender Verfügbarkeit von Transportfahrzeugen könnten Transporte bei verringertem Verkehrsaufkommen durchgeführt werden. Als Effekt sind beispielsweise zyklisch auftretenden Staus zu den Stoßzeiten mit dem Ansatz der Nachtfahrten vermeidbar.

Nach Lehmacher (2015), Schulte (1999), Zehle (1997, S. 43 ff.) und Kiwitt (2010) ist ein bedeutendes Probleme der City-Logistik die Belieferung und Zustellung der Ware zum Kunden auf den letzten Metern, der sog. letzten Meile. Für diesen Bereich der Belieferung sind zahlreiche Ansätze zur Anpassung einer BS denkbar. Wie zuvor vorgeschlagen kann eine Belieferung außerhalb der Stoßzeiten im Straßenverkehr erfolgen. Durch eine Belieferung zur Abend- oder Nachtzeit können Stoßzeiten im Straßenverkehr und an der Lieferrampe umgangen werden. Eine Herausforderung ist die Anwesenheit des Kunden beim Entladen. Eine Kombination mit einer weiteren Maßnahme ähnlich der von Paketstationen könnte die Maßnahme weiter prozessstabilisierend wirken. Wenn Zulieferer eine Zugangsberechtigung für ein Zwischenlager erhalten, ist eine Entladung auch ohne die Anwesenheit des Kunden möglich. Durch ein deutlich vergrößertes Zeitintervall für Lieferungen wird der Engpass an der Laderampe umgangen und Transportzeiten verringert. Eine Einbindung einer Kollaboration mit mehreren Logistikdienstleistern, im Sinne des City-Logistik Gedanken, ist ebenfalls denkbar. Der Aufwand für organisatorische, dispositive und leistungsverrechnende Tätigkeiten ist als überschaubar anzusehen. Die Verwendung von

Nachtlieferungen ist jedoch nicht für jeden Kundenkreis denkbar. Sollten Kunden ein hohes Liefervolumen benötigen oder auf eine direkte und schnelle Lieferung angewiesen sein, dann ist eine Nachtlieferung als alleinige BS in diesen Fällen als nicht zielführend anzusehen. Die Möglichkeit zur Verwendung von Nachtlieferungen als Erweiterung der BS ist daher individuell zu prüfen. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Lieferabläufe könnte nach Birger (2019) und Leh-macher (2015) nicht in der Logistik, sondern der Schaffung besserer Randbedingungen im Stra-ßenverkehr liegen. Eine Einflussnahme auf die Politik könnte zur Schaffung besserer transport-logistischer Randbedingungen führen. Zu den Randbedingungen gehören die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Ladebuchten für Logistikdienstleister und die Verwendung exklusiver Fahrspuren. Mit der Verwendung neuer Technologien, die eine Verwendung von Echtzeitdaten aller Logistik-teilnehmer und Verkehrssituationen erfasst, können Logistikteilnehmer aber auch selbst eine Ver-besserung der Lieferabläufe erreichen. Beispielsweise können durch Echtzeitdaten die Stauum-fahrung und eine verbesserte Nachfragesteuerung realisiert werden.

Zusammenfassend sind für eine Auslegung der BS folgende ausgewählte Untersuchungs-möglichkeiten zu betrachten:

- Routenfahrten,
- Direktbelieferungen,
- Städtische Konsolidierungscenter mit Sammelfahrten,
- Lagerhaltung,
- Nachttransporte,
- FP mit alternativen Antrieben und angepasster Kapazität,
- Cargocap Kleinstzug-Konzept,
- Schaffung besserer Rahmenbedingungen im Straßenverkehr für Logistikdienstleister.

4.2 Kriterien für die Bewertung von Belieferungsstrategien

Für die Bewertung der BSn ist eine Nutzwertanalyse mit einem Punktbewertungsverfahren (PBV) durchzuführen. Um eine weitestgehend objektive Beurteilung zu ermöglichen werden Bewer-tungskriterien benötigt. Nach Zangemeister (1976) und Zilahi-Szabó (2007) werden mithilfe von Bewertungskriterien die Ziele eines Unternehmens und der Simulationsstudie wiedergespiegelt. Unterschiedliche Unternehmensschwerpunkte sind möglich und erfordern eine differenzierte Wahl der Bewertungskriterien. Im Folgenden werden die theoretischen Grundlagen vorgestellt für die Bestimmung von Bewertungskriterien zu Bewertung von BSn im Kontext der City-Logis-tik. In dem Zusammenhang wird auf Literatur zu Bewertungskriterien zurückgegriffen. Durch die Betrachtung von wirtschaftlichen, technischen, organisatorischen und rechtlichen Kriterien sollen alle für eine Beurteilung notwendigen Bereiche einer BS abgedeckt werden. Bei der Wahl der Bewertungskriterien ist weitestgehend auf operationelle Kriterien zurückzugreifen. Durch die Messbarkeit wird eine objektive Bewertung ermöglicht. Daher werden für die eigentliche Beur-teilung verstärkt die in Abschnitt 3.5 erläuterten Kennzahlen verwendet.

Die Bewertungskriterien werden in ein PBV eingebunden, in der nach Zangemeister (1976) die eigentliche Bewertung stattfindet. Für die Anwendung des PBV werden die Bewertungskrite-rien in einer Zielhierarchie aufgeteilt und nach der Priorität, die mit ihrer Erfüllung einhergeht, bepunktet. Auf einer definierten Skala werden unbedeutende Kriterien niedrig bepunktet, wohin-

gegen die Bedeutung mit steigender Punktzahl ansteigt. Neben der Bepunktung für die Priorität von Bewertungskriterien ist ebenfalls eine Bepunktung für die jeweiligen zu bewertenden Objekte nach der Effektivität bei der Erfüllung der Bewertungskriterien durchzuführen. Durch eine Multiplikation der Punkte für die Priorität des Bewertungskriteriums und der Effektivität bei der Erfüllung entsteht eine Gewichtung für die einzelnen Kriterien. Eine Summation der multiplizierten Werte für das jeweilige Objekt liefert eine gewichtete Priorität für den Vergleich der Effektivität von Objekten. Die Struktur eines PBV Beispiels wird in der Tabelle 4.1 gezeigt. Als Ergebnis kann aus einer Auswahl von Objekten das effektivste bestimmt werden. Für die Auswahl ist das Objekt mit der größten gewichteten Priorität zu wählen.

Tabelle 4.1: Beispieltabelle für das Punktbewertungsverfahren.

Nutzwertanalyse									
Zu bewertende Objekte Bewertungskriterien	Priorität	Objekt Nr. 1	Objekt Nr. 2	Objekt Nr. 3	Objekt Nr. 4	Objekt Nr. 5	Objekt Nr. 6	Objekt Nr. 7	Objekt Nr. 8
		Beispielbewertungskriterium Nr. 1	9	9 81	5 45	1 9	3 27	2 18	1 9	5 45	5 45
Beispielbewertungskriterium Nr. 2	8	9 72	8 64	7 56	9 72	2 16	2 16	5 40	4 32
Beispielbewertungskriterium Nr. 3	8	8 64	9 72	6 48	6 48	7 56	2 16	4 32	5 40
Gewichtete Priorität		217	181	113	147	90	41	117	117
Rang		1	2	6	3	7	8	4	4
= Effektivität der Objekte bei dem Kriterium		= Multiplikator zwischen Effektivität und Priorität				Priorität: 1 = niedrig 9 = hoch			

Die Wahl der Bewertungskriterien sollte nach Zangemeister (1976) und Zilahi-Szabó (2007) nach einer Einteilung von übergeordneten Kategorien geschehen, um alle relevanten Bereiche für eine Entscheidung abzudecken. Für die Wahl der Bewertungskriterien sollten beispielsweise die Kategorien der wirtschaftlichen, technischen, organisatorischen und rechtlichen Einflüsse auf das System berücksichtigt werden. Während die Frage ist, welche Kennwerte messbar sind oder mit den gegebenen Daten ermittelt werden können, sollten möglichst viele der genannten Bereiche bei der Bewertung einbezogen werden. Eine genaue Auswahl der Bewertungskriterien erfolgt nach dem zu erreichenden Untersuchungsziel. Für wirtschaftliche Kriterien ist zu hinterfragen, ob beispielsweise eine Strategie mit dem untersuchten Unternehmen kombinierbar ist. Zu den wirtschaftlichen Kennzahlen, die bei einer Einführung einer Strategie zu erfüllen oder zu verbessern sind, zählen u. a. Umsätze, der Gewinn vor Zinsen und Steuern, das Verhältnis aus Ertrag und Investition, Amortisierungszeiten etc. Für technische Bewertungskriterien ist zu bestimmen, ob zu bewertende Strategien mit dem untersuchten System kompatibel sind. Für die Kompatibilität im Kontext der City-Logistik ist insbesondere auf die Funktionalität und Leistungsfähigkeit der Technik einzugehen mit der Frage, ob Transportvolumina zielführend transportiert werden können. Bei der Wahl organisatorischer Bewertungskriterien wird die Eingliederung neuer Strategien auf bestehende Prozesse berücksichtigt. Neben dem Ablauf von Prozessen ist auch auf mit den Prozessen einhergehende Stellgrößen, wie beispielsweise Arbeitnehmer einzugehen. Zuletzt sind die rechtlichen Kriterien zu prüfen mit der Fragestellung, inwieweit Strategien den rechtlichen Vorgaben genügen. Das umfasst die Zulässigkeit in den Bereichen der Gesetze, Normen und Vereinbarungen mit anderen Logistikdienstleistern sowie Kunden. Die genannten Kategorien der Kriterien sind beispielhaft zu sehen und für eine Bewertung dem jeweiligen Fall anzupassen. Beispielhaft können je nach Fallbeispiel auch regionale Kriterien von großer Bedeutung sein und sollten in einer eigenen Kategorie berücksichtigt werden.

5 Konzepterarbeitung zur Bewertung von Belieferungsstrategien

Mit diesem Kapitel beginnt der praktische Teil der Masterarbeit. Zur Bewertung von BS_n im Kontext der City-Logistik wird ein allgemeingültiges Konzept erarbeitet. Die zuvor theoretisch behandelte Problemstellung der City-Logistik im Kontext der Zukunftsentwicklung von Städten dient als Modellierungsrahmen und wird in Form eines Simulationsmodells zur Bewertung von BS_n wiedergegeben. Alle behandelten Themen werden in diesem Zusammenhang als Inputgrößen im Modell aufgenommen. Für die Erarbeitung des Konzeptes wird zuerst ein allgemeingültiges Modell als Grundkonstrukt für die Systemanalyse eines Logistiksystems hergeleitet. Im Anschluss werden die weiteren nötigen Arbeitsschritte der Formalisierung, der Implementierung, der Herleitung von Bewertungskriterien und der der 2k Factor-Design Ansatz behandelt und entsprechend der zu bearbeitenden Reihenfolge in den Arbeitsplan des Konzeptes aufgenommen. Die genauen Schritte, die bei dem Konzept zur Bewertung von BS_n im Kontext der City-Logistik durchlaufen werden müssen, sind:

- Erarbeitung von einem Systemverständnis und der Kontrolle, ob das zu untersuchende System durch die Bausteine des Modells prinzipiell zielführend abgebildet werden kann oder Anpassungen an den Bausteinen nötig sind.
- Die Veränderung des Simulationsmodells an zu untersuchende Zielgrößen oder BS_n.
- Anpassung der Eigenschaften der einzelnen Simulationsmodellentitäten an das zu untersuchende System mit dem einpflegen von Daten
- Aufstellung von Bewertungskriterien für die Bewertung der BS_n
- Modelluntersuchung mit Faktorversuchsplänen
- Erstellung eines Versuchsplans mit mehreren BS_n, welche sowohl einzeln als auch als Kombination miteinander zu untersuchen sind.
- Simulationsdurchläufe mit einer Analyse und Bewertung für die einzelnen BS_n.

5.1 Modellbildung eines Simulationsmodells zur Bewertung

Als Zielsetzung dieser Arbeit ist die Bewertung von BS_n im Kontext der City-Logistik festgelegt worden. Das Simulationsmodell ist die Grundlage, um eine spätere Bewertung der BS_n zu ermöglichen. Um als Grundlage fungieren zu können müssen alle relevanten Einflussfaktoren der zu bewertenden BS_n, in dem folgenden Modell abgebildet werden. Die im Kapitel 2 behandelten Entwicklungen einer Stadt im Kontext der City-Logistik werden hierfür als äußere Einflüsse in einem Stadtmodell ebenfalls zusammengefasst. Anhand des Stadtmodells soll eine weitere Abschätzung der zukünftigen Entwicklung ermöglicht werden, um das Systemverhalten im Zusammenhang mit unterschiedlichen BS_n im Kontext der City-Logistik untersuchen zu können. Neben dem Modellteil, der die Entwicklungen in der Stadt abbildet, ist für die Abbildung der Modellteil des zu untersuchenden Logistiksystems von entscheidender Bedeutung. Für die Abbildung werden über Zusammenhänge wie das Verkehrsaufkommen und dem Schadstoffausstoß Verbindungen zum zu untersuchenden Logistiksystem hergestellt.

Nachfolgend wird das Grundkonstrukt des Simulationsmodells beschrieben, um ein genaues Verständnis für die Funktionsweise zu vermitteln. Für die Anwendung des Bewertungskonzepts ist zu überprüfen, ob das zu untersuchende System durch das erstellte Modell wiedergegeben werden kann. Für die Überprüfung ist ein Systemverständnis des abzubildenden Systems zu erarbeiten, wobei Unternehmensdaten, Grafiken, unterschiedliche Diagrammtypen und Mitarbeitergespräche heranzuziehen sind (Abschnitt 3.3). Falls eine Abbildung des Systems nicht mit dem hergeleiteten Modell möglich ist, sind Anpassungen am Modell vorzunehmen, bis alle relevanten Entitäten des Systems abgebildet werden.

Für das Erstellen eines allgemeingültigen Konzepts wird auch das Simulationsmodell möglichst allgemeingültig gehalten und SD typisch mit verallgemeinernden Entitäten dargestellt. Zur Abgrenzung des Untersuchungsgebietes werden als Systemgrenzen die Einzugszone eines Agglomerationsraums verwendet. Für die Untersuchung des Logistiksystems werden ein- und ausfließende Warenströme über Quellen und Senken eingebunden. Im Kontext der City-Logistik werden nur Warentransporte von stadtnahen Lagern (Quelle) zu ihrem Distributionsziel (Quelle) untersucht und logistische Transitlieferungen nicht berücksichtigt. Als Einheit für das Liefervolumen im Modell wird die Europalette als standardisierter Ladungsträger angenommen.

Das Konzept zur Bewertung von BS_n ist zur allgemeingültigen Anwendung auf zu untersuchende Systeme gedacht. Die nachfolgende Darstellung des Modells kann jedoch nicht ohne weiteres in jede Simulationssoftware übernommen werden. Die Modellbildung beruht auf der Simulationssoftware Vensim PLE in der Version 7.2. Auch wenn das erarbeitete Konzept allgemeingültig sein soll, ist für die Modellierung die Funktionsweise von Vensim mit der entsprechenden Syntax von Bedeutung. Die Syntax einer anderen Simulationssoftware kann sich von der in Vensim unterscheiden und das Kopieren des Modells ohne Anpassungen verhindern. Ein Verständnis wird daher als wichtig für die Anwendung des Modells erachtet. In Vensim sind Entitätsnamen nicht case sensitiv. Bei der Verwendung der Zeichen plus, minus, mal, geteilt oder dem Leerzeichen im Entitätsnamen, ist der Entitätsname in Anführungszeichen zu setzen. Für die Modellbildung bei Vensim ist die aktuelle *Simulationszeit* als „Time“, die Einteilung der *Zeitschritte* der Simulation als „Time Step“ und das *Ende des Simulationszeitraumes* als „Final Time“ angegeben. Die „Initial Time“ beschreibt dagegen den Zeitpunkt des Simulationsbeginns. Neben den in der SD Simulation typischen Bausteinen der BG, HG etc. sind mit Time, Time Step, Initial Time, Final Step und Noise Seed auch systemverändernde Variablen in das Simulationsmodell und die hinterlegten Berechnungsformeln integrierbar. „Noise Seed“ ist für die Steuerung der Standardeinstellung bei Zufallszahlengeneratoren verantwortlich.

Die Zwischenschritte des Konzept- und Funktionalmodells werden nicht explizit dargestellt. Stattdessen erfolgt die Erklärung mit dem in diesem Fall ebenfalls übersichtlichen Simulationsmodell. Für ein besseres Verständnis ist das Simulationsmodell in sechs Bereiche aufgeteilt worden, die farblich gekennzeichnet sind. Die Vorstellung des Simulationsmodells, welches im erarbeiteten Konzept verwendet werden soll, erfolgt zuerst mit der Erläuterung der Modellierung der Stadt (Farbe Braun), da für eine Untersuchung eines Logistiksystems die Entwicklung der Umgebung von signifikanter Bedeutung für das Systemverhalten ist. Als für das Modell relevante Einflussfaktoren wurden die Größe und Verteilung der Bevölkerung, das durchschnittliche Einkommen und die Größe des KFZ-Bestands identifiziert. Eine hohe Bevölkerung führt mit einer steigenden Anzahl von Kfz zu einem steigenden Verkehrsaufkommen auf den Straßen, was auch

Einflüsse auf die Prozesse eines Logistikdienstleisters hat. Bei der Betrachtung ist ebenfalls das durchschnittliche Einkommen von Bedeutung. Ältere Kfz stoßen mehr Schadstoffe aus als neue Fahrzeuge. Die Anschaffung neuerer Fahrzeuge erfordert ausreichend Kapital. Für die Abbildung ist in das Modell eine Korrelation zwischen Fahrzeugalter, Fahrzeugbestand und Einkommen zu dem entstehenden Schadstoffausstoß aufgenommen worden. Der zweite entscheidende Teil des Simulationsmodells ist die Abbildung aller entscheidenden Entitäten des Logistiksystems. Die Beschreibung des Logistiksystems erfolgt über Entitäten die beschreiben, welche Menge (Farbe Orange), von welchen Standorten (Farbe Schwarz), von welchem FP (Farbe Magenta), bei bestimmten Verkehrsverhältnissen (Farbe Grün) zu bestimmten Kosten (Farbe Rot) transportiert werden. Die genaue Beschreibung des Simulationsmodells erfolgt aufgrund der zahlreichen Wirkzusammenhänge tabellarisch für jede Entität und wurde dem Anhang beigelegt (Tabelle 5.1). Triviale Hilfsvariablen die für die erleichterte Eingabe von Initialisierungswerten in das Modell eingefügt wurden, sind grau hinterlegt und werden nicht explizit erläutert. Die Darstellung innerhalb des Simulationsmodells mit getrennten Zu- und Abflüssen durch unterschiedliche FGn bei BGn werden im Modell z. T. zu einer FG oder auch nur einer BG zusammenfasst. Die Zusammenfassung erfolgt durch die Kombination der Formeln in der jeweiligen Entität. Die Annahme der Zusammenfassung wird getroffen, um die Übersichtlichkeit zu steigern und Rechnungen zu vereinfachen. Zuflüsse nehmen daher im Bedarfsfall auch negative Werte an. Die Abbildung im vorgestellten Simulationsmodells dient in erster Linie als grobe Orientierung, für die Wirkzusammenhänge der einzelnen Entitäten und kann mit der höherpreisigen Software weiter vereinfacht werden. Um im Modell eine möglichst realitätsgetreue Abbildung zu ermöglichen, werden Daten auch als Array in das Modell eingebunden. In der nachfolgenden Beschreibung des Modells wird für die Deklaration von Arraydaten ebenfalls die Syntax, der verwendeten Simulationssoftware Vensim PLE verwendet. Die Arraydaten werden in Vensim als sogenannte *Lookupfunktion* in das Modell eingebunden und über eine Eingangsgröße mit dem jeweiligen Modellzustand verknüpft. In der weiteren Beschreibung der Wirkzusammenhänge werden BG und Lookupfunktionen als solche unter dem Entitätsnamen gekennzeichnet. Die Darstellung der Eingänge bei Entitäten erfolgt mit „*“. Vereinzelt auftretende Ausgänge werden mit „Δ“ gekennzeichnet. Die genaue Beschreibung des Modells mit den Wirkzusammenhängen zwischen den einzelnen Entitäten ist den nachfolgenden Tabellen zu entnehmen. Die Zugehörigkeit der Beschreibungstabellen ist ebenfalls in Tabelle 5.1 vermerkt.

Das Bewertungskonzept soll die Untersuchung mehrerer BSn im Kontext der City-Logistik ermöglichen. Für eine Untersuchung der in Abschnitt 4.1 aufgezeigten BSn sind 21 Eingangsfaktoren in das Modell eingebunden worden (Anhang 17). Mit den Eingangsfaktoren sollen die Charakteristika der einzelnen BSn wiedergegeben und das Modell für die einzelnen Experimente an die BSn angepasst werden. Mit dem erstellten Modell sind weitere Untersuchungsmöglichkeiten von BSn die nicht in Abschnitt 4.1 aufgelistet sind gegeben. Im Modell sind durch weitere Entitäten wie beispielsweise *Härte der Einfuhrbeschränkungen* und *Kfz Wachstumsquote* zusätzliche Eingangsfaktoren gegeben. Mit den Entitäten ist eine weiterführende Untersuchung im Kontext einer veränderten EFB und die Untersuchung mit einem steigenden oder fallenden Verkehrsaufkommen möglich. Wenn die im Modell gegebenen Eingangsfaktoren dagegen nicht ausreichen um die Charakteristika der zu bewertenden BSn abzubilden oder wenn andere Schwerpunkte bei

den Ergebniswerten für die Bewertung gewünscht werden, dann sind Anpassungen am erarbeiteten Simulationsmodell in Form von neuen Entitäten vorzunehmen.

Tabelle 5.1: Wirkzusammenhänge und Farbcodierungen im Simulationsmodell.

Simulationsmodellteil	Abgedeckte Bereiche	Farbe	Verweis zum Anhang mit der:	
			Grafik	Erklärung
Simulationsmodell	Gesamtes Simulationsmodell	—	Anhang 4	—
Stadtmodell	Bevölkerung, Einkommen und KFZ-Bestand	Braun	Anhang 5	Anhang 11
Verkehrsmodell	Verkehrsaufkommen, Schadstoffbelastung und verkehrsrelevante Eigenschaften von Belieferungen	Grün	Anhang 6	Anhang 12
Lagermodell	Anzahl der Lager und Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche	Schwarz	Anhang 7	Anhang 13
Belieferungsmodell	Mengenrelevante Eigenschaften von Belieferungen	Orange	Anhang 8	Anhang 14
Fuhrparkmodell	Fuhrparkrelevante Eigenschaften von Belieferungen	Magenta	Anhang 9	Anhang 15
Kostenmodell	Kostenrelevante Eigenschaften von Belieferungen	Rot	Anhang 10	Anhang 16

5.2 Formelhinterlegungen im Simulationsmodell

Für die Bewertung von BS_n im Kontext der City-Logistik ist im letzten Abschnitt das Grundgerüst des Simulationsmodells behandelt worden. Mit den Entitäten und den zugehörigen Wirkzusammenhängen, ist ein Konzeptmodell modelliert worden. Für das weitere durchlaufen des Bewertungskonzepts ist zu prüfen, ob mit dem Konzeptmodell das abzubildende System und die zu bewertenden BS_n prinzipiell abgebildet werden können. Mit dem Konzeptmodell können noch keine Experimente im Kontext der Bewertung von BS_n durchgeführt werden. Um die realitätsnahe Abbildung eines Systems zu ermöglichen, wird in diesem Abschnitt die Formalisierung und Implementierung des Modells durchgeführt oder die durchzuführenden Schritte beschrieben. Für das Bewertungskonzept wird ein Grundgerüst aus Berechnungsformeln für die Entitäten vorgegeben, um die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen den Entitäten abzubilden. In den Berechnungsformeln einzelner Entitäten werden explizit Platzhalter genannt, für die keine Vorschläge formuliert worden sind. Über die Platzhalter ist das Modell an das abzubildende System anzupassen. Allerdings sind alle vorgeschlagenen Formeln zu überprüfen und ggf. an den zu untersuchenden Sachverhalt anzupassen. Wird bei der Anpassung der Formeln an das zu untersuchende System festgestellt, dass im Modell weitere Entitäten benötigt werden, dann ist mit einem iterativen Vorgehen der Abschnitt 5.1 mit der Anpassung des Modells erneut zu durchlaufen. Als Ziel dieses Abschnitts sollen alle Rechenschritte des im Abschnitt 5.1 erarbeiteten Modells bekannt und das Simulationsmodell ausreichend genau an das abzubildende System angepasst sein.

Für die Anpassung des Modells und um das Modell auf andere SD Simulationsprogramme übertragen zu können, sind die Syntax der verwendeten Simulationsmethodik und programmsspe-

zifische Kenntnisse zu beachten. Bei der Einbindung von normalen Formeln ermöglichen Simulationsmittel die Verwendung von mathematischen, logischen und komplexeren Anweisungen. Komplexe Anweisungen ähneln der einer höheren Programmiersprache ohne die selbe Mächtigkeit in die Simulation einzubringen. Zu den komplexen Anweisungen gehören beispielsweise die Generierung von Zufallszahlen, bedingten Anweisungen und Verkettungen. Während SD prinzipiell den Elementen der Regelungstechnik gleicht, ist die Formelhinterlegung nicht unmittelbar mit der Erstellung von Schaltungen für logische Zusammenhänge vergleichbar. Stattdessen können innerhalb der Berechnung von Entitäten die Kausalitäten vereinfacht und verbunden werden. Eine Entität allein kann dabei Schwankungen durch Zufallsgeneratoren, Verzögerungen, Verkettung und bedingte Anweisung zusammen beinhalten. Komplexe Sachverhalte können auf wenige Entitäten zusammengefasst werden. Der Grad der Vereinfachung ist von der Mächtigkeit der verwendeten Simulationssoftware abhängig. Die nachfolgenden Formelerläuterungen basieren auf der Simulationssoftware Vensim PLE. Für das Verständnis der Modellierung ist auch die Funktionsweise der Software Vensim bei der Berechnung von Bedeutung. Die Berechnung der einzelnen Zeitschritte erfolgt nach einer bestimmten Reihenfolge. Zuerst wird die Initialisierung durchgeführt. Bei der Initialisierung werden Konstanten eingelesen, die Startzeit berechnet, und BGn auf ihre Startwerte gesetzt. Falls externe Daten vorhanden sind, werden Sie ebenfalls in das Modell geladen. Die eigentliche Simulationsberechnung beginnt mit den HGn, welche ausgehend von den BGn rekursiv berechnet werden. Im Anschluss erfolgt die Berechnung der an die BG angebundenen Flüsse. Mit dem Abschluss der Berechnung erfolgt die Integration der Entitäten und die Erhöhung der *Laufzeit* (Time) um einen *Zeitschritt* (Time-Step). Für die Untersuchung sind Start- und Endwerte des Untersuchungszeitraums anzugeben, um einen Zeitrahmen für die Simulation vorzugeben (Initial Time und Final time). Bei dem Simulationsmodell wurde eine Untersuchungszeit von 20 Jahren mit 7300 Tagen bei einem Zeitschritt von einem Tag angenommen. Das mit Formeln beschriebene Modell hat eine Ungenauigkeit von fünf Tagen, die im Untersuchungsraum von 20 Jahren nicht simuliert wurden. Die durch die Vernachlässigung der Schaltjahre entstehende Ungenauigkeit wird als ausreichend klein betrachtet, um eine genaue Abbildung zu ermöglichen.

Das vorgestellte Konzept zur Bewertung soll in möglichst vielen Anwendungsfällen verwendbar sein, was ein allgemein gehaltenes Grundkonstrukt an Berechnungsformeln und eine Anpassung der Formeln an das Systemverhalten bedingt. Die im Folgenden vorgestellten Formeln sind daher nur als grundsätzliche Rechenzusammenhänge innerhalb des Modells zu verstehen. Genaue Parameter für Ausprägungen, Verzögerungen, Erwartungswerte, Standardabweichungen und Zufallsgeneratoren sind individuell zu ergänzen. Für weitere, zu untersuchende Sachverhalte, sind die Berechnungsformeln zu modifizieren. Platzhalter in den Berechnungsformeln, die vom Modellierer für das Simulationsmodell an das reale System angepasst werden müssen, sind in kursiver und fetter Schrift dargestellt. Die in der Spalte Gleichungen aufgeführten Funktionen werden mit einem „=“ Zeichen eingeführt. Für die Initialisierung von BGn sind weitergehende Informationen notwendig, weshalb die Initialisierungsinformationen ebenfalls in der Spalte Gleichungen dargestellt werden. Zur Kennzeichnung der Initialisierungsinformationen wird das Zeichen „●“ an die Werte vorgestellt. Die Beschreibung der Berechnungsformeln in den einzelnen Entitäten ist wie in der Beschreibung der Wirkzusammenhänge im Modell in Abschnitt 5.1 auf die einzelnen Modellteile aufgeteilt. Die Tabelle 5.2 zeigt die Zuordnung der Erklärungen der

Berechnungsformeln zu den einzelnen Modellteilen, welche im Anhang zu finden sind. Das erarbeitete Simulationsmodell mit den Berechnungsformeln (Die Platzhalter sind mit Beispielwerten hinterlegt) ist dem digitalen Anhang beigefügt und kann dort eingesehen oder auch verwendet werden.

Tabelle 5.2: Zuordnung der Berechnungsformeln mit Erklärung im Simulationsmodell.

Teil des Simulationsmodells	Verweis zum Anhang
Stadtmodell	Anhang 18
Verkehrsmodell	Anhang 19
Lagermodell	Anhang 20
Belieferungsmodell	Anhang 21
Fuhrparkmodell	Anhang 22
Kostenmodell	Anhang 23

Für die weitere Anpassung der Berechnungsformeln und Platzhalter ist das in Kapitel 3 beschriebene grundsätzliche theoretische Vorgehen und die Einbeziehung von Hintergrundwissen zum System zu beachten. Für die Erarbeitung von Hintergrundwissen sind Unternehmensdaten, Grafiken, unterschiedliche Diagrammtypen und Mitarbeitergespräche heranzuziehen (Abschnitt 3.3). Die Erstellung der Berechnungsformeln ist nach der abzubildenden Logik des Systems unter Verwendung der Grundrechenarten plus, minus, mal und geteilt durchzuführen. Bei der Einbindung komplexerer Logiken ist auf eine Simulationssoftware mit bedingten Anweisungen höherer Programmiersprachen zurückzugreifen. Bei der Modellierung und Formelhinterlegung sind Zirkelschlüsse bei Initialisierungswerten zu vermeiden. Mit der zusätzlichen Einbindung von Entitäten mit festen Startwerten können Initialisierungsprobleme umgangen werden. Das Systemverhalten des mit SD abgebildeten Systems gleicht dem Systemverhalten eines Regelungstechnik Schaltplans. Für die Anpassung des Simulationsmodells ist ein unrealistisches Aufschaukeln einzelner Entitäten oder des Systems aufgrund von Eigenfrequenzen zu berücksichtigen und zu vermeiden.

Im Kontext dieser Arbeit wurde eine Bewertung der Ergebnisse in einem Zeitraum von zwanzig Jahren Laufzeit für sinnvoll erachtet, um eine langfristige nachhaltige Strategiebewertung durchführen zu können. Mit Ablauf des Zeitraums von zwanzig Jahren sollte eine Amortisierung der zu bewertenden BS erfolgt sein. Bei einer länger oder kürzer anzunehmenden Amortisierungszeit ist der Untersuchungszeitraum zu überprüfen und an die Laufzeit anzupassen. Aufgrund von starken Schwankungen im Bereich des Liefervolumens und um für die Modellierungsdaten auch auf bei der Uhrzeit unsauber gepflegte Datenbanksysteme zurückgreifen zu können, wurde der Zeitschritt der Simulation auf einen Tag gesetzt. Die Verallgemeinerung der Simulationsabläufe auf einen Tag entspricht der für SD typischen Verallgemeinerung von Abläufen und wird daher als zielführend angenommen. Auf diese Weise wird eine Untersuchung auch kleiner Logistikdienstleister mittels des Simulationsmodells ermöglicht. Eine Anpassung der Zeitschritte bei der Simulation ist möglich. Für eine Anpassung der Zeitschritte in der Simulation sind neben den Simulationsparametern alle Wachstumsformeln und Impulsgeberfunktionen im Simulationsmodell anzupassen und umzurechnen.

Für die Anpassung der als Grundgerüst vorgegebenen Berechnungsformeln und Platzhalter auf das abzubildende System sind Datensätze notwendig. Zum einen werden ausgewertete Datensätze vom zu untersuchenden Logistikdienstleister benötigt und zum anderen sind Datensätze

für die Beurteilung der Zukunftsentwicklung des Agglomerationsraums heranzuziehen. Entsprechend der für SD typischen Verallgemeinerung werden für das Modell verallgemeinerte statistische Werte oder Wertereihen zu Entitäten benötigt. Neben den Durchschnittswerten sind Abweichungen bei den einzelnen Werten der Unternehmensdaten zu berücksichtigen, um die Wiedergabe des in der Realität ebenfalls schwankenden Systemverhaltens zu ermöglichen. Für die Einbindung der Schwankungen sind statistische Untersuchungen zu der Verteilung von Werten bei einzelnen Entitäten durchzuführen, wobei geprüft wird, welche Art von Verteilung vorliegt. Die ermittelten Verteilungen von Werten sind durch deterministische Zufallszahlengeneratoren, Kurvenfunktionen und unterschiedliche mathematische Verteilungsfunktionen in die entsprechende Entität im Simulationsmodell einzubinden. Bei der Einbindung von Zufallszahlen ist auf die statistische Abhängigkeit der abgebildeten Entitäten zu achten. Bei einer statistischen Abhängigkeit sind Zufallszahlen durch die Verwendung von einem eigenen HGN Baustein, welcher in anderen Entitäten eingebunden wird, zu vereinheitlichen. Alternativ ist eine Gleichschaltung der deterministischen Zufallszahlengeneratoren durch die Anpassung auf den gleichen *Startwert* (seed) durchzuführen.

Für die Anpassung des Modells an das abzubildende System sind die gegebenen Datensätze wie in Abschnitt 3.3 beschrieben in Test- und Trainingsdatensätze aufzuteilen. Bei der Auswahl der Datensätze ist eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit zu verwenden und auf statistische Zusammenhänge in den Daten zu achten. Zur Gewährleistung einer statistischen Unabhängigkeit sind beispielsweise keine Kriterien wie Wochentage etc. zur Trennung der Datensätze zu verwenden. Mit den Trainingsdatensätzen ist das Modell an das abzubildende System anzupassen. Für die realitätsnahe Abbildung sind aus einem ersten Simulationsversuch Ergebniswerte zu ziehen, mit Kennzahlen vom Unternehmen zu vergleichen und Anpassung an den Eingabefaktoren vorzunehmen. Nach einer ausreichenden Annäherung beim Modellverhalten zum Systemverhalten ist ein neuer Satz Trainingsdaten für die iterative Anpassung des Modells zu verwenden. Die Anpassung ist abgeschlossen, sobald keine Anpassungen bei der Verwendung weiterer Trainingsdatensätze nötig sind. Der Datensatz der Testdaten ist für die bei der Bewertung durchzuführenden Experimente zurückzuhalten. Durch die Trennung der Datensätze soll verhindert werden, dass das Simulationsmodell auf einen speziellen Datensatz angepasst wird und bei anderen Eingabedaten ein unrealistisches Systemverhalten abbildet.

Die Komplexität eines Simulationsmodell steigert die Unübersichtlichkeit und erhöht Fehleranfälligkeit bei der Arbeit an den im Modell eingebetteten Berechnungsformeln. Bei der Anpassung des Modells ist wegen der Komplexität verstärkt auf die Verifizierung und Validierung zu achten. Um Fehlerquellen ausschließen zu können, ist im vorgestellten Grundgerüst von Berechnungsformeln auf die konsistente Verwendung von Einheiten nach dem internationalen Einheitensystem (SI-Einheiten) im Simulationsmodell zu achten. In den nachfolgend vorgestellten Berechnungsformeln wird, um die Begrenzung maximaler Zahlenwerte in Vensim zu umgehen, bei der zu fahrenden Strecke die Einheit Kilometer verwendet. Während die Einheiten nicht direkt in die Berechnung aufgenommen werden, führen Fehler bei den nicht korrekt umgerechneten Einheiten zu falschen Ergebnissen. Simulationsprogramme ermöglichen z. T. die Hinterlegung der Einheiten von Ergebniswerten aller Entitäten im Modell. Mit den in der Simulationssoftware eingebauten Validierungsmaßnahmen ist die richtige Verwendung der Einheiten bei den Modelanpassungen zu kontrollieren. Bei der Einbindung von Formeln in das Simulationsmodell ist die

Kontrolle über eingebaute V&V Funktionen zu verwenden. Bei Anpassungen der Berechnungsformeln ist die automatische Kontrolle der Syntax bei der Eingabe und Bearbeitung von Berechnungsformeln zu berücksichtigen. Die Fehlerkorrektur ist durch die Funktion zeitnah bei der Bearbeitung der einzelnen Entität möglich. Für die Anpassung des Simulationsmodells ist die Fehlerkontrolle zu verwenden.

5.3 Herleitung von Bewertungskriterien zur Bewertung von Belieferungsstrategien

In dem zu erarbeiteten Konzept soll die Bewertung von BS_n im Kontext der City-Logistik erfolgen. Der Schwerpunkt des Konzepts wurde auf die Einzelhandelsbelieferung mit dem Schnittstellenbereich der Ökologistik gelegt. Im Kontext der Ökologistik sind Bereiche in der Stadt mit EFBen aufgrund vom Schadstoffausstoß des Kfz-Verkehrs zu beachten. Bei der Herleitung der vorgeschlagenen Bewertungskriterien wird dieser Schwerpunkt berücksichtigt. Bei der Wahl weiterer Bewertungskriterien sind an den gewählten Schwerpunkt angepasste Kriterien zu wählen.

Nach den in Abschnitt 4.2 erläuterten Bewertungskategorien werden in diesem Konzept die Bereiche der wirtschaftlichen, technischen, organisatorischen und rechtlichen Kriterien für eine Bewertung verwendet. Als wichtigstes Kriterium wird die Wirtschaftlichkeit bei der Bewertung angenommen. Normalerweise sind bei Strategieausrichtungen langfristig Umsatzsteigerungen zu erzielen, weshalb Kennzahlen zu Umsätzen ein wichtiger Bestandteil der Bewertungskriterien sind. Der Umsatz wird in dem erarbeiteten Simulationsmodell nicht durch die untersuchten BS_n beeinflusst, da ein gleichbleibender Marktanteil bei Logistikkieferungen angenommen wird. Bei den Bewertungskriterien wird der Umsatz daher nicht verwendet. Ein wichtiges Bewertungskriterium der Wirtschaftlichkeit ist der, aus dem Umsatz berechenbare, vom Unternehmen erarbeitete monetäre Gewinn, der nach dem Abzug der Kosten erhalten bleibt. Aus dem Gewinn können weitergehende Daten wie Amortisierungszeiten bei den neu einzuführenden BS_n ermittelt werden. Für eine weitergehende Analyse sind Unternehmensdaten mit den Lieferpreisen notwendig, um Gewinnmargen zu ermitteln. Durch die bei jeder BS gleich steigenden oder fallenden Umsatzzahlen sind mit den laufenden Kosten Rückschlüsse auf den erzielten monetären Gewinn zu ziehen. Um auch ohne weiterführende Datensätze einen Vergleich der BS_n zu ermöglichen werden nachfolgend die laufenden Kosten für die Bewertung von BS_n verwendet. Für die Bewertung der BS wird angenommen, dass weniger laufenden Kosten einen höheren monetären Gewinn bedeuten. Der Zusammenhang der Amortisierung wird mithilfe der Priorisierung der laufenden Kosten und der Investitionskosten im Punktbewertungsverfahren abgebildet. Für den zu beliefernden Kunden ist bei der Wahl eines Logistikdienstleisters neben dem Preis der Lieferdienstleistung auch die Zuverlässigkeit bei der Lieferung von Bedeutung. Im Modell werden neben den laufenden Kosten auch die nicht rechtzeitig transportierten Paletten (n. r. t. P.) über den Untersuchungszeitraum hinweg aufsummiert. Die Summe der n. r. t. P. dient als Anhaltspunkt für die Lieferzuverlässigkeit der jeweiligen BS_n. Die Summe ist in den erstellten Bewertungskriterien als Faktor für Liefertreue zu verwenden. Neben den laufenden Kosten sind die einmalig zu zahlenden Investitionskosten ein bedeutender Faktor, der mit in die gesamten Kosten einzukalkulieren ist. Eine Strategie die weniger Kosten generiert wird als bessere Strategie eingeschätzt.

Als wirtschaftliche Bewertungskriterien zählen:

- Liefertreue (Dargestellt über n. r. t. P.),
- Laufende Kosten,
- Investitionskosten.

Bei technischen Bewertungskriterien ist zu beurteilen, inwieweit die technischen Elemente, die bei einer BSn verwendet werden sollen, bereits die Marktreife erreicht haben. Weiterhin ist zu bewerten, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass die verwendete Technik nach heutigem Stand in naher Zukunft obsolet seinen wird.

Für technische Bewertungskriterien ist daher zu berücksichtigen:

- Beinhaltet die BS eine Zukunftstechnologie oder ist alles auf dem Stand der Technik (Ausgereiftheit der Strategie),
- Ist die BS zukunftsfähig oder bald obsolet (Zukunftsfähigkeit der Strategie).

Für die Organisation ist zu prüfen, ob die BS in das bestehende System integrierbar ist. Als ein im Modell untersuchbarer organisatorischer Faktor ist die Auslastung des FPs gewählt worden. Eine hohe Auslastung des FPs deutet auf wenige freie Kapazitäten im FP hin. Eine zu niedrige Auslastung von Fahrzeugen ist ein Zeichen von einer nicht ausreichend angepassten BS mit weiterem Optimierungspotential. Organisatorisch relevant bei der Bewertung von BSn im Kontext der City-Logistik sind mögliche Verwendungen von Sonderregelungen im Straßenverkehr wie beispielsweise E-Fahrzeugspuren. Für die entsprechenden Strategien werden aufgrund der kostenfreien Nutzung von Vorteilen eine gesondertes Bewertungskriterium zugeordnet. Die Umstellung einer BS kann bei einem bestehenden Logistiksystem zu drastischen Veränderungen führen, die nicht im Sinne des Arbeitgebers, Arbeitnehmers oder Kunden sind. Als Folge können Probleme wie Auftragsrückgänge oder Proteste resultieren. Bei der Bewertung sind diese Probleme einzukalkulieren.

Organisatorische Bewertungskriterien:

- Wie hoch ist die Auslastung der Fahrzeuge bei einfahrberechtigten Fahrzeugen? (Auslastung der Fahrzeuge),
- Bestehen bei der BS Nutzungsmöglichkeiten von Vorteilen? (Nutzungsmöglichkeiten von Vorteilen),
- Sind organisatorische Probleme bei der Umstellung der BS zu erwarten? (Organisatorische Probleme).

Für rechtliche Bewertungskriterien sind mögliche Gesetzeskonflikte oder Veränderungen innerhalb des Untersuchungszeitraumes zu berücksichtigen, die bei der Einführung, dem Betrieb oder bei der Abschaffung einer BS relevant sind.

Rechtliche Bewertungskriterien:

- Ist ein wirtschaftlicher Betrieb der BS auch bei einer gesetzlichen Verschärfung der SGW möglich? (Wirtschaftlicher Betrieb trotz Gesetzesverschärfung),
- Sind rechtliche Herausforderungen bei der Umstellung einer BS zu erwarten? (Rechtliche Herausforderungen bei der Umstellung).

Neben den aufgeführten Bewertungskriterien sind weitere Nennungen möglich. Während die gewählten Bewertungskriterien auf dem zuvor erstellen Simulationsmodell basieren kann ein angepasstes Simulationsmodell angepasste Bewertungskriterien benötigen. Bei der Ergänzung der aufgeführten Bewertungskriterien sind möglichst messbare Kriterien zu verwenden und die

beschriebenen Bereiche der wirtschaftlichen, technischen, organisatorischen und rechtlichen Kriterien abzudecken. Bei der Anpassung der Bewertungskriterien oder Einplanung neuer sind die bereits im Modell abgebildeten Wirkzusammenhänge zu berücksichtigen und die vorherigen Abschnitte iterativ zu durchlaufen. In Abschnitten 5.1 sind weitere Entitäten vorzusehen und in Abschnitt 5.2 mit Berechnungsformeln zu hinterlegen. Für die messbaren Bewertungskriterien sind BG als Summe oder HG mit Mittelwertbildung für die Schaffung eines messbaren Bewertungskriteriums einzubinden.

5.4 Simulationsdurchführung zur Systemanalyse

Für den Test mit BSn sind einzelne Faktoren im Simulationsmodell auszuwählen, die für die Anpassung an zu bewertende BSn als Eingangsfaktoren verwendet werden. Für das Grundkonstrukt wurden 21 Eingangsfaktoren ausgewählt. Die Tabelle 5.3 zeigt die 21 Eingangsfaktoren mit der ihrer Einheit und dem in der Simulation möglichen Wertebereich. Obwohl die Wertebereiche der Eingangsfaktoren vorgegeben sind, ist das Systemverhalten zu berücksichtigen und eine unrealistische Abbildung aufgrund von Eigenschwingungen zu verhindern. Für die vereinfachte Analyse von grundsätzlich anderen BSn mit unterschiedlichen Betriebskosten durch Wartung, Reparatur und den laufenden Betrieb wurde die Umschaltvariable *Unterhaltskosten* in das Modell eingebunden. Mit dem binären Eingangssignal kann zwischen den zwei Szenarien umgeschaltet werden. Analog kann mit dem Eingangsfaktor *Fuhrparkanpassung* über ein binäres Eingangssignal die Funktion deaktiviert oder aktiviert werden.

Tabelle 5.3: Entitäten als Eingangsfaktoren im Simulationsmodell und ihr Definitionsbereich.

Entität	Einheit	Wertebereich
<i>Einwirkungsfaktor von Staus</i>	Dimensionslos	[0,5]
<i>Schadstoffgrenzwert</i>	Dimensionslos	[50,700]
<i>Fahrzeit pro Route</i>	Sekunde	[60,90000]
<i>Zu fahrende Strecke pro Route</i>	Kilometer	[1,300]
<i>Umschaltung Unterhaltskosten</i>	Dimensionslos	{0,1} = [×;√]
<i>Anzahl durchgeführter Routenfahrten</i>	Fahrten	[1,200]
<i>Ziele pro Route</i>	Ziele/Route	[1,60]
<i>Anzahl Fahrten pro Route</i>	Fahrten/Route	[1,30]
<i>Arbeitsstunden pro Tag</i>	Stunde	[5,24]
<i>Fahrzeugkapazität</i>	Palette	[1,50]
<i>Anzahl Lager</i>	Stück	{1, 2, 3, ..., 20}
<i>Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche</i>	Prozent	[10,100]
<i>Erneuerbar betriebene Fahrzeuge</i>	Stück	[0,900]
<i>Klassische Fahrzeuge</i>	Stück	[0,900]
<i>Fuhrparkanpassung</i>	Dimensionslos	{0,1} = [×;√]
<i>Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit</i>	Autos pro Erneuerungszyklus	[0,5]
<i>Entladezeit je Palette</i>	Sekunde	[1,300]
<i>Entladezeit Pauschale</i>	Sekunde	[1,900]
<i>Fahrzeitverlängerung und -kürzung</i>	Prozent	[0,300]
<i>Erneuerungszyklus</i>	Anzahl der Zyklen pro Jahr	[1,56]
<i>Sicherheitsrückstellungen</i>	Prozent	[0,300]

Das Heranziehen weiterer Faktoren für die Bewertung oder die Untersuchung von „Was ist, wenn ...“ Szenarien mit ihnen ist möglich. Beispielsweise kann die Ausgangslage des Wachstums in

der Stadt fluktuieren und andere Werte annehmen. Die möglichen Entitäten umfassen beispielsweise das Konsumwachstum, das Bevölkerungswachstum oder das Einkommenswachstum. Aufgrund des Umfangs dieser Masterarbeit wurden die Eingabefaktoren auf die wesentlichen Faktoren innerhalb des zu untersuchenden Logistiksystems beschränkt.

Vor dem Hintergrund der Bewertungskriterien können unterschiedliche BSn im Kontext der City-Logistik bewertet werden. Die Ausprägungen der Faktoren von BSn sind angepasst an den behandelten Agglomerationsraum zu wählen. Die Randbedingungen der unterschiedlichen Kostenfaktoren, EFBen, Bevölkerungs- und Konsumwachstum etc. sind in den letzten Abschnitten als Funktionen in das Modell integriert worden. Für die Wahl der Ausprägungen der Einflussfaktoren von BS sind analog durchzuführen. Im Kontext der Auslegung der Werte ist die 2^{k-p} teilfaktoriellen Versuchsplanung durchzuführen, um ein Verständnis für das Verhalten des Simulationsmodells zu erhalten, bevor die einzelnen BSn analysiert werden. Anhand der 2^{k-p} teilfaktoriellen Versuchsplanung sind bei den BSn relevante Kombinationen auszuwählen, die zusammen weiter untersucht werden. Für das Durchlaufen der Versuchsplanung ist das ausreichend genau an das abzubildende System angepasste Simulationsmodell notwendig. Die Anpassung sollte mit den Abschnitten 5.1 und 5.2 bereits durchgeführt worden sein. Andernfalls sind die in den Abschnitten aufgezählten Anpassungen durchzuführen.

Vor dem Hintergrund der Bewertung von BSn im Kontext der City-Logistik wurde in den vorherigen Abschnitten ein Modell erstellt, welches mehrere Einflüsse integriert, um unterschiedliche Wirkzusammenhänge abzubilden. Für die Analyse des erstellten Modells ist eine ausreichend hohe Auflösung des Versuchsplans nötig, um trotz der hohen Anzahl von Wirkzusammenhängen die Effektivität der Einflussfaktoren zu bestimmen. Als ausreichend wird die Auflösungsstufe „IV“ angenommen, mit der die Effektivität von Einflussfaktoren der zweiten und ggf. auch der dritten Stufe von Wechselwirkungen bei Faktoren bestimmt werden können. Gleichzeitig ist der Aufwand der Versuchsplanung gering zu halten, weshalb nur Eingabefaktoren zu verwenden sind, die für die Bewertung von BS relevant sind. Nachfolgend wird die Untersuchung der zwölf wichtigsten Eingabefaktoren als ausreichend angenommen. Bei zwölf Einflussfaktoren werden 64 Experimente mit drei Replikationen für sinnvoll gehalten, was insgesamt 192 Durchläufen entspricht.

Ein Beispiel eines Versuchsplans ist entsprechend der Tabelle 3.1 mit den Ausprägungen für die einzelnen Faktoren zu erstellen. Der 2^{k-p} Factor-Design Ansatz stellt durch die Reduzierung der Experimente nicht alle Kombinationen der Ausprägungen dar. Die Liste der zu verwendenden Faktorausprägungen für den oben beschriebene Ausgangslage mit zwölf Faktoren bei einem 2^{12-6} teilfaktoriellen Versuchsplan ist den Daten für ein Anwendungsbeispiel im Anhang 30 zu entnehmen. Ein Versuchsplan mit Eingabewerten und Ergebnissen nach dem Schema des in Anhang 30 aufgeführten Beispiels wird Anhang 31 dargestellt. Mit der Übertragung der hohen und niedrigen Ausprägungen für die einzelnen Faktoren im Versuchsplan entsteht die Grundlage für die faktorielle Analyse. Zusätzlich zu den Faktorausprägungen sind die Auszuwertenden Ergebnisse der Simulation in der Tabelle für jedes Experiment mit mehreren Replikationen festzuhalten. Die im Grundkonstrukt des Simulationsmodells vorbereiteten Entitäten zur Ergebnisauswertung (Abschnitt 5.3) sind ohne weitere Aufarbeitung für das Bewertungskriterium verwendbar. Die dargestellten Ergebniswerte im Beispiel zeigen den Stand des Simulationszustandes zu einem

zu bestimmenden Zeitpunkt an. In diesem Fall wird der Zeitpunkt auf das Ende des Untersuchungszeitraums nach 7300 Simulationsschritten, also nach 20 Jahren festgelegt. Bei der Anpassung des Modells mit weiteren Entitäten zur Ergebnisauswertung, sind die Entitäten ebenfalls im Simulationsmodell als BGn Summenbausteine oder über einen längeren Zeitraum gemittelte HGn einzubinden. Andernfalls sind die Werte der Entitäten für die Auswertung über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg zu betrachten und bedürfen einer getrennten Auswertung, bevor ein verwendbarer Ergebniswert vorliegt. Die Tabelle 5.4 zeigt ein Beispiel für die Struktur des Versuchsplans, der alle Ausprägungen der Faktoren mit den zugehörigen Ergebniswerten bei drei Replikationen wiedergibt. In jede Zeile des Versuchsplans ist ein Experiment mit den zugehörigen Ausprägungen der Eingangsfaktoren einzutragen. Neben der Verwendung der Simulationssoftware ist für den Vorgang der Erstellung des Teilfaktorversuchsplans und der Auswertung der Ergebnisse der Faktorisierung ebenfalls die Verwendung von entsprechender Software hilfreich für ein effektives Kosten-Nutzen Verhältnis. Nachfolgend wird von der Verwendung von Hilfssoftware ausgegangen und für die genaue Funktionsweise auf die Beschreibung in Kapitel 3 verwiesen. Durch die Auswertung der Ergebnisse nach 7300 Simulationsschritten werden die einzelnen Abläufe in der Zeitspanne nicht mehr genau wiedergegeben. Neben den Ergebnissen am Ende des Untersuchungszeitraums sind die Verläufe der Ausprägung bei Entitäten über den Untersuchungszeitraum hinweg zu berücksichtigen. Die Verläufe ermöglichen ein Verständnis der einzelnen Systemabläufe für die Bewertung und sind bei einem Mehrwert für die Verdeutlichung der Simulationsergebnisse visuell darzustellen (Abschnitt 3.5). Gegen den Informationsverlust durch die Summierung der Werte in BGn für die Ergebniswerte ist ebenfalls eine Betrachtung an mehreren Zeitpunkten während der Untersuchung möglich. Für jeden Ergebniszeitpunkt ist dabei eine Tabelle nach dem Vorbild der Tabelle 5.4 zu erstellen. Die dargestellte Tabelle ist, um die weiteren Kennzahlen der Bewertungskriterien und alle zu verwendenden Faktoren zu ergänzen. Im Anhang 45 ist ein Beispiel einer Tabelle in einer vollständigen Form für ein Fallbeispiel mit zusammengefassten Replikationsergebnissen dargestellt.

Tabelle 5.4: Beispiel der Struktur eines Versuchsplans für Experimente an Belieferungsstrategien.

Eingangsfaktoren						Ergebnisse				
						Laufende Kosten			...	
Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5	...	Rep-likation	Rep-likation	Rep-likation	Rep-likation	Rep-likation
Anzahl Lager	Anzahl von Fahrzeugen	Entladezeit	E-Kfz-Quote	Fuhrparkanpassung	...	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 1	Nr. 2
1	15	A	0%	1	...	5	6	5	90	...
1	30	A	50%	1	...	9	10	11	150	...
...

Nach dem Durchlaufen der Versuchsplanung sind die ermittelten Ergebnisse auszuwerten. Mit der Auswertung der Ergebnisse ist die Effektivität aller Eingabefaktoren für alle messbaren Bewertungskriterien zu bestimmen. Neben den einzelnen Faktoren ist die Effektivität von Faktorkombinationen bis zur dritten Ordnung zu berechnen (Abschnitt 3.4). Mit den Effektivitätswerten sind Koeffizienten für die Bestimmung der Regressionsgleichungen für alle messbaren Bewertungskriterien zu erstellen. Zusätzlich zur Effektivität ist für die Faktoren das Maß der Streuung zu bestimmen. Mit Wahrscheinlichkeitsnetzten sind die Ergebnisse zu visualisieren und Schlüsse zu signifikanten Faktoren oder statistischen Ausreißern zu ziehen. Wenn die Ergebniswerte vom Erwartungswert über die Standardabweichung hinaus abweichen, ist zu klären warum.

Die Grafiken im Anhang 24 und Anhang 25 zeigen in solchen Wahrscheinlichkeitsnetzen für die n. r. t. P., wie die Ergebnisse der Effekte der Eingabefaktoren im Regelfall aussehen und werden und aufzustellen sind. In Effektdiagrammen ist die Effektivität der einzelnen Faktorausprägungen auf die einzelnen Ergebniswerte ersichtlich darzustellen. In den Pareto-Diagrammen ist die errechnete Effektivität von Faktoren und Faktoren in Wechselwirkungen aufzulisten (Beispiel im Anhang 38). Die besonders effektiven Faktoren sog. *signifikante Faktoren* sind bei der Wahl, der weiter zu bewertenden BS verstärkt zu betrachten, um einen großen Hebeleffekt für eine zielführende BS zu erzielen. Als Signifikant sind Faktoren zu betrachten, wenn der Einfluss der Faktoren bei Berücksichtigung eines Signifikanzbereiches einen bedeutenden Einfluss auf die Ergebniswerte der Simulation besitzt und die Einflüsse anderer Faktoren übertrifft. Für die Kombination von BS sind BS mit passenden Ausprägungen der Faktoren zu kombinieren. Welche Faktoren zusammenpassen, ist den Effektivitätswerten der Ergebnisse der faktoriellen Versuchsplanung zu entnehmen.

Nach der Faktorisierung sind für die einzelnen zu untersuchenden BSn realistischen Werte für die Eingangsfaktoren auszulegen, um die eigentliche Bewertung von konkreten BSn zu ermöglichen. Für die Bestimmung der Eingangsfaktoren mit den zugehörigen Ausprägungen sind Werte aus der Datenaufbereitung beim Logistikdienstleister zu ziehen. Des Weiteren sind für unbekannte Faktorausprägungen bei BSn weitere Daten zu erheben oder realistische Ausprägungen durch Annahmen zu wählen. Mit der Aufstellung der BSn ist zu prüfen wie die Werte im allgemeingültigen Konzept eingebunden werden können. Wenn das Simulationsmodell entsprechende Anpassungen benötigt, um weitere BSn zu analysieren, dann ist bei der Anpassung der Eingangsfaktoren iterativ vorzugehen. Die Anpassungen sind im Abschnitt 5.1 durchzuführen. Die nachfolgenden Unterpunkte des Bewertungskonzeptes aus Kapitel 5 sind mit den neuen Ergebnissen aus Abschnitt 5.1 ebenfalls erneut zu durchlaufen, bis eine gewünschte Analyse der BSn möglich ist.

Die einzelnen BSn sind mit ihren Ausprägungen wie in der Tabelle 5.4 dargestellt aufzulisten. Für die Auflistung sind neben neuen zu bewertenden BSn auch die aktuelle BS zu berücksichtigen. Die bestehende BS ist mit allen Faktorausprägungen im Modell herzuleiten, um ein Vergleichsdurchlauf für die anderen BSn erzeugen können. Anhand des Vergleichsdurchlaufs können Abschätzungen bei der Bewertung getroffen werden. Zusätzlich zu den BSn sind ebenfalls sinnvolle Kombinationen aus mehreren BSn zu erstellen. Anders als bei einzelnen Faktorvariationen, der vollfaktoriellen oder teilfaktoriellen Versuchsplanung, sind die BSn in Kombinationen entsprechend nach der ermittelten Effektivität des zuvor durchgeführten 2^{k-p} Factor-Design Ansatzes zu variieren. Für das Variieren ist das Systemverständnis und die Theorie der einzelnen BSn mit zu berücksichtigen, da nicht alle Kombinationen möglich oder als Experiment sinnvoll sind. Neben den BSn sind Entwicklungen in der Stadt in die Planung unterschiedlicher Experimente einzubeziehen. Für die Untersuchung der Ökologistik wurde beispielsweise die Thematik verringerter SGW mit öfter geltenden Fahrverboten als relevant betrachtet. Für das Modell sind daher Randbedingungen für eine Verschärfung der Grenzwerte von Schadstoffen oder eine Ausweitung der Zone der EFBen ebenfalls relevant für die Untersuchung. Bei dem Untersuchungszeitraum von 20 Jahren sind Veränderungen der Randbedingungen als realistisch zu erachten und daher auch für die Bewertung der BSn zu berücksichtigen. Mit dem erstellten Versuchsplan sind alle Experimente analog zum zuvor durchgeführten 2^{k-p} Factor-Design Ansatz

zu durchlaufen und die Ergebnisse mit drei Replikationen zu sammeln. Bei den Durchläufen der BS_n ist auch die Warmlaufphase mit dem Einschwingverhalten zu berücksichtigen.

5.5 Auswertung der Simulationsergebnisse mit der Kennzahlenermittlung und dem Punktbewertungsverfahren

Die zuvor erarbeiteten Simulationsergebnisse der einzelnen Experimente von BS_n können nicht ohne weiteres für die Bewertung verwendet werden. Die Ergebnisse sind statistisch zu untersuchen und in Kennzahlen umzuwandeln. Des Weiteren sind die Bewertungskriterien zu priorisieren, bevor eine Bewertung von BS_n im PBV möglich ist. Die notwendigen Abläufe der Anpassung werden nachfolgend näher beschrieben.

Neben der Ermittlung und Kontrolle von Kennzahlen mit der statistischen Überprüfung in Konfidenzintervallen und der Bepunktung für ein PBV ist in einer Auswertung die realitätsnahe Abbildung des Modells bei den Ergebnissen sicherzustellen. Für die Auswertung ist die Verwendung der Simulationssoftware zur Darstellung und der Vergleich von Graphen der einzelnen Entitäten sinnvoll. Die Vergleiche sollen sicherstellen das die einzelnen Entitäten bei einsehbarer Eingangsgröße erwartete Ausgangsgrößen liefern. Der Vergleich zwischen Testläufen ist ebenfalls bedeutend. Darstellungen von Ergebnissen mit mehreren überlagerten Graphen für unterschiedliche Experimentdurchläufe erlauben den Test von Unterscheidungen durch bedingte Anweisungen. Viele Simulationsprogramme bieten für die Überprüfung Funktion wie das Causal Tracing an, um ein Verständnis für das Modell und die Ergebnisse zu erarbeiten. Die Funktion ermöglicht von einer ausgewählten Entität aus, die verursachenden Entitäten aufzurufen und stellt grafisch die Verläufe aller einflusshabenden Entitäten dar. Analog kann im Bottom-Up Verfahren aus Ausgangswerten das Ergebnis der Zusammenfügung der einzelnen Parameter verfolgt werden, um Auswirkungen im Modell zu untersuchen und zu kontrollieren. Für die Ergebnisauswertung ist die Überprüfung der ermittelten Ergebnisse durchzuführen, um die Eindeutigkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Für die Überprüfung der statistischen Eindeutigkeit der Ergebnisse sind Konfidenzintervalle einzusetzen (Abschnitt 3.5). Alternativ sind neben Konfidenzintervallen auch Box-Plot Diagramme für die statistische Untersuchung von Ergebniswerten möglich. Im Kontext der Arbeit, mit der Entwicklung eines Konzeptes zur Bewertung von BS_n, werden jedoch Konfidenzintervalle verwendet. Die für die Analyse der BS bestimmten Messreihen werden bei der Überprüfung mit ihren Replikationen als Intervalle dargestellt. Für die Berechnung wird ein Konfidenzniveau von 95 Prozent als ausreichend angenommen. Mit den gegebenen Daten zur Anzahl der Replikationen und dem Signifikanzniveau kann das Quantile der T Funktion bestimmt werden. Multipliziert mit den Standardabweichungen wird die Größe des Konfidenzintervalls bestimmt, das anzeigt in welchem Bereich die Werte nach dem Signifikanzniveau als wahrscheinlich zu erwarten sind. Ausgehend vom Mittelwert ist mit den positiv und negativ abgehenden Konfidenzintervallgrenzen grafisch zu überprüfen, ob die einzelnen Messreihen Überschneidungen in den Ergebniswerten besitzen (Abbildung 5.1). Im Fall von Überschneidungen ist das Ergebnis nicht eindeutig und eine Beurteilung aufgrund der Ergebnisse fragwürdig. Eine zuvor gestellte Hypothese kann bei Überschneidungen in den Ergebnissen nicht sicher bestätigt werden. Neben einzelnen Messreihen sind nach dem Vorgehen ebenfalls Kombinationen von Faktoren zu überprüfen.

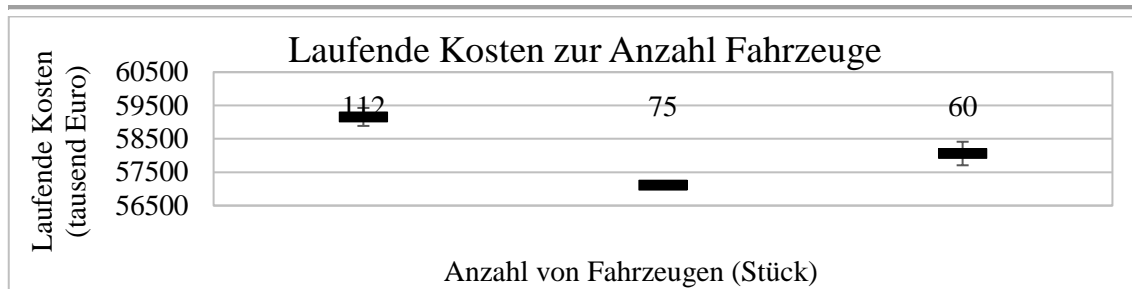


Abbildung 5.1: Beispieldarstellung eines Konfidenzintervalls.

Nachdem die Ergebniswerte der Simulation verifiziert und validiert wurden, dienen sie der quantifizierten Bewertung der BSn. Für eine weitere Bewertung von BSn im Kontext der City-Logistik sind die Werte in eine für das PBV verwendbare Skala in charakteristische Zahlenwerte bzw. Kennzahlen zu überführen. Die Tabelle 5.5 zeigt die Bepunktung der laufenden Kosten. Für die neun möglichen Punkte ist ein Cluster zu erstellen, das die Bandbreite der Ergebnisse abdeckt. Die einzelnen BSn erhalten nach dem Erfüllungsgrad im Cluster ihren entsprechenden Kennzahlen für das PBV. Für die einzelnen Bewertungskriterien ist zu beachten, welches Ziel zu erreichen ist. Entsprechend nach dem Ziel sind ansteigende oder fallende Skalen zu verwenden.

Tabelle 5.5: Kennzahlen und die Bepunktung für das Punktbewertungsverfahren.

Bewertungskriterium	Faktorausprägung (Schlecht = 1, Gut = 9)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Laufende Kosten [Mio. €]	]108 -120]	]97 -108]	]86 -97]	]74 -86]	]63 -74]	]52 -63]	]41 -52]	]30 -41]	]00 -30]
...

Für die Ermittlung der Effektivität von BSn ist neben den Punkten der Kennzahlen auch die Bedeutung der unterschiedlichen Bewertungskriterien relevant. Die Kriterien sind entsprechend ihrer Bedeutung mit Punkten in der Priorität zu versehen (Tabelle 5.6). Bei dem Vorgang ist auf eine möglichst große Objektivität zu achten. Bei der Einteilung sind die Unternehmensziele zu berücksichtigen und mögliche Analysen zur Risiko- und Fehlerbewertung einzubeziehen.

Tabelle 5.6: Bewertungskriterien und die Priorisierung für das Punktbewertungsverfahren.

Bewertungskriterien	Priorität	Priorität:
Bewertungskriterium Nr. 1	7	1 = Niedrig
Bewertungskriterium Nr. 2	9	9 = Hoch
...	...	

Wenn die in Abschnitt 5.3 für das Simulationsmodell hergeleiteten Bewertungskriterien und die in den Simulationsdurchläufen erarbeiteten Kennzahlen verifiziert, validiert und aufbereitet wurden, können die erarbeiteten Werte im PBV zusammengeführt werden. Nicht messbare Bewertungskriterien sind unter Verwendung von Annahmen, Vergleichsdaten und Schätzungen abzuwiegen und ebenfalls für jede BS von eins bis neun zu bepunkteten. Für die subjektive Einschätzung ist vom Vergleichsdurchlauf ausgehend eine Abschätzung des Erfüllungsgrades der alternativen BSn bei den Bewertungskriterien durchzuführen. Durch den Vergleich zum Vergleichsdurchlauf ist die Subjektivität bei der Bewertung möglichst gering zu halten. Die Effektivität wird mit dem Multiplikator multipliziert und für jede BS aufsummiert. Das Ergebnis ist die gewichtete Priorität (Tabelle 4.1). Die im elektrischen Anhang beigefügte Tabelle ermöglicht eine automatische Sortierung der BSn. Die BS mit der höchsten gewichteten Priorität ist als Effektivste im Verhältnis zu den gesetzten Bewertungskriterien zu sehen.

6 Konzeptumsetzung zur Evaluation an einem Fallbeispiel

Um eine Evaluierung des erarbeiteten Konzeptes zur Bewertung von BSn im Kontext der City-Logistik durchführen zu können wird im Folgenden ein Fallbeispiel behandelt. Für die Behandlung wird zuerst das im Fallbeispiel behandelte Unternehmen vorgestellt, bevor alle in Kapitel 5 erläuterten Abschnitte überprüft und praktisch durlaufen werden.

6.1 Vorstellung des Fallbeispiels

Für die Bewertung von BSn an einem Fallbeispiel wurden die Eigenschaften des Unternehmens und die Einwirkungen der umliegenden Stadt als bedeutende Einflüsse identifiziert. Daher werden im Folgenden die Randbedingungen des Unternehmens behandelt, bevor im nächsten Abschnitt aus allen Randbedingungen die Annahmen für eine Anpassung des Modells gezogen werden. Für die Untersuchung ist ein Verständnis des zu untersuchenden gesamten Systems zu ermitteln unter Zuhilfenahme von Diagrammen wie beispielsweise EPK-, ERM- und Sankey-Diagramme sowie Karten. Die vom Unternehmen bekannten Daten sind jedoch beschränkt auf Datensätze zu den Transporten, Fahrzeugen, Zielen, Routen und Produkten. Eine eigenständige Erstellung von Sankey-Diagrammen wäre bei den gegebenen Datensätzen prinzipiell möglich, aber ohne Mehrwert für eine Verdeutlichung der Ausgangslage. Zu den Prozessabläufen sind keine Informationen verfügbar, außer den im Folgenden aus den Datensätzen erarbeiteten. Rücksprachen mit Mitarbeitern zu den Zusammenhängen konnten ebenfalls nicht geführt werden. Für den Konzeptdurchlauf werden daher weitere Annahmen getroffen, die im Laufe des Konzeptdurchlaufs beim Fallbeispiel näher erläutert werden. Für die Beurteilung der Einflussfaktoren der Stadt auf den Logistikdienstleister werden zusätzlich öffentlich zugängliche Statistiken verwendet, um den Zustand der Stadt über den Untersuchungszeitraum hinweg abzubilden.

Der Standort des untersuchten Unternehmens ist in der Hauptstadt Griechenlands, Athen. Die Stadt, die als Beispiel für in Abschnitt 2.3 die weitere Entwicklung aufgeführt wurde, ist gekennzeichnet durch eine Umgebung mit besonderen Randbedingungen. Durch hohe SWe in der Luft könnten analog wie in deutschen Städten verstärkte EFBen von der Politik umgesetzt werden, die auch die Belieferungen in der City-Logistik betreffen. Bei der Bewertung von BSn im Kontext der City-Logistik ist in diesem Konzept verstärkt die Ökologik berücksichtigt worden, wobei die EFB bereits im Modell vorgesehen sind. Die Stadt Athen verwendet ein rotierendes Einfahrtsverbot, wodurch ein Teil der Fahrzeuge an jedem zweiten Tag nicht in die Innenstadt einfahren darf. Für Lieferfahrzeuge ist die Einfahrt während dieser EFBen frei. Bei erhöhten SWen gilt das Fahrverbot auch für Lieferfahrzeuge. Die Einfahrt besonders sauberer Lieferfahrzeuge ist ebenfalls gestattet. Bei den gegebenen Randbedingungen ist das Modell für das Fallbeispiel der Stadt Athen mit der Einfahrt von Lieferfahrzeugen in die Stadt in das Konzept integrierbar. Der Anteil der Ziele in der Zone mit EFB des Unternehmens liegt bei 20 Prozent aller Ziele. Eine weitere Untersuchung der Ziele im Innenstadtring auf bei Routenfahrten zeigte, dass aufgrund der gewählten Routenziele, mit nah beieinander liegenden Routenzielen, ein ver-

gleichsweiser hoher Anteil von Zielen im Innenstadtring vorliegt, sobald eines der Ziele im Innenstadtring liegt. Ausgemacht wurde eine Wahrscheinlichkeit von 84 Prozent, dafür das Ziele innerhalb des Innenstadtrings liegen, wenn bereits ein Ziel im inneren Ring liegt. Aufgrund der bei der Untersuchung gewählten Abgrenzung des Innenstadtbereichs durch Koordinatengrenzen und nicht durch Straßenverläufe, ist in der Untersuchung von einem Anzeigefehler auszugehen. Für die weitere Untersuchung ist anzunehmen, dass der Anteil der Ziele im Innenstadtring beim abgebildeten Logistiksystem tendenziell eher kleiner ist.

Für Athen ist bei der Thematik von mit Elektrizität betriebenen Fahrzeuge eine Besonderheit zu beachten. Die Stadt verfügt über ein Netz von Oberleitungen für Straßenbahnen und Busse. Bei der Bewertung von BSn sind die Oberleitungen zu berücksichtigen. Durch die Oberleitungen ist die Spannungsversorgung von E-Lkw während der Fahrt gegeben, wodurch Reichweitenerhöhungen und Ladezeitenverkürzungen bei E-Lkw ermöglicht werden. Für die einzelnen Strecken der Lieferfahrten liegen keine Daten vor. Daher ist ein Vergleich mit der Abdeckung von Oberleitung nicht möglich. Nachfolgend wird für das Fallbeispiel allerdings angenommen, dass alle E-Lkw wie normale Lkw innerhalb von zwei Schichten verwendet werden können.

Das Bevölkerungswachstum in der Stadt wird langfristig weiter ansteigen. Analog zeigen die Prognosen für das durchschnittliche Einkommen ein deutliches Wachstum auf, was ein Anzeichen auf ein steigendes Konsumverhalten ist.

Aus den gegebenen Datensätzen des Unternehmens ist ersichtlich, dass alle Lieferungen von einem Startpunkt ausgehend durchgeführt werden. Der Standort des Lagers ist bei den Koordinaten 38.070477, 23.784800. Die Koordinaten entsprechen dem Außenbezirk Ηλιακό Χωριό im Athener Norden. Der Zeitrahmen in dem Datensätze aus dem zu untersuchenden Unternehmen für die Analyse gesammelt wurden, liegt zwischen dem 01.04.2015 bis zum 30.06.2015. Bei den Daten der Belieferungen wurden Zusammenschlüsse von Zielen zu Routen identifiziert. Erkenntnisse zu der vom Logistikdienstleister angewendeten BS für den Transport der Paletten liegen nicht vor. Nachfolgend wird daher angenommen, dass Routenfahrten als startmäßige angewandte BS verwendet werden. Nach den gegebenen Daten wurden im Zeitraum der Datenerfassung 11.850 Belieferungen von Distributionszielen über 2.807 Routen durchgeführt und 42.132 Paletten transportiert. Dabei wurden im Durchschnitt 4,2 Ziele pro Route mit insgesamt 16 Paletten pro Route beliefert. Durchschnittlich wurden 4.997 kg mit 137 unterschiedlichen Produkttypen bei einer Gesamtanzahl von 10.361 Produkten pro Route transportiert. In der Tabelle 6.1 sind zusätzlich die Werte für das untersuchte Unternehmen entlang eines Tages ersichtlich. Auf der Karte in Anhang 26 und Anhang 27 werden alle belieferten Ziele innerhalb des Datenerhebungszeitraumes aufgezeigt. Als Kundengruppe wurde Einzelhandelsgeschäfte und Supermärkte identifiziert.

Tabelle 6.1: Unternehmensdaten mit Durchschnittswerten von Logistikabläufen (Noch nicht aufbereitete Unternehmensdaten).

Im Durchschnitt pro Tag						
Durchgeführte Routenfahrten	Angefahrte Ziele	Transportierte Paletten	Transportiertes Gewicht	Transportierte Produkte	Transportierte Produkttypen	Ziele im Innenstadtring
45,1	191,6	727,0	221.743,0	467.659,7	6.226,4	46,4

Zur Einbindung von statistischen Schwankungen bei ausgelieferten Paletten wurde untersucht, ob eine Normalverteilung oder eine andere Verteilung bei den jeweiligen Datensätzen vorliegt. Für die Überprüfung der Verteilung wurde untersucht, ob der gegebene Datensatz von der Normalverteilung mehr als 5% abweicht. Im Fall der Verteilung von transportierten Paletten pro Tag wurde bei der Kontrolle mit dem Kolmogorow-Smirnow- und Chi-Quadrat-Test eine signifikante Abweichung festgestellt. Eine weitergehende Analyse zeigte, dass die Verteilung der Daten auch keiner anderen statistischen Verteilung entspricht. Stattdessen sind zyklisch wiederkehrende Schwankungen im Liefervolumen identifiziert worden, die im Kontext der Untersuchung auf Nachfrageschwankungen zurückgeführt werden. Während das Liefervolumen im Untersuchungszeitraum 42132 Paletten umfasst, ist das Liefervolumen nach einer Bereinigung der Daten nur noch 36102 Paletten groß. Das durchschnittliche Gewicht einer Palette beträgt 1270 kg. Durch starke Schwankungen werden in Einzelfällen die maximal zulässigen Gewichte für die als verwendet angenommenen Europaletten überstiegen. Die gegebenen Datensätze zu den transportierten Gewichten werden als unzuverlässig bewertet und die Aufbereitung der Daten als nicht zielführend angenommen. Bei Routenfahrten wurde identifiziert, dass die Planung nicht aufgrund der maximalen Transportfähigkeit durchgeführt werden. Für Routenfahrten werden aufgrund des im Verhältnis zur Transportkapazität höhere Liefervolumens Fahrten zurück zum Lager notwendig, um die restlichen zu transportierenden Paletten aufzuladen. Selbst bei Einzelbelieferungen müssten im Durchschnitt bereits in fast sieben Prozent der Fälle zwei Fahrten durchgeführt werden. Bei Routenfahrten müssen im Durchschnitt dagegen 2,1 Fahrten durchgeführt werden.

Wie aus der Beschreibung der Verhältnisse in der Stadt Athen erkannt wurde, werden vor allem Kfz älteren Baujahres verwendet. Bei dem untersuchten Unternehmen werden auch überwiegend KFZ älteren Baujahres verwendet. Die Fahrzeuge erfüllen aufgrund des Alters nur ältere Schadstoffnormen. Die Gefahr bei möglichen EFBen nicht mehr in alle Stadtbereiche einfahren zu können ist somit als gegeben anzunehmen. Der FP des Unternehmens weist insgesamt 112 Fahrzeuge auf. Bei der Ermittlung der durchschnittlichen Schadstoffnorm aller Fahrzeuge standen nicht für alle Fahrzeuge Einträge der Schadstoffnorm zur Verfügung. Die vorhandenen Einträge zu Fahrzeugen und der Schadstoffnorm werden in der Tabelle im Anhang 28 aufgezeigt und weisen im Durchschnitt eine Schadstoffnorm von 2,7 auf. Für die durchschnittliche Schadstoffnorm aller Fahrzeuge wird der Wert übernommen.

Aufgrund mangelnder Informationen ist eine weitergehende Darstellung von Distributionsabläufen nicht möglich, da aus den gegebenen Datensätzen keine weiteren Rückschlüsse gezogen werden können.

6.2 Modellbildung und Abstraktion der Unternehmensdistribution

Für die Einbindung der Unternehmensdaten wurde eine Auswertung der gegebenen Daten durchgeführt und in für die SD Simulation verwendbare verallgemeinerte Daten umgewandelt. Neben Mittelwerten wurden Schwankungen bei den einzelnen Werten der Unternehmensdaten in das Modell eingebunden. Mit der Einbindung wird die Wiedergabe des in der Realität ebenfalls schwankenden Systemverhaltens ermöglicht. Für die Einbindung von Schwankungen werden Zufallszahlen verwendet. Für die Einbindung der Schwankungen der Daten wurden die Verteilungen

der einzelnen Entitäten geprüft, wobei berücksichtigt wurde, welche Art der Verteilung vorliegt. Wenn die entsprechende Verteilung mit allen Parametern bekannt war, wurde sie in das Modell eingebunden.

Für die Anpassung des Modells müssten die Daten eigentlich wie in Abschnitt 3.4 beschrieben in Test- und Trainingsdaten aufgeteilt werden, mit einer Stichprobe aus der Grundgesamtheit. Das Simulationsmodell würde mit mehreren Sätzen dieser Trainingsdaten an eine realitätsnahe Abbildung angepasst werden. Im vorliegenden Fallbeispiel ist aufgrund des geringen Zeitraums der Datenerhebung eine Trennung der Datensätze in mehrere Teile nicht ohne Informationsverlust möglich oder sie führt zu den gleichen Mittelwerten der gesamten Datenerhebung und generiert keinen Mehrwert. Außerdem sind keine Kosten- oder weitere Umsatzzahlen vom Logistikdienstleister bekannt. Die Beschaffung weiterer Daten ist ebenfalls nicht möglich. Die Anpassung des Modells erfolgt daher möglichst genau mit den vorliegenden Datensätzen. Für fehlende Datensätze werden im Folgenden Annahmen zum Verhalten des Simulationsmodells getroffen, die für das Verhalten des Systems als wahrscheinlich angenommen werden. Das Unternehmen soll durch die realitätsnahen Annahmen weiterhin grob abgebildet werden, um Rückschlüsse auf das abgebildete System ziehen zu können.

Für die Bewertung von BS_n durch das erarbeitete Konzept, wurde das in Abschnitt 5.1 erstellte Modell überprüft und bei den gegebenen Daten des Fallbeispiels als für die Bewertung zielführend befunden. Das Konzeptmodell mit den vorbereiteten Entitäten wurde ohne Veränderungen übernommen. Eine Überprüfung der im Konzept verwendeten Formeln aus Abschnitt 5.2 zeigte ebenfalls keinen Bedarf an Veränderungen für eine Untersuchung des Fallbeispiels auf. Die Formeln werden ebenfalls bei der Verwendung des Fallbeispiels verwendet.

Der Zeitraum vom 01.04.2015 bis zum 30.06.2015 aus dem Unternehmensdaten gegeben sind, ist für eine weitergehende ganzheitliche Bewertung von BS_n im Kontext der City-Logistik eigentlich zu klein. Periodische Schwankungen bei einzelnen Parametern durch saisonale oder besondere städtische Ereignisse sind bei diesem kleinen Zeitfenster nicht ausreichend in den Daten vorhanden und können daher nicht mit dem Modell abgebildet werden. Im Folgenden wird trotzdem angenommen, dass die gegebenen Daten verwendet werden können, um die Ausgangslage des Unternehmens zu beschreiben, welche ganzheitlich gültig ist.

Die Aufbereitung der Unternehmensdaten wird nicht als Hauptaufgabe dieser Arbeit angesehen. Die Behandlung der nachfolgenden Datenaufbereitung umfasst daher nur eine grobe Darstellung von Schritten und Besonderheiten, die zur Nachverfolgung der erarbeiteten Unternehmensdaten notwendig sind. Die einzelnen Schritte und Besonderheiten der Datenaufbereitung sind in der Tabelle 6.2 einsehbar.

Tabelle 6.2: Vorgehensschritte und Besonderheiten der Datenaufbereitung.

Schritte/ Besonderheiten	Annahmen/ Bemerkungen
Die Daten wurden für die Simulation untersucht.	Problematisch sind inkonsistente, fehlerhafte und fehlende Datensätze.
In den Datensätzen wurden Einträge mit nicht konsistenter Schreibweise identifiziert und korrigiert.	Beispielsweise wurde bei Datensätzen mit Koordinaten Trennzeichen hinzugefügt oder fehlende Stellen ergänzt.
Bei den Fahrzeugdaten wurden Fahrzeuge ohne Vertragsbindung entdeckt und entfernt.	

Schritte/ Besonderheiten	Annahmen/ Bemerkungen
Bei den Fahrzeugdaten wurden fehlende Daten zur Angabe des Typs des Verbrennungsmotors bei den Fahrzeugen erkannt und ergänzt.	Fehlende Angaben beim Verbrennungsmotor werden ebenfalls als „Diesel“ angenommen.
Ein PKW wurde in den Transportdaten identifiziert, mit einer Ladekapazität von Null Paletten. Gleichzeitig sind mit dem Fahrzeug Transportaufträge von bis zu 44 Paletten verbucht worden.	Die Verwendung des Fahrzeugs zur Belieferung wird als unrealistisch eingestuft. Das Fahrzeug wird aus der Untersuchung ausgeschlossen.
Der Untersuchungsraum wurde auf relevante Bereiche eingegrenzt. Als Eingrenzung wurden nur folgende Postleitzahlen verwendet: (x = alle ganzen Zahlen; Die Inseln vor Athen (Beispielsweise 180xx) werden aufgrund der unrealistischen Fahrzeit aus der Untersuchung ausgeschlossen)	100xx - 126xx; 131xx -136xx; 141xx - 146xx; 151xx - 157xx; 161xx - 167xx; 171xx - 177xx; 181xx – 188xx; 19001 – 19007; 192xx - 196xx.
Für eine genauere Filterung von Eingabefehlern wurde für eine Eingrenzung des Untersuchungsraums auf die gegebenen Koordinaten der einzelnen Ziele zurückgegriffen und ein verwendbares Koordinatenfenster festgelegt.	Breitengrad: 37°50' - 38°31' Längengrad: 23°30' - 24°10'
Während der Innenstadtring für Einfahrtsbeschränkungen bei hohen Schadstoffbelastungen in der Luft durch einzelne Straßen eingegrenzt wird, ist im Folgenden eine Vereinfachung getroffen worden. Für die Eingrenzung werden die äußersten Koordinaten der abgrenzenden Straßen verwendet, um ein Koordinatenfenster zu erzeugen. Der Innenstadtring wird durch folgende Straßen abgegrenzt: L. Alexandras, Sacharow, L. Mesogion, Fedippidou, Michalakopoulou, Sp. Merkouri, Vryaxixos, Hymettus, Iliou, Ambr. Frantzis, L. Andrews Sygrou, Chamosternas, Piräus, Iera Odos, Konstantinopel, Achilleos, Pl. Karaiskaki, Karolou und Marni bzw. im Original lautend, Λ. Αλεξάνδρας, Ζαχάρωφ, Λ. Μεσογείων, Φειδιππίδου, Μιχαλακοπούλου, Σπ. Μερκούρη, Βρυάξιδος, Υμηττού, Ηλ. Ηλιού, Αμβρ. Φραντζή, Λ. Ανδρ. Συγγρού, Χαμοστέρνας, Πειραιώς, Ιερά Οδός, Λ. Κωνσταντινουπόλεως, Αχλλέως, Πλ. Καραϊσκάκη, Καρόλου und Μάρνη. Durch das Koordinatenfenster wird eine Zuordnung der Ziele zum Innenstadtring durchgeführt.	Vereinfacht erfolgt die Einteilung der Ziele zum Innenstadtring über das Koordinatenfenster: Breitengrad: 37°95'43.16" - 37°99'72.41" Längengrad: 23°67'12.84" - 24°77'10.38"
Die Tabellen wurden zu einer großen Datenbank hinzugefügt, um Berechnungen durchzuführen und daraus weitere Datenabfragen zu erstellen.	Für die Verbindung der Daten wird ein Left-Join verwendet.
Offensichtlich falscher Gewichtsbuchungen wurden identifiziert. Die Daten wurden,	Aufgrund fehlender und widersprüchlicher Daten wird für die Menge an zu liefernden Paletten das maximale Gewicht pro Palette

Schritte/ Besonderheiten	Annahmen/ Bemerkungen
wenn möglich mit den Daten der zu liefernden Produkte rekonstruiert und zusammengefügt. Trotzdem wurden in den Gewichtsdaten für den Ladungsträger der Europalette unrealistisch hohe Buchungen erkannt.	vernachlässigt. Die Gewichtsdaten werden nur für die Vorstellung des Fallbeispiels verwendet. Für die Berechnung wurden die Gewichte einer Palette auf maximal zehn Tonnen begrenzt.
Die Anzahl der zu liefernden Paletten wurde bei fehlenden Datensätzen mit dem berechneten Volumen aus den zu transportierenden Produkten bestimmt.	Für eine Europalette wird eine Fläche von 0,96 m ² bei zwei Meter Höhe angenommen. Volumenverluste beim Kommissionieren von Produkten werden vernachlässigt.
Die Anzahl der pro Ziel zu transportierenden Paletten wurde auf ganze Paletten aufgerundet.	Der Transport von Paletten pro Ziel erfolgt nur in ganzen Paletten. Die Modellberechnung verwendet dagegen weiterhin Durchschnittswerte.
Die unterschiedlichen Tabellen weisen zwei unterschiedliche Datumsangaben auf, weswegen eine Angabe verworfen wurde.	Die Datumsangaben der Tabelle „Routes“ werden für die weitere Auswertung berücksichtigt und die Datumsangaben der Tabelle „Deliveries“ werden verworfen.
Zu Fahrzeiten und Entfernungen vom Lager zum jeweiligen Ziel sind keine Informationen bekannt. Die einzelnen Fahrzeiten und Fahrstrecken wurden über die Start- und Endpunkte bestimmt.	Für die Berechnung wurde der Google Dienst „Distance Matrix API“ verwendet, der Straßenverläufe, aber keine Verzögerungen durch Stau berücksichtigt hat.
Zu Fahrzeiten, Entfernungen und Reihenfolge der Ziele für Routenfahrten waren keine Informationen bekannt, weshalb die Fahrzeiten und Fahrstrecken anhand der gegebenen Koordinatenpunkte bestimmt wurden.	Für Routenfahrten werden Fahrten vom Lager über mehrere Ziele zurück zum Lager angenommen. Mit dem Google Dienst „Directions API“ wurde die schnellste Verbindung für alle Ziele einer Routenfahrt ermittelt und mit der Fahrzeit und Fahrstrecke zu den Daten hinzugefügt. Bei unvollständigen Zielangaben wurde eine Kompensierung der Fahrzeit und Fahrstrecke an die fehlenden Ziele angewandt. Für die Kompensierung wird $\left(\frac{\text{Ziele}}{\text{Anzahl angegebener Koordinaten}}\right)^{0,5}$ als angemessener Anpassungsfaktor angenommen. Die Wurzel wird verwendet, um den Faktor zu verkleinern. Bei Routenfahrten geht die Anzahl der angepassten Ziele nicht im gleichen Verhältnis in die Fahrzeit und die Fahrstrecke ein, da die erste und letzte Fahrt, von und zum Lager hin gleich bleibt und einen großen Anteil der Fahrzeit und Fahrstrecke ausmacht. Ausgehend vom zu transportierenden Liefervolumen und der Transportkapazität der Lieferfahrzeuge sind Rückfahrten zum Lager identifiziert worden. Die Fahrzeiten und Fahrstrecken sind um die zusätzlichen Fahrten zum Lager verlängert worden.
Im Bereich der Uhrzeiten wurden viele fehlende und fehlerhafte Datensätze identifiziert.	Eine genauere Untersuchung der einzelnen Routenfahrten mit der Uhrzeit wird als nicht zielführend angesehen. Das Zeitintervall der Simulationsschritte wird daher mit einem Tag als passend angenommen.

Schritte/ Besonderheiten	Annahmen/ Bemerkungen
Die Verteilung der Schwankungen der einzelnen Entitäten wurde untersucht.	Für Wertereihen der Entitäten wurden neben Normalverteilungen auch abweichende Verteilungen identifiziert, die weitergehend untersucht wurden (Liefervolumen).
Bei dem zu transportierenden Liefervolumen wurden wiederkehrende und überlagernde Schwankungen über den Zeitraum der gegebenen Daten entdeckt.	Die ermittelten Schwankungen werden für die gesamte Laufzeit der Simulation angenommen und im Modell abgebildet.
Zu den einzelnen Entitäten wurden für die Simulation verwendbare Mittelwerte gebildet.	Die einzelnen Werte wurden für das Modell gebildet unter Berücksichtigung der Systemgrenzen
In den Lieferdaten wurden keine freien Arbeitstage bei Sonn- und Feiertagen erkannt.	Der Abbildung eines produktiven Lieferprozesses erfolgt konstant über die Zeitschritte der Simulation hinweg.

Nach dem Aufbereiten und Auswerten der Daten mit dem Filtern der Koordinaten, Postleitzahlbereiche etc. sind weniger Datensätze verwendbar. Die Zahlen der Unternehmensabläufe weichen durch die Reduktion leicht von den in der Vorstellung des Fallbeispiels genannten Zahlen in Abschnitt 6.1 ab. Die Tabelle 6.3 führt signifikante Durchschnittswerte für den Fall von Belieferungen durch Einzelfahrten auf. Nachfolgend wird der Begriff der Direktfahrten verwendet, wobei eine geplante Route mit nur einem Ziel gemeint ist und nicht die direkte Belieferung vom Kunden mit Ware aus der einer Fabrik. Aufgrund der vereinzelt auftretenden Mehrfachfahrten bei einer einzelnen Direktbelieferung wäre der Terminus Einzelfahrten unpassend. Eine Bewertung der Belieferungsstrategie mit dem Transport der Ware von der Fabrik direkt zum Kunden ist dagegen aufgrund der fehlenden Datenlage nicht möglich. Im Kontext der untersuchten Supermarktlogistik mit einer großen Anzahl unterschiedlicher Produkte ist die klassische Direktbelieferung als unrealistisch einzustufen. Dagegen werden in der Tabelle 6.4 die Durchschnittswerte für den Fall von Routenfahrten aufgeführt. Unter der Annahme, dass die Routenfahrten ein Teil der standardmäßig verwendeten BS sind, werden die Daten als Ausgangswert für die Anpassung weiterer zu testender BSn verwendet.

Tabelle 6.3: Aufbereitete Unternehmensdaten für Einzelfahrten.

Auswertung	Einheit	Ausprägung
Ziele pro Tag	[Stück]	153,5
Ziele pro Tag innerhalb des Innenstadtrings	[Stück]	46,1
Fahrten pro Tag insgesamt (Mit Rückfahrten)	[Stück]	169,4
Fahrten pro Direktfahrt im Durchschnitt	[Stück]	1,1
Fahrzeit bei Direktbelieferungen	[Sekunde]	2.787,1
Fahrweg bei Direktbelieferungen	[Kilometer]	36,38
Paletten pro Ziel	[Stück]	3,5
Paletten am Tag	[Stück]	696,9
Gewicht pro Tag	[Kilogramm]	273.357,6
Gewicht pro Palette	[Kilogramm]	1.125,1
Produkte am Tag	[Stück]	619.648,5
Unterschiedliche Produkte am Tag	[Stück]	5.622,5

Die durchschnittliche mögliche Transportfähigkeit bei verwendeten Fahrzeugen sind 11,55 Paletten pro Fahrzeug. Die Daten zeigen eine starke Schwankung von der Transportfähigkeit durch

eine starke Varianz der verwendeten Fahrzeuge. Die Schwankung wurde als normalverteilt identifiziert mit einer Standabweichung von 2,2 Paletten beim durchschnittlichen Transportvolumen der Fahrzeuge.

Tabelle 6.4: Aufbereitete Unternehmensdaten für Routenfahrten.

Auswertung	Einheit	Ausprägung
Routenfahrten pro Tag	[Stück]	35,4
Insgesamt pro Tag angefahrene Ziele	[Stück]	158,0
Ziele pro Tag im Innenstadtring	[Stück]	44,7
Fahrten pro Tag insgesamt (Mit Rückfahrten)	[Stück]	73,7
Fahrten pro Route im Durchschnitt	[Stück]	2,1
Fahrzeit bei Routen	[Sekunde]	6.611,7
Fahrweg bei Routen	[Kilometer]	78,9
Paletten pro Ziel	[Stück]	3,8
Paletten am Tag	[Stück]	697,7
Gewicht pro Tag	[Kilogramm]	279.511,5
Gewicht pro Palette	[Kilogramm]	1.140,5
Produkte am Tag	[Stück]	626.514,0
Unterschiedliche Produkte am Tag	[Stück]	5.605,8

Anpassung des Simulationsmodells an das abzubildende System

Die gesammelten Informationen aus Unternehmensdaten und Daten zur Stadt Athen müssen auf Werte reduziert und in das Modell eingebunden werden, um die zukünftigen Entwicklungen realitätsnah abzubilden. Die Ausgangssituation und Annahmen für die Platzhalter im Stadtmodell werden in Tabelle 6.5 dargestellt, wohingegen in Tabelle 6.6 auf Anpassungen für das Logistiksystem eingegangen wird. In den Tabellen werden die Ausgangssituationen oder Annahmen beschrieben. Die im Modell eingefügten Anpassungswerte werden dem Platzhalter und der übergeordneten Entität zugeordnet. Das Format der Anpassungswerte für das Simulationsmodell entspricht der verwendeten Simulationssoftware Vensim. Für die Umsetzung der Anpassung werden die in Abschnitt 2.3 gesammelten Informationen verwendet.

Tabelle 6.5: Anpassung des Simulationsmodells an die Stadt.

Ausgangssituation/ Annahme	Entität	Platzhalter	Anpassungswert
Die Größe der Landbevölkerung außerhalb des Agglomerationsraum Athens ist rückläufig. Prognosewerte für die Zukunft liegen nicht vor. Der Wert des Rückgangs schwankte in den letzten Jahren um den Wert von -1,7 Prozent. Für den weiteren Verlauf wird daher ein fester Rückgangswert von -1,7 Prozent angenommen.	<i>Entwicklungsrate der Landbevölkerung</i>	(Wachstumswert pro Zeitschritt in Prozent)	-1.7
Für den Ausgangswert der ländlich lebenden Bevölkerung, die vom Stadtleben angezogen werden können, wurde zu Beginn des Untersuchungszeitraums eine Anzahl von 2,4 Mio. Menschen erkannt. Die Zahl wird für die Simulation übernommen.	<i>Landbevölkerung (BG)</i>	(Startwert)	2.428.790
Für Griechenland wurde das Einkommenswachstum zum Zeitpunkt der Untersuchung und für die nächsten zwei Jahre erkannt. Das	<i>Einkommenswachstum</i>	Lookup (Startwert)	[(0,-0.4) -(7300,10)] ,(0,2.23)

Ausgangssituation/ Annahme	Entität	Platzhalter	Anpassungswert
Verhältnis des bekannten Einkommenswachstums wird auf den Untersuchungsraum übertragen. Für den Zeitraum vor der Finanzkrise liegen Daten zu den Einkommenswachstumsverläufen vor. Für die Untersuchung wird angenommen, dass die finanzielle Situation in Griechenland sich zunehmend verbessert und sich dem ursprünglichen Ausgangszustand annähert. Für das Einkommenswachstum im Simulationsmodell werden daher historische Verläufe nach einer Laufzeit von mehr als zehn Jahren angenommen und verwendet.	(Lookup)		,(365,-0.35) ,(730,0.089) ,(1095,1.914) ,(3650,4) ,(4380,3.2) ,(4745,1.484) ,(5110,3.02) ,(5475,3.879) ,(5840,3.217) ,(7300,3.5))
Analog zum Einkommenswachstum wurden für Griechenland das durchschnittliche Einkommen pro Person bestimmt. Als Vereinfachung wird das durchschnittliche BNE pro Person auf den Untersuchungsraum übertragen.	Ø Einkommen (BG)	(Startwert)	16513
Bei der Erläuterung des Fallbeispiels Athens wurde ein zunehmendes Wachstum der Vororte im Vergleich zur Innenstadt festgestellt. Die Verschiebung des Wachstums wird zu Beginn der Untersuchung auf 2,45 Prozent im Jahr angenommen. Aufgrund der natürlichen geografischen Wachstumsgrenzen einerseits mit dem Meer und andererseits mit den Bergen, wird für die Zukunft ein abnehmendes verstärktes Wachstum der Vororte angenommen. Durch die weiteren in Abschnitt 2.1 beschriebenen Abläufe und den in Abschnitt 2.3 recherchierten Prognosedaten wird die Stadtentwicklung langfristig abnehmend eingeschätzt. Für die Abbildung im Modell wird nach 10,5 Jahren ein Rückgang auf 1,83 Prozent Verschiebung im Jahr angenommen. Gegen Ende des Untersuchungszeitraums wird dieser Wert für gegen Null gehend angenommen.	Stadtentwicklung (Lookup)	Lookup (Eingangsfaktor des vier Phasen Modells in Prozent)	[(0,-7e-005)-(10000,-0)] ,(0,-6.7e-005) ,(3839.76 ,-5e-005) ,(10000,0))
Das Bevölkerungswachstum wurde anhand von Vergleichsdaten für die ersten Jahre des Untersuchungszeitraums nachgebildet. Für die zukünftige Entwicklung der Stadtbevölkerung wurden Quellen in Abschnitt 2.3 untersucht. Die Bevölkerungsentwicklung in Städten zeigt einen weiter fallenden Verlauf auf. Aufgrund der Sondersituation mit Athen als Hauptstadt und Tourismusziel, wird ein um 0,1 Prozent höheres Wachstum als im Durchschnitt angenommen.	Bevölkerungswachstum im Jahr (Lookup)	(Startwert Wachstumswerte der Bevölkerung)	[(0,-0.5) -(7665,0.7)] ,(0,-0.27) ,(365,-0.219) ,(730,-0.217) ,(1095,0.02) ,(1460,0.231) ,(1825,0.172) ,(2190,0.21) ,(4015,0.16) ,(5840,0.13) ,(7665,0.07))

Ausgangssituation/ Annahme	Entität	Platzhalter	Anpassungswert
Zur Innenstadt oder Kernstadt von Athen zählen neben der Gemeinde „Athen“ weitere Stadtteile. Als Innenstadtabgrenzung wurde der Bereich Athen Zentrum gewählt, mit 1.029.520 Einwohnern zum Zeitpunkt der letzten Volkszählung. Die Einwohnerzahlen der Volkszählung wurden in das Simulationsmodell übernommen.	<i>Innenstadtbevölkerung</i> (BG)	(Startwert)	1.02952e+006
Der restliche Bevölkerungsanteil des Agglomerationsraums beläuft sich zum Zeitpunkt der letzten Volkszählung im Jahr 2011 auf 2.113.529 Einwohner, die sich auf die Vororte verteilen. Die Einwohnerzahlen der Volkszählung wurden in das Simulationsmodell übernommen.	<i>Vorortbevölkerung</i> (BG)	(Startwert)	2.11353e+006
Über Vergleichswerte von vermieteten Lager-Immobilien im Agglomerationsraum wurde ein Mietpreis von zwei Euro/m ² ermittelt. Der Mietpreis pro Quadratmeter wird auch für das Modell angenommen. Preisunterschiede im Agglomerationsraum werden vernachlässigt, da das Mieten eines Logistiklagers in Stadtgebieten mit besonders teuren Mieten als unrealistisch angenommen wird.	<i>Mietpreis-spiegel</i>	(Startwert Mietpreis pro m ²)	2
Für das Konsumwachstum wurde das Wachstum zum Zeitpunkt der Untersuchung beschrieben. Das Wachstum wird mit den vorliegenden Daten in das Modell übernommen. Für länger entfernte zukünftige Verläufe wird eine Annäherung des Konsumwachstums an die zurückliegenden Jahre vor der Finanzkrise angenommen. Im Modell wurden daher Vergleichswerte der vergangenen Jahre in das Modell eingebunden.	<i>Konsumwachstum</i> (Lookup)	Lookup (Konsumwachstum in Prozent pro Jahr)	([(0,-0.3) -(7301,10)] ,(0,0.178) ,(365,0.21) ,(730,-0.177) ,(1095,0.571) ,(1460,0.292) ,(1825,1.417) ,(2555,3.044) ,(3285,4.125) ,(4015,2.892) ,(4745,4.564) ,(7301,3.714))
Für das Wachstum des Kfz-Bestands wurde ein vom Bevölkerungswachstum unabhängiger Anteil identifiziert. Zurückliegend wuchs der Kfz-Bestand um 4.1 Prozent in den letzten 17 Jahren. Für den zukünftigen Verlauf des Kfz-Wachstums wird im Modell das gleiche Wachstum angenommen.	<i>KFZ-Bestand</i> (BG)	((Kfz Wachstum) /100) / (Zeitinter- vall des Kfz-Wachs- tums bei gleicher Be- völkerungs- größe)	((4.1/100)) /6205
Politische Regelungen können den Personenverkehr zu einer verstärkten Verwendung anderer Verkehrsmittel lenken. Die Entität <i>Kfz Wachstumsquote</i> bietet die Möglichkeit etwaige Restriktionen abzubilden. Da in	<i>Kfz Wachstumsquote</i>	(Kfz Wachs- tumsquote)	100

Ausgangssituation/ Annahme	Entität	Platzhalter	Anpassungswert
Athen zum jetzigen Zeitpunkt keine weiteren politischen Regelungen ersichtlich sind, wird der Wert der Entität auf 100 Prozent gesetzt, um ein unverändertes Verhalten zu erreichen.			
Als durchschnittliches Fahrzeugalter für private Fahrzeuge in Athen wurden 14,1 Jahre festgestellt. Für das Modell wird dieser Wert übernommen.	\emptyset Fahrzeugalter (BG)	(Startwert \emptyset Fahrzeugalter)	14.1
Private erneuerbar betriebene Fahrzeuge besitzen in Athen aufgrund der hohen Anschaffungskosten nur einem geringen Anteil im Kfz-Bestand. Im Modell wurden daher die niedrigen Bestandszahlen übernommen und mit für den Untersuchungsbereich geschätzten Entwicklungswerten erweitert. Für die Entwicklung wird ein langsam steigendes exponentielles Wachstum angenommen. Aufgrund der Ausgangslage beim BIP wird der Anteil von elektrisch betriebenen Kfz beim Ende des Untersuchungszeitraums auf 1,6 Prozent geschätzt.	Private erneuerbar betriebene Fahrzeuge (Lookup)	Lookup (Anpassungswert für den Anteil von privaten erneuerbar betriebenen Fahrzeugen)	[(0,0)-(7300,10)] ,(0,0.04) ,(1428.75,0.1) ,(2857.49,0.3) ,(3683.49,0.3193) ,(4263.91,0.347) ,(4710.4,0.36) ,(5067.58,0.37) ,(5536.39,0.55) ,(6362.39,0.7) ,(7300,1.5))
Die Größe des Schadstoffausstoßes ist im Modell ein vereinfachter dimensionsloser Wert in dem die Schadstoffe im Untersuchungsbereich zusammengefasst darstellt werden. Für die Herleitung liegen keine genauen Daten vor. Die Ermittlung der Anpassungswerte des Schadstoffausstoßes geschieht daher iterativ, bis das gewünschte realistische Ergebnis bei Fahrverboten abgebildet wird.	Schadstoffausstoß	(Festes Verkehrsunabhängiges Schadstoffaufkommen)	+2e+006
		(Anpassungswert)	1.094
Analog ist bei der Schadstoffbelastung iterativ ein dem Modell angemessener Startwert zu finden. Für den Startwert wird der bei der Entität <i>Schadstoffausstoß</i> bestimmte Wert für das feste Schadstoffaufkommen als ausreichend angenommen.	Schadstoffbelastung (BG)	(Startwert für die Schadstoffbelastung)	+2e+006
Für die Entität <i>Natürliche Reduktion</i> sind mehrere Annahmen für eine realistische Abbildung nötig. Der Rückgang und die Bildung von Schadstoffen unterliegen unterschiedlichen Einflüssen und Schwankungen. Ein Teil der natürlichen Schadstoffbildung wurde in die Entität <i>Natürliche Reduktion</i> verlagert. Beispielsweise steigt der Feinstaubwert verursacht durch Wetterphänomene wie beispielsweise Wüstensand an. Alternativ können regelmäßige Waldbrände im Sommer Schadstoffe in das untersuchte System einbringen. Für die Abbildung im Modell werden Schwankungen über Sinus	Natürliche Reduktion	(Fester Reduktionsterm)	+1.25*10 ⁷
		(Zufallschwankungen)	RANDOM NORMAL(9e+007,1e+009,4.1597e+008,6.26599*1e+009,0)
		(Jährlicher Schwankungsterm)	+1.5e+008*
		(Monatlicher)	+8e+007*

Ausgangssituation/ Annahme	Entität	Platzhalter	Anpassungswert
<p>und Cosinus-Funktionen unterschiedlicher Amplitude und Frequenz eingebracht. Neben festen Schwankungen werden zwei Zufalls-generatoren unregelmäßige Schadstoffverläufe in das System ein.</p> <p>Eine verbaute Stadt führt zu einer zunehmenden schlechteren Belüftung, wodurch die Schadstoffkonzentrationen langsamer abnehmen. Für die natürliche Schadstoffreduktion wurde daher eine zeitliche Anpassung der Schadstoffreduktion in das Modell eingebunden.</p> <p>Die Anpassung des Modells bei der Entität erfolgt unter dem Gesichtspunkt realistische Schadstoffverläufe für Fahrverbote abzubilden, bei der Verwendung dimensionsloser Ein- und Ausgangsgrößen.</p>		<i>Schwankungsterm</i>)	
		<i>(Zweimonatlicher Schwankungsterm)</i>	-9e+007*
		<i>(Täglicher Schwankungsterm)</i>	-8e+007*
		<i>(Zufallschwankungen 2)</i>	-RANDOM NORMAL(9e+007,1e+009 ,2.1597e+008, 6.26599* 1e+009,0)
	<i>Zeitliche Anpassung</i>		-(Time^2.07)
<p>Da die SWe auf einem dimensionslosen Wert beruhen, ist für die Entität <i>Einfahrbeschränkung</i> die Anpassung des Eingangswertes nötig. Nur angepasst kann der Wert den SWen gegenübergestellt werden und realistische Ausgangswerte zu Fahrverboten wiedergeben.</p>	<i>Einfahrbeschränkung</i>	<i>(Anpassungswert)</i>	3*10^6
<p>Die Entität <i>Härte der Einfahrbeschränkungen</i> bietet die Möglichkeit etwaige erweiterte oder entschärfte Restriktionen abzubilden und „Was wäre, wenn...“ Situationen zu untersuchen. Da in Athen zum jetzigen Zeitpunkt keine weiteren politischen Regelungen ersichtlich sind, wird der Wert der Entität auf „1“ gesetzt.</p>	<i>Härte der Einfahrbeschränkungen</i>	<i>(Startwert für Verschärfungen Einfahrbeschränkungen)</i>	1
<p>Das Verkehrsaufkommen als Eingangswert der Entität <i>Verzögerungen durch Staus</i> hat die Einheit Kilometer pro Tag. Die Entität <i>Verzögerungen durch Staus</i> hat dagegen die Einheit (zusätzliche) Sekunde pro Sekunde (Fahrzeit). Der Anpassungswert ist als dimensionslose Näherungsformel auszulegen, die auf Grundlage der in Kapitel 2 behandelten Staus innerhalb der Stadt beruhen.</p>	<i>Verzögerungen durch Staus</i>	<i>(Anpassungswert)</i>	5/9e+008
<p>Bei dem Ausbau der Infrastruktur in Athen ist der Verkehrsträger Straße nur zweit-rangig. Viele Investitionen sind für die Instandhaltung notwendig. Neue Ausbauprojekte finden vor allem außerhalb des Untersuchungsraums mit Autobahnanbindungen statt. Für das Modell wird daher nur ein geringes Wachstum angenommen von 0,1 Prozent pro Jahr.</p>	<i>Wachstumsrate der Infrastruktur</i>	<i>(Wachstumsrate der Infrastruktur in Prozent)</i>	0.1
<p>Die Entität <i>Fahrzeitverkürzung und Verlängerung</i> bietet die Möglichkeit etwaige erweiterte oder entschärfte Restriktionen abzubilden und „Was wäre, wenn...“ Situationen</p>	<i>Fahrzeitverkürzung und</i>	<i>(Anpassungswert des Modells)</i>	0

Ausgangssituation/ Annahme	Entität	Platzhalter	Anpassungswert
zu untersuchen. Da in Athen zum jetzigen Zeitpunkt keine weiteren politischen Regelungen ersichtlich sind, wird der Wert der Entität auf „0“ gesetzt.	<i>Verlängerung</i>	mit weitergehenden Fahrzeitverkürzungen als Prozentangabe)	

Neben der Anpassung des Simulationsmodells an die Randbedingung der Stadt, die bisher beschrieben wurden, ist die Anpassung des Simulationsmodells an das zu untersuchende Unternehmen notwendig. In der Tabelle 6.6 werden die vorliegenden Randbedingungen zusammengefasst, Annahmen getroffen und Anpassungswerte zur Abbildung des Logistiksystems vorgestellt.

Tabelle 6.6: Anpassung des Simulationsmodells an das Unternehmen.

Ausgangssituation /Annahme	Entität	Platzhalter	Anpassungswert
<p>Aus den Unternehmensdaten wurden die Werte von zu transportierenden Paletten pro Tag bestimmt. Der Zeitraum der gegebenen Datensätze ist mit drei Monaten nur bedingt aussagekräftig für längere Untersuchungszeiträume. Zyklische Besonderheiten wie saisonale Effekte werden daher nicht im Modell abgebildet.</p> <p>Aus den vorliegenden Daten ist ein durchschnittlicher Wert von 726 zu beliefernden Paletten am Tag bestimmt worden. Die Anzahl von zu beliefernden Paletten ist als zyklisch schwankend erkannt worden, sowohl über eine Woche als auch über einen längeren Zeitraum hinweg. Die Abbildung des Sachverhalts wurde über eine Sinus- und Cosinus-Funktion in Verbindung mit einer normalverteilten Zufallsfunktion nachgebildet. Zur Einbindung der Nachfrageschwankungen in das Simulationsmodell wurde daher die Modellzeit in einer Sinus- und Cosinus-Funktion eingebunden.</p> <p>Um unterschiedliche Startbedingungen in das Modell einzubinden, startet der Verlauf durch die Einbindung eines Zufallsgenerators mit unterschiedlich viel zu transportierenden Paletten. Analog wurden zur realitätsnahen Abbildung von Schwankungen bei den zu transportierenden Paletten gleichverteilte Zufallszahlen eingebunden.</p>	<i>Ausgangslage zu transportierende Paletten</i>	(Fester Wert von zu liefernden Paletten)	726
		(Kleine kurzzeitige Schwankung)	+85
		(Große langfristige Schwankung)	+215
		(Zufallswerte)	RANDOM NORMAL(-150,150,0,110,9001)
Die Anzahl der durchgeführten Routenfahrten pro Tag schwankt im Untersuchungszeitraum. Der Verlauf der Anzahl von Routenfahrten entspricht dem der zu transportierenden Paletten. Zur Einbindung der Schwankungen wird daher der durchschnittliche Wert von Routenfahrten pro Tag als Ausgangswert genommen und mit den gleichen Schwankungen, die auch bei der Ausgangs-	<i>Anzahl durchgeführter Routenfahrten</i>	(Anpassungswerte für die Schwankungen)	*RANDOM NORMAL (0.8,1.2,1,0.144,9001) *(1+ 0.11*SIN(Time*(1/2)* 3.14159 +Zufallsstart) +0.28*cos

Ausgangssituation /Annahme	Entität	Platzhalter	Anpassungswert
lage an zu transportierenden Paletten verwendet wurden in das Modell eingebracht. Da in der Entität <i>Anzahl durchgeführter Routenfahrten</i> eine andere Einheit verwendet wird, werden die Schwankungen durch prozentuale Werte angepasst. Durch den gleiche Seed im Zufallszahlengenerator werden im Simulationsmodell die Schwankungen der beiden Entitäten gleichgeschaltet.			(Time*(1/2)* 3.14159/9 +Zufallsstart))
Erste Auswertungen der Unternehmensdaten zeigten das 20 Prozent der Ziele im Innenstadtring liegen und ein Anteil von 24 Prozent der Belieferungen an Ziele im inneren Innenstadtring gehen. Nach der Filterung und weitergehenden Auswertung der Datensätze, wurde ein Anteil von 29 Prozent für Belieferungen an Ziele im Innenstadtring bestimmt. Der Prozentwert wurde in das Modell übernommen und wird über den Verlauf der Untersuchung als konstant angenommen.	<i>Anteil der Fahrten in einem Bereich mit Einfahrbeschränkungen</i>	(Anpassungswert für das Modell)	0.29
Die Anzahl der Routenfahrten, die ein Fahrzeug am Tag durchführen kann, ist von der Fahrzeit der am Tag durchgeführten Routen abhängig. Über iterative Lösungsvorgänge ist für die Entität ein realistischer Startwert zu finden. Die Entität der durchschnittlichen Anzahl von Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag ist eine sich selbst einstellende BG. Die Anpassungsvariable ist nur für die Initiierung des Simulationsmodells nötig. Ein signifikant falscher Wert führt im Modell jedoch zu einer verlängerten Einschwingphase.	<i>Ø Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag (BG)</i>	(Startwert der durchschnittlichen Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag)	3
Bei Lieferungen zu vereinzelt Logistikkunden wurden statistische Auffälligkeiten mit besonders kleinem Liefervolumen identifiziert und eine Veränderung der Transportkapazität als nötig betrachtet. Als Anpassung wird im Modell die durchschnittliche Transportkapazität um eine neunzehntel Palette über die Zeit angehoben, um den Effekt auszugleichen.	<i>Anpassung der Fahrzeugkapazität</i>	(Anpassungswert, mit dem Bruchteil des Wertes einer Palette, um den die Transportkapazität erhöht werden soll)	(Time^1.3) /(6*Time^1.3 +7.3e+08/Time)
Für den Fall, dass die Entität <i>Fuhrparkanpassung</i> den Wert „1“ hat, wodurch die Kapazitätsanpassung des FPs aktiviert ist, gibt die Entität <i>Erneuerungszyklus</i> an, mit wie vielen Zyklen im Jahr eine Anpassung vorgenommen werden soll. Da aus den Daten keine Informationen zu Anpassungen des FPs ersichtlich sind, wird ein Wert für die Entität angenommen. Für das Modell wird	<i>Erneuerungszyklus</i>	(Anpassungswert, mit der Anzahl von Kauf- und Verkaufsintervalle in einem Jahr)	4

Ausgangssituation /Annahme	Entität	Platzhalter	Anpassungswert
eine Anpassung mit jedem Quartal als realistisch erachtet. Bei der Umstellung von klassisch betriebenen Kfz- auf elektrisch betriebene Kfz wird ein Wechsel von einem Kfz pro Zyklus angenommen.			
Das durchschnittliche Alter von gewerblich verwendeten Fahrzeugen in Athen wurde als überdurchschnittlich alt identifiziert. Die Auswertung der Unternehmensdaten bestätigen diese Erkenntnis. Die durchschnittliche Euro Schadstoffnorm bei den Fahrzeugen im Unternehmen beträgt 2,7. Für die Bestimmung der Schadstoffnorm wurde von unvollständige Datensätzen auf die Grundgesamtheit der Fahrzeuge geschlossen. Für die dauerhafte Einfahrerlaubnis in den Innenstadtring Athens ist mindestens die Schadstoffnorm Euro-5 nötig. Für den Fall, dass die Größenanpassung des FPs im Modell aktiv ist, wird angenommen, dass die Schadstoffnorm mit jedem Kauf verbessert wird. Die Verbesserungsquote wurde bestimmt mit der Veränderung der Schadstoffnorm, wenn ein Kfz neu gekauft wird und von einer alten Euro-1 Schadstoffnorm auf die neue Euro-6 Schadstoffnorm wechselt. Für das untersuchte Unternehmen verbessert sich die durchschnittliche Schadstoffnorm mit der Neuanschaffung um den Wert 0,0538569. Da die Sprünge in der Schadstoffnorm in der Praxis nicht bei jedem Fahrzeugwechsel so groß sind, wird für das Modell ein Wechselwert von 0,00567225 angenommen.	Ø Schadstoffnorm (BG)	(Anpassungswert, für die durchschnittliche Verbesserung der Schadstoffnorm mit jedem Kfz Kauf)	0,00567225
		(Startwert zur Anpassung des Modells an die durchschnittliche Schadstoffnorm im Logistiksystem)	2.73
Fahrzeuge mit Euro-5 Schadstoffnorm dürfen im Untersuchungsraum ungehindert in Zonen beschränkter Einfahrt Lieferungen ausführen. Die durchschnittliche Schadstoffnorm wird daher als Einflussfaktor für die Anzahl der einfahrbereiten Fahrzeuge herangezogen. Zur Einbindung in das Modell wird eine Funktion aufgestellt, die diesen Sachverhalt abbildet. Dafür wird mit einer linearen Regression über die durchschnittliche Schadstoffnorm der FP mit der Einfahrerlaubnis abgebildet. Von 93 Fahrzeugen mit bekannter Schadstoffnorm können im Fall eines Fahrverbots nur drei Fahrzeuge in den Innenstadtring einfahren. Ein weiteres einfahrberechtigtes Fahrzeug führt zu einer Verbesserung der Schadstoffnorm um den Wert 0,022689. Unter der Annahme das eine lineare interpolierte Funktion ausreichend genau ist, wurde	Anzahl einfahrberechtigter Fahrzeuge	(Anpassungswert/Funktion für die Einfahrfähigkeit nach Schadstoffnorm)	(42.7293*Ø Schadstoffnorm-113.479)

Ausgangssituation /Annahme	Entität	Platzhalter	Anpassungswert
die Funktion für den Anteil der einfahrbereiten Fahrzeuge gebildet, mit der Schadstoffnorm als Eingabewert. Zu beachten ist, dass die Hälfte der Fahrzeuge auch ohne gültige Schadstoffnorm in den Innenstadtring einfahren darf.			
Um Schwankungen beim Liefervolumen abzufangen muss ein Logistikdienstleister Sicherheitsrückstellungen beim FP bilden. Aufgrund der starken Schwankungen an zu transportierenden Paletten wird ein Wert von 140 Prozent für die Sicherheitsrückstellung von Fahrzeugen gewählt. Der Wert wurde iterativ bei den gegebenen Randbedingungen für ein stabilisierendes Systemverhalten ermittelt.	<i>Sicherheitsrückstellungen</i>	(Anpassungswert für die zusätzlichen Rückstellungen von Fahrzeugen in Prozent)	140
Die n. r. t. P. können zu Einbußen beim Einzelhändler führen. Daher wird eine vertragliche Regelung mit Schadensansprüchen für jede Palette, die pro Tag zu spät ausgeliefert wird, angenommen. Der Wert wird auf fünf Euro pro Palette und Tag festgelegt.	<i>Strafzahlungen für nicht fristgerechte Lieferung</i>	(Anpassungswert für entsprechende Strafzahlungen pro Palette und Tag)	5
Die Lohnkosten können einen erheblichen Teil der Arbeitskosten ausmachen und unterscheiden sich nach Standort, Tätigkeit, Qualifikation und Unternehmen. Die Lohnkosten von Arbeitnehmern sind nicht bekannt. Aufgrund des geringeren Qualifikationsniveaus wird angenommen, dass die Lagerarbeiter weniger verdienen als Lkw-Fahrer. Die Kosten für das Unternehmen sind aufgrund steuerlicher Abgaben höher als die Einkommen der Arbeitnehmer. Ein Lagerarbeiter, dessen Einkommen unter dem durchschnittlichen Lohn liegt, wird mit dem Faktor von 1,0 zum durchschnittlichen Einkommen für die Lohnkosten des Unternehmens angenommen. Die Lohnkosten des Fahrers werden dagegen mit dem 1,3-fachen Durchschnittslohn angenommen. Die Kosten für die Verwaltung werden für den Vergleich von BSn als vernachlässigbar angenommen und nicht im Modell abgebildet.	<i>Lohnkosten Lagerarbeiter</i>	(Anpassungswert der Einkommen im Vergleich zum durchschnittlichen Einkommen im Agglomerationsraum)	1
	<i>Lohnkosten Fahrer</i>	(Anpassungswert der Einkommen im Vergleich zum durchschnittlichen Einkommen im Agglomerationsraum)	1.3

Für die Untersuchung wird angenommen das im Kontext des Kfz-Verkehrs die beim Unternehmen im Bestand befindlichen Fahrzeuge den Ansprüchen des Unternehmens in Bezug auf die Ladekapazität entsprechen. Eine weitergehende Untersuchung des Fahrzeugvolumens wird daher nicht durchgeführt und gegebene Transportgrößen der Fahrzeuge aus dem Unternehmen für die weitere Simulation verwendet.

6.3 Simulationsdurchführung bestehender und neuartiger Belieferungsstrategien

Vor dem Hintergrund der Bewertung von BSn im Kontext der City-Logistik mit SD wird wie im erarbeiteten Bewertungskonzept in Abschnitt 5.4 beschrieben weiter vorgegangen. Die vor der Simulationsdurchführung durchlaufenen Abschnitte der Modellierung wurde für die Simulation des Fallbeispiels als passend bewertet. Am Modell werden keine Modifikationen vorgenommen. Für die Bewertung von BSn durch das erarbeitete Konzept wurden die Bewertungskriterien in Abschnitt 5.3 im Konzept dargestellt. Die Bewertungskriterien wurden ebenfalls überprüft und bei den gegebenen Daten des Fallbeispiels als zielführend befunden. Sie werden daher ohne Anpassungen für die Simulationsdurchführung übernommen.

Die im Abschnitt 4.1 behandelten BSn wurden als für die Anwendung auf das Fallbeispiel tauglich befunden und werden nachfolgend beim Fallbeispiel bewertet. Bei der im Fallbeispiel verwendeten BS konnten, aufgrund der begrenzten Datenlage und fehlenden Hintergrundinformationen, nur eine grobe Identifikation der bestehenden BS erfolgen. Alle Informationen aus den gegebenen Daten wurden ausgewertet und in die Identifikation der bestehenden BS eingebracht. Zusammenfassend sind die Erkenntnisse aus Abschnitt 6.1 und 6.2 zur bestehenden BS, dass ein Logistikdienstleister, mit einem Lager und Routenfahrten auf dem Verkehrsträger Straße, mit durch Diesel betriebenen Kfz, Belieferungen an Einzelhandelsgeschäfte und Supermärkte durchführt. Die für die bestehende BS nachfolgend verwendeten Werte zum Schichtsystem, Arbeitszeiten, Konsolidierungen und FP-Anpassungen basieren dagegen auf Annahmen. Die ermittelte BS des Fallbeispiels beschreibt grundsätzlich die BS vom abgebildeten Unternehmen, lässt aufgrund der getroffenen Annahmen aber keine sicheren Rückschlüsse mehr auf das Unternehmen zu. Die bestehende BS wird für die Erstellung eines Vergleichsdurchlauf bei der Bewertung verwendet. Aufgrund der fehlenden Implementierungen von BSn aus Abschnitt 4.1 in der bestehenden BS, wird sie nachfolgend auch unter dem Terminus Routenfahrten aufgeführt.

Für die Bewertung der BSn wurden mehrere Umschaltfunktionen verwendet, um die Bewertung von grundsätzlich unterschiedlichen BSn zu unterscheiden oder die Experimente zu vereinfachen. Zusammen mit der jeweiligen Umschaltfunktion werden automatisch mehrere zusammenhängende Eingangsfaktoren umgeschaltet, die für die jeweilige zu bewertende BS gelten. Die Umschaltung zwischen Routenfahrten greift auf die ausgewerteten Daten zurück und verändert die Eingabewerte von Routen pro Tag, Ziele pro Route und Fahrten pro Route, entsprechend der Ausgangsdaten und dem anzuwendenden Fall. Zu den Fällen gehören: Fall 1 (W) Routenfahrten Fall 2 (Y) Direktbelieferung und Fall 3 (Z) Direktbelieferung mit Cargocap (Tabelle 6.7).

Tabelle 6.7: Fallunterscheidungen im Simulationsmodell: Fahrten.

	<i>Anzahl durchgeführter Routenfahrten (pro Tag)</i>	<i>Ziele pro Route</i>	<i>Anzahl Fahrten pro Route</i>
Fall 1 (W)	35,4	4,46	2,1
Fall 2 (Y)	153,5	1,0	1,1
Fall 3 (Z)	152,2	1,0	2,1

Alle zu testenden BSn basieren auf Basis der Datengrundlage der Routenfahrten. Eine Ausnahme bilden die Daten der Direktbelieferung und Cargo Cap BS. Aufgrund der direkten Belieferungswege wurde als Ausgangslage auf die Daten der Direktbelieferung zurückgegriffen und die Daten entsprechend angepasst. Aufgrund des Transportes auf dem Schienennetz unterhalb der

Stadt sind neben der fehlenden Wechselwirkung mit Staus auch die Verbindungen zwischen dem Lager und den Kunden direkter. Für die zu fahrenden Strecke und die Zeit wird daher die Annahme von einer Reduktion von 24 Prozent der ursprünglichen Strecke und Zeit angenommen.

Mit der Umschaltung der Unterhaltskosten werden grundsätzlich unterschiedliche BSn bewertet. Für die Umschaltung der einzelnen BSn werden weitere Faktoren im Modell verändert. Die Ausprägung der einzelnen Faktoren ist in der Tabelle 6.8 ersichtlich. Beim Fall vier werden Cargocap Züge mit zwei Paletten Transportkapazität und 24 Stunden Arbeitszeit pro Tag in das System eingebunden. Die Fälle eins, zwei und drei testen dagegen unterschiedliche Schichtsysteme beim Transport mit dem Lkw.

Tabelle 6.8: Fallunterscheidungen im Simulationsmodell: Unterhaltskosten.

	<i>Arbeitszeit pro Tag (Stunden)</i>	<i>Fahrzeugkapazität (Paletten)</i>
Fall 1 (D)	21	11,55
Fall 2 (F)	14	11,55
Fall 3 (G)	7	11,55
Fall 4 (H)	24	2

Eine weitere Fallunterscheidung dient der Trennung von unterschiedlichen durchschnittlichen Entladezeiten pro Palette und als pauschale Wartezeit je Ziel (Tabelle 6.9). Als Ausgangswert werden 90 Sekunden Entladungszeit pro Palette als realistisch angenommen. Die autonome Entladung von Paletten wird als 30 Sekunden schneller angenommen. Der Zeitansatz für das Finden eines Parkplatzes oder das Einfahren in die Ladebucht wird mit durchschnittlich 300 Sekunden festgelegt. Die zusätzliche Ankunftszeit von autonomen Cargocap-Zügen wird dagegen mit 30 Sekunden angenommen. Als dritter Fall wird eine vergünstigte Ankunftszeit angenommen, die nur halb so lange dauert wie die der ursprünglichen Ausgangssituation. Die angenommenen Werte wurden als Schätzwerte oder Erfahrungswerte zusammengetragen.

Tabelle 6.9: Fallunterscheidungen im Simulationsmodell: Entladezeiten.

	<i>Entladezeit pro Palette (Sekunden)</i>	<i>Entladezeitpauschale (Sekunden)</i>
Fall 1 (A)	90	300
Fall 2 (B)	60	30
Fall 3 (C)	45	150

Teilfaktorieller Versuchsplan

Für das Konzept ist der Factor-Design Ansatz zur Analyse der Faktoren wie in Abschnitt 5.4 beschrieben durchgeführt worden. Mit der Durchführung wurde ein Systemverständnis erarbeitet um anhand der Effektivität von Faktoren eine sinnvolle Kombination einzelner BSn für eine Bewertung zusammenzustellen. Für die Erstellung des 2^{12-6} teilfaktoriellen Versuchsplans wurden 18 Entitäten (Anhang 29) aus der Tabelle 5.3 ausgewählt und mit den Fallunterscheidungen auf zwölf Eingangsfaktoren reduziert. Für die Eingangsfaktoren wurden Wertepaare mit einer hohen und einer niedrigen Ausprägung gewählt und nach der Faktorausprägung des 2^{k-p} Factor-Design Ansatzes zusammengetragen. Die Übersicht des Versuchsplans mit der Aliasstruktur, welche die Vereinfachung des teilfaktoriellen Versuchsplans bis zur dritten Ordnung aufzeigt, die Versuchplantabelle der Ausprägungen und die zwölf Eingangsfaktoren sind im Anhang 30 einsehbar. Mit den vorliegenden Eingabefaktoren wurde der teilfaktorielle Versuchsplan durchlaufen.

Die entstandene Tabelle des Versuchsplans enthält die Ergebnisse der einzelnen Experimente gemittelt über die drei Replikationen. Die Ergebniswerte sind der Tabelle des Versuchsplans im Anhang 31 zu entnehmen. Eine genauere Darstellung der Replikationsergebnisse ist im

Anhang 32 einsehbar. Die Ergebnisse wurden als Grundlage verwendet, um die Effektivität der einzelnen Faktoren zu bestimmen. Die Ergebnisse der kodierten Koeffizienten, der Varianzanalyse und der Regressionsgleichung der Effektivität für die drei Bewertungskriterien sind in den Tabellen im Anhang 33 (laufenden Kosten), Anhang 34 (n. r. t. P.) und Anhang 35 (Auslastung des FPs) ersichtlich.

Aus den ermittelten Ergebniswerten für die Effektivität der einzelnen Faktoren auf die Bewertungskriterien wurden Effektdiagramme für die bessere Visualisierung der Ergebnisse erstellt. Die Abbildung 6.1 zeigt die Struktur der Abbildung der Hauptfaktordiagramme für die unterschiedlichen Ausprägungen der Faktoren auf. Bei den gegebenen Annahmen zeigen die Ergebnisse eine Reduktion der Kosten mit einer höheren **Anzahl von Lagern**. Durch die Reduktion der Fahrstrecke und Zeit bei der Verwendung mehrerer Lager sinken die laufenden Kosten, die Anzahl der n. r. t. P. und die Auslastung beim verwendeten FP. Der **Anteil der Lagerfläche**, die für den Transport des zwischenzulagernden Volumens benötigt wird, zeigt keinen Einfluss auf die Auslastung des FPs, was aufgrund des fehlenden Wirkzusammenhangs zu erwarten war. Die laufenden Kosten steigen aufgrund des erhöhten Flächenbedarfs mit dem Faktor an. Der Umstand, dass der Faktor einen steigenden Einfluss auf die n. r. t. P. besitzt, ist nicht am Simulationsmodell erklärbar. Im vorliegenden Fall wird aufgrund der hohen Anzahl von Wirkzusammenhängen im Modell und der verringerten Auflösung des 2^{k-p} Factor-Design Ansatzes von einem Fehler ausgegangen. Die steigende **Anzahl der Fahrzeuge** führt zu sinkenden laufenden Kosten durch eine geringen Anzahl von n. r. t. P. Gleichzeitig sinkt die Auslastung des FPs ab. Durch die höhere Verfügbarkeit an Fahrzeugen treten weniger Engpässe bei Fahrzeugen während der Untersuchung auf, was die verringerte Anzahl von n. r. t. P. begründet. Durch die geringere Anzahl von Strafzahlungen sinken die laufenden Kosten mit steigender Anzahl von Fahrzeugen, da die sonst zu zahlenden Strafzahlungen die Betriebskosten der zusätzlichen Fahrzeuge übersteigen. Eine **Erneuerung der Fahrzeuge mit E-Kfz** zeigt hohe Werte bei der Reduzierung der laufenden Kosten und den n. r. t. P. auf.

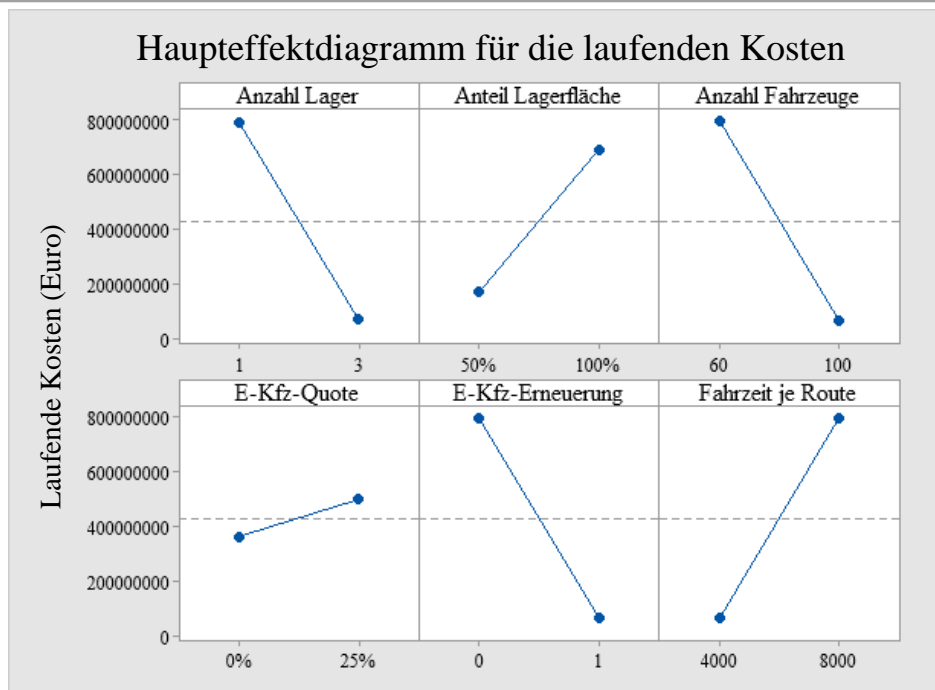


Abbildung 6.1: Haupteffektdiagramm für die laufenden Kosten, Teil 1.

Die **E-Kfz-Quote** führt nach den Ergebnisdaten mit steigender Ausprägung zu geringfügig steigenden Kosten, verspätet ausgelieferten Paletten und einer leicht abfallenden Auslastung des FPs. Aufgrund der geringen ermittelten Effektivität, die innerhalb des Toleranzbereiches für Schwankungen liegt und der widersprüchlichen Ergebniswerte im Kontext der Umstellung des FPs auf E-Kfz, wird von einem Fehler aufgrund unterschiedlicher Wechselwirkungen im Modell ausgegangen. Für das Ergebnis wird von fallenden laufenden Kosten und einer fallenden Anzahl n. r. t. P. ausgegangen. Während E-Kfz den Engpass bei einfahrbereiten Fahrzeugen im Fall von EFBen auflösen können, liegt bei den im teilfaktoriellen Versuchsplan durchgeführten Experimenten gar kein Engpass vor. Der Anteil der Ziele im Innenstadtring ist geringer als der Anteil des nicht einfahrfähigen FPs. Durch die Verteilung der Ziele sind im Fall von EFB gleich viele Fahrzeuge für Belieferungen im Innenstadtring verfügbar, wie wenn keine EFBen vorliegen. Der Einfluss der E-Kfz auf das Bewertungskriterium der n. r. t. P. ist am Modell nicht erklärbar, weshalb von einem Fehler ausgegangen wird. Während beim **Fahrweg** keine signifikanten Einflüsse bei der Effektivität identifiziert wurden, zeigt die **Fahrzeit** einen bedeutenden signifikanten Einfluss bei allen drei Bewertungskriterien. Die steigende Fahrzeit ist aufgrund der hohen Lohnkosten für den Fahrer bedeutend größer als die Betriebskosten des Fahrzeugs. Eine lange Fahrzeit führt zu hohen laufenden Kosten und gleichzeitig können bei einer hohen Fahrzeit nur weniger Belieferungen pro Tag durchgeführt werden, wodurch die Anzahl der n. r. t. P. ansteigt. Mit mehr pro Fahrzeug zu liefernden Paletten steigt die Auslastung des FPs ebenfalls an. Die **Einwirkung von Staus** führen zu einer Verlängerung der Fahrzeit. Bei einem aktiven Einfluss der Entität ist ein analoges Verhalten, wie bei einer Verlängerung der Fahrzeit zu beobachten. Die **Entladezeit** ist mit Zustand C geringer als im Zustand A. Während das Verhalten der Entladezeit der Fahrzeit gleicht, ist der Einfluss der Entladezeit geringer. Die Umschaltung der **Unterhaltskosten** prüft eine grundsätzlich andere BS mit Cargocap Zugbelieferungen statt klassischen Kfz-Fahrten. Die Ergebnisse des 2^{k-p} Factor-Design Ansatzes zeigen bei der BS Cargocap höhere Kosten mit einer höheren Anzahl von n. r. t. P. auf. Die höhere Auslastung bei Cargocap Belieferungen weist auf eine nicht ausreichende Anzahl von Fahrzeugen für die zu transportierende Anzahl von Paletten hin. Die einzelnen Haupteffektdiagramme für die drei Bewertungskriterien sind im Anhang 36 (laufende Kosten), Anhang 37 (N. r. t. P.) und Anhang 38 (Auslastung der FPs) angefügt.

Eine Untersuchung der Faktoren in Wahrscheinlichkeitsnetzen, Halbwahrscheinlichkeitsnetzen und Pareto-Diagrammen für die einzelnen messbaren Bewertungskriterien der laufenden Kosten, n. r. t. P. und der Auslastung des FPs liefern Erkenntnisse zu der Signifikanz bei den Effekten der einzelnen Faktoren und der Kombination von ihnen. In den Halbwahrscheinlichkeitsnetzen sind die absoluten Effekte der zwölf Faktoren dargestellt. Die absoluten Effekte ermöglichen das Vergleichen der Einflüsse aller Faktoren, bei den drei messbaren Bewertungskriterien. Ob der Effekt des Faktors zu einer Steigerung oder einem Rückgang beim messbaren Bewertungskriterium führt, ist in den Wahrscheinlichkeitsnetzen und Pareto-Diagrammen ersichtlich. Bei der Auslastung des FPs zeigen neben den bereits beschriebenen Faktoren der Anzahl der Lager, der Anzahl der Fahrzeuge und der Fuhrparkanpassung zwei Faktoren in Wechselwirkungen einen signifikanten Effekt auf die Auslastung. Sowohl die Fahrzeit mit der Fuhrparkanpassung als auch die Anzahl der Lager mit der Entladezeit zeigen einen signifikant reduzierenden Einfluss auf die Auslastung des FPs. Bei den steigernden Wechselwirkungen sind die Anzahl der

Fahrzeuge mit einer E-Kfz-Erneuerung sowie die Anteil der Lagerfläche mit den Unterhaltskosten als auch die Anzahl der Lager mit einer Fuhrparkanpassung als signifikante Faktoren identifiziert worden (Auslastung des FPs: Anhang 39; Laufende Kosten: Anhang 40; n. r. t. P.: Anhang 41).

Bei den laufenden Kosten und den n. r. t. P. wurden nach den Ergebnissen der Effektivität dagegen keine signifikanten Einflussfaktoren identifiziert (Anhang 40 und Anhang 41). Bei den Ergebniswerten, bei denen eine ohnehin schon eine hohe Streuung vorliegt, wich die Effektivität der Faktoren nicht signifikant von der Standardstreuung ab. In den Diagrammen der Wahrscheinlichkeitsnetzte der Effekte für die Effektivität ist eine Clusterbildung der Effektivitätswerte zu erkennen. Das unnatürliche Zusammenliegen bei den Effekten wird auf die hohe Anzahl von Wirkzusammenhängen im Modell und die verringerte Auflösung bei dem 2^{k-p} Factor-Design Ansatz zurückgeführt (Verweis auf Ausreißer in der Grafik im Anhang 42).

In den Ergebniswerten des Teilfaktorversuchsplans sind ebenfalls Unregelmäßigkeiten zu erkennen. Zum einen zeigten sich in einem Teil der durchgeführten Experimente Fälle, in denen gar keine Paletten zu spät transportiert wurden und zum anderen führen die meisten der Fälle in denen verspätete Transporte auftreten nur zu wenigen n. r. t. P. Wenige Abweichungen liegen dagegen um ein Vielfaches höher. Eine Darstellung in Wahrscheinlichkeitsnetzten für die Ergebniswerte bei den laufenden Kosten und den n. r. t. P., die nicht auf den Effekten beruhen, zeigen diesen Sachverhalt auf. Die Messreihenwerte in den Diagrammen weisen eine sehr enge Gruppierung von Werten auf und wenige sehr weit vom Median abweichende Ergebnisse (Anhang 42). Aufgrund der Abweichung um ein Vielfaches des Medianwertes steigt die Standardabweichung signifikant an. In den Wahrscheinlichkeitsnetzdiagrammen der Effekte werden etwaige Faktoren, die eigentlich signifikant sind, nicht mehr als signifikante Faktoren identifiziert. Als Ursache für die Werte mit extrem hoher Abweichung werden die Faktoren der *Anzahl der Fahrzeuge* und die Umstellung der Unterhaltskosten als Einfluss innerhalb des Simulationsmodells angenommen. Auffällig ist in diesem Kontext, dass die Anpassung des FPs, auch bei Cargocap Belieferungen der hohen Anzahl an n. r. t. P. entgegenwirken kann. Für die weitere Umstellung von Kombinationen bei BSn werden die zuvor dargestellten Ergebnisse der Haupteffekten als relevant eingestuft, auch ohne die Einstufung als signifikante Faktoren.

Die Umschaltung der Unterhaltskosten dient der Bewertung einer grundlegend andere BS. Die im Modell eingebundene Cargocap BS verwendet im Vergleich zur klassischen Belieferung kleinere Fahrzeuge mit einer geringeren Transportkapazität von zwei Paletten. Für einen zielgerichteten Betrieb ohne Engpässe sind für das gegebene Transportvolumen entsprechend mehr Fahrzeuge einzukalkulieren. Bei der weiteren Bewertung von BSn wird daher eine Anpassung der nötigen Fahrzeuge bei der Analyse der Cargocap BS durchgeführt.

Zielgrößenoptimierung

Mit den berechneten Werten wurde darüber hinaus mit einer Zielgrößenoptimierung ermittelt, welche der Ausprägungen am sinnvollsten für möglichst geringe Kosten im Modell sind. Die anderen Bewertungskriterien wurden bei der Zielgrößenoptimierung zurückgestellt, da die Kosten als wichtigste Kenngröße angenommen werden. Als sinnvoll werden drei Lager bewertet, ohne die Verwendung von Konsolidierungsmöglichkeiten für weitere Logistikdienstleister. Der Umstand, dass die Konsolidierungsdienstleistung, als nicht kostensteigernd bewertet wird, ist bei

sehr geringen Liefervolumen verständlich, da ein deutlicher Mehrbedarf an Fläche für die Konsolidierung im Vergleich zum Lagerplatz benötigt wird. Im vorliegenden Fall wird dagegen aufgrund der hohen Anzahl von Wirkzusammenhängen im Modell und der verringerten Auflösung des 2^{k-p} Factor-Design Ansatzes, von einem Fehler in der Auswertung der Effekte ausgegangen. Für die Anschaffung von Fahrzeugen werden im Modell keine Kosten berücksichtigt. Für BSn ist daher die Verwendung weniger Kfz und eine Schrittweise Anpassung vom Bedarf bei gleichzeitiger Erneuerung des FP's mit E-Kfz sinnvoll, für eine Reduzierung der laufenden Kosten. Für die weitere Reduzierung der laufenden Kosten sind Maßnahmen mit einer Reduzierung der Fahrzeit als zielführend zu erachten. Selbst wenn ein geringfügig längerer Fahrweg gefahren werden muss, ist das Einsparungspotential durch die verringerte Fahrzeit größer. Die Reduzierung der Fahrzeit spiegelt sich in den Faktoren des Stauinflusses und der Entladezeit wider, welche möglichst klein zu halten sind, um die gesamte Fahrzeit zu reduzieren und die laufenden Kosten zu senken. Eine Verschärfung des SGW für die EFB führt tendenziell zu steigenden laufenden Kosten für den Logistikdienstleister. Eine Verschärfung der SGW kann zwar nicht direkt beeinflusst werden, muss jedoch eingeplant werden. Der Faktor der Unterhaltskosten ermöglichte die Umschaltung für die Analyse einer grundlegend anderen BS. Bei den gegebenen Randbedingungen des Liefervolumens und der Betriebskosten im Kontext der Cargocap BSn sind konventionelle BSn auf dem Verkehrsträger Straße als zielführender zu sehen, um eine Reduktion der laufenden Kosten zu erreichen. Die nachfolgenden Untersuchungen von BSn erfolgen daher schwerpunktmäßig auf einer Weiterentwicklung konventioneller BSn auf dem Verkehrsträger Straße.

Zusammenstellung des Versuchsplans mit Belieferungsstrategien

Ausgehend von den Ergebnissen des Factor-Design Ansatzes, der Zielgrößenoptimierung und dem Modellverständnis für die gegebenen Randbedingungen, wurden neben den einzelnen BSn auch mehrere Kombinationen von BSn bestimmt und in einem Versuchsplan zusammengetragen. Die Bestimmung der einzelnen Faktorausprägungen für die einzelnen BS basiert, wenn nachfolgend nicht anders beschreiben, auf den Erkenntnissen der Datenaufbereitung bei den Unternehmensdaten und den bereits getroffenen Annahmen (Abschnitt 6.1 und 6.2). Der Versuchsplan wurde mit dem angepassten Modell durchlaufen und die Ergebnisse der Experimente sind im Versuchsplan im Anhang 45 einsehbar. Die zugehörige Verweisliste der BSn ist im Anhang 43 abgebildet. Nachfolgend wird die Ausgangslage der Routenfahrten und die Zusammenstellung der BS weiter erläutert.

Ausgangslage der Belieferungsstrategie des Unternehmens im Fallbeispiel

Als bestehende BS beim untersuchten Logistikdienstleister wurden Belieferungen mit Routenfahrten über mehrere Ziele auf dem Verkehrsträger Straße identifiziert, wobei als Hilfsmittel FPFe mit Verbrennungsmotoren verwendet werden. Für die Routenfahrten wurde angenommen, dass im Ausgangszustand keine Konsolidierungen durchgeführt wird und das gesamte Liefervolumen, in dem einen bestehenden Lager, zwischengelagert werden muss. Als Startwert der Untersuchung für die Größe des FP's wird der ermittelte Wert von 112 Fahrzeugen als konstanter Wert über den Untersuchungszeitraum verwendet. Erste Untersuchungsergebnisse zeigten das die Größe des FP's nicht dem optimalen Verhältnis entspricht. Für die BSn wird daher eine weiterführende Untersuchung der Anzahl der zu verwendenden Fahrzeuge durchgeführt. Bei der Ausgangssituation werden alle der verwendeten Fahrzeuge mit einem Dieselmotor betrieben. Für die weitere Unters-

chung zu Veränderungen an der Ausgangslage werden Anpassungsmöglichkeiten des FPs in Bezug auf die Zusammensetzung der Antriebstypen und die Größe des FPs analysiert. Entsprechend der Einflussfaktoren auf dem Verkehrsträger Straße unterliegen auch die Fahrzeuge in der als Ausgangslage betrachteten BS dem Einfluss der Fahrzeitverlängerung durch Staus. Während Maßnahmen, zur Reduzierung der Einflussnahme von Staus auf die Fahrzeit existieren, konnte im Fallbeispiel keine entsprechende Maßnahme identifiziert werden. Für die Ausgangslage werden Verzögerungen durch Staus daher als Einflussfaktor angenommen. Neben der reinen Fahrzeit sind die Entladezeiten für die benötigte Zeit pro Routenfahrt von Bedeutung. Aufgrund der unzureichenden Datenlage wurde als Ausgangswert für Entladezeiten der Fall A als Ausgangslage angenommen. Die BS der Routenfahrten ist als Ausgangslage die aufbauende Grundlage für die weiteren zu bewertenden BSn.

Weitere Untersuchung neuer Belieferungsstrategien

Als eine alternative BS wird der Wechsel auf Direktbelieferungen untersucht. Während die Ausgangslage der meisten Einflussfaktoren gleich bleibt, ändern sich die Werte für die Fahrzeit, Fahrstrecke, Anzahl der Fahrten pro Tag, die durchschnittlichen Fahrten pro Routenfahrt etc. Die notwendigen Daten wurden analytisch aus der Datenauswertung ermittelt oder über Schätzwerte und Annahmen für die jeweilige BS getroffen.

Eine grundlegende Veränderung ist die Einführung der **Cargocap BS**. Für die Cargocap BS wurde eine reduzierte Fahrstrecke (Fahrzeit) um 24 (25) Prozent im Vergleich zu den Direktbelieferungen angenommen. Die Reduzierung wird aufgrund der direkteren Verbindung zwischen dem Kunden und dem Lager sowie den fehlenden Einfluss des Verkehrsaufkommens angenommen. Zusätzlich zu den allgemeinen Verzögerungen im Straßenverkehr wird die Fahrzeit bei der Cargocap BS auch nicht von Staus beeinflusst. Der Eingangsfaktor zum Einfluss von Stau wird daher auf den Eingangswert „0“ gesetzt. Für die Entladung wurde angenommen, dass der Vorgang autonom abläuft und mehr Zeit beansprucht als die manuelle Verladung einer Palette (Fall B). Die Transportkapazität der einzelnen Fahrzeuge wurde entsprechend nach den im Transportkonzept verwendeten Fahrzeugen auf zwei Paletten pro Fahrzeug festgelegt. Bei der Cargocap BS können nur Elektrofahrzeuge verwendet werden. Die E-Kfz-Quote wird daher bei der Analyse auf 100 Prozent gesetzt. Durch den unterirdischen Transport ist die BS nicht nur von Staus, sondern auch von EFBen unabhängig. Untersuchungen zu SGW und Änderungen bei EFBen sind wegen der Unabhängigkeit bei der Cargocap BS nicht zielführend. Stattdessen sind die Ergebnismerte in beiden Untersuchungsfällen verwendbar. Die hohen Investitionskosten der BS Cargocap werden in den Experimenten nicht berücksichtigt und fließen erst im PBV in die Betrachtung ein.

Die **Verwendung von E-Kfz** zeigt eine Verbesserung bei den laufenden Kosten und der Anzahl von n. r. t. P. Zum einen sind die Kosten für den Betrieb geringer und zum anderen sind die Fahrzeuge unabhängig von EFBen verwendbar. Für die BSn wird weiter untersucht, inwieweit eine schlagartige Umstellung des FPs, eine schrittweise Umstellung des FPs oder eine Kombination der beiden Maßnahmen als zielführend bei Transporten auf dem Verkehrsträger Straße zu erachten ist. In dem Zusammenhang wird insbesondere der Einfluss der Faktoren bei einer Veränderung der SGW und EFBen analysiert. Eine Verschärfung der SGW und Vergrößerung der EFBS-Zone kann zwar nicht direkt beeinflusst werden, muss jedoch eingeplant werden. Die Kosten und Liefertreue der BSn sind für den Fall von Gesetzesverschärfungen neu zu bewerten. Die Verwendung von E-Kfz wird im Fall von Gesetzesverschärfungen als effektiver Lösungsansatz

zur Prozessstabilisierung angenommen und weiter untersucht. Neben den Gesetzesverschärfungen wird ebenfalls eine Veränderung der Randbedingungen bei den Lieferbedingungen untersucht. Bei der BS **Schaffung besserer Lieferbedingungen** wird von der exklusiven Verwendung bei Haltebuchten und Fahrspuren ausgegangen. In dem Kontext ist auch der intraorganisatorische Lösungsansatz mit der Verwendung von Echtzeitdaten für die Stauumfahrung und einer variablen Routenplanung möglich. Bei der BS wird daher sowohl der Einfluss von Staus deaktiviert als auch der schnellen Entladefall C bei der Entladezeit verwendet. Die Einführung der exklusiven Fahrspuren und Haltebuchten ist nicht direkt vom Unternehmen abhängig, sondern von der Politik. Durch Lobbyarbeit kann das Unternehmen jedoch Einfluss auf die Politik nehmen. Aufgrund des Umfangs der zusätzlichen Fahrzeit durch Staus wird dem Faktor ein großes Verbesserungspotential zugerechnet und nachfolgend weiter untersucht. Die Fahrzeitverkürzungen sind auch mit **Nachtfahrten** realisierbar. Bei Nachtfahrten ist aufgrund des verringerten Verkehrsaufkommens nicht mit einer Verzögerung durch Stau zu rechnen, wohingegen in der Nacht die Parkplätze eher zugeparkt sind und das Entladen nicht beschleunigt ablaufen kann. Der Einflussfaktor für Stau auf die Fahrzeit wird daher im Modell deaktiviert.

Zusätzlich zu der in der Ausgangslage angenommenen einen Arbeitsschicht mit sieben Stunden Arbeitszeit, ist die Annahme einer längeren Arbeitszeit mit zwei oder drei Schichten möglich. Die BS **Mehrschichtbetrieb** bildet die Untersuchung der Arbeitszeit in unterschiedlichen Ausprägungen im Modell ab.

Bei der Wahl einer effektiven Strategie im Unternehmen, ist das Lagermanagement mit einzubeziehen. Im Kontext dieser Arbeit wird die BS **Verwendung mehrerer Lager** beim Fallbeispiel untersucht. Durch zusätzliche Ausgangsstandorte für die Belieferungen werden die Fahrwege und Fahrzeiten zwischen dem Lager und dem Kunden verringert. Durch die Kosteneinsparungen beim Transport sollen die gesamten monetären Kosten gesenkt werden. Daher ist die Abwägung zwischen Fahrtkostensparnissen und zusätzlichen Lagerkosten zu treffen. Neben den Kosten können durch die kürzere Fahrzeit ein höheres Liefervolumen in der gleichen Zeit transportiert werden, wodurch die Wahl der Anzahl der Lager auch im Hinblick auf die Liefertreue zu treffen ist. Da in der Ausgangslage nur ein Lager verwendet wird, werden im Folgenden Tests über die Anzahl mehrerer über die Stadt verteilte Lagerstandorte durchgeführt. Für jedes weitere Lager wird im Modell eine Verkürzung der Strecke und Fahrzeit berechnet. Bei der Kombination der BSn mit mehreren Lagern bleiben die Eingabewerte der BSn für die Fahrzeit und Fahrstrecke gleich.

Eine Verlegung des einen bestehenden Lagerstandortes in der Ausgangslage ist ebenfalls ein möglicher Ansatzpunkt für eine Untersuchung. Im Nachfolgenden wird dagegen angenommen, dass der gegebene Lagerstandort aufgrund der Autobahnanbindung als strategisch bedeutend einzustufen ist. Die Verlegung wird daher nicht weiter untersucht. Bei den Lagern ist ebenfalls der Ansatz der Konsolidierung zu berücksichtigen.

Die **Konsolidierung** ist eine BS mit der Kosten gesenkt werden sollen, durch das Zusammenlegen von Routenfahrten, Ressourcen und Prozessen mit anderen Logistikdienstleistern. In der Praxis würde sich das Liefervolumen und der Fuhrpark für das Unternehmen im Fallbeispiel wahrscheinlich erhöhen und Kosten sowie Gewinne würden zwischen den Unternehmen aufgeteilt werden. Aufgrund der mangelnden Ausgangslage bei den Daten können zu den Kosten oder

dem Gewinn allerdings keine Abschätzungen getroffen werden, weshalb das gleiche Liefervolumen wie im Vergleichsdurchlauf für die Simulation verwendet wird. Im Modell wird mit der BS der Konsolidierung der Anteil der im Lager vorzuhaltenden Ware um einen Anteil reduziert. Durch die Reduktion soll ein besserer Überblick über die Kosten im Logistiksystem entstehen und ein Teil des Einsparungspotentials bei der Konsolidierung mit anderen Logistikdienstleistern abgebildet werden. Gleichzeitig ist im Modell durch den festen Flächen- und Ressourcenbedarf bei der Konsolidierung eine Einschätzung möglich, ab wann bei den gegebenen Randbedingungen die Lagerflächenreduktion die zusätzlichen Kosten überwiegt.

Die zuvor aufgeführten BS führen z. T. zu reduzierten Fahrzeiten und ermöglichen durch die Fahrzeitreduktion mehr Fahrten pro Arbeitstag. Mit der steigenden Transportkapazität pro Tag entstehen freie Kapazitäten im FP, die nicht benötigt werden und trotzdem laufleistungsunabhängige Kosten verursachen. Auch im Ausgangsfall ist die **Anpassung der Größe des FPs** zu untersuchen, um eine Verbesserung der Ergebnisse bei den Bewertungskriterien zu erreichen. Für die Anpassung der Größe des FPs wurden zwei unterschiedliche BSn erarbeitet. Die erste BS geht von einer starren Anpassung der Größe des FPs zu Beginn der Untersuchung aus. Bei der zweiten BS wird in regelmäßigen Abständen eine Anpassung der Größe des FPs an den im Modell berechneten Bedarf durchgeführt. Für die Untersuchung ist die Annahme, dass die BS der regelmäßigen Kapazitätsanpassung in keiner Ausprägung vom Unternehmen während des Untersuchungszeitraums angewandt wird als unrealistisch anzusehen. Eine Anpassung des FPs war aus den gegebenen Daten allerdings nicht ersichtlich. Die regelmäßige Anpassung des FPs wird daher als zu bewertende BS aufgeführt. Die Anzahl der Anpassungen pro Jahr wird im Modell durch den Wert der Entität *Erneuerungszyklus* vorgegeben. Für die BS ist die Wahl der Anzahl der Erneuerungszyklen im Kontext der Bewertungskriterien weiter zu untersuchen.

Durch einzelnen BSn werden nach den Ergebnissen der Faktorisierung zu kombinierte BSn zusammengefasst für eine weitergehende Bewertung, wobei die einzelnen Faktorausprägungen gleichbleiben und für die Bewertung übernommen werden.

6.4 Ergebnisauswertung der Simulation mit der Kennzahlenermittlung für das Punktbewertungsverfahren

Neben den Ergebniswerten des Versuchsplans für die Bewertung der BSn (Verweisliste der BSn: Anhang 43; Versuchsplan: Anhang 45) ist ein Modellverständnis mit den Abläufen während der Simulation wichtig, um die Ergebnisse interpretieren zu können. Die einzelnen Einflüsse werden daher näher beschrieben und interpretiert, bevor die Ergebnisse statistisch überprüft und die zuvor aufgestellten Interpretationen bestätigt werden.

Erläuterungen der Experimentdurchläufe

Bei der Analyse der Ausgangssituation wurde die BS der **Routenfahrten** als Vergleichsdurchlauf untersucht. Beim Systemverhalten zeigt sich, dass gegen Ende des Untersuchungszeitraums verstärkt Tage mit EFBen auftreten, durch die zunehmend wachsende Verkehrsbelastung in der Stadt. Der Konsum und das mit ihm in Wirkzusammenhängen stehende Liefervolumen ist während der Untersuchung gewachsen. Gegen Ende des Untersuchungszeitraums treten n. r. t. P. auf, da die Transportkapazitäten nicht ausreichend groß waren. Der Effekt, der n. r. t. P. ist nur partiell an einzelnen Tagen zu erkennen. Ein Aufstauen der zu transportierenden Paletten über die Tage

hinweg ist nicht zu erkennen. Die Ergebnisse deuten auf einen zu kleinen FP gegen Ende des Untersuchungszeitraums hin, wenn eine durchgehend hohe Liefertreue zu gewährleisten ist. Durch das wachsende Konsumverhalten steigen mit den Liefervolumen auch die Lagerfläche und die für das Unternehmen nötigen Lagerkosten. Das langsam steigende Verkehrsaufkommen führt außerdem Verkehrsverzögerungen durch Staus, welche wiederum die Fahrzeit bei Lieferungen verlängern. Längere Fahrzeiten führen wiederum zu einem höheren Arbeitsaufwand mit einer Steigerung der laufenden Kosten. Durch die längeren Fahrzeiten können pro Tag weniger Routenfahrten durchgeführt werden und die Transportkapazität des gesamten Systems sinkt.

Das Ergebnis der BS der **Direktbelieferung** mit der Verwendung von Einzelfahrten statt Routenfahrten weist höhere laufende Kosten und keine n. r. t. P. auf. Der Umstand, dass die BS der Direktbelieferungen höhere Kosten als die BS der Routenfahrten verursacht wird auf das fehlende Einsparungspotential bei der Fahrstrecke und Fahrzeit im Vergleich zu den Routenfahrten zurückgeführt. Der Umstand, dass Direktbelieferungen im Bereich der Liefertreue effizienter als Routenfahrten sind, ist unerwartet, da bei Direktbelieferungen keine Einsparungseffekte bei der Strecke und der Fahrzeit wirken. Dass die Einzelfahrten als liefertreuer im Simulationsmodell wiedergegeben werden, liegt durch die schwankenden Zufallswerte im Bereich der möglichen Ungenauigkeit. Außerdem werden bei der Direktbelieferung insgesamt mehr Fahrten durchgeführt, wodurch die Transportkapazität des Logistiksystems ansteigt. Die Auslastung der Fahrzeuge ist mit 22,3 Prozent vergleichsweise gering, was ein Zeichen von Überkapazitäten im FP ist. Mit einer weiteren Optimierung sind daher weitere Einsparungen möglich. Selbst bei Einzelfahrten sind in Einzelfällen extra Rückfahrten zum Lager notwendig.

Bei dem Ansatz der BS der **regelmäßigen Kapazitätsanpassungen im FP** werden in allen Experimenten n. r. t. P. festgestellt. Entgegen der Ausgangslage mit Routenfahrten treten gegen Ende des Untersuchungszeitraums die n. r. t. P. nicht häufiger auf. Die wenigen n. r. t. P. treten verteilt während des Untersuchungszeitraums auf. Der Bedarf der notwendigen Fahrzeuge steigt mit dem Konsumwachstum an und wird in jedem der Experimente der regelmäßigen FP-Anpassung ausgeglichen. Mit einzelnen Experimenten wurde die Anpassungshäufigkeit und deren Auswirkung auf das Modell untersucht. Die Abdeckung des Bedarfs erfolgt immer rückblickend auf den höchsten Bedarf des letzten Anpassungszeitraums mit der Vergrößerung um den prozentualen Wert der Entität *Sicherheitsrückstellung*. Ein langer Anpassungszeitraum beinhaltet mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit eher eine hohe Schwankung. Mit der Sicherheitsrückstellung und der gespeicherten eher erhöhten Schwankung des letzten Anpassungszeitraums steigt der Wert für den nächsten prognostizierte Fahrzeugbedarf an. Der berechnete Fahrzeugbedarf ist bei einem kleineren Anpassungszeitraum dagegen kleiner, wodurch Schwankungen im zu transportierenden Liefervolumen öfter nicht ausgeglichen werden können. Die Ergebnisse der einzelnen Experimente spiegeln diesen Zusammenhang wieder. Eine Erhöhung der Anzahl der Zyklen bei der Anpassung des FPs zeigt, dass die Anzahl der n. r. t. P. ansteigt. Durch die häufigeren Anpassungen wird schneller auf den Bedarf reagiert. Die Fahrzeuganzahl sinkt und die Schwankungen im zu transportierenden Liefervolumen können nicht mehr zielführend ausgeglichen werden. Die Anzahl der n. r. t. P. steigt in diesen Fällen zusammen mit den Strafzahlungen für n. r. t. P. an. Die entstehenden Strafzahlungen führen zu steigenden laufenden Kosten. Die Fahrzeuge, die für das Ausgleichen der Schwankungen im Liefervolumen helfen, werden an den meisten Tagen nicht benötigt und erzeugen für den Unterhalt der Fahrzeuge laufende Kosten. Mit der Verringerung

der Anzahl der Zyklen pro Jahr für die Anpassung der FP-Größe steigen diese Unterhaltskosten an. Durch den größeren FP werden gleichzeitig die Liefervolumenschwankungen besser bewältigt, wodurch weniger n. r. t. P. auftreten. Für das Erreichen niedriger laufender Kosten ist daher die Abwägung zwischen den Unterhaltskosten der Fahrzeuge und den Strafzahlungen für n. r. t. P. zu treffen. Bei den Experimenten wurde erkannt, dass die Unterhaltskosten für die zusätzlichen Fahrzeuge bei vier Kapazitätsanpassungen pro Jahr größer sind als die zu bezahlenden Strafzahlungen. Der Effekt verstärkt sich, wenn nur noch eine Anpassung pro Jahr beim FP durchgeführt wird. Werden die Anpassungen des FPs jeden Monat durchgeführt sinken die laufenden Kosten im Vergleich zu den vier Anpassungen pro Jahr ab. Dagegen steigt die Anzahl der n. r. t. P. an. Bei einer 24 oder 56 Anpassungen pro Jahr erhöht sich die Anzahl der n. r. t. P. deutlich. Die Strafzahlungen aufgrund der hohen Anzahl der n. r. t. P. führt zu insgesamt höheren laufenden Kosten als bei vier Anpassungen pro Jahr. Bei mehr als zwölf Anpassungen pro Jahr ist durch die starken zyklischen Schwankungen der Anpassungszeitraum zu klein, um die Schwankungen einzuplanen. Durch die fehlende Einplanung entstehen Fehlplanungen in der Kapazitätsplanung des FPs und zu transportierende Paletten sammeln sich im Lagern an. Aufgrund der begrenzten Transportkapazität können die Paletten aber nicht abtransportiert werden. Im nächsten Anpassungszyklus werden im Vergleich zum durchschnittlichen Liefervolumen überdurchschnittlich viele Fahrzeuge benötigt, um die angestauten Paletten abtransportieren zu können. Die Ersparnis bei der Fahrzeuganpassung gleicht sich aus. Durch die Strafzahlung für die n. r. t. P. steigt der Preis weiter an. Der Effekt der n. r. t. P. findet über den ganzen Untersuchungsraum hinweg statt. Durch die vermehrten Fahrverbote gegen Ende des Untersuchungszeitraums wird der Effekt allerdings verstärkt. Für das Unternehmen ist somit eine Abwägung zwischen Kosten und Liefertreue zu treffen. Für das weitere Vorgehen wird aufgrund der geringen laufenden Kosten bei gleichzeitig guter Liefertreue die Anpassung zu jedem Quartal für das weitere Bewerten von Kombinationen von BSn verwendet.

Bei der BS der **langsamen Umstellung auf E-Kfz** wurden während des Untersuchungszeitraums 80 Fahrzeuge in E-Kfz umgewandelt bzw. verkauft und durch E-Kfz ersetzt. Durch den Betrieb der im Unterhalt und Verbrauch günstigeren Elektrofahrzeuge sinken die laufenden Kosten marginal ab. Nicht berücksichtigt werden die Investitionskosten für den Kauf der Fahrzeuge. Bei der **schlagartigen Einführung von E-Kfz** mit einer Quote von 25 Prozent, haben die 28 E-Kfz über den Untersuchungszeitraum hinweg insgesamt weniger Laufleistung als bei der langsamen Einführung der E-Kfz. Das Einsparungspotential durch die geringeren laufleistungsgebundenen Kosten fällt durch die geringere Laufleistung noch geringer aus als bei der langsamen Einführung von E-Kfz. Beide der neu zu bewertenden BS zeigen bei der Verwendung der gleichen Zufallsgeneratoren für alle Replikationen die gleiche Anzahl der n. r. t. P. wie im Vergleichsdurchlauf auf. Durch die Regelungen für die Einfahrtsbeschränkung kann die Hälfte der Fahrzeuge in den Innenstadtring einfahren. Durch die Regelung sind selbst im Fall von EFBen mehr Fahrzeuge verfügbar, als benötigt werden. Erst bei einer weiteren Einschränkung der Zone der EFB werden die Anpassungen der E-Kfz für Belieferungen wirksam bei der Anzahl der n. r. t. P.

Die BS **Cargocap** generiert vergleichsweise hohe laufende Kosten aufgrund der angenommenen Unterhaltskosten der Untergrundanlage. Für den Transport des gegebenen Liefervolumens im Fallbeispiel sind aufgrund der 24 Stunden Arbeitszeit weniger Fahrzeuge für den Transport ausreichend, im Vergleich zum konventionellen Transport auf dem Verkehrsträger Straße im Ein-

Schichtbetrieb. Da die Fahrzeuge weitestgehend autonom fahren, entstehen durch die Verwendung des Drei-Schichtbetriebs nur vergleichsweise geringe Mehrkosten. Bei den hohen Fixkosten ist ein wirtschaftlicher Betrieb allerdings erst ab einem höheren Liefervolumen möglich. Gegen Ende der Versuchslaufzeit treten bei der BS durch das mit der Zeit gestiegene Liefervolumen vereinzelt n. r. t. P. auf. Durch die 24 Stunden Arbeitszeit pro Tag muss auch in den Lagern durchgehend gearbeitet werden. Der Kostenanstieg allein durch die Lagerkosten beläuft sich bei der 24 Stunden Arbeit auf 15 Prozent der gesamten laufenden Kosten. In der weiteren Untersuchung wurden die Anzahl der nötigen Fahrzeuge der Cargocap BS auf ein Optimum von 40 Fahrzeuge bestimmt. Bei der Anzahl von 40 Fahrzeugen treten bei dem im Fallbeispiel zu transportierenden Liefervolumen in keiner der Replikationen n. r. t. P. auf. Eine weitere Steigerung der Fahrzeuganzahl führt durch den Unterhalt der Fahrzeuge zu steigenden laufenden Kosten.

Durch die **Verwendung mehrerer Lager** sinkt die Fahrstrecke und die Fahrzeit ab. Mit der verringerten Fahrzeit werden Arbeitsstunden freigestellt und monetäre Kosten eingespart. Die zusätzlichen Kosten für die Lager sind bei der Verwendung von drei Lagern zunächst geringer als die erzielten Einsparungen bei den Unterhalts- und Fahrkosten. Durch die Verwendung der Lager wird eine Ersparnis an monetären Kosten erzielt. Drei Lager wurden als optimale Anzahl für Lager im Modell bei der Ausgangslage der Routenfahrten ermittelt und werden für die Kombination von BSn verwendet. Selbst bei zwei Lagern ist die Fahrzeitverkürzung gegen Ende des Untersuchungszeitraums ausreichend, um bei den gegebenen Fahrzeugkapazitäten alle Paletten trotz der Schwankungen im Liefervolumen durchgehend transportieren zu können. Die Fahrzeitverkürzung durch die Lager führt im Logistiksystem somit zu einer Erhöhung der Transportkapazität pro Tag. Mit mehr Lagern sinkt die zu fahrende Strecke und Zeit zwar weiter ab, allerdings nur noch in einem kleineren Verhältnis. Die Kosten durch die zusätzlichen Lager steigen weiter an und überwiegen letztendlich die Reduktion der Unterhalts- und Fahrkosten, wenn zu viele Lager verwendet werden.

Die **Konsolidierung** ist eine BS mit der Kosten gesenkt werden sollen, durch das Zusammenlegen von Routenfahrten, Ressourcen und Prozessen mit anderen Logistikdienstleistern. Im Modell konnten mit der Verwendung des bestehenden Lagers als Konsolidierungscenter laufende Kosten eingespart werden. Die eingesparten monetären Kosten sind allerdings mit dem niedrigeren Gewinn zu verrechnen. Durch die grundsätzliche Ähnlichkeit zum Ausgangszustand tritt am Ende des Untersuchungszeitraums der Effekt der zu geringen Transportkapazität auf, bei dem immer öfter nicht alle Schwankungen im zu transportierenden Liefervolumen ausgeglichen werden können. Durch den Effekt steigt die Anzahl der n. r. t. P. auf den gleichen Wert der Ausgangslage an.

Der Einsatz von **Nachtfahrten** wird angenommen, dass Staus keinen Einfluss mehr auf Lieferfahrten auf dem Verkehrsträger Straße haben. Durch den großen Anteil der durch Stau zusätzlich benötigten Zeit verlängert sich die Lieferzeit deutlich. Wenn der Einfluss von Staus nivelliert wird, ist der Effekt im Experiment ausreichend, um die n. r. t. P. zu vermeiden. Durch die verkürzte Fahrzeit können weitere Lieferungsfahrten durchgeführt oder die Anzahl der Fahrzeuge reduziert werden. Eine ähnlich wirkende BS wurde mit der **Schaffung verbesserte Lieferbedingungen** implementiert, die auf die Verwendung exklusiver Fahrspuren und Ladebuchten abzielt. Für die BS wird angenommen, dass sowohl Staus keinen Einfluss auf die Fahrten haben, als auch eine verkürzte Entladezeit beim Entladen vorliegt. Durch die verkürzten Lieferzeiten entsteht ein

weiteres Freisetzungspotential an Arbeitszeit, wodurch die laufenden Kosten im Vergleich zur Ausgangslage sinken. Für die Umsetzung ist vornehmlich nicht das Unternehmen, sondern die Politik verantwortlich. Die Untersuchung der BS findet trotzdem statt, um zu untersuchen, ob Lobbyarbeit für eine Durchsetzung als lohnend einzustufen ist.

Die BS **Mehrschichtbetrieb** ermöglicht durch die Anpassung der Arbeitszeit bei gleicher Anzahl von Fahrzeugen eine Erhöhung der Transportkapazität des Logistiksystems zu erreichen. Beim Experiment des Zwei-Schichtbetriebes werden im Vergleich zur Ausgangslage zusätzliche Kosten verursacht. Durch die erhöhte Transportkapazität während des Untersuchungszeitraums keine n. r. t. P auf. Im Vergleich zur Ausgangslage der Routenfahrten steigt die Transportkapazität so weit, dass ein Großteil der Transportkapazität gar nicht gebraucht wird und die Mehrkosten für den Zwei-Schichtbetrieb einen bedeutenden Teil der gesamten laufenden Kosten ausmachen. Der Drei-Schichtbetrieb ist analog zu betrachten und für den Ausgangsfall der Routenfahrten eine zu weitgreifende Maßnahme deren Kosten nicht im Verhältnis zum Nutzen stehen. Zur Reduktion der n. r. t. P bei der Kombination von BSn ist der Mehrschichtbetrieb als effektive Maßnahme zu berücksichtigen.

Neben der kontinuierlichen Anpassung der Größe des FPs ist mit der **einmaligen Anpassung der FPs** eine weitere BS gegeben. Durch die Analyse der Größe des FPs können Abwägung zwischen dem für die laufenden Kosten günstigsten Fall und der Vermeidung von n. r. t. P. getroffen werden. Die gegebene Anzahl an Fahrzeugen zum Ausgangzeitpunkt wird aufgrund der Abwägung zwischen n. r. t. P und laufenden Kosten allerdings als zielführend angesehen. Während weniger Fahrzeuge geringere Kosten verursachen, steigt die Anzahl der n. r. t. P. an, wodurch die Liefertreue deutlich absinkt.

Bei den gegebenen Ausgangsbedingungen zeigt die **Verschärfung der Grenzwerte** nur einen sehr begrenzten Einfluss. Bei 29 Prozent der Ziele in der Zone der EFB können auch im Einschränkungsfall ausreichend Fahrzeuge das Liefervolumen an alle Ziele transportieren. Analog zu den zuvor bewerteten E-Kfz BSn bleibt das Verhältnis der n. r. t. P. so groß wie im Vergleichsdurchlauf der Ausgangslage.

Im Gegensatz der Verschärfung der SGWe steigt bei der **Vergrößerung der Zone der Einfahrbeschränkung** die Zahl der n. r. t. P. deutlich an. Während zuvor 50 Prozent der Kfz in die Zone der EFB im Fall überschrittener SGWe einfahren konnten, wird ein Anteil von durchschnittlich 29 Prozent der Ziele in der Zone der EFB pro Tag angefahren. Steigt der Anteil der Ziele aufgrund der als wahrscheinlich erachteten Verschärfungen über 50 Prozent an, entstehen bei EFB Engpässe bei der Transportkapazität für das zu transportierende Liefervolumen. Mit der steigenden Anzahl der n. r. t. P. steigen ebenfalls die laufenden Kosten an, aufgrund der fälligen Strafzahlungen pro Palette. Die zuvor vorgestellten Maßnahmen der E-Kfz sind in Kombinationen mit der Verschärfung der Zone der EFB aufgrund ihrer Einfahrerlaubnis besonders relevant.

Durch die Untersuchungen der nachfolgenden BSn in Kombination miteinander konnten im Vergleich zu den einzelnen BSn die laufenden Kosten reduziert werden, bei einem gleichzeitig akzeptablen oder verbesserten Verhältnis der Liefertreue.

Zum einen wurde durch die Anpassung der Fahrzeugkapazität, die Fahrzeuge bis zum ersten Anpassungszyklus von Hand abgesenkt, um die Kosten marginal weiter zu senken. Aufbauen darauf werden Nachfahrten und verbesserte Lieferbedingungen schrittweise zusammen kombi-

niert und bewertet. Da bei der Kombination der Maßnahmen keine vollwertige Liefertreue gewährleistet werden kann, wurde ebenfalls ein Zwei- und Drei-Schichtsystem in Kombination mit den vorherigen BS_n bewertet. Der Umstand das n. r. t. P. bei der Kombination auftreten ist auf die regelmäßige Anpassung der Größe des FP_s zurückzuführen. Während die Transportkapazität durch Mehrschichtbetrieb vergrößert wird, entsteht ein verringerter Bedarf an Fahrzeugen im System. Mit der Anpassung der Größe des FP_s wird die Größe des FP_s an den Bedarf angepasst und der Effekt des Mehrschichtbetriebs auf die Transportkapazität ausgeglichen. Der Mehrschichtbetrieb eignet sich nach den Ergebniswerten nicht zur Verbesserung der Liefertreue in Kombination mit der regelmäßigen Anpassung der Größe des FP_s. Durch die im Experiment verringerte Anzahl der benötigten Fahrzeuge sinken die Unterhaltskosten. Dagegen steigen die Lagerkosten, weil eine längere Arbeitszeit im Lager notwendig wird. Ein Verbesserungseffekt der Fahrzeuganpassung und dem Mehrschichtbetrieb entsteht durch den festen Kostenanteil erst bei einem deutlich größeren Transportvolumen, bei dem die Lagerkosten durch die Mehrschichtarbeit geringer sind als die Einsparung der Unterhaltskosten des FP_s.

Die Verwendung von mehreren Lagern mit der Konsolidierung ist eine geeignete Kombination von BS_n im Kontext der Reduzierung der laufenden Kosten. In Kombination mit dem verringerten FP, der regelmäßigen Fuhrparkanpassung und den verbesserten Lieferbedingungen wird das in der Bewertung beste Ergebnis für die laufenden Kosten erreicht. Die Werte für die n. r. t. P. sind gleichzeitig niedrig, was auf eine hohe Liefertreue hindeutet. Selbst ohne Konsolidierung werden bei beiden Bewertungskriterien gute Ergebnisse erzielt. Die Kombination der einzelnen BS_n wird für die Ausgangslage der Routenfahrten als optimale Anpassung angesehen.

Bei der Annahme der verschärften SGW_e in Kombination mit einer Vergrößerung der Zone für EF_B_n verändern sich die Randbedingungen enorm. Gegen Ende des Untersuchungszeitraums häufen sich EF_B_n an. Im Experiment ist der FP des Vergleichsdurchlaufs über einen längeren Zeitraum nicht groß genug, um das gesamte Transportvolumen zu transportieren. Durch die exponentiell wachsende Anzahl von n. r. t. P. steigen auch die Strafzahlungen an. Für die weitere Bewertung im Kontext einer „Was ist, wenn...“ Situation wird das Szenario einer deutlich erweiterten Zone der EF_B und reduzierten SGW verwendet. Für die weitere Analyse ist zu bewerten, welche BS_n effektiv gegen die Problemstellung der neuen Ausgangssituation anzuwenden sind.

Die Einführung einer E-Kfz-Quote führt bei der Ausgangsstellung zu einer geringeren Zahl von n. r. t. P. und durch die in der Folge fehlenden Strafzahlungen auch zu deutlich geringeren laufenden Kosten. Im Gegensatz zur ersten Bewertung einer E-Kfz-Quote macht für den verschärften Untersuchungsfall die Einführung der Quote Sinn für eine Verbesserung der logistischen Abläufe. Durch die verschärften EF_B_n und verschärften SGW entsteht gegen Ende des Untersuchungszeitraums immer noch ein signifikanter Rückstau an n. r. t. P. Mit der Einführung einer höheren Quote von 50 Prozent der Fahrzeuge als E-Kfz ist die Anzahl der n. r. t. P. und die laufenden Kosten weiter verringert worden. Am Ende des Untersuchungszeitraums entsteht bei der 50 Prozent E-Kfz-Quote kein Rückstau mehr an n. r. t. P. Die Umstellung des FP_s auf E-Kfz zeigt dagegen eine noch effektivere Wirkung die laufenden Kosten abzusenken. Gegen Ende des Untersuchungszeitraums sind mit 80 E-Kfz bei der langsamen Umstellung auf E-Kfz insgesamt 24 Kfz mehr im FP als bei der zuvor bewerteten E-Kfz-Quote mit 50 Prozent. Die Kosten für die Einführung sind im Modell nicht mitberücksichtigt worden und werden im PBV betrachtet. Als

Maßnahme gegen die EFBen im Kontext der E-Kfz-Verwendung wird für die weiteren Bewertungen, die langsame E-Kfz Einführung gewählt.

Eine erneute Kombination der E-Kfz-Umstellung mit den zuvor erarbeiteten BSn für eine Reduzierung der laufenden Kosten verwendet. Die Kombination von mehreren Lagern, dem Start mit weniger Fahrzeugen und einer regelmäßigen Fuhrparkanpassung führt auch in diesem Fall zu einem signifikant besseren Ergebnis im Kontext der laufenden Kosten. Durch die Fuhrparkanpassung ist in diesem Experiment auch eine weitere Senkung der n. r. t. P. möglich. Ein Zwei-Schichtbetrieb ist in diesem Kontext dagegen nicht als sinnvoll anzusehen, genau wie die Verwendung von Direktbelieferungen.

Statistische Ergebnisuntersuchung

Die Simulationsergebnisse zur Bewertung der BSn wurden mit ihren Replikationen statisch untersucht, um die Eindeutigkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Die Ergebniswerte der einzelnen Replikationen sind im Anhang 46 mit den Verweisliste im Anhang 43 und Anhang 44 einsehbar. Die Untersuchungsergebnisse für die statistische Signifikanz sind im Anhang 47 bis Anhang 62 angefügt. Nachfolgend werden nur einzelnen Ergebnisse mit besonderer Bedeutung oder statistisch relevanten Schwankungen näher erläutert und explizit auf die jeweilige Abbildung verwiesen. Für das Erreichen einer guten Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit bei der Kombination mehrerer BSn wird mit einer Verweisnummertabelle gearbeitet. Die jeweiligen verwendeten BSn bei den Kombinationen sind in Anhang 54 einsehbar.

Die grundlegenden BSn mit ihren Ergebnissen und der statistischen Streuung sind in der Grafik in Anhang 47 ersichtlich. Wie zuvor in der Simulation ersichtlich wurde, ist die Direktbelieferung kostenintensiver als der Vergleichsdurchlauf. Ebenso sind Mehrschichtbetriebe teurer. Auffallend ist, dass bei der Verwendung von weniger Fahrzeugen die Ungenauigkeit für das Ergebnis der laufenden Kosten ansteigt. Bei zu wenigen Fahrzeugen ist eine signifikante Aussage zu Ergebnissen nicht möglich. Im Zusammenhang mit Zufallsschwankungen in mehreren Entitäten entstehen bei zu geringen Transportkapazitäten starke Kostenschwankungen.

Im Kontext der Bewertungen der Anpassung der Größe des FPs ist mit hoher Wahrscheinlichkeit eine genauere Aussage zu den erwartbaren Werten möglich, wenn mehr Fahrzeuge verwendet werden. Bei der Verwendung von 100 Fahrzeugen ist keine sichere Aussage zu den laufenden Kosten möglich (Anhang 48). Begründet sind die Kostenschwankungen bei einer Reduktion der Anzahl von Fahrzeugen mit den auftretenden hohen Schwankungen im Liefervolumen. Bei einem höheren zu transportierenden Liefervolumen stehen bei 100 Fahrzeugen öfter keine ausreichende Transportkapazität zur Verfügung. Die Strafzahlungen für die n. r. t. P. führen im Anschluss zu der möglichen Kostensteigerung. Da die Schwankungen mit zufallsgenerierten Werten zusammenhängen, steigt nicht nur der Mittelwert, sondern auch die Streuung der Werte deutlich an. Dieser Umstand wird in der Abbildung für die n. r. t. P. im Kontext der Anzahl der Fahrzeuge im Anhang 59 ebenfalls ersichtlich. Bei der BS Cargocap wirken ebenfalls die Schwankungen beim Liefervolumen. Eine genaue Ermittlung der optimalen Fahrzeuggröße ist aufgrund der großen Ungenauigkeit nicht weiter möglich (Anhang 49). Als erster Wert für die ermittelte Anzahl der Fahrzeuge mit geringer Streuung werden daher 40 Fahrzeuge als optimaler Wert bei gegebenen Liefervolumen für das Fallbeispiel angenommen. Das Modellverhalten der statistisch erhöhten Schwankungen bei zu wenigen Fahrzeugen ist auch bei den Konfidenzinter-

vallen bei der regelmäßigen Kapazitätsanpassung zu erkennen. Wie beschrieben, sinkt der Fahrzeugbedarf bei kleineren Intervallen für die Anpassung der FP-Größe ab und führt zu einer steigenden Anzahl von n. r. t. P. Die Diagramme in Anhang 50 und Anhang 61 bestätigen die Entwicklung der erhöhten Schwankungen für besonders kleinen Anpassungszyklen. Für den besonders stark ausgeprägten Unterschied bei n. r. t. P. bei 24 Kapazitätsanpassungen pro Jahr im Vergleich zu weniger Anpassungen pro Jahr wird angenommen, dass der drastische Unterschied auf die zyklischen Schwankungen beim Liefervolumen zurückgeführt werden, die bei 24 Kapazitätsanpassungen pro Jahr nicht mehr berücksichtigt werden. Das Diagramm in Anhang 52 zeigt die statistische Signifikanz bei der Unterscheidung der Größe der Einfahrbeschränkungszone auf. Wie beschrieben, liegen die Ergebniswerte bei den laufenden Kosten des Vergleichsdurchlaufs und die Anhebung des Anteils der Ziele in der Zone der EFB auf einen Anteil von 58 Prozent nah beieinander. Da mindestens 50 Prozent der Kfz beim Fahrverbot in die beschränkte Zone einfahren dürfen, kann in beiden Fällen mit einem Wechsel der verfügbaren Fahrzeuge eine Belieferung der Ziele gewährleistet werden. Erst bei einer weiteren Verschärfung entstehen Engpässe bei den verfügbaren Kfz im Fall von Tagen mit einer gültigen EFBen. Bei der weiteren Verschärfung steigt nicht nur der Wert für die laufenden Kosten weiter an, sondern auch die möglichen Schwankungen, die nach dem 95 Prozent Intervall wahrscheinlich sind. Aufgrund der großen Schwankung ist eine genaue Aussage zu den zu erwartenden laufenden Kosten bei einer weiteren Verschärfung nicht sicher möglich. Ein Erreichen der zuvor ermittelten laufenden Kosten ohne Verschärfung liegt ebenfalls im möglichen Bereich. Der Effekt der starken Schwankungen wird auf die mit steigendem Anteil der Ziele in der Einfahrbeschränkungszone relevanten EFBen zurückgeführt. Das Konfidenzdiagramm in Anhang 55 zeigt die laufenden Kosten der einzelnen BS-Kombinationen und der zu erwartenden Ungenauigkeit für die Ergebnisse (Die zugehörige Verweistabelle ist in Anhang 54 einsehbar). Besonders hohe Ungenauigkeiten, neben den bereits beschriebenen, wurden nicht identifiziert. Während die Ergebnisse der Simulation bereits beschrieben wurden, ist mit dem Diagramm eine gute Übersicht zu den Effekten der einzelnen BS-Kombinationen auf die messbaren Bewertungskriterien möglich. Neben den laufenden Kosten wurden Konfidenzintervalle auch für die n. r. t. P. erstellt. Ein Teil der BSn führt zu einem ausreichenden Maß an Überkapazitäten bei den Transportkapazitäten, um Liefervolumenschwankungen dauerhaft auszugleichen. Beim anderen Teil der BSn wird dagegen immer eine hohe Streuung der Ergebnisse identifiziert, die auf die hohe Schwankung beim Liefervolumen bei nicht ausreichenden Transportkapazitäten zurückgeführt werden. Zu erkennen ist dieser Sachverhalt in der Abbildung in Anhang 56. Die Bewertung auf Basis der n. r. t. P. besitzt aufgrund der hohen Ungenauigkeit nur eine geringe Aussagekraft. Bei dem Konfidenzintervalldiagramm für die n. r. t. P. bei der Kombination der einzelnen BSn sind die Ergebnisse in Anhang 57 dargestellt. Ein Vergleich der BSn mit der Ausgangslage bei der Verschärfung für EFBen wurde in Anhang 58 angefügt. Die Ausgangssituation der Fälle 13 und 14 verursacht viele n. r. t. P. mit einer hohen Ungenauigkeit und wurden daher getrennt dargestellt. Die BSn 12, 15 und 16 führen ebenfalls zu einer höheren Anzahl von n. r. t. P. im Vergleich zur Ausgangslage mit Routenfahrten. Analog wie bei der Betrachtung der einzelnen BSn wächst bei der Kombination mehrerer BSn die Ungenauigkeit mit der steigenden Anzahl der n. r. t. P. weiter an. Statistisch sind eindeutige Ergebnisse bei den BS-Kombinationen aufgrund der Überschneidung der einzelnen Ergebnisse nah an ihrem Konfidenzintervall nicht sicher möglich. Die Kombination der BSn mit weiteren führte allerdings zu einem

prozessstabilisierenden Ergebnis, wodurch auch für die einzelnen Kombinationen, deren Mittelwert unter dem Vergleichsdurchlauf liegt, eine leichte prozessstabilisierende Wirkung angenommen wird. Zu beachten ist, dass die Annahme nur gültig ist, wenn die für die gegebenen Randbedingungen ermittelten optimalen Eingangsfaktoren verwendet werden. Zu den Eingangsfaktoren gehören die Eingangsfaktoren der FP-Größe, Lageranzahl und die Anzahl der Zyklen für die Kapazitätsanpassung pro Jahr (Anhang 57). Mit wachsender Anzahl an Lieferfahrzeugen steigt die Transportkapazität an. Eine hohe Transportkapazität, die über dem durchschnittlichen Bedarf liegt, kann im benötigten Fall Schwankungen besser bewältigen und weniger oder gar keine n. r. t. P. aufkommen lassen. Die Abbildung in Anhang 60 verdeutlicht diesen Sachverhalt eingängig für die Cargocap BS. Mit der Anzahl der n. r. t. P. unterliegen die Ergebnisse größeren Schwankungen bei den laufenden Kosten, was die zu erwartenden Ergebnisse angeht. Für ein Unternehmen ist eine Abwägung nötig zu im Durchschnitt günstigeren BSn, bei teilweise schlechterer Liefertreue und höheren durchschnittlichen laufenden Kosten mit einer besseren Planbarkeit bei einer gleichzeitig besseren Liefertreue. Fahrverbote haben einen großen Einfluss auf n. r. t. P., bei einem wachsenden Anteil der Ziele innerhalb der Zone der EFB. Werden zusätzlich die SGW reduziert, steigt die Anzahl der n. r. t. P. weiter an, da der Fall von EFBen häufiger auftritt. Das Konfidenzintervall im Anhang 62 zeigt diesen Zusammenhang mit den zugehörigen Schwankungen bei den Ergebniswerten auf. Bei der Kombination der SGW-Reduzierung und der 84 Prozent der Ziele in der Zone der EFB sinken durch das häufige Auftreten von Einfahrbeschränkungsfällen dagegen die Schwankungen weiter ab. Der Status der EFBen wird zunehmend zum Normalzustand. Durch die gegebenen Randbedingungen bei der Einfahrerlaubnis ist der Anteil der Ziele von 58 Prozent noch ausreichend klein, um nur wenige n. r. t. P. in signifikanter Stückzahl zu erwirken.

Die statistische Untersuchung der Simulationsergebnisse hat keine Auffälligkeiten gezeigt, die nicht schon vorher angenommen wurden. Bei den Ergebniswerten der BS mit niedriger Liefertreue sind aufgrund der starken Schwankungen weitere Schlüsse aus den Ergebnissen nicht sicher möglich. Aufgrund der proportional verlaufenden Mittelwerte wird trotzdem eine potentielle Abschätzbarkeit durch die Ergebniswerte angenommen. Die Ergebnisse werden für das weitere Vorgehen in dem PBV verwendet.

Bepunktung der Simulationsergebnisse

Um die ermittelten Simulationsergebnisse der messbaren Bewertungskriterien für das PBV verwenden zu können müssen die Werte umgewandelt werden. Die Umwandlung der Simulationsergebnisse wird mit der in Tabelle 6.10 aufgeführten Skala durchgeführt. Die Ergebnisse der messbaren Bewertungskriterien aus den Simulationsergebnissen in Anhang 45 sind mit der dargestellten Skala umgewandelt worden und in die Bewertungstabelle des PBV (Tabelle 6.12) eingefügt worden.

Priorisierung der Bewertungskriterien

Für die Durchführung des PBV ist die Priorisierung der einzelnen Bewertungskriterien nötig. Nachfolgend wird eine Einteilung der Priorität zu einzelnen Bewertungskriterien vorgenommen. Für das Unternehmen wird angenommen, dass ein wirtschaftlicher Betrieb mit möglichst kostengünstigen Abläufen bei der Bewertung Vorrang hat, weshalb das Bewertungskriterium der laufenden Kosten mit einer hohen Priorität bepunktet wird. Die Investitionskosten werden dagegen im Mittelfeld der Priorität angegeben, da angenommen wird, dass ein hohes Investitionskapital

zur Verfügung steht, solange sich die Maßnahme zeitig amortisiert. Für die Verwendung einer BS ist die zeitige Einführbarkeit und nachhaltige Verwendbarkeit ebenfalls bedeutend. Neue Technologien sind verwendbar, aber mit Risiken verbunden. Eine Gesetzesänderung kann Investitionen obsolet werden lassen. Daher werden die Ausgereiftheit und Zukunftsfähigkeit als ein durchaus zu beachtendes Bewertungskriterium in die Priorität aufgenommen. Das Auftauchen von organisatorischen Problemen, wie beispielsweise die große Freistellung von Arbeitnehmern bei der Einführung von autonomen Lieferfahrzeugen kann zu einem Imageverlust und Protesten führen. Im Sinne des Unternehmens sind die Risiken dagegen zu minimieren. Das Bewertungskriterium wird daher als wichtiges Bewertungskriterium eingeschätzt. Die Umsetzung der Priorisierung mit Punkten ist in Tabelle 6.11 einsehbar.

Tabelle 6.10: Kennzahlen und ihre Bepunktung für die Bewertung im Fallbeispiel.

Bewertungs- kriterium	Faktorausprägung (Schlecht = 1, Gut = 9)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Laufende Kosten (Mio. €)	]108 -120]	]97 -108]	]86 -97]	]74 -86]	]63 -74]	]52 -63]	]41 -52]	]30 -41]	]00 -30]
Verspätete Paletten (Tausend. Paletten)	]∞ -25]	]16 -25]	]10 -16]	]06 -10]	]03 -06]	]01 -03]	]00,2 -01]	]00 -0,2]	]00]
Auslastung der Fahrzeuge (Prozent)	]00 -08]	]8 -16]	]16 -24]	]24 -32]	]32 -40]	]40 -48]	]48 -56]	]56 -64]	]64 -100]

Tabelle 6.11: Priorisierung der Bewertungskriterien für die Bewertung im Fallbeispiel.

Bewertungskriterien	Priorität	Priorität:
Liefertreue	8	1 = Niedrig
Laufende Kosten	9	9 = Hoch
Investitionskosten	6	
Ausgereifte strategische Maßnahme	6	
Zukunftsfähigkeit	5	
Auslastung der Fahrzeuge	2	
Nutzungsmöglichkeiten von Vorteilen	3	
Organisatorische Probleme	7	
Wirtschaftlicher Betrieb trotz Gesetzesverschärfung	6	
Rechtliche Herausforderungen bei der Umstellung	6	

Punktbewertungsverfahren

Nachdem die messbaren Bewertungskriterien umgewandelt wurden und zusammen mit der Priorisierung der Bewertungskriterien in die Tabelle des PBV aufgenommen wurden, ist die Erfüllung der nicht messbaren Bewertungskriterien noch offen. Nachfolgend wird die Erfüllung der Bewertungskriterien durch die einzelnen näher BS behandelt.

Bestehende Belieferungsstrategie

Die bestehende Belieferungsstrategie der **Routenfahrten** dient als Ausgangslage für die weitere Abschätzung der neuen zu bewertenden BSn. Im Folgenden wird daher gesondert die Ausgangslage der Bepunktung der subjektiven Kriterien bei der BS erläutert, bevor auf die neuen zu bewertenden BSn eingegangen wird. Die Bepunktung der weiteren BSn basiert grundsätzlich auf dem Vergleich zur Ausgangslage der Routenfahrten.

Bei der weiteren Verwendung der Routenfahrten sind keine weiteren Investitionskosten nötig. Die Maßnahme wird bereits verwendet, weswegen ein ausgereifter Prozess für die Belieferung anzunehmen wird. Die Strategie wird aufgrund der wahrscheinlichen Verschärfungen der

EFBen oder der Reduzierung der Grenzwerte als nur bedingt zukunftsfähig angenommen. Wenn für alternative Antriebskonzepte mit Vorteilen wie E-Kfz Spuren Anreize für einen Fahrzeugwechsel geschaffen werden sollen, ist die BS von den Vorteilen ausgeschlossen. Die BS setzt ebenfalls keine Anreize an die Politik oder den Kunden etwaige Vorteile für die Prozesse des Logistikdienstleisters zu erarbeiten. Organisatorische Probleme bei der Einführung sind ausgeschlossen. Aufgrund der gegen Ende des Untersuchungszeitraums wachsenden n. r. t. P. werden bei der BS nur reduzierte Punkte beim Bewertungskriterium der Organisation gegeben. Der Effekt der aufstauenden Paletten würde sich bei einer Verschärfung der Zone der EFB weiter vergrößern. Der wirtschaftliche Betrieb wäre im Fall von Gesetztes Verschärfungen nicht gesichert und wird daher entsprechend niedrig bepunktet.

Durch das Zusammenlegen der Ziele auf einer Route kann das Transportvolumen des Fahrzeugs effektiver ausgenutzt werden und die Anzahl der Rückfahrten zum Lager für eine Neubeladung geringhalten. Die aufbereiteten Daten des Unternehmens wurden für die Auslegung der Routenplanung übernommen. Eine Bewertung wie die Ziele auf einer Route zusammengestellt worden sind, ist aufgrund der Datenlage nicht durchgeführt worden. Aus den gegebenen Daten ist nicht erkenntlich geworden, wie die Zusammenstellung der Routen durchgeführt worden ist. Sowohl bei der Routenplanungen nach der Transportkapazität eines Fahrzeugs als auch gegen die Routenplanungen nach der Schichtlänge liegen Gegenbeispiele in den Datensätzen vor. Wenn bei den Routenfahrten ohnehin Rückfahrten zum Lager notwendig sind, ist eine Verlängerung der Routenfahrten auf die Arbeitsschicht als zielführender anzunehmen, als das Anfangen einer neuen Routenfahrt. Eine weiterführende Analyse der Routenzusammenstellung nach der Schichtlänge oder der Transportkapazität des jeweiligen Fahrzeugs mit zusätzlichen Daten vom Unternehmen wäre daher als sinnvoll zu erachten.

Neue Belieferungsstrategien

Für **Direktbelieferungen** sind nur geringe Anpassungen im Unternehmen nötig. Die Investitionskosten werden als sehr gering eingeschätzt. Die Zukunftssicherheit ist durch die höhere Transportkapazität besser als die Ausgangslage mit Routenfahrten. Bei Verschärfungen der EFB ist aber auch die Direktbelieferung als nicht zukunftsfähig einzustufen. In diesem Fall entstehen analog wie bei den Routenfahrten gegen Ende des Untersuchungszeitraums eine erhöhte Anzahl von n. r. t. P., was organisatorische Probleme aufzeigt. Der Umstand das Direktbelieferungen effizienter für die Belieferungen als Routenfahrten sind, ist unerwartet, da bei Direktbelieferungen keine Einsparungseffekte bei der Strecke und der Fahrzeit wirken. Bei der Bewertung der Routenfahrten wurden die Routenziele aus den Daten übernommen und die schnellste Route der einzelnen Strecken bestimmt. Eine Untersuchung der Zusammenstellung der Routenfahrten wurde als nicht notwendig angenommen. Das Ergebnis der Direktbelieferungen deutet darauf hin, dass eine weiterführende Untersuchung der Routenzusammenstellung als sinnvoll zu erbrachten ist.

Für **Fuhrparkanpassungen** ist Kapital für die weitere Anschaffung von Fahrzeugen zurückzuhalten. Da die Investitionen über den Untersuchungszeitraum verteilt erfolgen werden die Investitionskosten als bedeutend, aber nicht übermäßig hoch eingestuft. Die Anpassungen sorgen für eine hohe Zukunftsfähigkeit durch die an den Bedarf geregelte Bereitstellung der Fahrzeuge. Als voll ausgereift wird die BS dagegen noch nicht eingeschätzt, da Vertriebswege für das Kaufen und Verkaufen von Fahrzeugen erst erarbeitet werden müssen. Die Verwendung eines lokalen

Fahrzeugmarktes erscheint unrealistisch, da alle Logistikdienstleister unmittelbar auf diesen Fahrzeugmarkt zugreifen und die Nachfrage die Preise signifikant beeinflussen würden. Die BS wird daher als nur bedingt ausgereift eingestuft. Durch die Anpassung ist ein wirtschaftlicher Betrieb auch trotz der Gesetzesverschärfung möglich. Der FP wird beim nächsten Anpassungsintervall entsprechend dem geänderten Bedarf erhöht.

Die **langsame Umstellung auf E-Kfz** wird durch die hohen Kosten der E-Kfz im Vergleich zur Anschaffung klassischer Verbrenner Kfz als teurer eingeschätzt. Da die Investitionskosten für die E-Kfz über den Untersuchungsraum verteilt benötigt werden sind sie im mittleren Punktbereich eingestuft worden. Für die Zukunft wird der Betrieb trotz Gesetzesänderungen als weiterhin wirtschaftlich eingestuft. Aufgrund der neuen Technik werden aber strategische und organisatorische Probleme mit der neuen BS erwartet. Bei der Verwendung einer neuen Technologie sind die rechtlichen Randbedingungen oftmals noch nicht fest und können zu Fehlinvestitionen führen. Für die Verwendung von E-Kfz wurde die Nutzung von Vorteilen im Straßenverkehr angenommen. Auch wenn zum Untersuchungsbeginn keine derartigen exklusiven Vorteile für E-Kfz vorliegen, werden sie für die Zukunft als wahrscheinlich eingestuft und daher mit in die Bepunktung aufgenommen. Im Fallbeispiel gilt für die Integration von E-Lkw ein Sonderfall, durch die in der Stadt mögliche Oberleitungsabnahme von Elektrizität. Mit der Oberleitung ist eine vergleichsweise einfach zu integrierende Möglichkeit gegeben, die eine zeitlich effektive und kostengünstige Verwendung der Fahrzeuge ermöglicht. Das Aufladen der E-Lkw während der Fahrt ermöglicht eine Vergrößerung der Reichweite der FPFs. Durch historisch gewachsene Bahnnetze ist die Oberleitung nicht genormt. Durch unterschiedliche Spannungen in der Oberleitung ist ein Wechsel von Auftragsgebieten nur bedingt möglich. Die Kapazitätsanpassung im FP ist durch den Sonderaufbau als nicht realistisch einzustufen. Die Verwendung von E-Lkw auf Lokal begrenzter Ebene bietet dagegen die beschriebenen Vorteile. Im Gegensatz zu der BS der langsamen Umstellung auf E-Kfz wird bei der BS der **schlagartigen Umstellung des Fuhrparks auf 25 Prozent E-Kfz** ein hohes Investitionsvolumen benötigt. Da bei der BS weniger Fahrzeuge umgerüstet werden, wird die BS als nicht so zukunftsfähig eingeschätzt wie die langsame Umstellung auf E-Kfz. Durch die schlagartige Umstellung werden organisatorische Probleme schwerer zu handhaben sein, weil Probleme in größerer Zahl auftreten und bei dem schlagartig großen Anteil der Fahrzeuge schnell behoben werden müssen.

Das **Cargocap Kleinstzug Konzept** ist eine grundlegend andere BS im Vergleich zur Ausgangslage mit Belieferungen durch Routenfahrten auf dem Verkehrsträger Straße. Für die Umstellung ist mit sehr hohen Investitionskosten, für den Bau der Fahrstrecke und die Anschaffung der Fahrzeuge, zu rechnen. Aufgrund der grundlegend neuen BS mit neuen Techniken, die noch nicht praxiserprobt sind, wird nicht von einer ausgereiften strategischen Maßnahme ausgegangen. Die Zukunftsfähigkeit des Konzepts wird dagegen als hoch eingeschätzt, da die BS abgesehen vom Strompreis unabhängig von äußeren Randbedingungen wie gesetzlichen Auflagen, EFBen etc. ist. Durch die Automatisierung ist ebenfalls in Teilen eine Abkopplung von den Lohnkosten möglich. Durch die Umstellung auf ein automatisiertes Verfahren ist durch die Freistellung von Arbeitnehmern dagegen mit organisatorischen Problemen in Form von Protesten zu rechnen.

Bei der BS mit **drei Lagerstandorten** wird nicht von einem Kauf, sondern der Miete der entsprechenden Immobilien ausgegangen. Bei den Investitionskosten wird daher nur die Lager-

ausstattung berücksichtigt und die Kosten als vergleichsweise niedrig eingestuft. Die Lagerplanung wird als ein gängiger Vorgang angenommen und als ausgereifte Maßnahme eingestuft. Lediglich die Neuplanung der Routenfahrten bei der BS erfordert zusätzliches Fachwissen und führt daher zu einem Punktabzug in der Bepunktung der BS. Durch den hohen Einfluss auf der BS auf die Fahrzeit und die verbesserte Transportkapazität pro Tag wird die BS als zukunftsfähig eingestuft.

Bei einer BS mit der **Konsolidierung** in den Lagern werden Aufträge anderer Logistikdienstleister im Lager verarbeitet und durch die vom untersuchten Unternehmen vorhandene Infrastruktur weitergeleitet. Für die Investitionskosten wird nur die zusätzliche Lagerausstattung für das Sortieren der Zustellungen eingerechnet wodurch vergleichsweise wenig Kosten entstehen. Durch die Teilung der Aufgabenbereiche sind Schnittstellenprobleme und Kostenrechnungen zwischen unterschiedlichen Logistikdienstleistern zu lösen, die Konfliktpotential bieten. Die Maßnahme wird daher bei der strategischen Ausgereiftheit in das gehobene Mittelfeld eingestuft. Durch Kostenersparnisse bei redundanten Abläufen wird die Maßnahme aber als zukunftsfähig für einen wirtschaftlichen Betrieb eingeschätzt. Als alleinige Maßnahme zur Prozessstabilisierung ist die BS im Ausgangszustand aufgrund der fehlenden Lösung des Problems mit der geringen Liefertreue am Ende des Untersuchungszeitraums nicht einzustufen.

Mit **Nachtfahrten** wird die bestehende BS leicht variiert. Für die Anpassung sind keine Investitionskosten anzunehmen. Aufgrund von möglichen Problemen bei der Umsetzung der Anlieferung in der Nacht wird nicht von einer vollkommen ausgereiften strategischen Maßnahme ausgegangen. Die BS führt zu einer leichten Verbesserung bei den Werten des Bewertungskriteriums der n. r. t. P. Da am Ende des Untersuchungszeitraums bei der BS Nachtfahrten immer noch der abgeschwächte Effekt, der gehäuft auftretenden n. r. t. P. auftritt, wird die Zukunftssicherheit nur als bedingt zukunftsfähig eingestuft. Aufgrund des in der Stadt zunehmenden kritisierten Schallemissionen ist bei der BS eine Gesetzesverschärfung möglich, die den wirtschaftlichen Betrieb durch zusätzliche Auflagen beeinträchtigen könnten.

Eine weitergreifende BS wird mit der **Schaffung verbesserter Lieferbedingungen** gegeben. Im Gegensatz zu der BS der Nachtfahrten sind bei der Schaffung besserer Lieferbedingungen auch Investitionskosten vorzusehen, um Lobbyarbeit bei der Politik zu leisten oder bessere Lieferbedingungen beim Logistikkunden zu schaffen. Da für die Schaffung der verbesserten Lieferbedingungen keine konkreten Vorgehenspläne verfügbar sind und individuell erarbeitet werden müssen, wird die BS nicht als ausgereifte strategische Maßnahme eingeschätzt. Sollten verbesserte Lieferbedingungen einmal in die Distributionsabläufe integriert worden sein, ist eine dauerhafte Verwendung von beispielsweise exklusiven Fahrspuren oder frei zu haltenden Ladebuchten ohne Zusatzkosten möglich. Durch die BS ist im Untersuchungszeitraum ein Betrieb durch die prozessstabilisierende Wirkung wirtschaftlich und in der Zukunft weiter möglich.

Bei der BS des **Mehrschichtbetriebes** wurde der Zwei-Schichtbetrieb für die Bewertung ausgewählt. Während keine Investitionskosten für die Umstellung angenommen werden, ist von organisatorischen Problemen bei der Umstellung auszugehen. Aufgrund der erhöhten Transportkapazität pro Tag wird von einer im Untersuchungszeitraum zukunftsfähigen BS ausgegangen. Große organisatorische Probleme werden bei der Umstellung auf den Mehrschichtbetrieb nicht erwartet.

Die **einmalige Anpassung der Fuhrparkkapazität** ist ebenfalls eine mögliche vom Ausgangszustand modifizierte BS. Bei der Bewertung wird der Experimentdurchlauf mit 120 Fahrzeugen verwendet. Durch die höhere Transportkapazität pro Tag kann der Effekt der n. r. t. P. gegen Ende des Untersuchungszeitraums abgeschwächt werden und die BS erreicht bessere Werte bei den laufenden Kosten und n. r. t. P. Dagegen sind für die Anschaffung der zusätzlichen Fahrzeuge Investitionskosten notwendig. Die grundsätzlichen Probleme bei einer Verschärfung der Randbedingungen für die EFB ist mit der BS nicht lösbar.

Bei der Kombination der einzelnen BSn für die weitere Bewertung werden die beschriebenen Aspekte entsprechend der verwendeten einzelnen BSn zusammengebracht und für die zusammengefügte Bepunktung übernommen. Die zuvor beschriebenen Aspekte der einzelnen BSn bleiben daher weiterhin gültig und werden für die Kombination der einzelnen BSn nicht noch mal aufgeführt.

Ergebnisse beim Punktbewertungsverfahren

Als Ergebnis bei der Bewertung der einzelnen BSn ist nach dem PBV die Verwendung von drei Lagern als die sinnvollste Veränderung der bestehenden BS auszuwählen. Sowohl die laufenden Kosten als auch die Liefertreue verbessert sich deutlich zum Ausgangszustand. Die Schaffung besserer Lieferbedingungen ist aufgrund des guten Kosten-Nutzen Verhältnis auf dem zweiten Platz und ebenfalls eine Effektive BS für eine Verbesserung der bestehenden Abläufe. Das Ergebnis der Bewertung für die Konsolidierungsmaßnahme ist durch den reduzierten Gewinn bei der Verwendung der Maßnahme herabzustufen (Tabelle 6.12).

Außerdem wurde eine Kombination der BSn erstellt. Bei der Bewertung wurde das Experiment zehn im Kontext der gegebenen Bewertungskriterien und Randbedingungen des Logistiksystems als besonders effektiv bewertet. Zu den kombinierten BSn gehört im Experiment zehn der Zusammenschluss mit der Verwendung von drei Lagern, einer anfänglichen Verkleinerung des FPs bei einer im Anschluss folgenden regelmäßigen Anpassungen des FPs sowie der Schaffung besserer Lieferbedingungen. Zusammen erreichen diese Maßnahmen eine deutliche Verbesserung zum Versuchsdurchlauf der bestehenden BS. Die Bewertungstabellen der Kombinationen der BSn sind in der Bewertungstabelle in Anhang 63 einsehbar. Bei der Tabelle wird für eine komprimierte Darstellung der Ergebnisse auf einer Seite erneut auf der Verweistabelle (Anhang 54) verwiesen.

Bei Betrachtung der Aufstellorte von Messstationen in Griechenland, ist von einer eigentlich höheren Schadstoffkonzentration in der Luft in Athen auszugehen. Beim Fallbeispiel wird die Wahrscheinlichkeit der Verschärfung der EFB und SGWe als hoch eingeschätzt. Für den Fall einer drastischen Verschärfung der Randbedingungen mit der Anzahl der Ziele in der Zone der EFB und der Reduzierung des SGWs wurde eine zusätzliche Bewertung von BSn durchgeführt. Im Kontext der Verschärfung der Randbeindung wurde die langsame Einführung von E-Kfz als zielführend erkannt. Mit der weiteren Kombination der einzelnen BSn ist das Experiment 17 als effektivster Ausgang identifiziert worden. Im Experiment wurde ein Zusammenschluss der einzelnen BSn, der langsamen E-Kfz-Umstellung, bei einem kleineren FP zu Beginn der Untersuchung mit regelmäßigen Anpassungen zum Bedarf im weiteren Verlauf der Untersuchung und die Verwendung von drei Lagern statt einem bewertet. Unter der Annahme das die SGW und EFBen weiter verschärft werden ist die Einführung dieser Kombination von BSn im Vergleich zur bestehenden BS zu überdenken (Anhang 64 und Anhang 54).

Bewertung der Belieferungsstrategien																											
Bewertungskriterium	Belieferungsstrategie	Priorität	Vergleichsdurchlauf (Routenfahrten)		Direktbelieferungen		Regelmäßige Kapazitätsanpassung		Langsame Umstellung auf E-Kfz		Schlagartige Umstellung auf eine 25% E-Kfz-Quote		Cargocap Kleinstzug-Konzept		Verwendung mehrerer Lager		Belieferungen mit Konsolidierung		Nachtfahrten		Schaffung besserer Lieferbedingungen		Mehrschichtbetrieb		Veränderte Fuhrparkgröße		
			Liefertreue	8	5	40	9	72	8	64	5	40	5	40	9	72	9	72	5	40	8	64	9	72	9	72	9	72	7	56
Laufende Kosten	9	7	63	7	63	7	63	7	63	7	63	4	36	7	63	7	63	7	63	7	63	7	63	7	63	7	63
Investitionskosten	6	9	54	9	54	6	36	5	30	3	18	0	0	7	42	8	48	9	54	6	36	9	54	7	42	7	42
Ausgereiftheit der Strategie	6	9	54	9	54	6	36	5	30	5	30	2	12	8	48	6	36	7	42	4	24	6	36	9	54	9	54
Zukunftsfähigkeit	5	3	15	4	20	9	45	8	40	3	15	9	45	9	45	7	35	6	30	9	45	8	40	4	20	4	20
Auslastung der Fahrzeuge	2	5	10	2	4	4	8	5	10	5	10	3	6	4	8	5	10	4	8	4	8	3	6	5	10	5	10
Nutzungsmöglichkeiten von Vorteilen	3	0	0	0	0	0	0	4	12	4	12	9	27	0	0	0	0	3	9	9	27	0	0	0	0	0	0
Organisatorische Probleme	7	5	35	8	56	8	56	4	28	3	21	2	14	8	56	7	49	6	42	9	63	5	35	5	35	5	35
Wirtschaftlicher Betrieb trotz Gesetzesverschärfung	6	2	12	3	18	9	54	8	48	8	48	9	54	8	48	4	24	7	42	7	42	7	42	7	42	2	12
Rechtliche Herausforderungen bei der Umstellung	6	9	54	9	54	9	54	6	36	9	54	9	54	9	54	9	54	7	42	7	42	9	54	9	54	9	54
Gewichtete Priorität			337		395		416		337		311		320		436		359		396		422		402		346		
Rang			9		6		3		9		12		11		1		7		5		2		4		8		
= Effektivität der Belieferungsstrategie auf ein Bewertungskriterium			= Multiplikator zwischen Effektivität und Priorität														Priorität: 1 = niedrig 9 = hoch										

Tabelle 6.12: Bewertungstabelle der einzelnen Belieferungsstrategien.

7 Evaluation für die Verwendung von SD zur Bewertung von Belieferungsstrategien

Während der praktischen Konzeptumsetzung entstanden Problemstellungen und Eindrücke die als nicht zielführend für die Bewertung von BSn im Kontext der City-Logistik zu bewerten sind. Nachfolgend werden die Aspekte für eine Evaluation erläutert.

Belieferungsstrategien, SD und Verallgemeinerungen: Bei der Modellierung mit SD werden Verallgemeinerungen verwendet, um Entitäten abzubilden und Simulationsergebnisse für komplexe Zusammenhänge zu erzielen. Probleme treten bei Abweichungen von den angenommenen Verallgemeinerungen auf. Durch die starke Abstraktion des zu untersuchenden Systems findet eine Abgrenzung und Vereinfachung des betrachteten Untersuchungsraums statt, wodurch einzelnen Einflüsse von bisher nicht behandelten BSn im Modell nicht berücksichtigt wurden. BSn können sehr variabel sein. Die Variabilität spiegelt sich durch die zahlreichen Ein- und Ausflussfaktoren wieder. Für die Bewertung von BSn muss das Simulationsmodell auf die unterschiedlichen Einflüsse eingehen können. Während die Abbildung von einzelnen BSn prinzipiell mit SD möglich ist, wurde versucht ein möglichst allgemeingültiges Simulationsmodell für das Bewertungskonzept zu erstellen. Eine Bewertung weiterer nicht in Abschnitt 4.1 vorgesehener BSn erfordert eine weiterführende Anpassung des Simulationsmodells mit einer ggf. anderen Schwerpunktsetzung. Die Anpassungen sind theoretisch auch in SD durchzuführen, aber als arbeitsintensiv anzunehmen. Analog werden Vereinfachungen für die Entwicklungen in der Stadt getroffen, die im Modell zu einer vereinfachten Abbildung der Realität führen. Bei der Anwendung des Bewertungskonzeptes bzw. Simulationsmodells auf eine andere Stadt sind i. d. R. andere Randbedingungen zu beachten. Für eine qualitativ hochwertige Bewertung von Belieferungsstrategien, ist auch die Integration von komplexen Wechselwirkungen bei wechselnden Einflussfaktoren in der Stadt notwendig. Die nötige Arbeit für das Anpassen des Modells an ein zu untersuchendes Fallbeispiel steigt durch die Variantenvielfalt weiter an. Die Allgemeingültigkeit erhöht den Arbeitsaufwand für die Anpassung an wenige Belieferungsstrategien, für die ggf. einfacher selbst ein Modell entworfen werden könnte. Der Sinn eines Bewertungskonzeptes mit allgemeingültigem Modell ist nicht mehr gegeben. Ein Simulationsmodell was alle möglichen Aspekte der Simulation in ausreichender Genauigkeit abbilden kann, ist vom Aufwand-Nutzen Verhältnis dagegen nicht tragbar. Die Allgemeingültigkeit des Bewertungskonzeptes ist damit nur sehr bedingt für vergleichbare Problemstellungen mit ähnlichen Randbedingungen gegeben. Ein Beispiel für eine aufwendige Anpassung sind die Berechnungen der Transportrate beim EFB. Das Modell ist auf ein Szenario wie bei den Athener EFBen ausgelegt. In deutschen Städten kommen mit der Umweltzone oder dem Dieselfahrverbot keine zeitlichen Begrenzungen nach dem Nummernschild zum Einsatz, sondern nur nach der Schadstoffnorm und dem Typ des Verbrennungsmotors. Solche EFBen machen Neuplanungen in den Formeln nötig. Im Regelfall sollten aber selbst bei grundlegend anderen zu bewertenden BSn Teile des Simulationsmodells modular wiederverwendet werden können. Die Aufteilung in die Untermodelle des Stadt-, Verkehrs-, Lager-, Belieferungs-, Fuhrpark- und Kostenmodells können auch als einzeln Modellbausteine verwendet werden. Dagegen wäre in einer diskreten Simulation mit der Verwendung von Klassen die Veränderung von Kriterien für EFBen leichter zu verändern, bei der Zuweisung bestimmter Eigen-

schaften für jedes einzelne Fahrzeug. Für die Prüfung der Einfahrfähigkeit eines Fahrzeugs sind in diesem Fall keine Berechnungen nach statistischen Funktionen mehr nötig, sondern nur noch eine einfache Abfrage des jeweiligen Status eines Fahrzeugs. Die Anpassung einer Rechnung nach statischen Werten ist aufwendiger als Anpassungen einer einfachen Abfrage. Die Problematik zeigt, dass im Bewertungskonzept von der Makroebene zu weit in die Mikroebene ausgewichen wurde. Zusätzlich wurden für die Simulation mit SD bereits in der Auswertung der Daten Verallgemeinerungen in Form von Durchschnittswerten in das Modell eingebracht die Rückschlüsse auf Ursachen erschweren und weitergehende Analysen erfordern. Im Bereich der Auslastung der Transport- und Gewichtsoptimierungen werden Effekte einzelner Fahrzeuge oder Fahrten beispielsweise verdeckt. Die Verallgemeinerung zeigt sich auch in der Verwendung von statistischen Werten. Bei großen Eingabewerten für das Liefervolumen und den Simulationszeitraum gleichen sich die statistischen Werte aus und bilden die Realität ab. Bei der Analyse eines kleinen Logistikdienstleisters mit geringem Liefervolumen entsteht durch die statistische Verwendung der Entitäten eine ungenaue Abbildung. Das Modell mit SD ist daher nur bedingt für sehr kleine Logistikdienstleister verwendbar.

Daten und die Anpassung des Modells: Für die Anpassung eines Modells ist ein Training des Modells wie in Kapitel 3 beschrieben durchzuführen. Aufgrund der stark verallgemeinerten Entitäten und nur begrenzt vorliegenden Prognosedaten bei komplexen Wirkzusammenhängen, ist die Anpassung des Modells schwierig. Die Datensätze sind i. d. R. nicht ohne Informationsverlust teilbar, wodurch die Anpassung bzw. das Trainieren des Modells nicht mehrmals möglich ist. Teile der Daten liegen für die Modellierung auf Makroebene nur in einmalig verwendbarer Form vor. Statistische Wirkzusammenhänge erschweren die Verwendung von Vergleichsdaten aus anderen Zeiträumen oder anderen Unternehmen. Bei vorliegenden Daten ist somit oft keine oder nur eine triviale Unterteilung in Trainings- und Simulationsdaten möglich. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Simulationsmodell das abzubildende System nicht mehr realitätsnah wiedergibt, steigt ohne das Trainieren an. Die Verwendung von zurückliegenden Daten kann diesen Missstand ausgleichen, vorausgesetzt sie sind in ausreichender Datenqualität und vollständig vorhanden. Ohne Vergleichsdaten wird für die Validierung Expertenwissen für die Abschätzung der Entwicklungen einzelner Entitäten benötigt. Der Vorgang wird als kostenintensiv und subjektiv angesehen.

Datenwerte sind ein generelles Problem des erarbeiteten Bewertungskonzepts im Kontext der City-Logistik. Das Modell ist an die Problemstellung der SWe in der City-Logistik angelehnt. Für die Datenerfassung ist das Modell auf staatliche Messstationen angewiesen. Während Daten zum Bevölkerungswachstum unkritisch zu sehen sind, unterliegen Daten zu Schadstoffen einem gewissen politischen Einfluss. Fahrverbote können politische Maßnahmen begünstigen oder behindern. Bei der Verwendung von Messwerten bei Schadstoffen ist der Umstand der Messung zu berücksichtigen und macht die Anwendung des Simulationsmodells arbeitsintensiver.

Zeitraum: Die Wahl von BSn sind mit Entscheidungen für hohe Kosten verbunden und erfordern eine langfristige und nachhaltige Sichtweise bei der Entscheidung zu einer Strategie. Die Bewertungshilfe zur Wahl einer BS mit einem Simulationsmodell muss daher ebenfalls einen langen Untersuchungszeitraum bewerten. Der in der Simulation verwendete Zeitraum von 20 Jahren erfüllt diese Erwartung. Der lange Untersuchungszeitraum führt aber ebenfalls zu einer steigenden Ungenauigkeit der Ergebnisse. Die vereinfachende Simulation auf einer Makroebene und

die zahlreichen vereinfachten Annahmen für die Simulation senken die Aussagekraft der Simulationsergebnisse. Durch neue Innovationen, gesellschaftliche Umbrüche, die in dem langen Untersuchungszeitraum ebenfalls nicht berücksichtigt werden, sinkt die Aussagekraft der Ergebnisse weiter ab.

Eingabebereiche und Wirkzusammenhänge: Das erarbeitete Simulationsmodell besitzt zwar viele vereinfachte Entitäten im Modell, aber durch die vielen Wirkzusammenhänge zwischen den Entitäten erreicht das Modell eine gewisse Komplexität. Eine Absicherung der Eingabewerte mit genauen Wertebereichen für alle Entitäten ist nicht ohne weiteres möglich. Trotz des vereinfachten Simulationsmodells ermöglicht die Menge an Eingaben bei Entitäten eine Vielzahl an möglichen Kombinationen. Mit bestimmten Kombinationen von Ausprägungen können in der Simulation unrealistische Ergebniswerte erzeugt werden, die das Modell nicht realitätsgetreu abbilden. Der Fall geschieht, wenn einzelnen Rückkopplungskreise in einen Zustand der Eigenfrequenz kommen und unrealistisch große Schwankungen erzeugen. Im Modell geschieht dies durch die vereinfachten Abläufe, die in der Realität komplexer sind. Die Wahl einer ausreichenden Genauigkeit in der Modellierung ist durch die Problemstellung erschwert.

Statistische Schwankungen: Statistische Schwankungen bei diskreten Ereignissen können in SD nur bedingt im Modell eingebunden werden. Der Unterschied zwischen diskreter und statistischer Simulation gleicht sich bei großen Untersuchungsräumen und -zeiten aus. Regelmäßigen Schwankungen und einfachen Zufallszahlen sind mit SD auch abbildbar. Die Darstellung von unregelmäßigen Ereignissen ist dagegen nur bedingt wiedergebar. Gerade im Bereich der City-Logistik entstehen situationsbedingt erhebliche Abweichungen in den Abläufen, durch nicht standardmäßig zufallsverteilte Ereignisse wie Eventveranstaltungen, Demonstrationen, Feiertage etc. Für die Bewertung von BS_n bei diesen Einflüssen in der City-Logistik sind aufwendige Modelanpassungen oder auch Neuplanungen eines Simulationsmodells nötig. Die Anwendung von SD zur Bewertung von BS_n in der City-Logistik ist nur bei einem System mit durchschnittlichen kontinuierlichen Verhältnissen zielführend. Die Einzelbetrachtungen von extremen Verhältnissen widerspricht dagegen den Simulationsparadigma von SD. Bei der Verwendung des dargestellten Konzeptes zur Bewertung von BS_n sind daher die entsprechenden Simulationsfälle zu beachten und führen für eine ausführliche Bewertung zu einem erhöhten Arbeitsaufwand. Die im Modell verwendeten Funktionen für die Abbildung von Schwankungen sind aufgrund der fehlenden Ähnlichkeit zu Standard Zufallsverteilungen aufwendig ermittelt worden. Eine schnelle Anpassung des im Konzept erarbeiteten Modells ist wegen des Arbeitsaufwandes nicht bei Logistiksystemen mit hohen Schwankungen und komplexen Wirkzusammenhängen möglich. Für die Anwendung des Konzeptes zur Analyse auf ein System ist daher eine erhöhte Arbeitszeit einzuplanen oder ggf. auch eine andere Simulationsmethodik als SD zu wählen.

Syntax: Die im theoretischen Teil beschriebene klare Einteilung zwischen HG_n und BG_n ist in der Modellierung nicht durchgängig geschehen. Aufgrund der fehlenden Relevanz wurden Entitäten oftmals nur als HG_n zusammengefasst. An anderen Stellen wurde für die Berechnung und Vermeidung von Zirkelschlüssen auf BG_n zurückgegriffen. Für die Übersichtlichkeit wurden HG_n und BG_n zusammengefasst. Die Verwendung einer anderen Simulationssoftware oder anderer Simulationsmodellelemente könnte vorteilhaft für den Simulationsaufwand und das Systemverständnis sein. Ein striktes Vorgehen nach der Syntax von Weber (1979) zur Einbeziehung

aller im erarbeiteten Modell zusammengefassten FG und HG wird im vorliegenden Modell dagegen als nicht zielführend und für unübersichtlich gehalten. Neben der Problematik vom Simulationsmodell und der Anpassung des Simulationsmodells an BS_n, können auch Probleme bei den Bewertungskriterien und den BS_n gefunden werden.

Bewertungskriterien nach Gesetzen: Die Herleitung allgemeiner Bewertungskriterien nach Gesetzen ist nur bedingt möglich. Bekannte Gesetze können in die Bewertungskriterien eingebunden werden. Für die Bewertung neuer BS_n ist ein tiefes Verständnis der Gesetzeslage zu erarbeiten. Für das Kriterium besteht sonst die Gefahr, dass aufgrund des inhaltlich neuen Bereichs bedeutende Gesetze nicht in die Betrachtung einbezogen werden. Bei der Bewertung von BS_n, die den Einsatz von neuen Technologien beinhalten, entstehen oft erst mit der Zeit weiterführende Gesetzestexte. Eine Bewertung über einen langfristigen Untersuchungszeitraum von 20 Jahren wird in der Folge erschwert. Die Ungenauigkeit der ermittelten Ergebnisdaten steigt weiter an und die Wahrscheinlichkeit, dass ermittelte Ergebnisse tatsächlich erreicht werden, sinkt ab.

Allgemein hergeleitete Belieferungsstrategien: Die in Abschnitt 4.1 hergeleiteten BS_n für eine Bewertung im Kontext der City-Logistik war eine Auswahl an BS_n, die für den Schwerpunkt der Supermarkt- und Ökologistik als zielführend erachtet wurden. Neben ausgewählten Schwerpunkten sind in der City-Logistik weitere Schwerpunkte zu beachten. Die Auswahl schränkt die Anwendbarkeit des Konzepts ein und widerspricht der gewünschten Allgemeingültigkeit. Als Beispiel sind die Briefzustellungen zu nennen, die aufgrund der geringen Restriktionen beim Gewicht und Volumen bereits mit dem Rad auf langen Routen ausgeliefert werden können. Dagegen sind wie im Fallbeispiel bei der Belieferung von Supermärkten bereits bei einzelnen Händlern einzelne Lieferfahrten durch das hohe Ladevolumen denkbar. Beide Ausgangsszenarien benötigen aufgrund der unterschiedlichen Liefervolumen unterschiedliche Vorschläge für alternative BS_n. Eine allgemeingültige Auswahl von BS_n ist daher nicht zielführend realisierbar.

Modelldarstellung in System Dynamics: Für die Prüfung von BS_n ist eine hohe Anzahl an Wirkzusammenhängen im Modell nötig, die nur für die Prüfung einzelner BS_n gebraucht werden. Für die Umschaltung in den Berechnungsformeln werden bedingte Anweisungen verwendet. Das Verwenden einer Entität in den Berechnungsformeln benötigt in Vensim PLE eine Verknüpfung der Entitäten durch einen Informationspfeil. Durch die gleichwertige Darstellung der Wirkzusammenhänge in gleichen Informationspfeilen verliert das Modell daher an Übersichtlichkeit und ist weniger intuitiv für den Betrachter. Zu beachten ist, dass das in Vensim PLE 7.2 erstellte Modell bewertet wird. In einer höherpreisigen Version von Vensim sind weitere Funktionen verfügbar und das Argument der Unübersichtlichkeit wird obsolet. Beispiele für verwandelbare Funktionen sind „Get Data at Time“ und Get Time Value, die weitergehenden Verknüpfungen hinter der Darstellungsebene erlauben. Bei der Verwendung alternativer Simulationsmittel ist dieser Evaluationspunkt ggf. obsolet.

Teilfaktorieller Versuchsplanung und System Dynamics: Die hohen Wirkzusammenhänge in SD und die verringerte Auflösung in der teilfaktoriellen Versuchsplanung führen zu undeutlichen Ergebnissen bei der Effektivität von einzelnen Faktoren. Für das Modell ist daher eine ausführliche Untersuchung mit der vollfaktoriellen Versuchsplanung vorzuziehen, um Erkenntnisse zum Systemverhalten und das Zusammenwirken von BS_n zu erhalten.

8 Zusammenfassung und Zukunftsausblick

Die Entwicklungen des Bevölkerungswachstums, der Verkehrsbelastung und dem wachsenden Konsum in den Städten zeigen eine einschneidende Veränderung im Status Quo bei der Logistik in der Stadt. Die Entwicklungen verdeutlichen die wichtige Stellung der City-Logistik als Sammlung von Lösungsansätzen.

Vor dem Hintergrund der Entwicklung wurde ein Konzept zur Bewertung der Effektivität von Belieferungsstrategien erarbeitet. Das im Rahmen des Bewertungskonzept erstellte Simulationsmodell stellt die zukünftige Entwicklung eines Logistiksystems in der Stadt im Kontext der City-Logistik dar, um durch Experimente an Belieferungsstrategien das Potential zu Verbesserungen zu einer bestehenden Belieferungsstrategie aufzuzeigen. Das Simulationsmodell behandelt schwerpunktmäßig die Schnittstellenbereiche der Belieferungen des Einzelhandels und der Ökologistik in der Stadt. Das nach der Simulationsmethodik System Dynamics entworfene Modell, stellt über Wirkzusammenhänge die verallgemeinerten Entwicklungen übergeordneter Entitäten in der Stadt und im Logistiksystem dar. Konkret wirken im Modell die Entwicklungen des Bevölkerungswachstum und des Einkommens auf die Einflussfaktoren des Logistiksystems. Durch die vernetzte Struktur werden die Fahrzeitverlängerungen, Einfahrverbote bei zu hohen Schadstoffwerten, Lohnkostensteigerungen und eine Steigerung des Liefervolumens aus den anfänglichen Einflussgrößen gebildet. Das Simulationsmodell gibt die vorgefertigten Bausteine der Modellteile mit Entitäten und Formeln als eine Art Grundkonstrukt vor, um die laufenden Kosten, die Liefertreue und die Auslastung des Fuhrparks über die Zeit und in Abhängigkeit der Eingangsfaktoren zu ermitteln. Im Modell wurden vorgefertigte Platzhalter für die einfache Anpassung an ein abzubildendes System vorgesehen.

Neben dem Simulationsmodell sind Belieferungsstrategien hergeleitet worden, um auf sie als Sammlung von Lösungsansätzen für die Bewertung zurückgreifen zu können. Um eine geregelte Bewertung der Belieferungsstrategien zu ermöglichen wurden Bewertungskriterien hergeleitet. Bei der Herleitung wurden wirtschaftliche, technische, organisatorische und rechtliche Kriterien behandelt, wobei erneut der Schwerpunkt des Einzelhandels und Supermarktlogistik mit der Ökologistik beachtet wurde. Für die Bewertung der Belieferungsstrategien und deren Zusammenstellung bei der Bewertung wird der 2^{k-p-p} Factor-Design Ansatz behandelt, mit dem ein Systemverständnis am Modell zu erarbeiten ist. Die nach der Simulation durchzuführende Ergebnisinterpretation und Kontrolle der statistischen Eindeutigkeit der Ergebnisse wurde ebenfalls im Bewertungskonzept behandelt. Für die eigentliche Bewertung des Konzepts wird eine Nutzwertanalyse mit Priorisierten Bewertungskriterien hergeleitet. Mit der Nutzwertanalyse wird die Erfüllung der Bewertungskriterien geprüft und die effektivste Belieferungsstrategie bestimmt.

Nach der Erstellung des Modells ist das Bewertungskonzept mit anonymen Unternehmensdaten durchlaufen worden, um einer Evaluation des Bewertungskonzeptes zu ermöglichen. Bei dem praktischen durchlaufen konnte nur auf eine kleine Menge von Datensätzen zurückgegriffen werden. Die Evaluation des Bewertungskonzeptes war aufgrund der Datenlage nur bedingt möglich. Neben den in der Evaluation beschriebenen Problemen sind weitere Probleme im Konzeptmodell möglich.

Zusammenfassend lässt sich zum erarbeiteten Konzeptmodell sagen, dass das erarbeitete Konzept als Grundlage für eine Bewertung von einem Logistiksystemen im Kontext der City-Logistik denkbar ist. Das Simulationsmodell ist jedoch nicht als allgemeingültig zu sehen und nur mit Einschränkungen zu verwenden. Insgesamt sind viele Anpassungen im Modell nötig, um eine Bewertung von Belieferungsstrategien durchführen zu können. Bei dem hohen Aufwand der Anpassung des Modells für die Bewertung von Belieferungsstrategien wird die Erstellung eines eigenen Modells bei abweichendem Schwerpunkt für sinnvoller betrachtet, im Kontext des Aufwand-Nutzen Verhältnisses. Allerdings sind Modellteile wie das Stadtmodell als übertragbare allgemeingültige Bausteine verwendbar, wenn ähnliche Wirkzusammenhänge bei der Bewertung von Belieferungsstrategien vorliegen. Die Simulationsmethodik System Dynamics hat sich als geeignet für eine Analyse übergeordneter Prozessgruppen mit komplexen Wirkzusammenhängen herausgestellt. Bei einer komplexen Ausgangslage bietet die Simulationsmethodik Möglichkeiten zur Untersuchung des Systemverhaltes mit „Was ist, wenn ...“ Szenarien. Durch die Einbindung zahlreicher Wirkzusammenhängen ist die Bewertung von Belieferungsstrategien mehrerer unterschiedlicher Untersuchungsfälle möglich. Für die Bewertung spezifischer Belieferungsstrategien, die eine Abbildung einzelner Prozessabschnitte benötigt, ist für ein möglichst genaues Ergebnis eine nicht auf der Makroebene arbeitende Simulationsmethodik als zielführender erkannt worden. Durch die für System Dynamics typischen Vereinfachungen mit der Modellierung auf der Makroebene wächst die Ungenauigkeit im erstellten Simulationsmodell und Rückschlüsse auf einzelne Prozessabläufe sind nicht mehr möglich.

Die Auswertung der Experimente ergab, dass ein bedeutender Teil der laufenden Kosten einer Belieferungsstrategie aus den die Lohnkosten der Arbeitnehmer besteht. Für die weitere Entwicklung der City-Logistik wird daher ein Augenmerk auf die Automatisierungstechnik zu legen sein. Autonome Fahrsysteme auf dem Verkehrsträger Straße könnten eine neue für die City-Logistik richtungsweisende Belieferungsstrategie bilden. Der signifikante Anteil der Lohnzahlungen für Fahrer wird in den Fahrkosten obsolet. Problematisch anzusehen ist im Kontext der Automatisierung die Entladung beim Kunden, die weiterer Entwicklungen bedarf. Ein Teil der Vorteile der in der Arbeit untersuchten Cargocap Belieferungsstrategie könnte somit ohne das zusätzliche Schaffen einer Infrastruktur und unter geringeren Investitionskosten in die bestehende Belieferungsstrategie integriert werden. Eine Belieferungsstrategien mit der Belieferung des Einzelhandels durch autonome Drohnen im Verkehrsträger Luft wird dagegen als nicht zielführend angesehen. Die geringe Tragfähigkeit einer Drohne wird bei einem vergleichbaren Handelsvolumen dafür sorgen, dass die Drohnentechnologie bei der Einzelhandelbelieferung nur als Interimslösung verwendet werden wird. Für die Belieferung der Endkunden in der City-Logistik wird die Belieferung unter Verwendung einer Drohne als ein für die Zukunft mögliche Belieferungsstrategie angenommen und stellt ein mögliches Untersuchungsgebiet dar.

Eine weiter zu beobachtende Entwicklung im Kontext der City-Logistik ist die autofreie Stadt. Wenn dieses Konzept mehrheitsfähige Bevölkerungsanteile erreichen sollte, dann muss sich ein Logistikdienstleister im Kontext der City-Logistik auf grundsätzlich andere Belieferungsstrategien abseits des Verkehrsträgers Straße umstellen. Durch erste bereits laufende Modellversuche in Städten könnten zu der Entwicklung weitergehende Analysen durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

ACEA (2019a): Anzahl der Neuzulassungen von Pkw in einzelnen Ländern Europas im Jahr 2018. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36395/umfrage/anzahl-der-pkw-neuzulassungen-in-den-laendern-europas/>, zuletzt geprüft am 12.04.2019.

ACEA (2019b): Average age of the EU motor vehicle fleet, by vehicle type. European Automobile Manufacturers Association. Online verfügbar unter <https://www.acea.be/statistics/tag/category/average-vehicle-age>, zuletzt geprüft am 12.04.2019.

ACEA (2019c): Interactive map: Correlation between uptake of electric cars and GDP in the EU. European Automobile Manufacturers Association. Online verfügbar unter <https://www.acea.be/statistics/article/interactive-map-correlation-between-uptake-of-electric-cars-and-gdp-in-EU>, zuletzt geprüft am 06.05.2019.

Athinaikiriviera (2019): Ανάπτυξη και νέες δουλειές: Το πρόγραμμα της ΝΔ για τις υποδομές. Online verfügbar unter <https://athinaikiriviera.gr/eidiseis/242-anaptyksi-kai-nees-douleies-to-programma-tis-nd-gia-tis-ypodomes>, zuletzt geprüft am 02.05.2019.

Bähr, Jürgen; Gans, Paul (2010): Bevölkerungsgeographie. Verteilung und Dynamik der Bevölkerung in globaler, nationaler und regionaler Sicht. 5. Auflage. Stuttgart: Ulmer.

Bala, Bilash Kanti; Arshad, Fatimah Mohamed; Noh, Kusairi Mohd (2017): System Dynamics. Modelling and Simulation. Singapore: Springer.

Bank of Greece (2018): Number of inbound visits to Greece in 2017. Bank of Greece. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/763903/total-number-of-inbound-visits-greece-by-region/>, zuletzt geprüft am 22.04.2019.

Birger, Nicolai (2019): Dieses neue Verkehrsschild könnte Ihnen bald begegnen. In: WELT, 02.04.2019. Online verfügbar unter <https://www.welt.de/wirtschaft/article191185071/Achtung-Ladezone-Dieses-neue-Verkehrsschild-koennte-Ihnen-bald-begegnen.html>, zuletzt geprüft am 02.04.2019.

Richtlinie VDI 3633, 12.2014: Blatt 1. Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen - Grundlagen.

BMU (2018): Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Allokation und Zuordnung öffentlicher Einnahmen und Ausgaben im Verkehr sowie Hemmnisse zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung. Unter Mitarbeit von Frank Bruns und Simon Hofmann. Zürich.

BMVI (2018): MID 2008. Mobilität in Deutschland 2008. Unter Mitarbeit von Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V und Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/mobilitaet-in-deutschland.html>, zuletzt geprüft am 01.07.2019.

- Bossel, Hartmut (1987): Systemdynamik. Grundwissen, Methoden und BASIC-Programme zur Simulation dynamischer Systeme. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Bossel, Hartmut (2004): Systeme, Dynamik, Simulation. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Norderstedt: Books on Demand.
- Brake, Klaus (2001): Neue Akzente der Suburbanisierung. In: Brake, Klaus, Dangschat, Jens S. und Herfert, Günter (Hg.): Suburbanisierung in Deutschland. Aktuelle Tendenzen. Opladen: Leske & Budrich, S. 15–26.
- Brake, Klaus (2005): Der suburbane Raum als Standorttyp. Zu den Veränderungen seines Charakters im Zuge der aktuellen Suburbanisierung in Deutschland. In: Brake, Klaus, Einacker, Ingo und Mäding, Heinrich (Hg.): Kräfte, Prozesse, Akteure. Zur Empirie der Zwischenstadt. Wuppertal: Müller + Busmann.
- Britisches Verkehrsministerium (2015): Values of travel time savings and reliability: final reports. Reports from a study conducted to recommend up-to-date national average values of travel time. Department for Transport. Online verfügbar unter <https://www.gov.uk/government/publications/values-of-travel-time-savings-and-reliability-final-reports>, zuletzt geprüft am 03.04.2019.
- Burkhard, Schade (2005): Volkswirtschaftliche Bewertung von Szenarien mit System Dynamics. Bewertung von nachhaltigen Verkehrsszenarien mit ESCOT. Dissertation. Universität Friedericiana Karlsruhe. Fakultät für Wirtschaftswissenschaften.
- Busmann, Friedrich (Hg.) (2009): Hochstraße zur Diskussion. Das Magazin zur Hochstraße. In: Stadtumbau 2010: Stadt Halle (Saale), Dezernat Planen und Bauen.
- Castellani, Davide; Narula, Rajneesh; Nguyen, Quyen T. K.; Surdu, Irina; Walker, James T. (2018): Contemporary Issues in International Business. Institutions, Strategy and Performance. Cham: Springer International Publishing.
- City Population (2013): Griechenland. Die zehn größten Städte im Jahr 2011. City Population; ELSTAT. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/204353/umfrage/groesste-staedte-in-griechenland/>.
- Cox, Wendell (2013): The Evolving Urban Form. Athens. In: new geography. Online verfügbar unter <http://www.newgeography.com/content/003618-the-evolving-urban-form-athens>, zuletzt geprüft am 16.04.2019.
- Cox, Wendell (2019): Demographia World Urban Areas. Built Up Urban Areas or World Agglomerations. 15th Annual Edition: 201904. Online verfügbar unter <http://demographia.com/db-worldua.pdf>, zuletzt geprüft am 16.05.2019.
- DESA (2018): World Urbanization Prospects 2018. New York. Online verfügbar unter <https://population.un.org/wup>.
- Destatis (2018): Wachsende Motorleistung der Pkw führt zu steigenden CO2-Emissionen. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/11/PD18_459_85.html, zuletzt geprüft am 03.04.2019.

- DIW (2018): Verkehr in Zahlen 2018/2019. Unter Mitarbeit von TCI Röhling, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin: Druckereiverbund BMVI.
- Dürand, Dieter (2012): Vernetzte Welten. In: Wirtschaftswoche, Heftnummer 39, D06-D16.
- Dürschmidt, Stephan (2001): Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion. München: Utz.
- Economopoulou, Alexia A.; Economopoulos, Alexander P. (2002): Air Pollution in Athens Basin and Health Risk Assessment. In: Environmental Monitoring and Assessment 80, Heftnummer 3, S. 277–299.
- EEA (2008): Road transport 2018. guidebook. European Environment Agency. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>, zuletzt geprüft am 14.08.2019.
- EEA (2016): Air pollution in Athens: existing status and abatement practices. European Environment Agency. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/2599XXX/page018.html>, zuletzt geprüft am 20.04.2019.
- EEA (2018): Air Quality e-Reporting. (AQ e-Reporting). European Environment Agency. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/aqereporting-8>, zuletzt geprüft am 20.04.2019.
- Ester, Martin; Sander, Jörg (2000): Knowledge Discovery in Databases. Techniken und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer.
- EU (2001): Richtlinie 2001/81/EG. Des Europäischen Parlaments und des Rates. Nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe. Europäisches Parlament und Rat. Brüssel.
- EU (2008): Richtlinie 2008/50/EG. DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES. vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Europäisches Parlament und Rat. Brüssel.
- EU (2017): Ευρωπαϊκή Επιτροπή - Δελτίο Τύπου. Η ΕΕ επενδύει σε μεγάλα έργα υποδομής που προάγουν την ανάπτυξη στην Ελλάδα. Europäische Kommission. Online verfügbar unter https://europa.eu/rapid/press-release_IP-17-704_el.pdf, zuletzt geprüft am 10.05.2019.
- EU-Kommission (2019): Saubere Mobilität. Schluss mit umweltschädigenden Lastkraftwagen. Kommission begrüßt erste EU-Norm zur Verringerung der Schadstoffbelastung durch Lastkraftwagen. Europäische Kommission. Brüssel. Online verfügbar unter http://europa.eu/rapid/press-release_IP-19-1071_de.htm, zuletzt aktualisiert am 18.02.2019, zuletzt geprüft am 02.04.2019.
- Fischer, Wolfram; Dittrich, Lothar (2013): Materialfluß und Logistik. Potentiale vom Konzept bis zur Detailauslegung. 2. Auflage. Berlin: Springer.

- Forbes (2008): Europäische Städte mit der niedrigsten Durchschnittsgeschwindigkeit im Straßenverkehr. Stand: 2008. in Kilometer pro Stunde. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37200/umfrage/durchschnittsgeschwindigkeit-in-den-15-groessen-staedten-der-welt-2009/>, zuletzt geprüft am 02.04.2019.
- Fox, Jonathan; Klüsener, Sebastian; Myrskylä, Mikko (2019): Is a Positive Relationship Between Fertility and Economic Development Emerging at the Sub-National Regional Level? Theoretical Considerations and Evidence from Europe. In: *European journal of population* 35, Heftnummer 3, S. 487–518.
- Fritzsche, Carolin; Kluge, Jan (2014): Wodurch werden die Mietpreise bestimmt? Unterschiede in den Mieten in Ost- und Westdeutschland. In: *ifo Dresden berichtet*, 2014, Heftnummer 21, S. 3–10.
- Gaebel, Wolf (1987): Verdichtungsräume. Strukturen und Prozesse in weltweiten Vergleichen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Gaebel, Wolf (1991): Agglomerationsräume in West und Osteuropa. In: Gutmann, Thalheim et al. (Hg.) 1991 – Agglomerationen in West und Ost, Bd. 16, S. 3–21.
- Golub, Gene H.; Ortega, James M.; Grigorieff, Rolf d. (Hg.) (1995): *Wissenschaftliches Rechnen und Differentialgleichungen. Eine Einführung in die numerische Mathematik*. Berlin: Heldermann.
- Graham, Cookson (2018): INRIX Global Traffic Scorecard. INRIX Research. Cheshire. Online verfügbar unter <https://www.rbb24.de/panorama/beitrag/2018/02/berlin-verkehr-stau-traffic-scorecard-inrix-2017.file.html/180206%20Traffic%20Scorecard.pdf>, zuletzt geprüft am 13.05.2019.
- Greve, Jens; Schnabel, Annette; Schützeichel, Rainer (2009): Das Makro-Mikro-Makro-Modell der soziologischen Erklärung. In: Greve, Jens, Schnabel, Annette und Schützeichel, Rainer (Hg.): *Das Mikro-Makro-Modell der soziologischen Erklärung. Zur Ontologie, Methodologie und Metatheorie eines Forschungsprogramms*. 1. Auflage. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 7–18.
- Gumzej, Roman; Rosi, Bojan (2017): Modellierung und Simulation von Lieferketten. In: Halang, Wolfgang A. und Unger, Herwig (Hg.): *Logistik und Echtzeit. Echtzeit 2017*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 79–88.
- Gutenschwager, Kai; Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2017): *Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen*. Berlin: Springer Vieweg.
- Heineberg, Heinz (2017): *Stadtgeographie*. 5. Auflage. Paderborn: Schöningh.
- Hermes (2012): Lärm und Abgase sind in Städten ein großes Problem. Interview mit Stephen Perkins. In: *Hermes Wings*.
- DIN IEC 60050-351, 2014: *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch. Teil 351: Leitetchnik*.
- Jüchter, Achim (2011): *Projektsteckbrief E-City Logistik. Teilvorhaben E-KEP*. Berlin.

- Kambezidis, H. d.; Tulleken, R.; Amanatidis, G. T.; Paliatsos, A. G.; Asimakopoulos, D. N. (1995): Statistical evaluation of selected air pollutants in Athens, Greece. In: *Environmetrics* 6, Heftnummer 4, S. 349–361.
- Kiwitt, Petra (2010): City-Logistics. Distribution in wachsenden Ballungsgebieten. In: Müller, Jan Dietrich (Hg.): *Delivering tomorrow. Zukunftstrend Nachhaltige Logistik. Wie Innovation und "grüne" Nachfrage eine CO2-effiziente Branche schaffen*. 1. Auflage. Bonn: Deutsche Post, S. 97–100.
- Kleppmann, Wilhelm (2016): *Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*. 9. Auflage. München, Wien: Hanser.
- Kramer, Ulrich (2008): *Kraftfahrzeugführung. Modelle - Simulation - Regelung*. München: Hanser.
- Kreitmair, Georg; Kraus, Stefan (1995): Ökologie und Logistik. Mehr als nur gute PR. In: *Logistik heute*, Heftnummer 17, S. 57–58.
- Kumar, Sameer; Yamaoka, Teruyuki (2007): System dynamics study of the Japanese automotive industry closed loop supply chain. In: *Journal of Manufacturing Technology Management*, Heftnummer 18, Ausgabe Nummer 2, S. 115–138.
- Κανελλαΐδης, Γ; Γκόλιας, Ι; Γιαννής, Γ. (2004): ΕΝΝΟΙΕΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ.
- Lange, Norbert de; Geiger, Martin; Hanewinkel, Vera; Pott, Andreas (2014): *Bevölkerungsgeographie*. Paderborn: Ferdinand Schöningh.
- Law, Averill M. (2015): *Simulation modeling and analysis*. 5. Auflage. New York: McGraw-Hill Education.
- Lee, Shin; Seo, Jong Gook; Webster, Chris (2006): The Decentralising Metropolis. Economic Diversity and Commuting in the US Suburbs. In: *Urban Studies* Band 43, Heftnummer 13, S. 2525–2549.
- Lehmacher, Wolfgang (2015): *Logistik im Zeichen der Urbanisierung. Versorgung von Stadt und Land im digitalen und mobilen Zeitalter*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Mertens, Peter (1982): *Simulation*. 2. Auflage. Stuttgart: Poeschel.
- Michaelis, Peter (1996): *Ökonomische Instrumente in der Umweltpolitik. Eine anwendungsorientierte Einführung*. Heidelberg: Physica-Verlag HD.
- Ministry of Environment (1989 - 1997): *The Atmospheric Pollution in Athens*. Ministry of Environment, Land Planung and Public Works. Greece.
- Moorman, Jürgen (2008): Strategische Herausforderungen für Finanzdienstleister. In: Strohecker, Jürgen und Sehnert, Jürgen (Hg.): *System Dynamics für die Finanzindustrie. Simulieren und analysieren dynamisch-komplexer Probleme*. Unter Mitarbeit von Moorman Jürgen. Frankfurt am Main: Frankfurt-School-Verl., S. 3–17.
- NOW (2011): *Modellregion Berlin/Potsdam. E-City-Logistik*. Berlin, Potsdam.

- Oasa (2019): OASA Jurisdiction (Urban Transport Service Area). Online verfügbar unter <http://www.oasa.gr/>.
- OECD (Hg.) (2015): *The Metropolitan Century: Understanding Urbanisation and its Consequences*. 1. Auflage. Paris: OECD.
- OICA (2017): Pkw-Bestand in den europäischen Ländern im Jahr 2015. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/163405/umfrage/pkw-bestand-in-ausgewaehlten-europaeischen-laendern/>, zuletzt geprüft am 25.04.2019.
- Olbrich, Rainer (2006): *Marketing. Eine Einführung in die marktorientierte Unternehmensführung*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Omnitrend (2014): *Mobilitätsbefragung 2013. Haushaltsbefragung zum Mobilitätsverhalten der Dortmunder Bevölkerung 2013*. Hg. v. Stadt Dortmund, Stadtplanungs- und Bauordnungsamt. Online verfügbar unter https://www.dortmund.de/de/leben_in_dortmund/verkehr/masterplan_mobilitaet_2030/analyse_der_ausgangssituation/mobilitaetsverhalten/index.html, zuletzt geprüft am 01.07.2019.
- Ossimitz, Günther; Schlöglhofer, Franz (1990): *Materialien zur Systemdynamik*. Wien: Hölder-Pichler-Tempsky.
- Paesler, Reinhard (1976): *Urbanisierung als sozialgeographischer Prozeß. Dargestellt am Beispiel südbayerischer Regionen*. Kallmünz, Regensburg: Lassleben.
- Plusminus (2016): *Dieselfahrverbot*. Hg. v. ARD. Online verfügbar unter <https://www.daserste.de/information/wirtschaft-boerse/plusminus/sendung/diesel-fahrverbot-hamburg-stadt-100.html>, zuletzt geprüft am 16.04.2019.
- Profos, Paul (1982): *Einführung in die Systemdynamik*. Stuttgart: Teubner.
- Rabe, Markus; Knothe, Thomas (2006): *Besonderheiten der Simulation von Geschäftsprozessen im Umfeld von Produktion und Logistik*. In: Wenzel, Sigrid (Hg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2006*. Tagungsband zur 12. Fachtagung, Kassel, 26. - 27. September 2006. Erlangen: SCS Publishing House (ASIM-Mitteilung, 104), S. 203–211.
- Rabe, Markus; Spiekermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008): *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Reussner, Ralf; Hasselbring, Wilhelm (Hg.) (2009): *Handbuch der Software-Architektur*. 2. Auflage. Heidelberg: dpunkt.
- Ritter, Nolan; Vance, Colin (2012): *Do fewer people mean fewer cars? Population decline and car ownership in Germany*. Essen: RWI.
- Romeike, Frank; Spitzner, Jan (2013): *Von Szenarioanalyse bis Wargaming. Betriebswirtschaftliche Simulationen im Praxiseinsatz*. 1. Auflage. Weinheim: Wiley.
- Römer, Daniel (2017): *Deutschland - Land der Autofahrer: Wie steht die Bevölkerung zur Verkehrswende?* KfW. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter

<https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Fokus-Volkswirtschaft/Fokus-2017/Fokus-Nr.-187-November-2017-Verkehrsbefragung.pdf>.

Sandrock, Jörg (2006): System Dynamics in der strategischen Planung. 1. Auflage: Deutscher Universitäts-Verlag.

Schulte, Christof (Hg.) (1999): Lexikon der Logistik. Unter Mitarbeit von Dietrich Adam, Dieter Ahlert, Ulli Arnold, Helmut Baumgarten und Jörg Becker. München: Oldenbourg.

Seidlmeier, Heinrich (2006): Prozessmodellierung mit ARIS. Eine beispielorientierte Einführung für Studium und Praxis. 2. Auflage. Wiesbaden: Friedrich Vieweg und Sohn; GWV Fachverlage.

SETE (2019): Number of international air arrivals in Athens in Greece from 2010 to 2018 (in 1,000). Statista Inc. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/939503/international-air-arrivals-athens/>, zuletzt geprüft am 22.04.2019.

Stasy (2019): General Information. Urban Rail Transport S.A. Online verfügbar unter http://www.stasy.gr/index.php?id=33&no_cache=1&L=1, zuletzt geprüft am 12.04.2019.

Statista (2019): Griechenland: Bruttoinlandsprodukt (BIP) pro Kopf in jeweiligen Preisen von 2008 bis 2018. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/14434/umfrage/bruttoinlandsprodukt-pro-kopf-in-griechenland/>, zuletzt geprüft am 17.04.2019.

Svante, Arrhenius (1896): On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. In: Philosophical Magazine and Journal of Science, Heftnummer 41, S. 237–276.

UMID (2011): UMID 04/2011. Berlin: Umweltbundesamt.

Umweltbundesamt (2018): Luftschadstoff-Emissionen in Deutschland. Stickstoffoxid-Emissionen; Emission von Feinstaub der Partikelgröße PM-10; Emission von Feinstaub der Partikelgröße PM-2,5. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland>, zuletzt geprüft am 31.03.2019.

Umweltbundesamt (2019): Wirkungen auf die Gesundheit. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-die-gesundheit>, zuletzt geprüft am 03.04.2019.

UN (2015): Adoption of the Paris Agreement. Framework Convention on Climate Change. United Nations. New York. Online verfügbar unter <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>.

UN (2018): World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. Average Annual Rate of Change of the Urban Population (per cent). custom data acquired via website. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. New York. Online verfügbar unter <https://population.un.org/wup/DataQuery/>, zuletzt geprüft am 16.04.2019.

Vensim. PLE (2019). Version 7.2: Ventana Systems, Inc. Online verfügbar unter <https://vensim.com/>, zuletzt geprüft am 03.02.2019.

- Weber, Karlheinz P. (1979): System Dynamics. Untersuchung eines kybernetisch-systemtheoretischen Modellansatzes unter besonderer Berücksichtigung von wachstumstheoretischen Modellen. Frankfurt am Main: R.G. Fischer.
- Weigert, Gerald; Rose, Oliver; Gocev, Pavel; Mayer, Gottfried (2010): Kennzahlen zur Bewertung logistischer Systeme. Performance Indicators for the Evaluation of Logistics Systems. In: Zülch, Gert und Stock, Patricia (Hg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel ;7. und 8. Oktober 2010. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (ASIM-Mitteilung, AM 131), S. 599–606.
- Werner, Hartmut (2013): Supply Chain Management. Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling. 5. Auflage. Wiesbaden: Springer.
- WHO (2016): Global Health Observatory data repository. Ambient air pollution. World Health Organization. Online verfügbar unter <http://apps.who.int/gho/data/view.main.SDGPM25116v?lang=en>, zuletzt geprüft am 01.05.2019.
- Wiendahl, Hans-Peter (1989): Grundlagen und Entwicklungsstand der Belastungsorientierten Fertigungssteuerung. In: Wiendahl, Hans-Peter (Hg.): Belastungsorientierte Fertigungssteuerung. Praxis und Weiterentwicklung. Tagungsbericht. München, 1988. Technische Universität Hannover; Gesellschaft für Management und Technologie. 2. Auflage. Hannover: Institut für Fabrikanlagen der Universität Hanover, S. 9–48.
- Wilms, Falko (Hg.) (2012): Wirkungsgefüge. Einsatzmöglichkeiten und Grenzen in der Unternehmensführung. 1. Auflage. Bern: Haupt.
- Wittenbrink, Paul (1995): Bündelungsstrategien der Speditionen im Bereich der City-Logistik. Eine ökonomische Analyse. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- World Bank (2018a): Population growth. World Bank Group (SP.POP.GROW). Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW?locations=GR>, zuletzt geprüft am 17.04.2019.
- World Bank (2018b): Rural population growth. World Bank Group (SP.RUR.GROW). Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/SP.RUR.TOTL.ZG?locations=GR>, zuletzt geprüft am 17.04.2019.
- World Bank (2018c): Urban population growth. World Bank Group (SP.URB.GROW). Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.GROW?locations=GR>, zuletzt geprüft am 17.04.2019.
- World Bank (2019a): Final consumption expenditure. World Bank Group (NE.CON.TOTL.KD.ZG). Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/NE.CON.TOTL.KD.ZG?locations=GR>, zuletzt geprüft am 21.04.19.
- World Bank (2019b): GNI (current LCU). World Bank Group (NY.GNP.MKTP.CN). Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GNP.MKTP.CN?end=2017&locations=GR&start=2000>, zuletzt geprüft am 20.04.19.

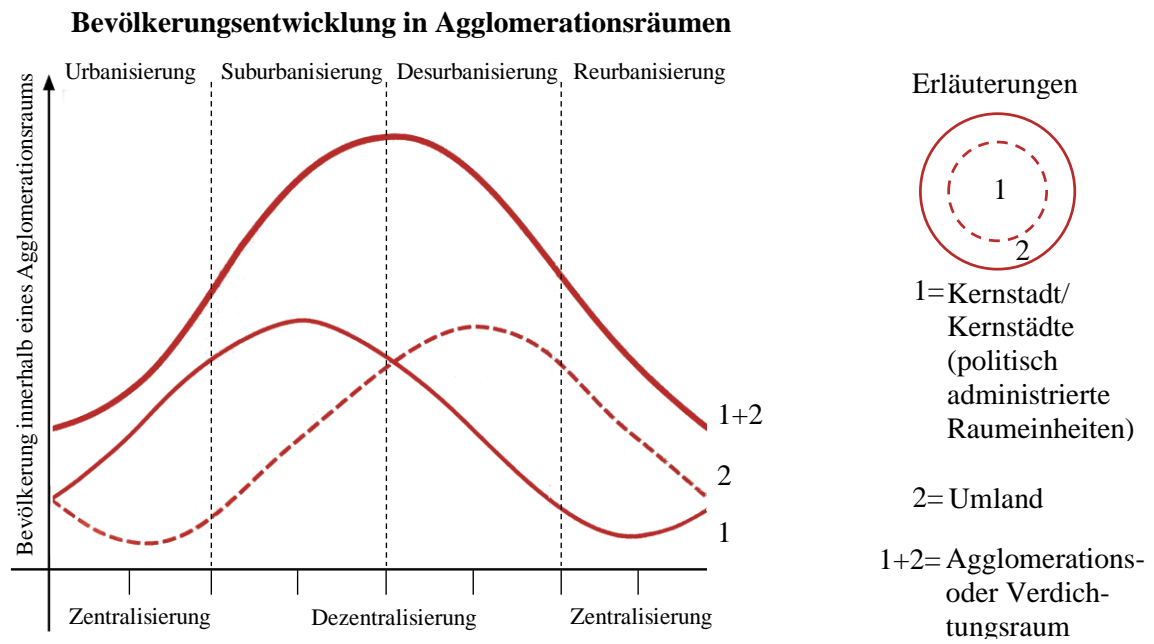
- World Bank (2019c): GNI per capita (current LCU). World Bank Group (NY.GNP.PCAP.CN). Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GNP.PCAP.CN?end=2017&locations=GR&start=1993>, zuletzt geprüft am 20.04.19.
- World Bank (2019d): Griechenland: Bevölkerungsentwicklung von 2008 bis 2018. World Bank Group; Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/203985/umfrage/bevoelkerungsentwicklung-in-griechenland/>, zuletzt geprüft am 21.04.2019.
- Zangemeister, Christof (1976): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. 4. Auflage. München: Wittemann.
- Zehle, Ines (1997): City-Logistik. Chancen der koordinierten Versorgung von Städten. 1. Auflage. Sinzheim: Pro Universitate Verlag.
- Zilahi-Szabó, Miklós Géza (2007): Betriebswirtschaftliche Instrumente. Nutzwertanalyse in der Beratungspraxis. In: Betriebswirtschaft im Blickpunkt, Heftnummer 07, S. 190–198. Online verfügbar unter <https://www.iww.de/bbp/archiv/betriebswirtschaftliche-instrumente-nutzwertanalyse-in-der-beratungspraxis-f24059>, zuletzt geprüft am 10.05.2019.
- Zirn, Oliver; Weikert, Sascha (2006): Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme. Eine praxisnahe Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Εθνικό Τυπογραφείο (2012): ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ. ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ. Online verfügbar unter http://www.et.gr/idoocs-nph/search/pdfViewer-Form.html?args=5C7QrtC22wEbA_BZxkczbHdtvSo-ClrL8NFVwjN9oWbb3U4LPcASlceJInJ48_97uHrMts-zFzeyCiBSQOpYn-Ty36MacmUFCx2ppFvBej56Mmc8Qdb8ZfRJqZnsIAdk8Lv_e6czm-hEembNmZCMxLMtazFy6AsvkyO35ftQvjIt-mgtRqh0TRGx3aPNdgJTBqg, zuletzt geprüft am 15.06.19.
- ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΡΧΗ (2011): Volkszählung 2011. Hellenic Statistical Authority. Online verfügbar unter https://web.archive.org/web/20111011061403/http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/BUCKET/General/A1602_SAM01_DT_DC_00_2011_01_F_GR und <http://www.statistics.gr/2011-census-pop-hous>, zuletzt geprüft am 16.04.2019.
- Σαρηγιάννης, Γεώργιος Μ. (2007): ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ. Προσωρινές σημειώσεις για το μάθημα «ειδικά θέματα περιβάλλοντος». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Online verfügbar unter http://courses.arch.ntua.gr/fsr/113496/ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ_ΡΥΠΑΝΣΗ.pdf.

Anhang

Anhang 1: Bevölkerungsentwicklung in Agglomerationsräumen	113
Anhang 2: Topographische Karte vom Agglomerationsraum Athen.....	114
Anhang 3: Karte von Athen mit Messstationen	115
Anhang 4: Darstellung des Simulationsmodells - Übersicht ohne Vergrößerung	116
Anhang 5: Darstellung des Simulationsmodells - Stadtmodell.....	117
Anhang 6: Darstellung des Simulationsmodells - Verkehrsmodell	118
Anhang 7: Darstellung des Simulationsmodells - Lagermodell.....	119
Anhang 8: Darstellung des Simulationsmodells - Belieferungsmodell.....	120
Anhang 9: Darstellung des Simulationsmodells - Fuhrparkmodell	121
Anhang 10: Darstellung des Simulationsmodells - Kostenmodell.....	122
Anhang 11: Wirkzusammenhänge - Stadtmodell.....	125
Anhang 12: Wirkzusammenhänge – Verkehrsmodell	129
Anhang 13: Wirkzusammenhänge – Lagermodell.....	130
Anhang 14: Wirkzusammenhänge - Belieferungsmodell	133
Anhang 15: Wirkzusammenhänge - Fuhrparkmodell	136
Anhang 16: Wirkzusammenhänge - Kostenmodell	138
Anhang 17: Eingangsfaktoren zur Anpassung des Systems	139
Anhang 18: Simulationsmodell - Stadtmodell	145
Anhang 19: Simulationsmodell - Verkehrsmodell.....	151
Anhang 20: Simulationsmodell - Lagermodell	153
Anhang 21: Simulationsmodell - Belieferungsmodell.....	158
Anhang 22: Simulationsmodell - Fuhrparkmodell.....	163
Anhang 23: Simulationsmodell – Kostenmodell	167
Anhang 24: Beispieldiagramme für die Effekte der Faktoren auf verspätete Paletten	168
Anhang 25: Beispieldiagramm für das Wahrscheinlichkeitsnetz bei nicht rechtzeitig transportierten Paletten.....	169
Anhang 26: Karte aller Zieldestinationen und Lagerstandorten	170
Anhang 27: Karte der Zieldestinationen und Lagerstandorte mit der Fokussierung auf den Agglomerationsraum Athen.....	171
Anhang 28: Schadstoffnormen bei Fahrzeugen	172
Anhang 29: Ausgewählte Eingangsfaktoren zur Anpassung des Modells.....	173
Anhang 30: Daten der teilfaktoriellen Versuchsplanung	177
Anhang 31: Teilfaktorieller Versuchsplan mit Ausprägungen und Ergebnissen	180
Anhang 32: Ausführliche Ergebniswerte beim teilfaktoriellen Versuchsplan.....	184
Anhang 33: Ergebnisse der Effektivitätsanalyse aller Faktoren bei den laufenden Kosten..	189
Anhang 34: Ergebnisse der Effektivitätsanalyse aller Faktoren bei den nicht rechtzeitig transportierten Paletten	194
Anhang 35: Ergebnisse der Effektivitätsanalyse aller Faktoren bei der Auslastung der Fahrzeuge	198
Anhang 36: Haupteffektdiagramm für die laufenden Kosten	199

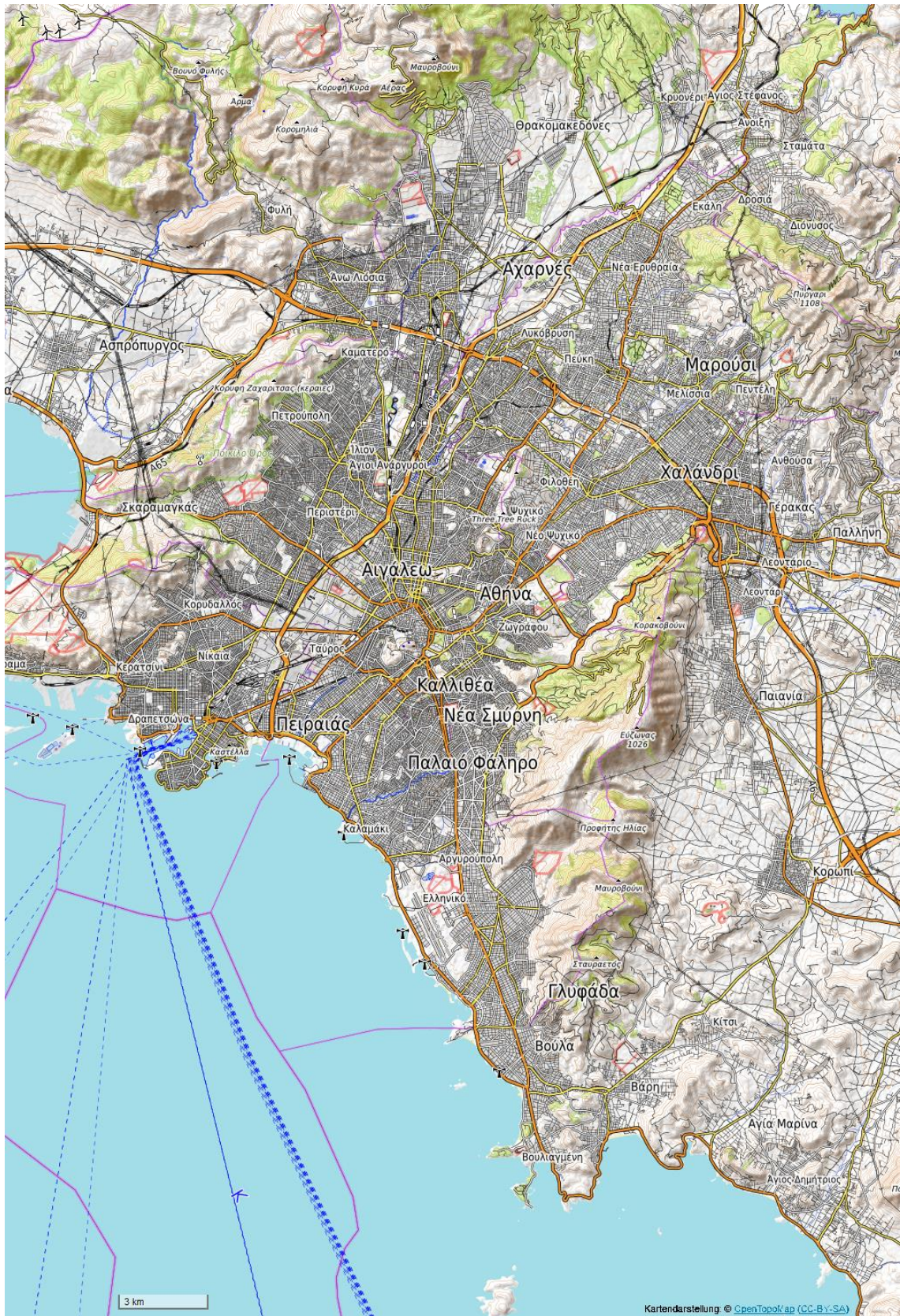
Anhang 37: Haupteffektdiagramm für die verspäteten Paletten	200
Anhang 38: Haupteffektdiagramm der Auslastung des Fuhrparks	201
Anhang 39: Effekte der Faktoren auf die Auslastung des Fuhrparks.....	202
Anhang 40: Effekte der Faktoren auf die laufenden Kosten	203
Anhang 41: Effekte der Faktoren auf verspäteten Paletten.....	204
Anhang 42: Wahrscheinlichkeitsnetze der drei messbaren Bewertungskriterien	205
Anhang 43: Verweisliste für die Durchlaufnummern bei den Experimenten für die Bewertung von Belieferungsstrategien.....	207
Anhang 44: Verweisliste für die Faktoren und Ergebnisse bei den Experimenten für die Bewertung von Belieferungsstrategien.....	208
Anhang 45: Vollständige Auflistungen der bewerteten Belieferungsstrategien	210
Anhang 46: Ausführliche Ergebniswerte bei den Experimenten der Beliieferungsstrategien	213
Anhang 47: Konfidenzintervall für die Ergebnisse der grundlegenden Beliieferungsstrategien	214
Anhang 48: Konfidenzintervall für die laufenden Kosten bei der Verwendung eines unterschiedlich großen Fuhrparks	215
Anhang 49: Konfidenzintervall für die laufenden Kosten bei der Anzahl der Fahrzeuge in der Cargocap Belieferungsstrategie.....	215
Anhang 50: Konfidenzintervall für die laufenden Kosten bei der Anzahl der Kapazitätsanpassungen im Fuhrpark	215
Anhang 51: Konfidenzintervall für die laufenden Kosten bei der Verwendung mehrerer Lager.....	216
Anhang 52: Konfidenzintervalle für die laufenden Kosten bei der Verschärfung der Einfahrbeschränkungen	216
Anhang 53: Konfidenzintervalle für die laufenden Kosten für bei der Verwendung der Cargocap Belieferungsstrategie in Kombination mit weiteren Beliieferungsstrategien	216
Anhang 54: Verweisnummerntabelle für die Darstellung der Beliieferungsstrategiekombinationen in Konfidenzintervallen	217
Anhang 55: Konfidenzintervalle für die laufenden Kosten bei der Verwendung der Beliieferungsstrategien in Kombination miteinander	218
Anhang 56: Konfidenzintervalle für die nicht rechtzeitig transportierten Paletten bei der Verwendung einzelner Belieferungsstrategien	219
Anhang 57: Konfidenzintervalle für die nicht rechtzeitig transportierten Paletten bei der Verwendung kombinierter Belieferungsstrategien.....	220
Anhang 58: Konfidenzintervalle für die nicht rechtzeitig transportierten Paletten bei der Verwendung kombinierter Belieferungsstrategien im Vergleich zur Ausgangslage bei veränderten Randbedingungen	221
Anhang 59: Konfidenzintervalle für die nicht rechtzeitig transportierten Paletten bei der Anpassung der Fuhrparkgröße.....	222

Anhang 60: Konfidenzintervalle für die nicht rechtzeitig transportierten Paletten bei der Cargocap Belieferungsstrategie	222
Anhang 61: Konfidenzintervalle für die nicht rechtzeitig transportierten Paletten bei der Kapazitätsanpassung des Fuhrparks	223
Anhang 62: Konfidenzintervalle für die nicht rechtzeitig transportierten Paletten bei Veränderung der Einfahrverbotszone	223
Anhang 63: Bewertungstabelle der kombinierten Belieferungsstrategien	224
Anhang 64: Bewertungstabelle der kombinierten Belieferungsstrategien im verschärften Fahrverbotsfall.....	225



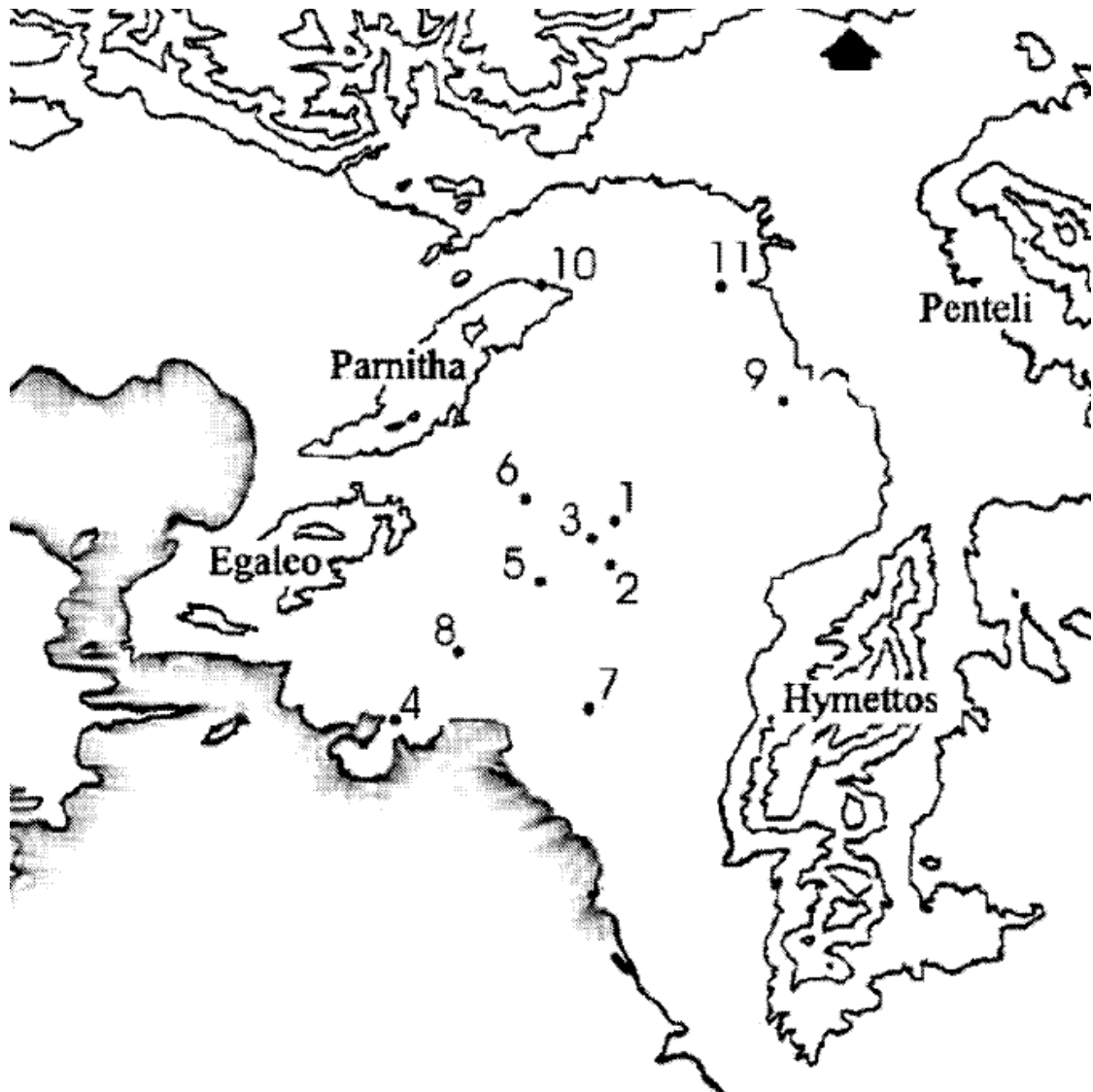
Anhang 1: Bevölkerungsentwicklung in Agglomerationsräumen (Nach Quelle Gaebel 1987).

Topographische Karte der Stadt Athen



Anhang 2: Topographische Karte vom Agglomerationsraum Athen.

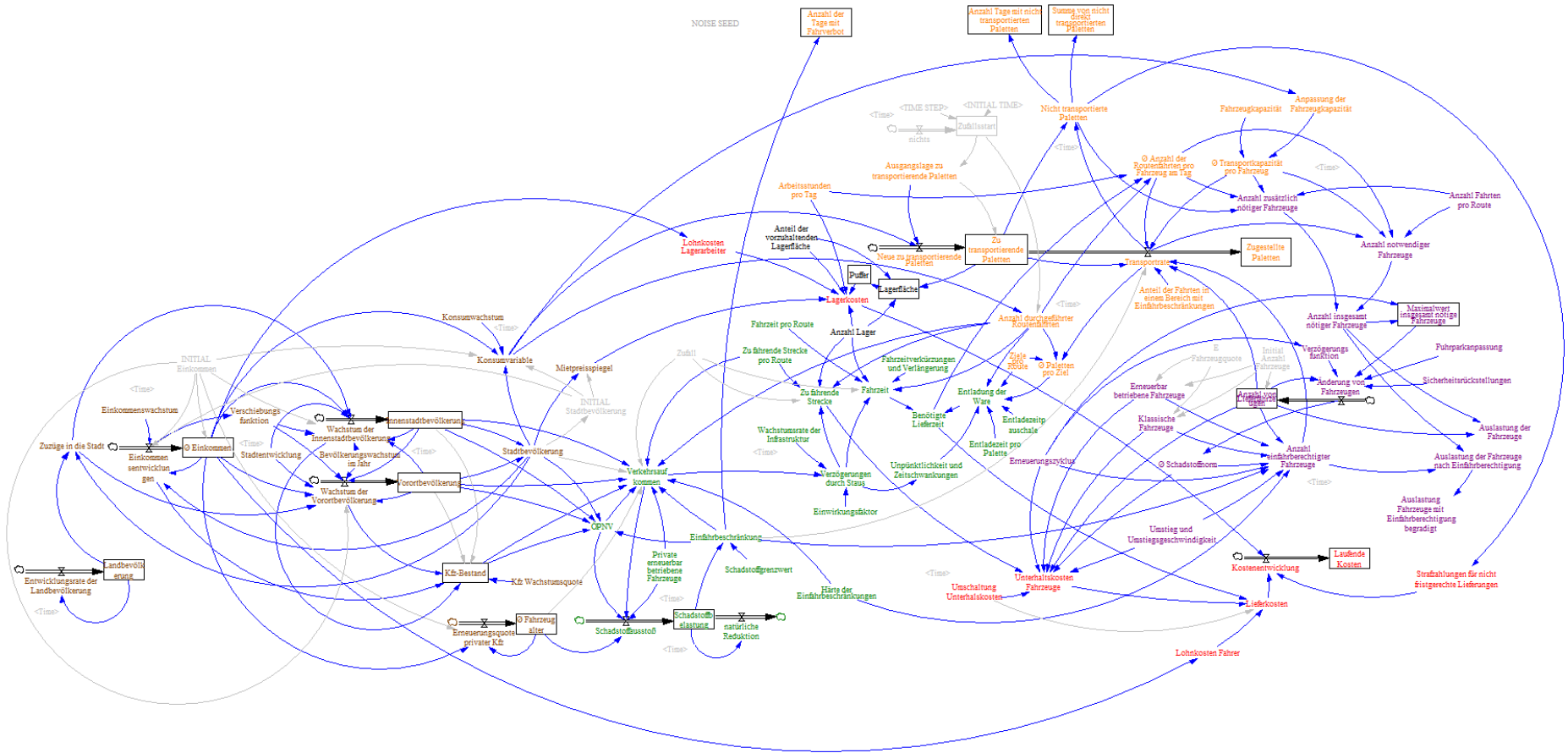
Karte mit der Position von Messtationen in Athen



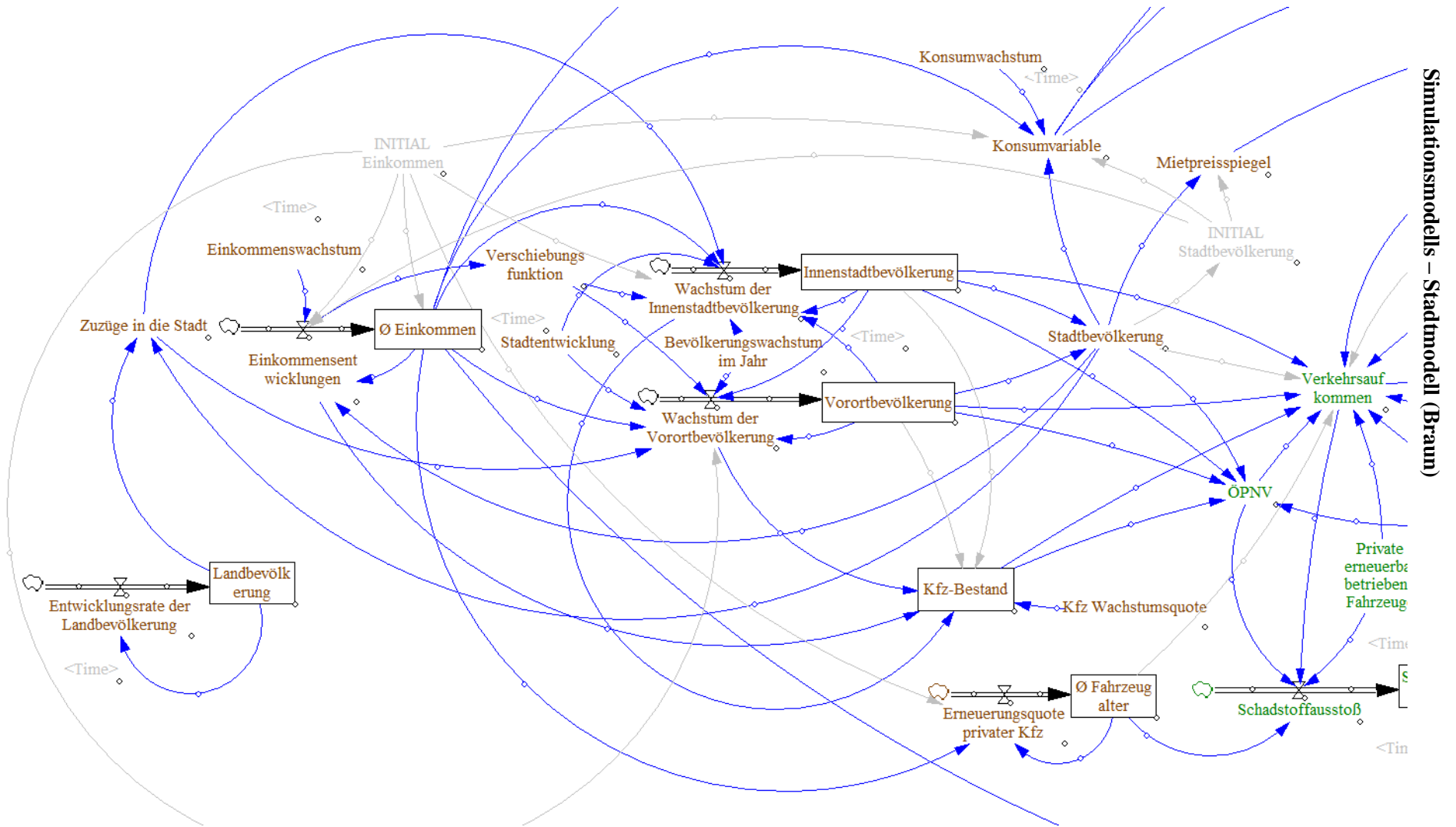
Stationsnummer	Gebiet	Gebietescharacter
1	„Patission“	Gewerblich bis Wohngegend
2	„Athena's“	Gewerbliche Gegend
3	„Aristotelous“	Gewerblich bis Wohngegend
4	„Piraeus“	Gewerblich bis Wohngegend
5	„Geoponiki“	Industriegebiet
6	„Peristeri“	Gewerblich bis Wohngegend
7	„N. Smyrni“	Wohngegend
8	„Rentis“	Industriegebiet
9	„Maroussi“	Wohngegend
10	„Liossia“	Landwirtschaft bis Wohngegend
11	„Likovrissi“	Wohngegend

Anhang 3: Karte von Athen mit Messstationen (Nach Quelle: Economopoulou und Economopoulos 2002, S. 278).

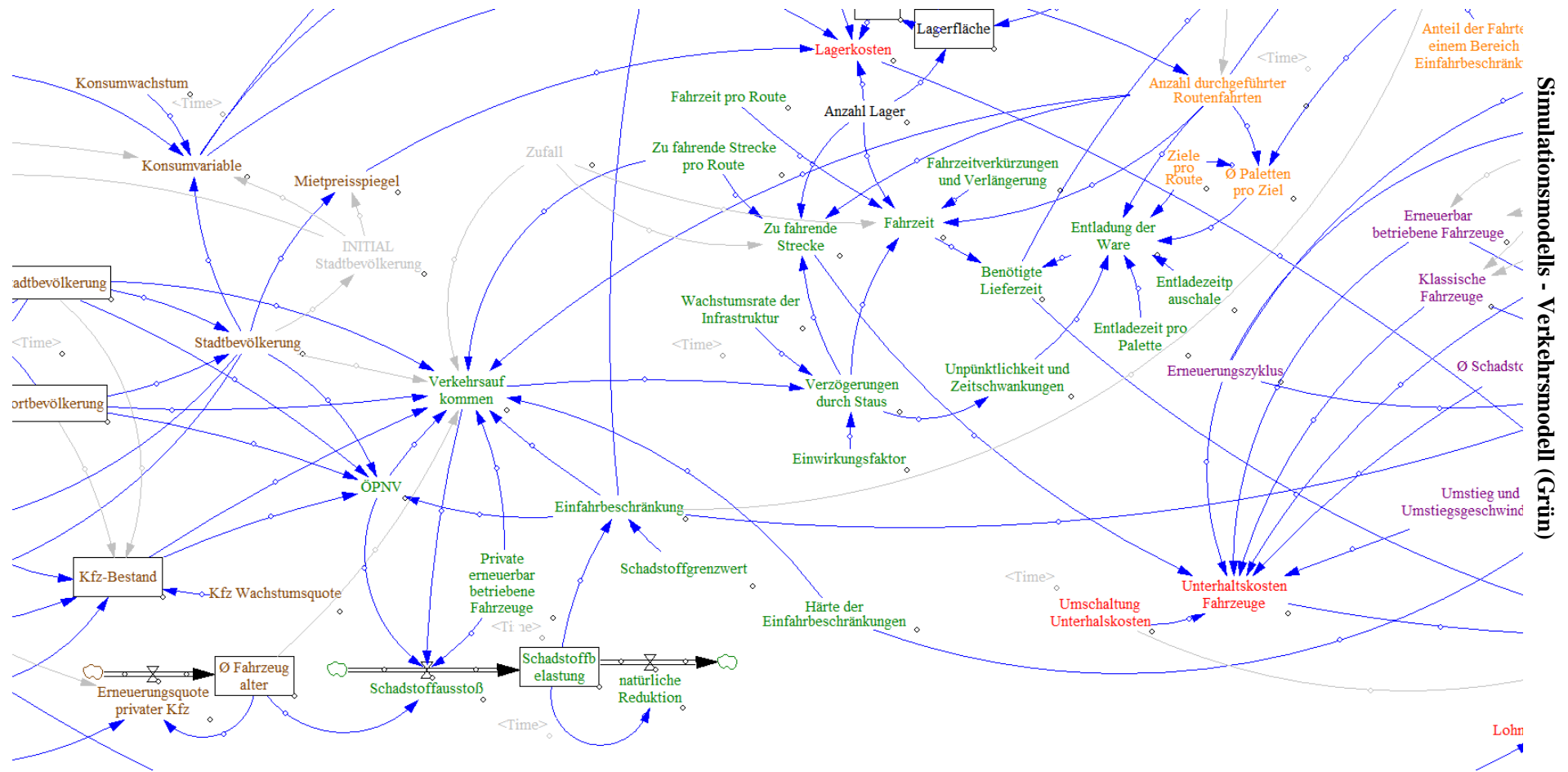
Simulationsmodells - Übersicht ohne Vergrößerung



Anhang 4: Darstellung des Simulationsmodells - Übersicht ohne Vergrößerung (Quelle: Screenshot des Simulationsmodells bei Vensim PLE 7.2).

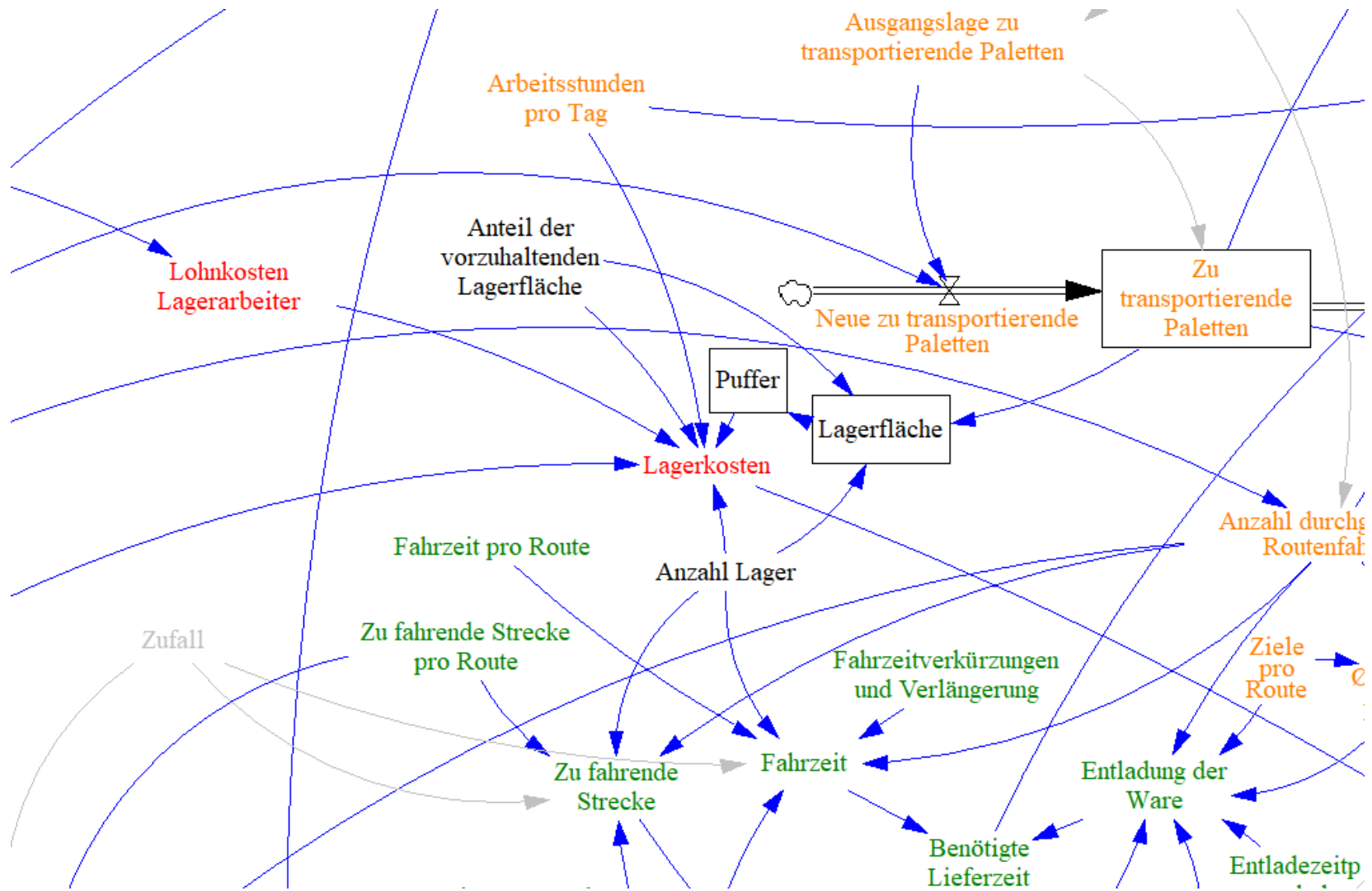


Anhang 5: Darstellung des Simulationsmodells - Stadtmodell (Quelle: Screenshot des Simulationsmodells bei Vensim PLE 7.2).



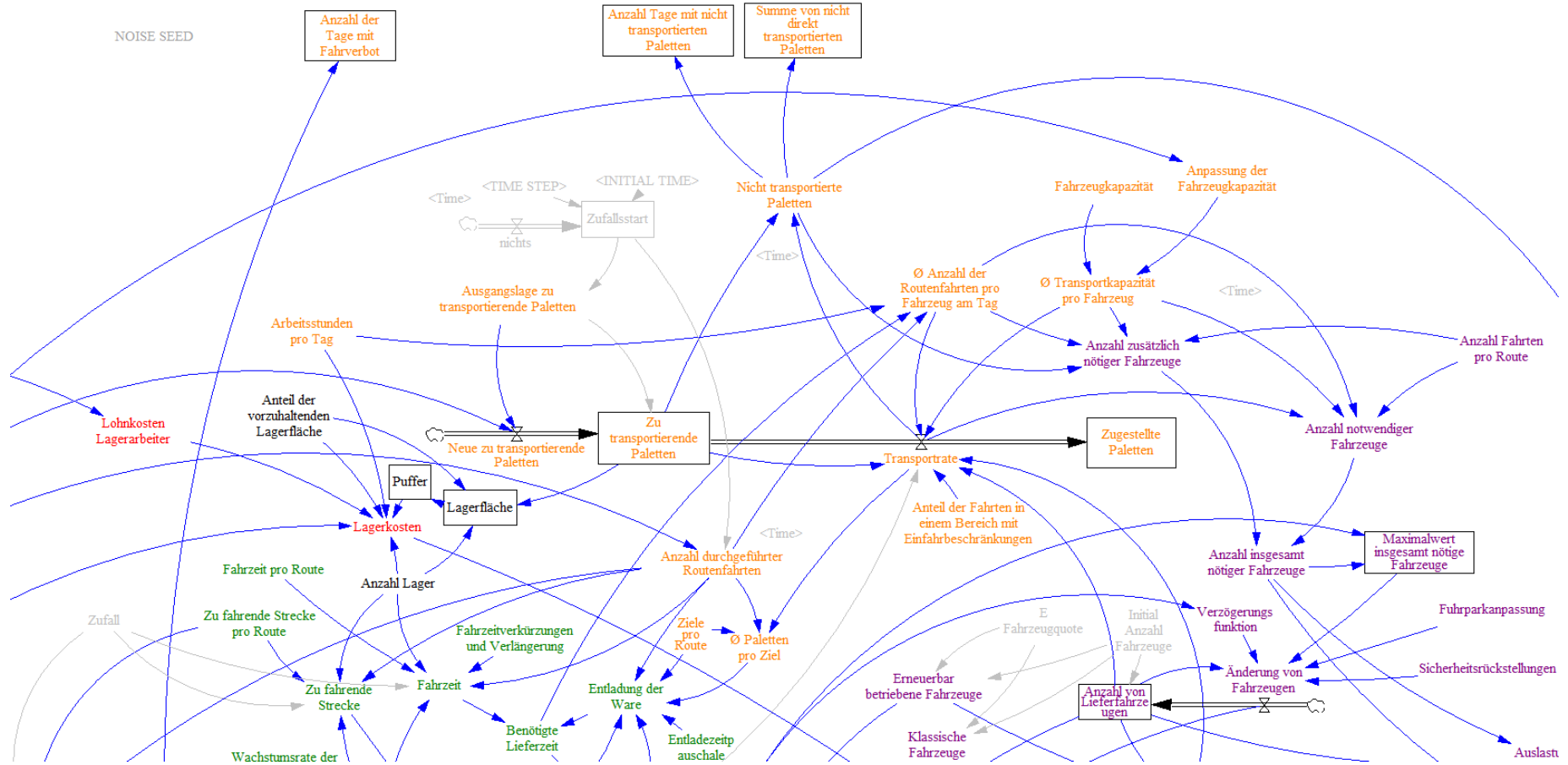
Anhang 6: Darstellung des Simulationsmodells - Verkehrsmodell(Quelle: Screenshot des Simulationsmodells bei Vensim PLE 7.2).

Simulationsmodells – Lagermodell (Schwarz)



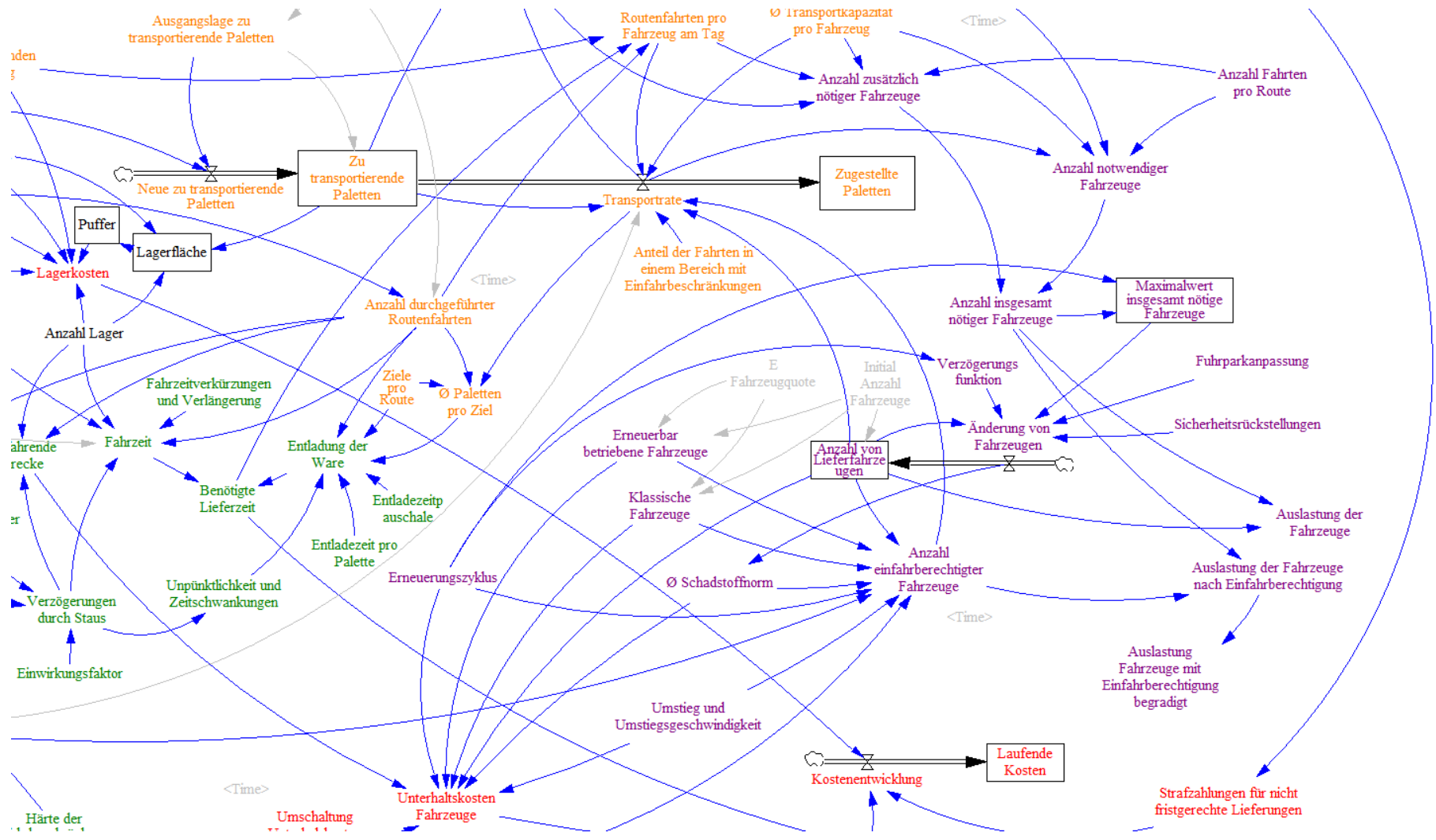
Anhang 7: Darstellung des Simulationsmodells - Lagermodell (Quelle: Screenshot des Simulationsmodells bei Vensim PLE 7.2).

Simulationsmodell – Belieferungsmodell (Orange)

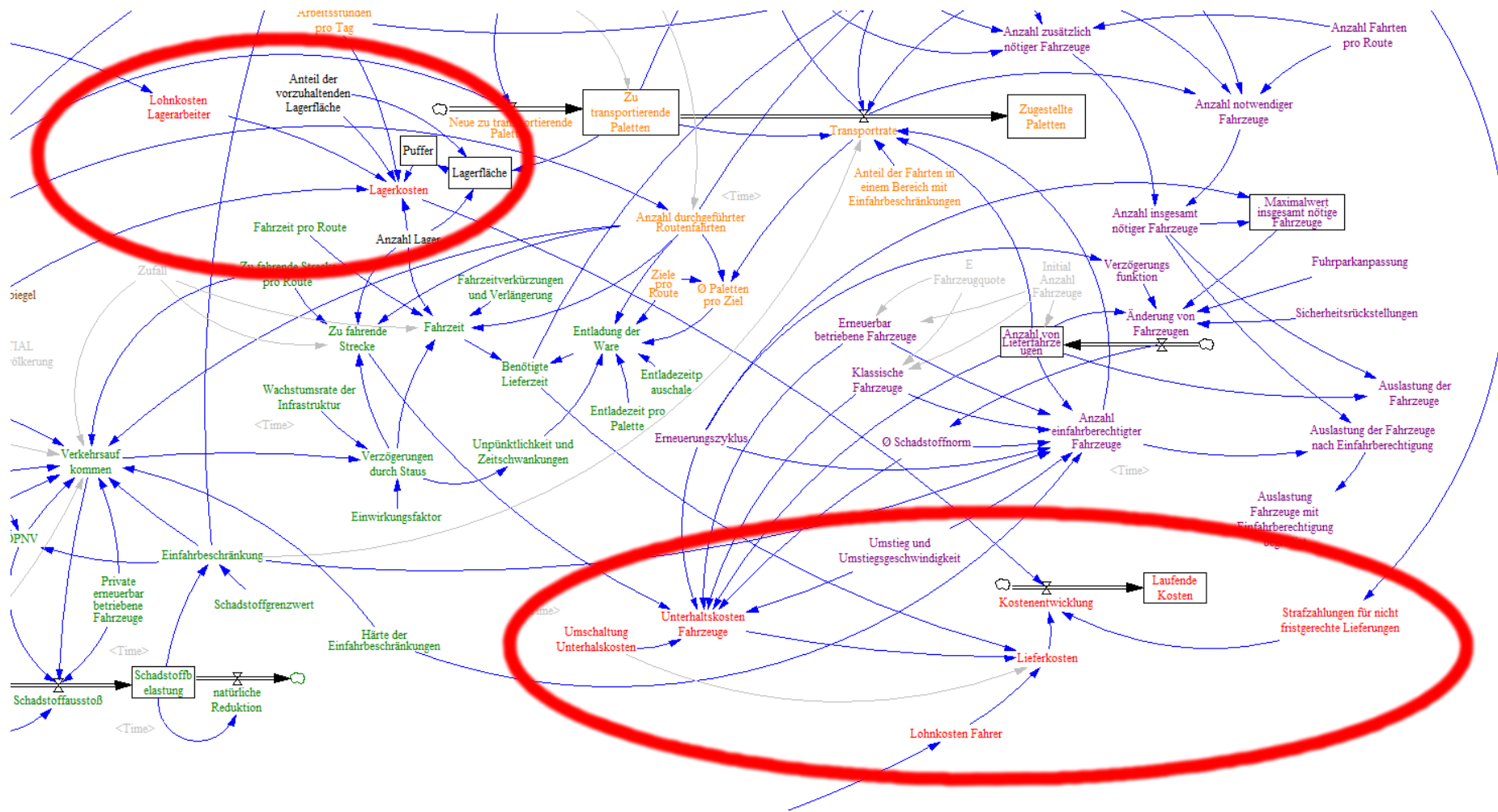


Anhang 8: Darstellung des Simulationsmodells - Belieferungsmodell (Quelle: Screenshot des Simulationsmodells bei Vensim PLE 7.2).

Simulationsmodells – Fuhrparkmodell (Magenta)



Anhang 9: Darstellung des Simulationsmodells - Fuhrparkmodell (Quelle: Screenshot des Simulationsmodells bei Vensim PLE 7.2).



Anhang 10: Darstellung des Simulationsmodells - Kostenmodell (Quelle: Screenshot des Simulationsmodells bei Vensim PLE 7.2).

Wirkzusammenhänge - Stadtmodell

Entität	Eingänge	Erläuterung
<i>Entwicklungsrate der Landbevölkerung</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Landbevölkerung</i> ▪ <i>Time</i> 	Statistiken zeigen ein zunehmendes Wachstum von Städten wohingegen die ländlich lebende Bevölkerung abnimmt. Für die Abbildung des Effekts des Bevölkerungsrückgangs wurde die FG der <i>Landbevölkerung</i> in das Modell eingebunden. Die Größe des Rückgangs ist von der Größe der Landbevölkerung abhängig, weshalb die BG <i>Landbevölkerung</i> als Eingangsgröße einfließt.
<i>Landbevölkerung (BG)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Entwicklungsrate der Landbevölkerung</i> 	Die Landbevölkerung bildet ein Potential für Zuzüge in die Stadt, weshalb die Größe der Landbevölkerung abgebildet wird. Die Veränderungen der BG werden durch die zugehörige FG eingebunden.
<i>Zuzüge in die Stadt</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Landbevölkerung</i> ▪ <i>Stadtbevölkerung</i> 	HG für die Veränderung der FG <i>Bevölkerungswachstums in der Stadt</i> im Kontext von Zuzügen von der Landbevölkerung in den Agglomerationsraum. Da die Landbevölkerung ein Potential für Zuzüge in die Stadt bildet, wird das Bevölkerungswachstum in der Stadt bei einer kleiner werdenden Landbevölkerung um bis zu 10 Prozent reduziert.
<i>Einkommenswachstum (Lookup)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Time</i> 	Das durchschnittliche Einkommen ist unterschiedlichsten Einflüssen ausgesetzt, die zu Veränderungen führen, wie der Inflation. Zur genauen Abbildung wird das Einkommenswachstum mit über den Untersuchungszeitraum veränderlichen Wachstumswerten in das Modell eingebunden.
<i>Einkommensentwicklungen</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Einkommenswachstum</i> ▪ \emptyset <i>Einkommen</i> ▪ <i>Stadtbevölkerung</i> 	Die FG bindet die Anpassung des Einkommens in das Modell ein. Als relevante Einflüsse wurden zum einen prognostizierte Wachstumsraten mit den Werten des Landesdurchschnitts identifiziert. Zum anderen wurde eine Einkommenssteigerung in Städten im Vergleich zur Landbevölkerung identifiziert, die mit der Anzahl der Einwohner im Agglomerationsraum in der FG abgebildet wird.
\emptyset <i>Einkommen</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Einkommensentwicklungen</i> 	Das Einkommen wurde als bedeutender Faktor für die Entwicklungen in der Stadt identifiziert. Das Einkommen beeinflusst den <i>Konsum</i> und Einkommensschwankungen können die Wachstumsrate einer Stadt verändern. Das <i>durchschnittliche Einkommen</i> wird daher als für die Modellierung relevant befunden und abgebildet.
<i>Stadtentwicklung</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Time</i> 	Stadtteile unterliegen unterschiedlichen aber voneinander abhängigen Wachstums- und Verfallszyklen (Abschnitt 2.1). Mit der Entität <i>Stadtentwicklung</i> wird die Verschiebung des Bevölkerungswachstums in der Stadt abgebildet. Die Entität wird für das Modell als relevant angenommen, da ein Wachstum der Bevölkerung in Vororten zu einem stärker steigenden Verkehrsaufkommen führt als ein Wachstum der Bevölkerung in der Innenstadt. Mit einem steigenden Verkehrsaufkommen werden mehr Schadstoffe im Straßenverkehr freigesetzt, wodurch die Wahrscheinlichkeit von EFBen im Untersuchungsraum steigt. Das hohe Verkehrsaufkommen führt mit Staus zusätzlich zu einer Steigerung der Fahrzeiten bei Lieferfahrten.

Entität	Eingänge	Erläuterung
<i>Verschiebungsfunktion</i> (Lookup)	▪ <i>Einkommensentwicklung</i>	Bei einem signifikanten Rückgang des Einkommens wurde ein Rückgang der geplanten Geburten erkannt. Die Entität <i>Verschiebungsfunktion</i> wirkt als neun Monate verzögerter Veränderungsfaktor für die Berechnung des Rückgangs beim Bevölkerungswachstum. Die Entität sorgt für einen fließenden Übergang bei der Berechnung des Rückgangs des Bevölkerungswachstums bei einem geringeren Einkommenswachstum.
<i>Bevölkerungswachstum im Jahr</i> (Lookup)	▪ <i>Time</i>	Das Bevölkerungswachstum wurde als bedeutender Einflussfaktor für die Zukunft einer Stadt erkannt, wobei das Wachstum selbst Schwankungen unterliegt. Die Entität <i>Bevölkerungswachstum im Jahr</i> bildet das schwankende Bevölkerungswachstums über die Zeit hinweg ab.
<i>Wachstum der Innenstadtbevölkerung</i>	▪ <i>Stadtentwicklung</i> ▪ \emptyset <i>Einkommen</i> ▪ <i>Zuzüge in die Stadt</i> ▪ <i>Verschiebungsfunktion</i> ▪ <i>Bevölkerungswachstum im Jahr</i> ▪ <i>Innenstadtbevölkerung</i> ▪ <i>Vorortbevölkerung</i>	Für das Wachstum der Bevölkerung in der Innenstadt wurden unterschiedliche Einflussfaktoren erkannt. In der FG <i>Wachstum der Innenstadtbevölkerung</i> werden die Einflussfaktoren in einer Rechnung zusammengezogen und die tägliche Veränderungsrate der Innenstadtbevölkerung bestimmt. Die FG fasst den Zu- und den Abfluss bei der BG <i>Innenstadtbevölkerung</i> zusammen. Bei einem Rückgang der Bevölkerung wird die FG entsprechend negativ.
<i>Innenstadtbevölkerung</i> (BG)	▪ <i>Wachstum der Innenstadtbevölkerung</i>	Die BG <i>Innenstadtbevölkerung</i> gibt die Größe der Innenstadtbevölkerung zum jeweiligen Untersuchungszeitpunkt an. Aufgrund der <i>Stadtentwicklung</i> verläuft das Wachstum der BG <i>Innenstadtbevölkerung</i> anders als das Wachstum der BG <i>Vorortbevölkerung</i> , was Auswirkungen auf das Verhalten der HG <i>Verkehrsaufkommen</i> hat.
<i>Wachstum der Vorortbevölkerung</i>	▪ <i>Stadtentwicklung</i> ▪ \emptyset <i>Einkommen</i> ▪ <i>Zuzüge in die Stadt</i> ▪ <i>Verschiebungsfunktion</i> ▪ <i>Bevölkerungswachstum im Jahr</i> ▪ <i>Innenstadtbevölkerung</i> ▪ <i>Vorortbevölkerung</i>	Für das Wachstum der Bevölkerung in den Vororten wurden unterschiedliche Einflussfaktoren erkannt. In der FG <i>Wachstum der Vorortbevölkerung</i> werden die Einflussfaktoren in einer Rechnung zusammengezogen und die tägliche Veränderungsrate der Vorortbevölkerung bestimmt. Die FG fasst den Zu- und den Abfluss bei der BG <i>Vorortbevölkerung</i> zusammen. Bei einem Rückgang der Bevölkerung wird die FG entsprechend negativ.
<i>Vorortbevölkerung</i> (BG)	▪ <i>Wachstum der Vorortbevölkerung</i>	Die BG <i>Vorortbevölkerung</i> gibt die Größe der Vorortbevölkerung zum jeweiligen Untersuchungszeitpunkt an. Aufgrund der <i>Stadtentwicklung</i> verläuft das Wachstum der BG <i>Vorortbevölkerung</i> anders als das Wachstum der BG <i>Innenstadtbevölkerung</i> , was Auswirkungen auf das Verhalten der HG <i>Verkehrsaufkommen</i> hat.
<i>Stadtbevölkerung</i>	▪ <i>Innenstadtbevölkerung</i> ▪ <i>Vorortbevölkerung</i>	Neben der Größe der Vorortbevölkerung und der Innenstadtbevölkerung wird für Rechnungen die Stadtbevölkerung als Ganzes ebenfalls in dem Modell modelliert.

Entität	Eingänge	Erläuterung
<i>Mietpreis- spiegel</i>	▪ <i>Stadtbevölkerung</i>	Der Mietpreis wurde als ein Kostenfaktor von Logistikdienstleistern für die Miete einer Lagerhalle identifiziert. Für die Entwicklung des Mietpreises werden die Werte der HG <i>Stadtbevölkerung</i> verwendet.
<i>Konsumvariable</i>	▪ <i>Stadtbevölkerung</i> ▪ <i>Einkommen</i> ▪ <i>Time</i>	Mit dem Wachstum der Stadtbevölkerung verändert sich eine für die Logistikdienstleister entscheidende Stellgröße, das Liefervolumen. In diesem Modell wird über einen wachsenden Konsum das steigende Liefervolumen abgebildet. Im Kontext des Wachstums von Liefervolumen wird angenommen, dass die Menge an Zielen im Untersuchungsraum konstant bleibt. Als HG für die Berechnung des Konsumwachstums wird als Vereinfachung das Wachstum der Stadtbevölkerung und die Zeit verwendet.
<i>Konsumwachstum (Lookup)</i>	▪ <i>Time</i>	Zusätzlich zu einer Steigerung des Liefervolumens im Verhältnis zur Bevölkerung wurde ein steigendes Liefervolumen in Abhängigkeit zur Zeit identifiziert. Die Entität <i>Konsumwachstum</i> gibt dieses prozentuale Wachstum des Konsums pro Jahr in der Lookupfunktion wieder.
<i>KFZ-Bestand (BG)</i>	▪ <i>Wachstum der Innenstadtbevölkerung</i> ▪ <i>Wachstum der Vorortbevölkerung</i> ▪ <i>Einkommensentwicklung</i> ▪ <i>Kfz Wachstumsquote</i>	Die hohe Konzentration von Kraftfahrzeugen im Bereich der Stadt verursacht einen signifikanten Anteil der Schadstoffe in der Luft. Für die Berechnung des Schadstoffausstoßes wird daher die Größe des KFZ-Bestands im Untersuchungsraum als bedeutend eingestuft und modelliert. Beim Bestand wurde eine auffällige Verteilung von Kfz nach Stadtbereichen erkannt, die ebenfalls im Modell abgebildet wird.
<i>Kfz Wachstumsquote</i>	—	Politische Steuerungsversuche können den Kfz-Bestand beeinflussen. Die Entität <i>Kfz Wachstumsquote</i> ist in das Modell aufgenommen worden, um Steuerungsversuche durch die Politik abzubilden zu können.
<i>Erneuerungsquote privater Kfz</i>	▪ <i>Ø Fahrzeugalter</i> ▪ <i>Ø Einkommen</i>	Das Fahrzeugalter ist als signifikanter Einfluss auf den Schadstoffausstoß identifiziert worden. Daher werden das durchschnittliche Fahrzeugalter und die Veränderung des Fahrzeugalters in einer BG und FG modelliert.
<i>Ø Fahrzeugalter (BG)</i>	▪ <i>Erneuerungsquote privater Kfz</i>	BG für die das durchschnittlichen Alters beim privaten KFZ-Bestand.

Anhang 11: Wirkzusammenhänge - Stadtmodell.

Wirkzusammenhänge - Verkehrsmodell

Entität	Ein- und Ausgänge	Erläuterung
<i>Schadstoffausstoß</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ \emptyset <i>Fahrzeugalter</i> ▪ <i>Kfz-Bestand</i> ▪ <i>ÖPNV</i> ▪ <i>Verkehrsaufkommen</i> ▪ <i>Time</i> ▪ <i>Private erneuerbar betriebene Fahrzeuge</i> 	<p>Für den Schadstoffausstoß wurden mehrere signifikante Einflussfaktoren identifiziert.</p> <p>Fahrzeuge, Fahrzeugalter, unterschiedlichen Streckenabschnitte, das Verbleiben des Schadstoffs in der Umgebung, das Wetter, natürliche Schadstoffquellen, verstärkte Bebauung und unterschiedliche Arten von Schadstoffen erschweren eine Abbildung. Für die zu untersuchenden EFBen in Städten sind in unterschiedlichen Ländern Schwerpunkte auf unterschiedliche Schadstoffe gelegt worden. Für eine realitätsnahe Abbildung ist eine eigenständige komplexe Simulation mit einer Beschränkung auf einzelne Schadstoffe wie den NO₂- oder den Feinstaubausstoß notwendig. Aufgrund der unzureichenden Datenlage und der Verhältnismäßigkeit der Simulation zum Erreichen des Simulationsziels wird für den Schadstoffausstoß eine Vereinfachung verwendet. Für eine allgemeingültige Verwendung wird im Folgenden die Vereinfachung von konkreten Schadstoffen auf den allgemeingültigen Begriff Schadstoffe und die Verwendung einer dimensionslosen Kennzahl mit der BG <i>Schadstoffbelastung</i> als sinnvoll betrachtet. Für die Anpassung und Auswertung der verbundenen Entitäten sind jedoch die Eigenschaften der unterschiedlichen Schadstoffe zu berücksichtigen. Im Modell wird die FG <i>Schadstoffausstoß</i> in Abhängigkeit der verwendeten Fahrzeuge und deren Laufleistung ermittelt.</p>
<i>Schadstoffbelastung (BG)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Schadstoffausstoß</i> Δ <i>Natürliche Reduktion</i> 	<p>BG der Schadstoffbelastung in der Stadt als dimensionslose Zahl ohne Bezug auf einzelne SWe.</p>
<i>Natürliche Reduktion</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Schadstoffbelastung</i> ▪ <i>Time</i> 	<p>Für den Rückgang von SWen wurden ebenfalls mehrere signifikante Einflussfaktoren identifiziert. Zu den erkannten Faktoren gehören Wettereffekte, Jahreszeiten und die Luftzirkulation im Kontext der Bebauung der Stadt. Die Einflussfaktoren werden über zyklische Schwankungen und Zufallswerte in die FG <i>Natürliche Reduktion</i> eingebracht.</p>
<i>Einfahrbeschränkung</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Schadstoffbelastung</i> ▪ <i>Schadstoffgrenzwerte</i> 	<p>Bei einer Überschreitung von SGW wurde eine Verpflichtung der Politik zur Verbesserung der Luftqualität identifiziert. Als gängige Maßnahme wurde EFBen in besonders belastete Bereiche erkannt, die mit der Entität <i>Einfahrbeschränkungen</i> ebenfalls in das Modell aufgenommen wird. Die Entität verwendet einen binären Ausgangswert für das Aufzeigen von EFBen bei der Überschreitung des SGWes.</p>
<i>Schadstoffgrenzwert</i>	—	<p>Der Eingangsfaktor <i>Schadstoffgrenzwert</i> wird verwendet, um das Modell an Randbedingungen anzupassen. Die Entität gibt vor, ab welcher Schadstoffbelastung eine Einfahrtbeschränkung in Kraft tritt.</p>

Entität	Ein- und Ausgänge	Erläuterung
<i>Härte der Einfahrbeschränkungen</i>	—	Neben politischen Steuerungsmethoden beim Kfz-Bestand sind politisch motivierte Veränderungen der EFBen als mögliche Veränderung im zu untersuchenden System identifiziert worden. Während eine EFB von der Hälfte der Fahrzeuge als gängige Variante identifiziert wurde, sind stärkere Einschränkungen denkbar. Daher wurde die HG <i>Härte der Einfahrbeschränkungen</i> zur Anpassung des Modells mit abgebildet.
<i>ÖPNV</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Vorortbevölkerung</i> ▪ <i>Innenstadtbevölkerung</i> ▪ <i>Einfahrbeschränkung</i> ▪ <i>Kfz-Bestand</i> 	Neben der Verwendung von privaten Kfz wurde der ÖPNV als Straßenteilnehmer identifiziert. Mit der Einwirkung vom ÖPNV am Verkehrsaufkommen wird der ÖPNV ebenfalls als für das Modell relevant befunden und als HG <i>ÖPNV</i> in das Modell eingebunden.
<i>Verkehrsaufkommen</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Innenstadtbevölkerung</i> ▪ <i>Vorortbevölkerung</i> ▪ <i>Zu fahrende Entfernung pro Route</i> ▪ <i>Anzahl durchgeführter Routenfahrten</i> ▪ <i>Härte der Einfahrbeschränkungen</i> ▪ <i>Einfahrbeschränkung</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>ÖPNV</i> ▪ <i>Kfz-Bestand</i> ▪ <i>Private erneuerbar betriebene Fahrzeuge</i> 	<p>Als Kostentreiber für einen Logistikdienstleister sind Fahrzeiten und Fahrstrecken ausgemacht worden. Ein hohes Verkehrsaufkommen auf dem Verkehrsträger Straße wurde identifiziert als Einfluss für Staus und Fahrzeitverzögerungen, was für einen Logistikdienstleister mit zusätzlichen Kosten verbunden ist. Für die Bestimmung der Fahrzeitveränderungen wurde die HG <i>Verkehrsaufkommen</i> in das Modell eingebunden. Für die Einbindung wurden beim Verkehrsaufkommen statistische Daten zum Nutzungsverhalten identifiziert und zur Berechnung verwendet.</p> <p>Neben der Fahrzeitverlängerung ist das Verkehrsaufkommen eine Einflussgröße zur Bestimmung von SWen und EFBen verwendet werden.</p> <p>Für die Einbindung der HG <i>Verkehrsaufkommen</i> in das Modell wurden die identifizierten Einflussgrößen übernommen. Erkannt wurde in diesem Kontext ein statistischer Zusammenhang zwischen der Laufleistung von Fahrzeugen und der Wohnsituation der Bevölkerung, welcher im Modell abgebildet wird. Weitere Einflüsse wie der Verkehrsbelastung durch die zu bewertenden Lieferfahrzeuge oder EFBen werden ebenfalls in Berechnung der HG <i>Verkehrsaufkommen</i> berücksichtigt.</p>
<i>Private erneuerbar betriebene Fahrzeuge</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Time</i> 	Entität für den Anteil der privaten erneuerbar betriebenen Kfz am gesamten Kfz-Bestand im Untersuchungsraum. Für einen hohen Anteil von erneuerbar betriebenen Kfz am Straßenverkehr wurde ein hohes BIP als Voraussetzung für eine weitergehende Ausbreitung erkannt.
<i>Verzögerungen durch Staus</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Verkehrsaufkommen</i> ▪ <i>Einwirkungsfaktoren</i> 	Statistiken zeigen eine abnehmende durchschnittliche Geschwindigkeit bei einer Steigerung des Verkehrsaufkommens. Bei gleichem Fahrweg wird eine längere Fahrzeit benötigt. Die Entität <i>Verzögerungen durch Staus</i> gibt den Sachverhalt mit der zusätzlichen benötigten Zeit für den Transport je Fahrzeiteinheit im Modell wieder.
<i>Einwirkungsfaktor</i>	—	Eingangsfaktor für die Anpassung des Modells an BS _n , der mit der Ausprägung die Auswirkungen, eines hohen Verkehrsaufkommens auf die Verzögerung

Entität	Ein- und Ausgänge	Erläuterung
		durch Staus bei der Fahrzeit von Belieferungen negiert oder in die Rechnung einbezieht.
Wachstumsrate der Infrastruktur	▪ <i>Time</i>	Entität für die Anpassung des Modells an das Wachstum der Infrastruktur.
Unpünktlichkeit und Zeitschwankungen	▪ <i>Verzögerungen durch Staus</i>	Verzögerungen an der Ladebucht sind als ein Einflussfaktor für eine längere Lieferzeit erkannt worden. Ein hohes Verkehrsaufkommen führt zu Verspätungen bei der Zeit bis das Liefervolumen entladen werden kann. Als Einfluss sind bei einer hohen Verkehrsbelastung eher belegte Parkplätze oder Umplanungen bei der Belegung der Verladebuchten in Folge von Verspätungen ausgemacht worden. Das Wenden und Einparken ist aufgrund des Verkehrsaufkommens ebenfalls erschwert. Für die Einbindung in das Modell wird die HG <i>Verzögerungen durch Staus</i> als Berechnungsvariable verwendet, um einen Näherungswert für eine pauschale durchschnittliche Verspätungszeit pro Ziel zu bestimmen.
Entladung der Ware	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Unpünktlichkeit und Zeitschwankungen</i> ▪ <i>Entladezeit pro Palette</i> ▪ <i>Entladezeitpauschale</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Ziele pro Route</i> ▪ <i>Ø Paletten pro Ziel</i> 	HG für die Berechnung der benötigten Zeit für die Entladung der Ware am jeweiligen Tag der Untersuchung, die alle Entladezeiten summiert.
Entladezeitpauschale	—	Eingangsfaktor mit dem Anpassungswert der als Pauschalwert für die pro Ziel benötigten Zeit zum Parken und vorbereiten der Entladung angenommen wird.
Entladezeit pro Palette	—	Eingangsfaktor für den Wert der Zeit, die pro auszuladende Palette angenommen wird.
Benötigte Lieferzeit	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Entladung der Ware</i> ▪ <i>Fahrzeit</i> 	Die HG fasst die für eine Routenfahrt benötigten Zeiten zusammen. Zu den Zeiten gehören die Fahrzeit und die Zeit, die für das Entladen der Paletten hinzukommt.
Fahrzeit	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Fahrzeitverkürzungen und Verlängerungen</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Anzahl Lager</i> ▪ <i>Fahrzeit pro Route</i> ▪ <i>Anzahl durchgeführter Routenfahrten</i> ▪ <i>Verzögerungen durch Staus</i> 	HG für die insgesamt am Tag für die Belieferungen gefahrene Zeit in Abhängigkeit der Eingangsfaktoren. Für die Anzahl der Lager wird angenommen, dass die Lager aus räumlich getrennt voneinander liegen und eine erhöhte Anzahl von Lagern die Fahrzeit verkürzt.
Fahrzeitverkürzung und Verlängerung	—	Eingangsfaktor für die Anpassung, der Fahrzeit bei der Untersuchung an besondere BSn.
Fahrzeit pro Route	—	Eingangsfaktor für die Anpassung des Modells an eine BS, mit der im Durchschnitt pro Route benötigten Fahrzeit.

Entität	Ein- und Ausgänge	Erläuterung
<i>Zu fahrende Strecke</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Anzahl Lager</i> ▪ <i>Anzahl durchgeführter Routenfahrten</i> ▪ <i>Zu fahrende Entfernung pro Route</i> ▪ <i>Verzögerungen durch Staus</i> 	Entität für die insgesamt am Tag für die Belieferungen gefahrene Kilometerleistung. Analog zur Fahrzeit ist anzunehmen, dass mehr Lagerstandorte zu einer Verkürzung der Kilometerleistung führen.
<i>Zu fahrende Strecke pro Route</i>	—	Eingangsfaktor für die Anpassung des Modells an eine BS, mit der im Durchschnitt pro Route zu fahrenden Strecke.

Anhang 12: Wirkzusammenhänge – Verkehrsmodell

Wirkzusammenhänge - Lagermodell

Entität	Eingänge	Erläuterung
<i>Anzahl Lager</i>	—	Eingangsfaktor für die Anpassung des Modells an eine BS mit der Anzahl von Lagern die als Ausgangspunkt einer Belieferung fungieren.
<i>Lagerfläche (BG)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anteil der vorzuhaltenden Lagerflächen ▪ Anzahl Lager ▪ Zu transportierende Paletten 	HG für die Berechnung der benötigten Lagerfläche, um die zu transportierenden Paletten für eine festgelegte Zeit zwischenlagern zu können.
<i>Puffer (BG)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lagerfläche 	Die gemietete Lagerfläche wurde als über die Zeit anpassbar angenommen. Die Entität <i>Puffer</i> gibt den Bedarf der Lagerfläche ohne Schwankungen innerhalb des Anpassungsintervalls wieder. Die benötigte Hallengröße wird um ein Intervall verspätet wiedergegeben. Da der Wert nur der Kostenermittlung dient, wird die entstehende Ungenauigkeit als ausreichend klein angenommen.
<i>Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche</i>	—	Für die Belieferung sind unterschiedliche BSn identifiziert worden. BSn können mit unterschiedlichen Lagerstrategien versuchen die laufenden Kosten gering zu halten. Bei der Trennung des Untersuchungsraums außerhalb des Einzugsgebietes der Stadt verbleiben die modellierungsrelevanten Möglichkeiten der Zwischenlagerung der zu transportierenden Ware im Untersuchungsgebiet oder die Konsolidierung von Ware im stadtnahen Lager. Die Entität <i>Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche</i> ermöglicht die Anpassung des Modells an den Anteil der Lagerfläche die für zu transportierenden Paletten, vorgehalten werden muss.

Anhang 13: Wirkzusammenhänge – Lagermodell.

Wirkzusammenhänge - Belieferungsmodell

Entität	Ein- und Ausgänge	Erläuterung
<i>Ausgangslage zu transportieren</i>	—	Für das Liefervolumen wurden u. a. Nachfrageschwankungen erkannt, die zu Schwankungen der zu transportierenden Menge führen und nicht normalverteilt, sondern zyklisch ablaufen. Die Entität ermöglicht die Anpassung des Modells an die Menge der zu transportierenden Paletten, zusammen mit den auftretenden Schwankungen des abzubildenden Systems. Bei einem Konsumwachstum dient die Entität als die Grundlage für die Anpassung an das zum jeweiligen Zeitpunkt gestiegene zu transportierende Liefervolumen.
<i>Neue zu transportierende Paletten</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Ausgangslage zu transportieren</i> ▪ <i>Konsumvariable</i> 	FG für die Anzahl der jeden Tag neu zu transportierenden Liefervolumen, in Abhängigkeit der Ausgangslage und dem Konsumwachstum. Im Modell wird die Vereinfachung getroffen, dass das Liefervolumen den zu transportierenden Paletten entspricht und Paletten der einzige Ladungsträger in der Untersuchung sind.
<i>Zu transportierende Paletten (BG)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Neue zu transportierende Paletten</i> ▪ Δ<i>Transportrate</i> 	BG, bei der die zu transportierenden Paletten gesammelt werden und im Normalfall auch täglich abtransportiert werden. Nicht transportierte Paletten verbleiben als Wert der Entität für den Transport im nächsten Zeitintervallschritt. Wenn der Abfluss der Entität <i>Transportrate</i> dauerhaft kleiner ist als der Eingangswert der Entität <i>Neue zu transportierende Paletten</i> , dann steigen die Werte der <i>BG Zu transportierende Paletten</i> exponentiell an. Hohe Werte in der <i>BS Zu transportierende Paletten</i> bedeutet viele nicht rechtzeitig transportierte Paletten, was mit Strafzahlungen verbunden ist.
<i>Transportrate</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Zu transportierende Paletten</i> ▪ \emptyset <i>Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag</i> ▪ \emptyset <i>Transportkapazität pro Fahrzeug</i> ▪ <i>Einfahrbeschränkung</i> ▪ <i>Anteil der Fahrten in einem Bereich mit Einfahrbeschränkungen</i> ▪ <i>Anzahl von Lieferfahrzeugen</i> ▪ <i>Anzahl einfahrberechtigter Fahrzeuge</i> 	Die FG gibt die Menge an transportierten Paletten wieder, die vom bestehenden FP bei gegebenen Randbedingungen von der <i>BG Zu transportierende Paletten</i> abtransportiert werden. Mit der Berechnung ist die FG eine Kernvariable im Simulationsmodell. Für die Berechnung ist nicht nur die Transportkapazität der Fahrzeuge, sondern auch der Fall von EFBen relevant, mit ggf. nicht ausreichend zur Verfügung stehenden Fahrzeugen, um alle Ziele zu beliefern. Als Folge einer zu kleinen Transportrate steigt die Anzahl der nicht transportierten Paletten an. Durch die grundlegende Berechnung im Modell ist die FG bedeutend, für die weitere Berechnung der angrenzenden Entitäten. Die für die noch nicht transportierten Paletten nötigen Fahrzeuge werden errechnet und verzögert zum

Entität	Ein- und Ausgänge	Erläuterung
		FP hinzugekauft. Mit den ermittelten Daten ist zum einen die Berechnung der laufenden Kosten möglich und zum anderen die Ermittlung der Auslastung des FPs.
Zugestellte Paletten (BG)	▪Transportrate	Summe der insgesamt über den Untersuchungszeitraum hinweg transportierten Paletten.
Nicht transportierte Paletten	▪Zu transportierende Paletten ▪Transportrate	HG für die an diesem Tag nicht transportierten Paletten, welche eigentlich an dem Tag transportiert werden sollten.
Anzahl Tage mit nicht transportierten Paletten (BG)	▪Nicht transportierte Paletten	Summe der insgesamt über den Untersuchungszeitraum hinweg auftretenden Tage, an denen zu transportierende Paletten nicht transportiert werden.
Summe von nicht transportierten Paletten (BG)	▪Nicht transportierte Paletten	Summe der insgesamt über den Untersuchungszeitraum hinweg nicht rechtzeitig transportierten Paletten (n. r. t. P.)
Anzahl durchgeführter Routenfahrten	▪Konsumvariable	Eingangsfaktor für die Anpassung des Modells an eine BS mit der Menge der durchgeführten Routenfahrten am Tag. Für den Faktor wird ein Wachstum Verhältnis des Konsumwachstums angenommen, analog zum steigenden Liefervolumen in Folge des Konsumwachstums.
Ziele pro Route	—	Eingangsfaktor für die Anpassung des Modells an eine BS mit der im Durchschnitt pro Route angefahrenen Ziele.
Ø Paletten pro Ziel	▪Ziele pro Route ▪Anzahl durchgeführter Routenfahrten ▪Transportrate	HG für die im Durchschnitt pro Ziel belieferten Paletten, um die nachfolgenden Entladungszeiten zu bestimmen.
Anteil der Fahrten in einem Bereich mit Einfahrbeschränkungen	—	Für einen Logistikdienstleister wurde die Liefertreue als wichtiges Ziel erkannt. Im Fall von EFBen können ggf. nicht mehr alle Ziele mit allen Fahrzeugen beliefert werden. Der Anteil der Ziele in der Zone der EFB ist damit relevant für die Abbildung der Lieferfähigkeit und wird als Eingangsfaktor für die Anpassung des Modells an den Anteil der sich in einem Einfahrbeschränkten Bereich befindlichen Ziele aufgenommen.
Ø Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag (BG)	▪Benötigte Lieferzeit ▪Anzahl durchgeführter Routenfahrten ▪Arbeitsstunden pro Tag	BG zur Berechnung der von einem Fahrzeug möglichen Routenfahrten pro Tag in Abhängigkeit der für Belieferungen benötigten Zeit zu der zur Verfügung stehenden Zeit.
Arbeitsstunden pro Tag	—	Eingangsfaktor für die Anpassung des Modells an eine BS, mit dem Wert der zur Verfügung stehenden Arbeitsstunden pro Tag.
Ø Transportkapazität pro Fahrzeug	▪ Fahrzeugkapazität ▪ Anpassung der Fahrzeugkapazität	HG für die Berechnung der im Durchschnitt pro Fahrzeug zur Verfügung stehenden Transportkapazität an Paletten.

Entität	Ein- und Ausgänge	Erläuterung
<i>Fahrzeugkapazität</i>	—	Eingangsfaktor für die Anpassung der durchschnittlichen Transportkapazität.
<i>Anpassung der Fahrzeugkapazität</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Time</i> ▪ <i>Konsumvariable</i> 	Statistisch auffällige besonders kleine Lieferungen mit dem Volumen vom Bruchteil einer Palette wurden in einer statistischen Untersuchung erkannt. Für einzelne Ziele wird die Annahme getroffen, dass die Ware auf den Paletten gebündelt werden. Bei der Vergrößerung des Liefervolumens werden bei den statistisch ausfalligen Lieferungen trotzdem nicht mehr Paletten für die Belieferung benötigt. Der Vorgang des Ausgleichs wird durch die geringe Anhebung der Fahrzeugkapazität im Modell abgebildet.
<i>Anzahl Fahrten pro Route</i>	—	Eingangsfaktor für die Anpassung des Modells an eine BS mit der durchschnittlichen Anzahl von Fahrten die ein Fahrzeug für die Abfertigung einer Route benötigt. Da das Liefervolumen einer Route die Transportkapazität eines Fahrzeugs übersteigen kann, müssen Fahrzeuge zurück zum Lager fahren, um das verbliebene zu transportierenden Volumen aufzunehmen. Die für diesen Vorgang benötigte Zeit und Wegstrecke ist in den durchschnittlichen Werten der Fahrstrecke und Fahrzeit mit aufzunehmen.

Anhang 14: Wirkzusammenhänge - Belieferungsmodell.

Wirkzusammenhänge - Fuhrparkmodell

Entität	Eingänge	Erläuterung
<i>Erneuerbar betriebliche Fahrzeuge</i>	—	Eingangsfaktor für die Anpassung des Modells an eine BS, mit der Anzahl der zu Beginn der Untersuchung im FP befindlichen E-Kfz.
<i>Klassische Fahrzeuge</i>	—	Eingangsfaktor für die Anpassung des Modells an eine BS, mit der Anzahl der zu Beginn der Untersuchung im FP befindlichen klassisch angetriebenen Fahrzeuge.
<i>Erneuerungszyklus</i>	—	Eingangsfaktor für die Anpassung des Modells an eine BS, mit der Anzahl in wie vielen Zyklen pro Jahr beim Bedarfsfall neue Fahrzeuge gekauft oder verkauft werden.
<i>Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit</i>	—	Eingangsfaktor für die Anpassung des Modells an eine BS, mit dem Austausch von klassisch angetriebenen Fahrzeugen durch E-Kfz. Die HG <i>Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit</i> wirkt als Umschaltfunktion, um den Wechsel der Fahrzeuge zu aktivieren und die Geschwindigkeit des Wechsels zu steuern.
<i>Ø Schadstoffnorm (BG)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Änderung von Fahrzeugen</i> 	Für die EFBen wurde in der Praxis eine oft anwendbare Möglichkeit zur freien Einfahrt von Kfz mit niedrigem Schadstoffausstoß erkannt. Für die Analyse von Logistikabläufen im Kontext der EFBen wird diese Eigenschaft als bedeutend angenommen. Die Entität für die Anpassung des Modells mit der zum Beginn der Untersuchung vorliegende durchschnittliche Schadstoffnorm wird daher mit in das Modell aufgenommen. Als Einfluss für Veränderungen der durchschnittlichen Schadstoffnorm wurde die Anschaffungen von weiteren Kfz eingebunden.
<i>Anzahl einfahrberechtigter Fahrzeuge</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Anzahl von Lieferfahrzeugen</i> ▪ <i>Erneuerbar betriebliche Fahrzeuge</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Klassische Fahrzeuge</i> ▪ <i>Ø Schadstoffnorm</i> ▪ <i>Erneuerungszyklus</i> ▪ <i>Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit auf alternative Antriebe</i> ▪ <i>Time</i> 	HG zur Bestimmung der einfahrbereiten Fahrzeuge aus dem zum jeweiligen Zeitpunkt vorliegenden FP. Für einen Logistikdienstleister wurde eine ausreichend hohe Transportkapazität für den Transport des zu transportierenden Liefervolumens als bedeutend für einen wirtschaftlichen Betrieb mit hoher Liefertreue erkannt. Im Modell wird daher die HG <i>Anzahl einfahrberechtigter Fahrzeuge</i> eingebunden, um in der weiteren Rechnung zu prüfen, ob auch im Fall von EFBen ein ausreichend hohes Transportvolumen für den Transport aller zu transportierender Paletten gegeben ist.

Entität	Eingänge	Erläuterung
<i>Anzahl von Lieferfahrzeugen (BG)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Änderung von Fahrzeugen</i> 	BG für die Größe des FPs. Die FG <i>Änderung von Fahrzeugen</i> ist als Zu- und Abfluss in die Berechnung der BG <i>Anzahl von Lieferfahrzeugen</i> eingebunden. Die FG kann für den Fall einer Anpassung des FPs mit zu verkaufenden Fahrzeugen negativ werden.
<i>Änderung von Fahrzeugen</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Anzahl von Fahrzeugen</i> ▪ <i>Verzögerungsfunktion</i> ▪ <i>Maximalwert insgesamt nötiger Fahrzeuge</i> ▪ <i>Fuhrparkanpassung</i> ▪ <i>Sicherheitsrückstellungen</i> 	Für den Untersuchungszeitraum wurde ein schwankendes Liefervolumen identifiziert. Eine Anpassung des FPs an den Bedarf ist denkbar, um die Auslastung der FPF zu erhöhen und Kosten einzusparen. Daher wird die FG <i>Änderung von Fahrzeugen</i> für regelmäßige Anpassungen bei der Größe des FPs in das Modell eingebunden.
<i>Sicherheitsrückstellungen</i>	—	Bei der Anpassung der Größe des FPs an den Bedarf wurden Schwankungen im Liefervolumen identifiziert, wodurch die berechnete Größe des FPs nicht ausreicht, um das gesamte Liefervolumen bei einer hohen Liefertreu transportieren zu können. Die Entität <i>Sicherheitsrückstellungen</i> ermöglicht eine Anpassung des Modells mit einem prozentualen Anteil von zusätzlichen bereitzustellenden Fahrzeugen, um die starken Schwankungen beim Bedarf ausgleichen zu können.
<i>Fuhrparkanpassung</i>	—	Eingangsfaktor zur Anpassung des Modells an eine BS. Die HG <i>Fuhrparkanpassung</i> wird als Umschaltung in das Modell eingebunden. Mit der HG soll die regelmäßige Anpassung der Größe des FPs im Modell eingeschaltet werden.
<i>Verzögerungsfunktion</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Erneuerungsfunktion</i> 	HG für die Erstellung eines gepulsten binären Signals zur Festlegung der Zyklen bei der Anpassung der Größe des FPs.
<i>Maximalwert insgesamt nötiger Fahrzeuge (BG)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Erneuerungsfunktion</i> ▪ <i>Anzahl insgesamt nötiger Fahrzeuge</i> 	HG für die Berechnung der zum jeweiligen Zeitpunkt benötigten Fahrzeuge. Mit der HG <i>Maximalwert insgesamt nötiger Fahrzeuge</i> wird der Änderungsbedarf bei der Größenanpassung des FPs bestimmt.
<i>Anzahl insgesamt nötiger Fahrzeuge</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Anzahl nötiger Fahrzeuge</i> ▪ <i>Anzahl zusätzlich notwendiger Fahrzeuge</i> 	HG für die Zwischenrechnung der zum jeweiligen Zeitpunkt benötigten Fahrzeuge.
<i>Anzahl notwendiger Fahrzeuge</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Transportrate</i> ▪ \emptyset <i>Transportkapazität pro Fahrzeug</i> ▪ \emptyset <i>Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag</i> 	HG für die Berechnung der zum jeweiligen Zeitpunkt benötigten Fahrzeuge für die Anzahl der tatsächlich transportierten Paletten.

Entität	Eingänge	Erläuterung
	▪Anzahl Fahrten pro Route	
Anzahl noch zusätzlich nötiger Fahrzeuge	▪Nicht transportierte Paletten ▪Ø Transportkapazität pro Fahrzeug ▪Ø Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag ▪Anzahl Fahrten pro Route	HG für die Berechnung der zum jeweiligen Zeitpunkt zusätzlich benötigten Fahrzeuge für die noch nicht transportierten Paletten.
Auslastung der Fahrzeuge	▪Anzahl insgesamt nötiger Fahrzeuge ▪Anzahl von Lieferfahrzeugen	HG für die Berechnung der Auslastung aller Fahrzeuge.
Auslastung der Fahrzeuge nach Einfahrberechtigung	▪Anzahl einfahrberechtigter Fahrzeuge ▪Anzahl insgesamt nötiger Fahrzeuge	HG für die Berechnung der Auslastung der Fahrzeuge mit einer Einfahrerlaubnis.
Auslastung Fahrzeuge mit Einfahrberechtigung begradigt	▪Auslastung der Fahrzeuge nach Einfahrberechtigung	HG für die Auswertung mit einer von Schwankungen befreiten Auslastung der einfahrbereiten Fahrzeuge.

Anhang 15: Wirkzusammenhänge - Fuhrparkmodell.

Wirkzusammenhänge - Kostenmodell

Entität	Eingänge	Erläuterung
<i>Strafzahlungen für nicht fristgerechte Lieferung</i>	▪ <i>Nicht transportierte Paletten</i>	HG für die Ermittlung der Strafzahlungen die pro Tag für die zum jeweiligen Zeitpunkt n. r. t. P. zu bezahlen sind.
<i>Lohnkosten Lagerarbeiter</i>	▪ \emptyset <i>Einkommen</i>	HG für die Ermittlung der Kosten der einzelnen Lagerarbeiter pro Tag. Für die durchschnittlichen Einkommen wurde ein Wachstum in Abhängigkeit der Zeit identifiziert. Für die Einkommen der Arbeitnehmer wird im Modell daher die BG <i>durchschnittliche Einkommen</i> als Einflussfaktor in die Berechnung der Lohnkosten eingebunden, um Kostensteigerungen abzubilden.
<i>Lagerkosten</i>	▪ <i>Lohnkosten Lagerarbeiter</i> ▪ <i>Lagerfläche</i> ▪ <i>Mietpreisspiegel</i> ▪ <i>Anzahl Lager</i>	HG für die Ermittlung der Lagerkosten. Bei den Lagerkosten wird der nötige Flächenbedarf des Lagers aus den zu transportierenden Paletten abgeleitet und mit dem Mietpreisspiegel multipliziert. Die Anzahl der Lager mit dem benötigten Material und die Lohnkosten werden ebenfalls hinzugerechnet, um ein realistisches Ergebnis zu erreichen.
<i>Unterhaltskosten Fahrzeuge</i>	▪ <i>Umschaltfunktion Unterhaltskosten</i> ▪ <i>Zu fahrende Entfernung</i> ▪ <i>Erneuerungszyklus</i> ▪ <i>Erneuerbare Fahrzeuge</i> ▪ <i>Klassische Fahrzeuge</i> ▪ <i>Anzahl von Lieferfahrzeugen</i> ▪ \emptyset <i>Schadstoffnorm</i> ▪ <i>Umstieg und Umstiegs- geschwindigkeit</i>	HG für die Ermittlung der Betriebskosten von Fahrzeugen mit den Aspekten der Laufleistung und statischen Kosten. In Abschnitt 4.1 wurden grundsätzlich andere BSn im Vergleich zum Transport auf dem Verkehrsträger Straße identifiziert. Als Folgerung wird in der HG <i>Unterhaltskosten Fahrzeuge</i> eine Umschaltfunktion durch die HG <i>Umschaltung Unterhaltskosten</i> in die Entität eingebunden. Durch die Umschaltfunktion wird die Möglichkeit zur Bewertung der grundsätzlich anderen BSn gegeben. Mit der Umschaltung können andere Parameter für die Kosten in der Entität eingebunden und für die Bewertung abgerufen werden.
<i>Umschaltung Unterhaltskosten</i>	—	Eingabefaktor für die Anpassung des Modells an eine grundlegend andere BS, für die andere laufende Kosten zu berücksichtigen sind.
<i>Lohnkosten Fahrer</i>	▪ \emptyset <i>Einkommen</i>	HG für die Ermittlung der Kosten der Fahrer umgerechnet in Sekunden. Für die durchschnittlichen Einkommen wurde ein Wachstum in Abhängigkeit der Zeit identifiziert. Für die Einkommen der Arbeitnehmer wird im Modell daher die BG <i>durchschnittliche Einkommen</i> als Einflussfaktor in die Berechnung der Lohnkosten eingebunden, um Kostensteigerungen abzubilden.
<i>Lieferkosten</i>	▪ <i>Benötigte Lieferzeit</i> ▪ <i>Lohnkosten Fahrer</i> ▪ <i>Unterhaltskosten Fahrzeuge</i>	HG für die Ermittlung der Lieferkosten. Für die Aufstellung der Lieferkosten sind die Faktoren die Lieferzeit und Lieferstrecke re-

Entität	Eingänge	Erläuterung
		levant. Mit ansteigendem Verkehrsaufkommen steigen die benötigten Lieferzeiten und die mit den Lieferzeiten verbundenen Kosten an. Ebenfalls relevant für Lieferzeiten ist die Entladung der Ware. Bei zeitkritischen Distributionszielen können durch ein hohes Verkehrsaufkommen Schwankungen bei Ankunftszeit auftreten, die an der Lieferrampe zu zusätzlichen Wartezeiten führen. Für die Bestimmung der Kosten wird der Zeitaufwand als ausreichend angenommen und die benötigte Anzahl von einzustellenden Arbeitnehmern nicht berücksichtigt. Die zu fahrende Strecke bei den Lieferungen wird über Wartungskosten mit in die Berechnung der Lieferkosten aufgenommen.
<i>Kostenentwicklung</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Lagerkosten</i> ▪ <i>Lieferkosten</i> ▪ <i>Strafzahlungen für nicht fristgerechte Lieferungen</i> 	FG der laufenden Kosten, welche die Kosten pro Tag summiert.
<i>Laufende Kosten</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Kostenentwicklung</i> 	Für den wirtschaftlichen Betrieb sind die Kosten für den Betrieb als signifikant identifiziert worden. Die Entität zeigt die Summe der Kosten über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg auf. Mit dem Vergleichen des Ausgangswertes der Entität nach Ablauf des Untersuchungszeitraums ist das Vergleichen der Effektivität von Eingangsfaktoren möglich.

Anhang 16: Wirkzusammenhänge - Kostenmodell.

Eingangsfaktoren zur Anpassung des Systems

Entität	Einheit
<i>Einwirkungsfaktor von Staus</i>	Dimensionslos
<i>Schadstoffgrenzwert</i>	Dimensionslos
<i>Fahrzeit pro Route</i>	Sekunde
<i>Zu fahrende Strecke pro Route</i>	Kilometer
<i>Umschaltung Unterhaltskosten</i>	Dimensionslos
<i>Anzahl durchgeführter Routenfahrten</i>	Fahrten
<i>Ziele pro Route</i>	Ziele/Route
<i>Anzahl Fahrten pro Route</i>	Fahrten/Route
<i>Arbeitsstunden pro Tag</i>	Stunde
<i>Fahrzeugkapazität</i>	Palette
<i>Anzahl Lager</i>	Stück
<i>Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche</i>	Prozent
<i>Erneuerbar betriebene Fahrzeuge</i>	Stück
<i>Klassische Fahrzeuge</i>	Stück
<i>Fuhrparkanpassung</i>	Dimensionslos
<i>Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit</i>	Autos pro Erneuerungszyklus
<i>Entladezeit je Palette</i>	Sekunde
<i>Entladezeit Pauschale</i>	Sekunde
<i>Fahrzeitverlängerung und -kürzung</i>	Prozent
<i>Erneuerungszyklus</i>	Anzahl der Zyklen pro Jahr
<i>Sicherheitsrückstellungen</i>	Prozent

Anhang 17: Eingangsfaktoren zur Anpassung des Systems.

Simulationsmodell - Stadtmodell

Entität	Gleichung	Anmerkungen
<i>Entwicklungsrate der Landbevölkerung</i>	= Landbevölkerung* (Wachstumswert pro Zeitschritt in Prozent) /36500)*IF THEN ELSE(Time>1095, (1095/(Time))^0.25 , 1)	Statistiken zeigen ein zunehmendes Wachstum von Städten, wohingegen die ländlich lebende Bevölkerung abnimmt. Zur Bestimmung der FG ist eine Lookupfunktion mit genauen über die Zeit veränderten Wachstumsraten vorteilhaft für eine genaue Abbildung der Realität. Da i. d. R. nur ausführliche Vergangenheitsdaten vorliegen und keine ausführlichen Prognosen wird eine Gleichung für einen einzelnen Wachstumswert mit wahrscheinlicher Entwicklung hergeleitet. Für die Berechnung wird der Wachstumswert pro Jahr auf den Wachstumswert pro Tag umgewandelt. Für große Zeitverläufe wurde ein abflachendes Wachstum als wahrscheinlich erkannt. Die Entwicklungsrate der Landbevölkerung wird für große Zeitverläufe ebenfalls abgeflacht abgebildet, um einen realistischen Verlauf zu erzielen.
<i>Landbevölkerung (BG)</i>	= Entwicklung der Landbevölkerung ● = (Startwert mit Größe der Landbevölkerung)	Die BG <i>Landbevölkerung</i> ist vereinfacht nur von der FG <i>Entwicklungsrate der Landbevölkerung</i> abhängig. Zu oder Abflüsse werden in der einen FG zusammengefasst.
<i>Zuzüge in die Stadt</i>	= IF THEN ELSE(Landbevölkerung>Stadtbevölkerung, 0.1, Landbevölkerung*(1/10)/Stadtbevölkerung)	Wie Untersuchungen zeigten, sind die Zuzüge von der Landbevölkerung in die Stadt für einen Teil des Bevölkerungswachstums in der Stadt verantwortlich. Die HG <i>Zuzüge in die Stadt</i> wird für die Beeinflussung der Rate des Bevölkerungswachstums in der Stadt verwendet. Für die Abbildung im Modell wurde der Ausgabewert der Entität nicht als absolute Wachstumsgröße mit der Anzahl von Personen, die vom Land in die Stadt ziehen eingebunden. Stattdessen wird ein Hilfwert, der das Bevölkerungswachstum beeinflusst von der Entität abgegeben. Wenn die Landbevölkerung größer als die Stadtbevölkerung ist, wird ein Anteil von zehn Prozent für das Stadtwachstum angenommen. Ist das Potential für Zuzüge im Untersuchungsraum erschöpft und die Landbevölkerung kleiner als die Stadtbevölkerung wird eine Verringerung des Wachstums angenommen. Die Größe Verringerung wird durch das Verhältnis der Absoluten Größen der beiden Bevölkerungsgruppen gebildet.
<i>Einkommenswachstum (Lookup)</i>	= Time ● = Lookup (Startwert mit der Entwicklung des Einkommenswachstums)	Für das Einkommenswachstum wird das Vorliegen von genauen Daten über die Zeit verteilter Entwicklungen als wahrscheinlich angesehen. Die HG <i>Einkommenswachstum</i> gibt den Verlauf des Einkommenswachstums über die Zeit an. Bei der HG wird für die Einbindung der Werte über die Zeit eine Lookupfunktion verwendet, um realitätsnahe Verläufe mit hohem Informationsgehalt abzubilden.

Entität	Gleichung	Anmerkungen
<i>Einkommensentwicklungen</i>	= (IF THEN ELSE(Stadtbevölkerung>INITIAL Stadtbevölkerung, (0.04/36500)* (Stadtbevölkerung/INITIAL Stadtbevölkerung)*(Ø Einkommen/INITIAL Einkommen) , 0)+(Einkommenswachstum*(1/ 36500)))*Ø Einkommen	Einer der Pull-Faktoren der Stadt sind die höheren Einkommen im Vergleich zum Land. Der Effekt steigt mit der Anzahl der Einwohner an. Daher wurde in der FG <i>Einkommensentwicklung</i> zusätzlich zum natürlichen Einkommenswachstum über die Zeit, auch das Einkommenswachstum in Abhängigkeit zur Größe der Stadt in das Modell eingebunden. Als Faktor für die Größe wurde die Größe der Bevölkerung im Agglomerationsraum verwendet.
Ø Einkommen (BG)	= Einkommensentwicklungen ● = (<i>Startwert in der Höhe des durchschnittlichen Einkommens</i>)	Die BG des durchschnittlichen Einkommens ermöglicht die Speicherung des Einkommens zwischen den Zeitschritten. Zu oder Abflüsse werden in der Entwicklungsrate zusammengefasst.
<i>Stadtentwicklung</i> (Lookup)	= Time ● = Lookup (<i>Eingangsfaktor des vier Phasen Modells in Prozent</i>)	Die Ausprägung der Variable ist individuell und iterativ für die Stadt des zu untersuchenden Logistiksystems zu bestimmen. Die Ausprägung der Konstante ist nach dem vier Phasenmodell aus Abschnitt 2.1 zu bestimmen und dem Wertebereich zwischen [-0,015;0,015] anzupassen. Entwicklungen außerhalb des Wertebereiches werden als unrealistisch angenommen.
<i>Verschiebungsfunktion</i> (Lookup)	= DELAY1(Einkommensentwicklungen, 270) ● = Lookup ([(0,0)-(0.5,0.5)],(0,0.05), (0.001205,0.1), (0.003205,0.2), (0.00520548,0.3), (0.007205,0.35), (0.0122324,0.434211), (0.0397554,0.471491), (0.110092,0.484649), (0.181957,0.489035), (0.5,0.5))	Bei einem starken Rückgang der Einkommen wurde ein Bevölkerungsrückgang identifiziert. Die Lookupvariable bringt eine Zeitverzögerung und den Rückgang der Geburten in Abhängigkeit der Einkommensentwicklung in das Modell ein. Die Variable beeinflusst anteilig das prognostizierte Bevölkerungswachstum im Agglomerationsraum. Durch die Einbindung der Entität als HG des eigentlichen Bevölkerungswachstums sollen die in der Prognose abgebildeten Wirkzusammenhänge beeinflusst werden können für die Untersuchung mit „Was ist, wenn...“ Szenarien. Um einen weichen Verlauf beim Übergang bei zu geringen Einkommensentwicklungen zu gewährleisten, werden mit der Lookupfunktion die Werte des Bevölkerungswachstums entsprechend um den Rückgang der Lookupfunktion reduziert. Die Verwendung des Wertes erfolgt gleichermaßen für die Entwicklung in den Vororten und den Innenstadtbereichen. Eine unterschiedlich starke Ausprägung des Wachstumswertes aufgrund unterschiedlich hoher absoluter Einkommen in unterschiedlichen Stadtbereichen wird als vernachlässigbar angenommen.
<i>Bevölkerungswachstum im Jahr</i> (Lookup)	= Time	Zur Anpassung des Modells an reale Verhältnisse wird eine von der Zeit abhängige Funktion

Entität	Gleichung	Anmerkungen
	<p>● = Lookup (Werte des Bevölkerungswachstums über die Zeit)</p>	durchlaufen, die prognostizierte Wachstumswerte der Bevölkerung zum jeweiligen Zeitpunkt als Rückgabewerte zurückgibt.
<p>Wachstum der Innenstadtbevölkerung</p>	<p>= IF THEN ELSE(Bevölkerungswachstum im Jahr>0, Bevölkerungswachstum im Jahr*(1/36500) *(0.4 +Zuzüge in die Stadt+(IF THEN ELSE (Ø Einkommen<INITIAL Einkommen*1.04938 , Verschiebungsfunktion , 0.5)))*Innenstadtbevölkerung+IF THEN ELSE (Vorortbevölkerung>=Innenstadtbevölkerung, Innenstadtbevölkerung*Stadtentwicklung , Vorortbevölkerung *Stadtentwicklung), Bevölkerungswachstum im Jahr* (1/36500) *(0.4 -Zuzüge in die Stadt+(IF THEN ELSE(Ø Einkommen<INITIAL Einkommen*1.04938 , 1-Verschiebungsfunktion , 0.5)))*Innenstadtbevölkerung+IF THEN ELSE (Vorortbevölkerung>=Innenstadtbevölkerung, Innenstadtbevölkerung*Stadtentwicklung , Vorortbevölkerung*Stadtentwicklung))</p>	<p>Für die Einwirkung auf das Wachstum der Bevölkerung wurden mehrere Eingangsgrößen erkannt, die einen signifikanten Einfluss besitzen. Einkommen, Zuzüge in die Stadt, die Stadtentwicklung und das Bevölkerungswachstum gehören zu den Einflüssen auf die Entität. Um eine realistische Abbildung des Modells zu gewährleisten werden alle Einflüsse in die Entwicklung aufgenommen.</p> <p>Die FG der <i>Wachstumsrate der Innenstadtbevölkerung</i> besteht aus einer mehrteiligen Funktion. Wenn die Stadt als ganzer Agglomerationsraum nicht wächst, dann sind in der Stadt nach dem Städteentwicklungsmodell trotzdem Verschiebungen bei der Bevölkerung in den Stadtteilen zu beobachten. Die konstante Stadtentwicklung wird als ein Fall in das Simulationsmodell eingebracht. Darüber hinaus besteht die Funktion aus dem Wachstumsterm, der das Wachstum der Bevölkerung im Verhältnis zur vorherrschenden Bevölkerung wiedergibt und ggf. in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen Einkommen und Zuzügen reduziert. Für die Berechnung sind die Eingangsgrößen entsprechend ihrer Bedeutung gewichtet.</p>
<p>Innenstadtbevölkerung (BG)</p>	<p>= Wachstum der Innenstadtbevölkerung</p> <p>● = (<i>Startwert der Innenstadtbevölkerung</i>)</p>	<p>Die BG <i>Innenstadtbevölkerung</i> speichert den Wert für die Größe der Innenstadtbevölkerung während der Untersuchung. Die BG ist nur von der FG <i>Wachstum der Innenstadtbevölkerung</i> abhängig. Zu und Abflüsse werden in der Entwicklungsrate zusammengefasst.</p>
<p>Wachstum der Vorortbevölkerung</p>	<p>=IF THEN ELSE(Bevölkerungswachstum im Jahr<0, Vorortbevölkerung*Bevölkerungswachstum im Jahr* (1/36500) *(0.4 +IF THEN ELSE(Ø Einkommen<INITIAL Einkommen*1.04938 , Verschiebungsfunktion , 0.5)+Zuzüge in die Stadt) -IF THEN ELSE(Vorortbevölkerung>=Innenstadt-</p>	<p>Die Bedingungen und die Umsetzung für das Wachstum der Vorortbevölkerung sind analog, zum Wachstum der Innenstadtbevölkerung. Der Unterschied im Wachstum der beiden Variablen liegt in der konträren Einbindung der Variable Stadtentwicklung.</p>

Entität	Gleichung	Anmerkungen
	bevölkerung, Innenstadtbevölkerung*Stadtentwicklung, Vorortbevölkerung*Stadtentwicklung), Vorortbevölkerung*Bevölkerungswachstum im Jahr*(1/36500) *(0.4+IF THEN ELSE(Ø Einkommen<INITIAL Einkommen*1.04938, 1-Verschiebungsfunktion, 0.5)-Zuzüge in die Stadt) -IF THEN ELSE(Vorortbevölkerung>=Innenstadtbevölkerung, Innenstadtbevölkerung*Stadtentwicklung, Vorortbevölkerung*Stadtentwicklung))	
<i>Vorortbevölkerung (BG)</i>	= Wachstum der Vorortbevölkerung ● = (<i>Startwert der Vorortbevölkerung</i>)	Die BG <i>Vorortbevölkerung</i> stellt die Größe der Vorortbevölkerung über die Zeit für Berechnungen angrenzende HG zur Verfügung. Die BG ist nur von der FG <i>Wachstum der Vorortbevölkerung</i> abhängig. Zu und Abflüsse werden in der Entwicklungsrate zusammengefasst.
<i>Stadtbevölkerung</i>	=Innenstadtbevölkerung + Vorortbevölkerung	Für weiterführende Berechnungen und zur Darstellung des gesamten Agglomerationsraumes werden in dieser Entität die Vorortbevölkerung und die Innenstadtbevölkerung zusammenaddiert.
<i>Mietpreisspiegel</i>	= IF THEN ELSE(Stadtbevölkerung<INITIAL Stadtbevölkerung, (<i>Startwert Mietpreis pro m²</i>), (<i>Startwert Mietpreis pro m²</i>) * (Stadtbevölkerung/INITIAL Stadtbevölkerung)^1.2)	Veränderungen im Mietpreis entstehen durch Veränderungen im Verhältnis des Angebots und der Nachfrage. Zur Veränderung des Mietpreises im Modell wurde die Nachfrage an die Bevölkerungszahl gekoppelt. Die Annahme setzt eine begrenzte Ausbreitungsfähigkeit der Stadt in die Fläche voraus. Ggf. ist der in der Berechnung festgesetzte Wachstumsfaktor von 1,2 ebenfalls an die realen Verhältnisse anzupassen.
<i>Konsumvariable</i>	= IF THEN ELSE(Ø Einkommen<=INITIAL Einkommen, ((1+Konsumwachstum/36500)^Time)*(Stadtbevölkerung/INITIAL Stadtbevölkerung), (Stadtbevölkerung/INITIAL Stadtbevölkerung)*((1+Konsumwachstum/36500)^Time)*((Ø Einkommen/INITIAL Einkommen)^0.173))	Der Bedarf an Konsumgütern wächst, sowohl durch wachsende Einwohnerzahlen in den Städten als auch pro Einwohner stetig an. Steigende Einkommen erhöhen die Konsummöglichkeiten weiter. Um diesen Sachverhalt im Simulationsmodell abzubilden ist die Konsumvariable eingebunden. Die Konsumvariable bildet einen Multiplikator für im Logistiksystem zu liefernde Anzahl Paletten. Für die Berechnung werden die jeweiligen Ausgangswerte mit Aktuellen Werten verglichen und die Variable vom Konsumwachstum zum jeweiligen Zeitpunkt berechnet.
<i>Konsumwachstum (Lookup)</i>	= Time	Datenarray für die Speicherung des prozentualen Wachstums des Konsums über die Zeit.

Entität	Gleichung	Anmerkungen
	<ul style="list-style-type: none"> ● = Lookup (<i>Konsumwachstum in Prozent pro Jahr</i>) 	
<i>KFZ-Bestand</i> (BG)	<p>= IF THEN ELSE(Einkommensentwicklungen > 1, 1, 0.3) * (Wachstum der Vorortbevölkerung * 0.665 + Wachstum der Innenstadtbevölkerung * 0.335) * 0.47 * Kfz Wachstumsquote / 100 + "Kfz-Bestand" * Kfz Wachstumsquote / 100 * (((<i>Startwert Kfz Wachstum</i>) / 100)) / (<i>Zeitintervall des Kfz Wachstums bei gleicher Bevölkerungsgröße</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● = (Vorortbevölkerung * 0.665 + Innenstadtbevölkerung * 0.335) * 0,47 	<p>Verteilungen für Großstädte haben gezeigt, dass im Durchschnitt 0,47 Kfz pro Einwohner in einer Stadt existieren, welche zu zwei Drittel in Vororten und zu einem Drittel in der Innenstadt gemeldet sind. Des Weiteren zeigen sich Veränderungen von Kfz-Beständen über die Zeit hinweg, aufgrund von veränderten Mobilitätswünschen oder politischen Reglementierungen. Im Modell wird die Verteilung von Fahrzeugen als charakteristisch angesehen und bei der Startwerten der BG übernommen. Die Verteilung wird ebenfalls für zukünftige Entwicklungen verwendet, wobei sie in Zusammenhang mit den FGn der Stadtbereiche gesetzt werden. Die sonst extra dargestellte FG des Kfz-Bestands ist aus Gründen der Übersichtlichkeit mit in die BG hineingezogen worden.</p> <p>Zusätzlich zum Anstieg des Kfz Bestands durch wachsende Bevölkerungszahlen, ist ein Anstieg des Kfz-Bestands über die Zeit identifiziert worden. Die Effekte werden in der Berechnung unabhängig voneinander eingebunden. Die Größe des Kfz-Zuwachses ist erneut individuell an das zu untersuchende System anzupassen.</p>
<i>Kfz Wachstumsquote</i>	= (<i>Startwert Kfz Wachstumsquote</i>)	HG für die Veränderung des KFZ-Bestands mit statistisch nicht eingeplanten Zuwächsen oder Rückgängen bei den Kfz Zuwachsraten, beispielsweise durch politisch festgelegte Sondersteuern die zu Rückgängen bei den Neuzulassungen führen.
<i>Erneuerungsquote privater Kfz</i>	= IF THEN ELSE(Ø Einkommen > INITIAL Einkommen, DELAY1(1 - (Ø Einkommen / INITIAL Einkommen)^(1/10) , 300) , - 1 + (Ø Einkommen / INITIAL Einkommen)^(- 1/23)) * (Ø Fahrzeugalter / (<i>Startwert Ø Fahrzeugalter</i>))^13	Für den Schadstoffausstoß wurde das Kfz-Alter als wichtiger Faktor erkannt. Bei einem schnell fluktuierenden Automarkt sinkt das durchschnittliche Alter von Kfz durch vermehrte Neuzulassungen ab. Für die realitätsnahe Darstellung im Simulationsmodell wird eine annähernde Funktion für das Alter verwendet, die den beschriebenen Sachverhalt abbilden soll. Eine genaue Beschreibung der Funktion ist aufgrund fehlender Daten nicht möglich. Eine weiterführende Modellierung der fehlenden Daten würde das Aufwand-Nutzen Verhältnis übersteigen. Insbesondere, da die im Simulationsmodell zu ermittelnden SWe nur annäherungsweise bestimmt und noch auf die im Untersuchungsraum auftretende Anzahl von Tagen mit EFBen angepasst werden müssen, ist diese Vereinfachung bei der Erneuerungsquote als verhältnismäßig anzusehen. Mit der vereinfachten Funktion für die Erneuerungsquote wird die Veränderung des

Entität	Gleichung	Anmerkungen
		durchschnittlichen Alters direkt über das Verhältnis von Einkommenszuwächsen errechnet und über quadratische Terme auf eine realistische zeitliche Variable für die Veränderung des Durchschnittsalters umgerechnet.
\emptyset Fahrzeugalter (BG)	= Erneuerungsquote privater Kfz • = (Startwert \emptyset Fahrzeugalter)	BG für die Höhe des durchschnittlichen Alters beim privaten Kfz-Bestand. Die Eingangsgröße <i>Erneuerungsquote privater Kfz</i> kann sowohl positiv als auch negativ sein und fasst durch die Vereinfachung sowohl Eingangs- als auch Ausgangsgrößen für die BG \emptyset <i>Fahrzeugalter</i> zusammen.

Anhang 18: Simulationsmodell - Stadtmodell.

Simulationsmodell - Verkehrsmodell

Entität	Gleichung	Erläuterung
Verkehrsaufkommen	$= \text{IF THEN ELSE}(\text{Einfahrbeschränkung} >= 1, ((\text{Innenstadtbevölkerung} * 0.699 * 19 + \text{Vorortbevölkerung} * 0.83 * 50) / (\text{Stadtbevölkerung}) * \text{"Kfz-Bestand"} * (1 - \text{Private erneuerbar betriebene Fahrzeuge} / 100) * (0.7 + 0.3 * (((2^{\text{Härte der Einfahrbeschränkungen}} - 1) / 2^{\text{Härte der Einfahrbeschränkungen}})) + (\text{Innenstadtbevölkerung} * 0.7 * 19 + \text{Vorortbevölkerung} * 0.83 * 50) / (\text{Stadtbevölkerung}) * \text{"Kfz-Bestand"} * (\text{Private erneuerbar betriebene Fahrzeuge} / 100) + (\text{Innenstadtbevölkerung} * 0.699 * 19 + \text{Vorortbevölkerung} * 0.83 * 50) / (\text{Stadtbevölkerung}) * \text{"Kfz-Bestand"} * (1 - \text{Private erneuerbar betriebene Fahrzeuge} / 100) * \text{IF THEN ELSE}(\emptyset \text{ Fahrzeugalter} <= 5, 1, (5 / \emptyset \text{ Fahrzeugalter})^3) / (((2^{\text{Härte der Einfahrbeschränkungen}} - 1) / 2^{\text{Härte der Einfahrbeschränkungen}}) + \text{Anzahl durchgeführter Routenfahrten} * \text{Zu fahrende Strecke pro Route} * \text{Zufall} + \text{ÖPNV} / 20), ((\text{Innenstadtbevölkerung} * 0.7 * 19 + \text{Vorortbevölkerung} * 0.83 * 50) / (\text{Stadtbevölkerung}) * \text{"Kfz-Bestand"} + \text{Anzahl durchgeführter Routenfahrten} * \text{Zu fahrende Strecke pro Route} * \text{Zufall} + \text{ÖPNV} / 20))$	<p>Die Zahlen für die durchschnittliche tägliche Verwendung des Kfz in einer charakteristischen Großstadt zeigten einen Anteil von 69,9 Prozent der Innenstadtbevölkerung die den Kfz für 19 Kilometer verwendet, wohingegen 83 Prozent der Vorortbevölkerung im Durchschnitt 50 Kilometer mit dem Kfz am Tag zurücklegen. Für die Modellierung des Simulationsmodells wird die Verteilung für die Laufleistung übernommen. Neben den bürgerlichen Kfz Besitzern trägt der ÖPNV ebenfalls einen Teil zur Verkehrsbelastung bei. Im Modell wird dieser Einfluss des ÖPNV reduziert in das Verkehrsaufkommen aufgenommen. Die Variable des ÖPNV ist anders als das Verkehrsaufkommen nach Laufleistung pro Personen und nicht nach Laufleistung je Fahrzeuge erstellt worden. Während nicht alle Verkehrsmittel des ÖPNV den Verkehrsträger Straße verwenden, haben die auf der Straße fahren einen größeren Einfluss, als ein einzelner Pkw, auf das Verkehrsaufkommen. Des Weiteren fahren durchschnittlich mehr Personen in einem ÖPNV Verkehrsmittel als in einem privaten Pkw. Die Variable ÖPNV geht daher nur mit dem Faktor ein Zwanzigstel in das Verkehrsaufkommen ein. Im Fall eines zu hohen Schadstoffgehalts gelten EFBen für Fahrzeuge. Im Modell wird eine zweigeteilte rotierende EFB angenommen. Durch die EFB ist die Hälfte der Kfz in Bereichen mit hoher SWe in der Luft betroffen, wie in anderen Städten mit EFBen. Da die EFB nur in einem begrenzten Bereich gelten, sind nur Fahrten in diesen Bereich aktiv betroffen. Für Fahrten in den betroffenen Bereich werden 30 Prozent der Fahrten angenommen. Ausgenommen vom Verbot sind besonders saubere und erneuerbar betriebene Kfz. Transitfahrten durch die Zone der EFB werden nicht berücksichtigt und aufgrund der Straßenanführung um die Zone der EFB als vernachlässigbar betrachtet.</p>
Private erneuerbar betriebene Fahrzeuge (Lookup)	<p>= Time</p> <p>● = (Anpassungswert für den Anteil von privaten erneuerbar betriebenen Fahrzeugen)</p>	<p>Mit der Quote privater erneuerbar betriebener Fahrzeuge wird wiedergegeben, wie viele Fahrzeuge in der Stadt nicht von EFBen betroffen sind und weniger Schadstoffe beim Fahren ausstoßen.</p>
ÖPNV	$= \text{IF THEN ELSE}(\text{Einfahrbeschränkung} < 1, \text{Innenstadt-}$	<p>Die Zahlen einer charakteristischen Großstadt für die durchschnittliche tägliche Verwendung des ÖPNV zeigten einen Anteil</p>

Entität	Gleichung	Erläuterung
	$\text{bevölkerung} * 0.222 * 19 + \text{Vorortbevölkerung} * 0.1317 * 50, \\ \text{Innenstadtbevölkerung} * 0.222 * 19 + \text{Vorortbevölkerung} * 0.1317 * 50 + (\text{Innenstadtbevölkerung} * 0.699 * 19 + \text{Vorortbevölkerung} * 0.83 * 50) * \text{"Kfz-Bestand"} / 6 * \text{Stadtbevölkerung})$	<p>von 22,2 Prozent der Innenstadtbevölkerung die den ÖPNV für 19 Kilometer verwendet, wohingegen 13,17 Prozent der Vorortbevölkerung im Durchschnitt 50 Kilometer mit dem ÖPNV fahren. Die charakteristische Verteilung wird für die Modellierung übernommen.</p> <p>Der ÖPNV in der Stadt besitzt in der Modellierung zwei Nutzungsfälle, die vom EFB abhängig sind. Im Fall von EFBen wird angenommen das zusätzlich ein Sechstel, der Personen, die ein Auto besitzen und von EFBen betroffen sind, den ÖPNV verwenden.</p>
Schadstoffausstoß	$= (\text{Anpassungswert}) * \max(0, ((\emptyset \text{ Fahrzeugalter})^{0.33} * \text{Verkehrsaufkommen} * (1 - \text{Private erneuerbar betriebene Fahrzeuge} / 100) + \text{Verkehrsaufkommen} * (\text{Private erneuerbar betriebene Fahrzeuge} / 100) / 8 + \text{ÖPNV} * 0.1) + (\text{Festes Verkehrsunabhängiges Schadstoffaufkommen})) * (\text{RANDOM NORMAL}(0.9, 1.1, 1, 0.01, 0)^2)$	<p>Für die Schadstoffbelastung in der Stadt wurden die Laufleistung und das Fahrzeugalter als signifikanter Einflussfaktor erkannt. Für die Modellierung im Modell kann das Fahrzeugalter nicht direkt mit dem Schadstoffausstoß in Korrelation gesetzt werden und muss mit einem verringerten Faktor angepasst werden. Bei der Verwendung des ÖPNV fahren im Durchschnitt mehr Personen in einem Fahrzeug, wodurch (trotz z. T. höherer SWE pro Verkehrsfahrzeug im ÖPNV) eine verringerte Schadstoffbelastung angenommen wird. Neben dem verkehrsbedingten Schadstoffausstoß sind weitere Emissionsquellen bekannt. Im Modell werden diese mit einem festen SW in eingebracht. Die genaue Größe des SWes ist an die im System vorherrschenden Gegebenheiten anzupassen.</p> <p>Wetterphänomene beeinflussen die Schadstoffemission. Bei Feinstaub bindet Nässe den Schadstoff. Diese Wetterschwankungen werden durch die Multiplikation der Ergebnisse mit einer Zufallsfunktion im Modell abgebildet.</p> <p>Zu den erneuerbar betriebenen Fahrzeugen gehören in Kontext dieser Untersuchung auch alternativ betriebene Fahrzeuge. Neben dem Bremsstaub, den jedes Fahrzeug ausstößt, haben Hybridfahrzeuge ebenfalls Schadstoffemissionen durch den Verbrennungsmotor. Im Modell wird daher vereinfacht eine stark reduzierte Schadstoffemission bei erneuerbar betriebenen Kfz von 1/8 der normalen Schadstoffemissionen moderner Kfz mit Verbrennungsmotor angenommen.</p>
Schadstoffbelastung (BG)	$= \text{IF THEN} \\ \text{ELSE}(\text{ABS}(\text{Schadstoffbelastung}) + (\text{Schadstoffausstoß} - \text{natürliche Reduktion}) \leq 0, 0,$	<p>Die Höhe der Schadstoffbelastung in der Stadt als wurde als dimensionslose Zahl ohne Bezug auf einzelne SWE in das Modell eingebunden.</p>

Entität	Gleichung	Erläuterung
	Schadstoffausstoß - natürliche Reduktion) ● = (Startwert für die Schadstoffbelastung)	Genauere Rückschlüsse aus dem Modell auf schadstoffbedingte Entwicklungen sind aufgrund der Vereinfachungen nur bedingt möglich. Die SWe dienen nur der Untersuchungsmöglichkeit, was bei Schadstoffüberschreitungen im Logistiksystem zu erwarten ist und wie sich die Anzahl von Tagen mit EFBen bei gegebenen Ausgangswerten in der Zukunft verändern. Diese Annahmen sind bei Rückschlüssen zu berücksichtigen.
Natürliche Reduktion	= max(0, max(0, Schadstoffbelastung*0.1 + (Fester Reduktionsterm) +RANDOM NORMAL (Zufallsschwankungen) +(Jährlicher Schwankungsterm)*SIN(3.14159 *Time* 2/365)+(Monatlicher Schwankungsterm)*cos(Time* (24/365) *3.14159)) - (Zweimonatlicher Schwankungsterm)*cos(Time* (12/365)*3.14159) - (Täglicher Schwankungsterm)*cos(Time* (1/2)* 3.14159))-RANDOM NORMAL(Zufallsschwankungen_2)(Zeitschwankung))	Für unterschiedliche Städte sind unterschiedliche Randbedingungen bei den Gegebenheiten der Stadt zu beachten. Im Kontext der Schadstoffbelastung sind aufgrund von Luftzirkulation, regelmäßigen Wetterphänomenen und Jahreszeiten-Schwankungen die Parameter so zu wählen, dass bei gegebenen SWe eine angemessen realistische Abbildung der sich aus Schadstoffkonzentrationen ergebene Verteilung von Tagen mit EFBen einstellt. Für die Einbindung im Modell bei der Abbildung der natürlichen Schadstoffreduktion sind eine feste Reduktionsmenge, Zufallsschwankungen und unterschiedlich ausgeprägte periodische Schwankungen, die je nach zu untersuchendem System zu bestimmen werden müssen vorgesehen.
Einfahrbeschränkung	= IF THEN ELSE(Schadstoffbelastung >=Schadstoffgrenzwert*(Anpassungswert),1, 0)	Die Entität <i>Einfahrbeschränkung</i> ist eine HG mit binären Ausgangswerten für die Angabe von EFBen bei der Überschreitung von SGW im System. Für die Simulation ist eine iterative Anpassung der SGW durchzuführen. Bei der Anpassung ist ein für die Stadt typisches und realistisches Auftreten von EFB zu realisieren.
Schadstoffgrenzwert	= (Startwert des Schadstoffgrenzwertes)	Faktorvariable, zur Untersuchung, der Auswirkungen von unterschiedlichen Grenzwerten.
Härte der Einfahrbeschränkungen	= (Startwert für Verschärfungen Einfahrbeschränkungen)	Eingabefaktor, für die Untersuchung, der Auswirkungen bei Veränderungen der Auflagen für die EFBen. Bei einem Wert von „1“ darf im Fall von Einfahrbeschränkungen die Hälfte der Fahrzeuge in die Zone der EFB einfahren. Bei einem Wert von „2“ wird die EFB weiter gelockert. Für Werte kleiner 1 wird der Anteil der Einfahrbeschränkten Fahrzeuge reduziert.
Verzögerungen durch Staus	= Einwirkungsfaktor*(1/Wachstumsrate der Infrastruktur)*Verkehrsauf-	Als Ursache für die in einer Stadt zusätzlich benötigte Fahrzeit, wurde ein erhöhtes Verkehrsaufkommen erkannt. Die in der HG hin-

Entität	Gleichung	Erläuterung
	$\text{kommen} * (\text{RANDOM NORMAL}(0.9, 1.1, 1, 0.01, 0)^2) * (\text{Anpassungswert})$	terlegte Berechnungsformel vereint das Verkehrsaufkommen mit dem Infrastrukturwachstum zu einem Wert, der pro gefahrener Zeiteinheit im Durchschnitt zusätzlich benötigt wird, bei Fahrten auf dem Verkehrsträger Straße. Der Anpassungswert ist auf eine angemessene realistische Zeitverzögerung anzupassen.
<i>Einwirkungsfaktor</i>	$= (\text{Startwert für die Anpassung der Einwirkung von Staus auf den Lieferbetrieb})$	Die Entität <i>Einwirkungsfaktor</i> ist ein Eingangsfaktor für die Anpassung des Modells an eine BS. Die Entität gibt an, wie stark ein hohes Verkehrsaufkommen auf die Verzögerung durch Staus im Straßenverkehr auswirkt. Die Entität ist standardmäßig mit dem Wert „1“ belegt und kann aber für die Untersuchung bestimmter BSn verändert werden. Mit der Entität wird im Modell auch die Möglichkeit gegeben der Einfluss von Staus ganz zu deaktivierbar.
<i>Wachstumsrate der Infrastruktur</i>	$= (1 + (\text{Startwert der Wachstumsrate der Infrastruktur in Prozent}) / 365000)^{\text{Time}}$	Entität für den prozentualen Ausbau der Infrastruktur, die den Zeitverlusten bei hohem Verkehrsaufkommen entgegenwirkt.
<i>Unpünktlichkeit und Zeitschwankungen</i>	$= \text{MIN}(780, \text{RANDOM NORMAL}(0.732, 1.268, 1, 0.113, 0) * \text{Verzögerungen durch Staus} * 600)$	Neben den Schwankungen bei der Fahrzeit wurde die Wartezeit an der Laderampe als ein Einflussfaktor identifiziert. Im Modell wird daher zusätzlich zur Entität für die Pauschalwartezeiten pro Ziel eine zusätzliche Entität eingebunden, die in Abhängigkeit von Verzögerungen durch Staus eine weitere Wartezeit einbringt. Die Entität <i>Unpünktlichkeit und Zeitschwankungen</i> dient der Berechnung der Zeitverzögerungen an der Laderampe. Als Maximalwert wird eine Wartezeit von 13 Minuten festgelegt. Für die durchschnittliche Wartezeit werden drei Minuten angenommen.
<i>Entladung der Ware</i>	$= \text{Entladezeit pro Palette} * \text{Anzahl durchgeführter Routenfahrten} * \text{Ziele pro Route} * \emptyset \text{ Paletten pro Ziel} + \text{Anzahl durchgeführter Routenfahrten} * \text{Ziele pro Route} * \text{Entladezeitpauschale} + \text{Unpünktlichkeit und Zeitschwankungen} * \text{Anzahl durchgeführter Routenfahrten} * \text{Ziele pro Route}$	Die Entität dient der Berechnung der insgesamt über den Tag benötigte Zeit für die Entladung der Ware. Die Variable zählt die gesamte Zeit, sowohl die Entladezeit einzelner Paletten als auch die pauschalen Werte für die Entladungsvorbereitung pro Ziel. Bei Logistikdienstleistungen sind Staus an der Laderampe ebenfalls ein Problem. Daher werden im Modell Wartezeiten an der Laderampe über die Entität <i>Unpünktlichkeit und Zeitschwankungen</i> in das Modell eingebunden.
<i>Entladezeitpauschale</i>	$= (\text{Startwert für die Anpassung der pro Ziel benötigten Zeit})$	Anpassungswert für den Pauschalwert der pro Ziel benötigten Zeit.
<i>Entladezeit pro Palette</i>	$= (\text{Startwert für die Anpassung der pro Palette zur Entladung benötigten Zeit})$	Anpassungswert für den Wert der Zeit, der pro auszuladende Palette benötigt wird.

Entität	Gleichung	Erläuterung
<i>Benötigte Lieferzeit</i>	= Entladung der Ware + Fahrzeit	Entität welche die gesamte Zeit, der für die Belieferung nötigen Zeiten der Entladungen und der Fahrzeiten, zusammenfasst.
<i>Fahrzeit</i>	= Zufall*Fahrzeit pro Route*Anzahl durchgeführter Routenfahrten*((1+Verzögerungen durch Staus)*(1+Fahrzeitverkürzungen und Verlängerung/100))/((Anzahl Lager)^0.7)	Für die Untersuchung von BS _n ist die Fahrzeit pro Route eine bedeutende Eingangsgröße. Generell erfolgt die Einbindung der Fahrzeit über die Fahrzeit pro Routen multipliziert mal die Menge durchgeführte Routen. Für die Verwendung der Fahrzeit in der Simulation sind Unternehmensdaten auszuwerten oder Annahmen für realistische Fahrzeiten zu treffen. Die Einbindung der Fahrzeit erfolgt mit Durchschnittswerten in das Modell. Die Verallgemeinerung der Fahrzeit auf die Routenfahrzeit, geschieht aufgrund der vereinfachenden Form der SD Simulation Als Ausgangssituation der Simulation wird ein Lager angenommen, wobei zusätzliche Lager die Fahrstrecke und Fahrzeit verringern. Aufgrund des undefinierten Standortes des zweiten Lagers wird beim Fahrzeitrückgang der Faktor von (1/x ^{0.7}) als Schätzwert angenommen. Die Entitäten Verzögerungen durch Staus und Fahrzeitverkürzungen und Verlängerungen ermöglichen die Beeinflussung der Fahrzeit, für die Analyse des Logistiksystems. Die Eingabe der Fahrzeit wird bei den beschriebenen Untersuchungen nicht verändert. Die Fahrzeitveränderungen werden im Modell bestimmt.
<i>Fahrzeitverkürzung und Verlängerung</i>	= (Startwert für die Anpassung des Modells mit weitergehenden Fahrzeitverkürzungen als Prozentangaben)	Entität für die Anpassung, der Fahrzeit bei der Untersuchung besonderer BS _n .
<i>Fahrzeit pro Route</i>	= (Startwert für die Anpassung des Modells an das reale System mit Ausgangswerten für die Fahrzeit pro Route in Sekunden)	Die Entität <i>Fahrzeit pro Route</i> dient der Anpassung des Modells an eine BS mit der im Durchschnitt pro Route benötigten Fahrzeit.
<i>Zu fahrende Strecke</i>	= Zufall*Zu fahrende Strecke pro Route*Anzahl durchgeführter Routenfahrten*(1+Verzögerungen durch Staus /1020)/(Anzahl Lager)^0.7	Analog zur Fahrzeit ist die Zusammensetzung der Gleichungen der zu fahrenden Strecke. Die zu fahrende Strecke pro Route * Anzahl der Routen. Eine Verringerung der Streckenlänge bei mehreren Lagern ist ebenfalls mit dem gleichen Reduktionsfaktor wie bei der Fahrzeit versehen. In Knotenpunkten der Stadt entsteht zu stark befahrenen Zeiten Stau. Eine Umfahrung ist für Logistikdienstleister mit einer längeren Fahrstrecke verbunden. Durch kürzere Fahrzeiten sind durch Umfahrungen dennoch Kostenersparnisse möglich. Im Modell wurde daher die Verzögerung durch Staus mit einem Umrechnungs-

Entität	Gleichung	Erläuterung
		faktor in zusätzliche Wegstrecke umgerechnet und in das Modell eingebunden. Die Ersparnis der Fahrstrecke durch die Einbindung weiterer Lager findet mit einem verallgemeinerten Umrechnungsfaktor im Modell statt, um eine Abschätzung für das Einsparungspotential zu geben.
<i>Zu fahrende Strecke pro Route</i>	<i>= (Startwert für die Anpassung des Modells pro Route zu fahrender Strecke in Kilometern)</i>	Variable für die Anpassung des Modells mit der insgesamt zu fahrenden Strecke pro Tag.

Anhang 19: Simulationsmodell - Verkehrsmodell.

Simulationsmodell - Lagermodell

Entität	Gleichungen	Erläuterung
Anzahl Lager	= (Startwert für die Anpassung des Modells an das reale System mit Ausgangswerten)	Die Entität <i>Anzahl Lager</i> ist für die Anpassung des Modells an die Anzahl von Lagern gedacht, die als Ausgangspunkt einer Belieferung fungieren.
Lagerfläche (BG)	<p>= IF THEN ELSE(PULSE TRAIN(91.25, 1, 91.25, 7300) <> 1, max((Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche/100)*Zu transportierende Paletten/6*(365/12)*3 +100* Anzahl Lager+IF THEN ELSE (Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche <> 100, 300, 0)*Anzahl Lager, Lagerfläche)-Lagerfläche, -Lagerfläche + (Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche/100)*Zu transportierende Paletten/6*(365/12)*3 +100 *Anzahl Lager +IF THEN ELSE(Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche <> 100, 300 , 0)*Anzahl Lager)</p> <p>● = (Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche/100)*Zu transportierende Paletten/6*(365/12) *3 +100*Anzahl Lager +IF THEN ELSE(Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche <> 100, 300 , 0)*Anzahl Lager</p>	<p>Eine Lagerfläche dient als temporärer Pufferplatz um eine Unterbrechungsfreie oder schnelle Belieferung von Liefergütern zum Kunden zu gewährleisten. Im Folgenden wird angenommen, dass der Logistikdienstleister ein eigenes Lager betreiben muss. Die angenommene Vorhaltezeit von Produkten beträgt einen Monat. Für Ermittlung des Flächenbedarfes des Lagers wird die Fläche der Europalette mit der Anzahl der beim Liefervolumen zu transportierenden Paletten verwendet. Für die Auslegung wird angenommen, dass Paletten in dreifach Regalen gelagert werden. Insgesamt benötigt das Lager als Arbeitsplatz weitere Flächen in Höhe von 200 Prozent zusätzlich zum Flächenbedarf der Paletten. Zusätzlich wird pro Lager eine Fläche von 100 m² als feste Arbeitsfläche für das Be- und Entladungen sowie dem Kommissionieren von Aufträgen auf den Ladungsträger der Paletten angenommen. Obwohl die zu liefernden Produkte in einer Kommissionierung zusammengestellt werden müssen und die Anzahl der gelagerten Paletten nicht genau der Anzahl der im Liefervolumen zu transportierenden Paletten entspricht, wird für die Berechnung die Annahme getroffen, dass die Unterscheidung zu vernachlässigen ist. Kooperationen führen zu Kostenersparnissen in der Logistikbranche. Das Zusammenlegen von Routenfahrten unterschiedlicher Unternehmen spart Kosten ein. Die Abbildung dieser Zusammenlegung geschieht über die Entität <i>Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche</i>. Wenn das Lager nur für Konsolidierungen benötigt wird, dann sinkt die Lagerfläche ab. Dagegen wird ein zusätzlicher Bereich für die Abläufe der Konsolidierung benötigt, was mit einer bedingten Anweisung im Modell im Modell umgeschaltet wird und zusätzlich 300 m² Fläche eingeplant. Für den Lagerflächenbedarf wird angenommen, dass eine Anpassung der gemieteten Lagerfläche alle drei Monate möglich ist.</p>
Puffer (BG)	= IF THEN ELSE(PULSE TRAIN(90, 1, 91, 7300) <> 1, +max(Puffer, Lagerfläche) - Puffer, -Puffer +Lagerfläche)	Weitere Sortierung zur Verwendung der Maximalwerte innerhalb des drei Monats Zeitraums.

Entität	Gleichungen	Erläuterung
	● = Lagerfläche	
<i>Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche</i>	= (<i>Startwert für die Anpassung des Modells an das reale System mit Ausgangswerten für die vorzuhaltende Lagerfläche</i>)	Variable für die Anpassung des Modells mit der Menge von Paletten, welche gelagert werden müssen (Im Fall von Konsolidierungscen-tern).

Anhang 20: Simulationsmodell - Lagermodell.

Simulationsmodell - Belieferungsmodell

Entität	Gleichung	Erläuterung
Ausgangslage zu transportierende Paletten	$= (\text{Fester Wert von zu liefernden Paletten})$ $+(\text{Kleine kurzzeitige Schwankung})$ $*\text{SIN}(\text{Time} * (1/2) * 3.14159 + \text{Zufallsstart})$ $+(\text{Große langfristige Schwankung})$ $*\text{cos}(\text{Time} * (1/2) * 3.14159 / 9 + \text{Zufallsstart})$ $+\text{RANDOM NORMAL} ((\text{Zufallswerte}))$	Die Größe des Liefervolumens bzw. die Menge an zu transportierenden Paletten eines Logistikdienstleisters unterliegen Schwankungen. Zyklische Schwankungen können identifiziert und abgebildet werden. Zur Einbindung der Schwankungen des zu transportierenden Modells wurden kurzzeitige, langzeitige und zufallsbasierende Schwankungen um einen festen Wert von zu transportierenden Paletten in das Modell eingebunden. Eine Anpassung des Modells erfordert ggf. zusätzliche Funktionen oder eine weitergehende Anpassung bestehender Funktionen. Das Ergänzen ist nach dem Bedarf durchzuführen, um eine realitätsnahe Abbildung der zu transportierenden Paletten zu erhalten.
Neue zu transportierende Paletten	= Ausgangslage zu transportieren * Konsumvariable	FG für die Berechnung der neuen zu transportierenden Paletten, in Abhängigkeit der Ausgangslage und dem Verhältnis zum Konsumwachstum.
Zu transportierende Paletten (BG)	= Neue zu transportierende Paletten-Transportrate ● = Ausgangslage zu transportieren	BG bei der die zu transportierenden Paletten am Tag auflaufen und im Normalfall abtransportiert werden. Nicht abtransportierte Paletten verbleiben in der BG und müssen beim nächsten Zeitschritt zusätzlich zu den neuen Paletten transportiert werden.
Transportrate	$= \text{MIN}(\text{Zu transportierende Paletten}, \text{max}(0, \text{IF THEN ELSE} (\text{Einfahrbeschränkung}=0, \text{IF THEN ELSE} (\text{Zu transportierende Paletten} > \text{Anzahl von Lieferfahrzeugen} * \emptyset \text{ Transportkapazität pro Fahrzeug} * \emptyset \text{ Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag}, \text{Anzahl von Lieferfahrzeugen} * \emptyset \text{ Transportkapazität pro Fahrzeug} * \emptyset \text{ Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag}, \text{Zu transportierende Paletten}), \text{IF THEN ELSE} (\text{Anteil der Fahrten in einem Bereich mit Einfahrbeschränkungen} * \text{Zu transportierende Paletten} < \text{Anzahl einfahrberechtigter Fahrzeuge} * \emptyset \text{ Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag} * \emptyset \text{ Transportkapazität pro Fahrzeug} : \text{AND}: (1 - \text{Anteil der Fahrten in einem Bereich mit Einfahrbeschränkungen}) * \text{Zu transportierende Paletten}))$	Für einen Logistikdienstleister im Kontext der City-Logistik wurde die Lieferfähigkeit als eine wichtige Herausforderung erkannt. EFBen stellen Herausforderungen für die Lieferfähigkeit dar. Im Modell wird mit der Entität <i>Transportrate</i> geprüft, wie hoch die mögliche Anzahl von transportierbaren Paletten pro Tag bei gegebenen Randbedingungen ist. Die Anzahl von Lieferfahrzeugen in den jeweiligen Bereich wird mit der Transportfähigkeit der Fahrzeuge und der Anzahl von Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag multipliziert, um die mögliche Transportkapazität pro Tag zu ermitteln. Die Entität <i>Transportrate</i> beschreibt durch die Berechnung, die an diesem Tag transportierten Paletten, wenn der berechnete Wert kleiner ist, als die Anzahl der an diesem Tag zu transportierenden Paletten ist. Im Fall von Einfahrbeschränkungen werden komplexere Berechnungsfälle mit mehrstufigen bedingten Anweisungen nötig, die Bereiche mit EFBen und die Fahr-

Entität	Gleichung	Erläuterung
	$\frac{\text{Zu transportierende Paletten} \cdot \left(\frac{\text{Anzahl von Lieferfahrzeugen} \cdot \text{Anzahl einfahrberechtigter Fahrzeuge}}{\text{Transportkapazität pro Fahrzeug}} \cdot \text{Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag} + (1 - \text{Anteil der Fahrten in einem Bereich mit Einfahrbeschränkungen}) \cdot \text{Zu transportierende Paletten} \right)}{\text{Anzahl einfahrberechtigter Fahrzeuge} \cdot \text{Transportkapazität pro Fahrzeug} + (1 - \text{Anteil der Fahrten in einem Bereich mit Einfahrbeschränkungen}) \cdot \text{Zu transportierende Paletten} \cdot \left(\frac{\text{Anzahl von Lieferfahrzeugen} \cdot \text{Anzahl einfahrberechtigter Fahrzeuge}}{\text{Transportkapazität pro Fahrzeug}} \cdot \text{Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag} + (1 - \text{Anteil der Fahrten in einem Bereich mit Einfahrbeschränkungen}) \cdot \text{Zu transportierende Paletten} \right)}$	<p>zeuge mit Einfahrberechtigung berücksichtigt. Durch die Fallunterscheidung wird sichergestellt, dass die Berechnung auch den Fall von freien Transportkapazitäten von Fahrzeugen mit einer Einfahrerlaubnis zur Belieferung von den Zielen im frei einfahrbaren Bereich berücksichtigt. Für die Berechnung wird eine Gleichverteilung der Ziele in der Einfahrtverbotszone zum zu transportierenden Liefervolumen angenommen.</p>

Entität	Gleichung	Erläuterung
	zeug*Ø Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag, Zu transportierende Paletten), Anzahl von Lieferfahrzeugen*Ø Transportkapazität pro Fahrzeug*Ø Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag))))))	
Zugestellte Paletten (BG)	= Transportrate ● = 0	Summe der insgesamt über den Untersuchungszeitraum hinweg transportierten Paletten.
Nicht transportierte Paletten	= IF THEN ELSE(Time < 24, 0, max(0,Zu transportierende Paletten-Transportrate))	Variable für die an diesem Tag nicht transportierten Paletten, welches eigentlich transportiert werden sollten. Um durch das Einschwingverhalten des Systems keine Ergebnisverfälschungen zu erhalten werden Paletten erst nach 24 Tagen als nicht transportiert aufgeführt.
Anzahl Tage mit nicht transportierten Paletten (BG)	= IF THEN ELSE(Nicht transportierte Paletten>0, 1, 0) ● = 0	Summe der insgesamt über den Untersuchungszeitraum hinweg auftretenden Tage, an denen zu transportierende Paletten nicht transportiert werden.
Summe von nicht transportierten Paletten (BG)	= max(0,Nicht transportierte Paletten) ● = 0	Summe des insgesamt über den Untersuchungszeitraum hinweg auftretenden n. r. t. P.
Anzahl durchgeführter Routenfahrten	= max(1,(Startwert, der durchgeführten Routenfahrten pro Tag)*Konsumvariable*RANDOM NORMAL((Anpassungswerte für die Schwankungen)))	Variable für die Anpassung des Modells mit der Menge an durchzuführenden Routen am Tag und dem Verhältnis zum Konsumwachstum. Neben den Mittelwert als Ausgangswert ist die Verteilung der Anzahl der Routenfahrten zu untersuchen und durch entsprechende Funktionen für die Schwankungen abzubilden.
Ziele pro Route	= (Startwert, der durchschnittlichen Ziele pro Tag) *RANDOM NORMAL(Anpassungswerte für die Schwankungen)	Variable für die Anpassung des Modells an im Durchschnitt pro Route angefahrne Ziele.
Ø Paletten pro Ziel	= max(1,MIN(Transportrate/(Anzahl durchgeführter Routenfahrten*Ziele pro Route),40))	Variable für die im Durchschnitt pro Ziel belieferten Paletten. Die Variable wird vom Modell berechnet und benötigt keine Anpassung mit Eingabedaten.
Anteil der Fahrten in einem Bereich mit Einfahrbeschränkungen	= (Anpassungswert für das Modell)	Variable für die Anpassung des Modells an den Anteil der sich in einem Bereich mit EFBen befindlichen Ziele, die bei EFBen nicht mit allen Fahrzeugen angefahren werden dürfen.
Ø Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag	= IF THEN ELSE(Arbeitsstunden pro Tag*60*60/(Benötigte Lieferzeit/Anzahl durchgeführter Routenfahrten)>Ø Anzahl	Variable zur Berechnung der von einem Fahrzeug möglichen Routenfahrten pro Tag. Die Rechnung prüft die zur Verfügung

Entität	Gleichung	Erläuterung
(BG)	<p>der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag, IF THEN ELSE(Arbeitsstunden pro Tag*60*60/(Benötigte Lieferzeit/Anzahl durchgeführter Routenfahrten)>Ø Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag+1,1,0.2),0)</p> <p>- IF THEN ELSE(Ø Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag<=1 , 0 ,IF THEN ELSE(Arbeitsstunden pro Tag*60*60/(Benötigte Lieferzeit/Anzahl durchgeführter Routenfahrten)<Ø Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag, IF THEN ELSE(Arbeitsstunden pro Tag*60*60/(Benötigte Lieferzeit/Anzahl durchgeführter Routenfahrten)<Ø Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag-1,1,0.2),0))</p> <p>● = (Startwert der durchschnittlichen Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag)</p>	<p>stehende Zeit im Verhältnis zu der im Durchschnitt insgesamt für eine Routenfahrt benötigte Zeit. Das Ergebnis bestimmt, wie der aktuelle Wert der BG angepasst werden muss.</p> <p>Die Variable hat die Besonderheit, dass eine BG verwendet wird. Aufgrund des bei der Initialisierung durchlaufenden Ablauf der einzelnen Entitäten ist die Verwendung einer BG mit Startvariablen nötig, um Zirkelschlüsse zu vermeiden. Die zeitliche verzögerte Einstellung eines Wertes wird als ausreichend genau und trotzdem zielführend angesehen.</p>
Arbeitsstunden pro Tag	= (Startwert für die Anpassung des Modells mit der Arbeitszeit am Tag in Stunden)	Variable für die Anpassung des Modells mit dem Wert der zur Verfügung stehenden Arbeitsstunden pro Tag.
Ø Transportkapazität pro Fahrzeug	= Fahrzeugkapazität*(1+Anpassung der Fahrzeugkapazität)	HG für die Zusammenführung der Werte des Modells für die im Durchschnitt pro Fahrzeug zur Verfügung stehenden Transportkapazität an Paletten.
Fahrzeugkapazität	= (Anpassungswert für das Modell mit der durchschnittlichen Transportkapazität der Fahrzeuge)	Eingangsfaktor für die Anpassung der Ø Transportkapazität der FPF an das zu untersuchende Logistiksystem.
Anpassung der Fahrzeugkapazität	= (Time^1.3)/((Anpassungswert, mit dem Bruchteil des Wertes einer Palette, um den die Transportkapazität erhöht werden soll)*Time^1.3 +7.3e+008/Time) *((Konsumvariable^5)/((Konsumvariable^5)+(2*Konsumvariable^4)))	Statistisch auffällige besonders kleine Lieferungen werden durch die Anpassung der Fahrzeugkapazität im Modell abgebildet. Die besonders kleinen Liefermengen mit dem Volumen von dem Bruchteil einer Palette werden zu einzelnen Kunden geliefert. Bei einem wachsenden Liefervolumen ist anzunehmen, dass bei Kunden, die nur einzelne Paletten bekommen ebenfalls das Liefervolumen anteilig steigt. Die Auslastung auf der einen Palette, die in dem Fall ausgeliefert wird, steigt ebenfalls an. In dem Fall kann das Liefervolumen leicht steigen ohne das eine zusätzliche Palette für den Transport benötigt wird. Als Folge würde das Transportvolumen

Entität	Gleichung	Erläuterung
		<p>der transportierten Produkte leicht wachsen, ohne dass sich die Anzahl der zu transportierenden Paletten verändert. Da im Simulationsmodell das Liefervolumen gleich den transportierten Paletten gesetzt wurden, sind Anpassungen für die realitätsgenaue Abbildung nötig. Um dieses Wachstum auszugleichen wird der Wert der Transportkapazität pro Fahrzeug leicht angepasst.</p>
<p><i>Anzahl Fahrten pro Route</i></p>	<p>= (Anpassungswert, mit den im Durchschnitt pro Route gefahrenen Fahrten)</p>	<p>Wert für die Ø Anzahl von Fahrten die ein Fahrzeug für die Abfertigung einer Route benötigt. Da FPF Routen zugeteilt bekommen, deren Liefervolumen das Transportvolumen übersteigt sind bei einer Route zusätzliche Fahrten zum Lager nötig. Die für diesen Vorgang benötigte Zeit und Wegstrecke ist in den durchschnittlichen Werten der Fahrstrecke und Fahrzeit mit aufzunehmen.</p>

Anhang 21: Simulationsmodell - Belieferungsmodell.

Simulationsmodell - Fuhrparkmodell

Entität	Gleichung	Erläuterung
Erneuerbar betriebe Fahrzeuge	= (<i>Anpassungswert, mit den in der Ausgangssituation vorliegenden Menge an erneuerbar betriebenen Kfz</i>)	Entität mit der das Modell an eine BS angepasst wird, mit der Anzahl der zu Beginn der Untersuchung im FP befindlichen erneuerbar betriebenen Fahrzeuge.
Klassische Fahrzeuge	= (<i>Anpassungswert, mit den in der Ausgangssituation vorliegenden Menge an klassisch mit Verbrennern betriebene Kfz</i>)	Entität mit der das Modell an eine BS angepasst wird, mit der Anzahl der zu Beginn der Untersuchung im FP befindlichen klassisch betriebenen Fahrzeuge.
Erneuerungszyklus	= (<i>Anpassungswert, mit der Anzahl von Kauf- und Verkaufzyklen in einem Jahr</i>)	Entität für die Anpassung des Modells, an die Anzahl der Anpassungszyklen pro Jahr. Voraussetzung für Einflussnahme der Entität im Modell ist das der Wert der Entität <i>Fuhrparkanpassung</i> auf „1“ und/oder <i>Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit</i> auf ungleich „0“ ist.
Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit	= (<i>Anpassungswert, für unterschiedliche Belieferungsstrategien</i>)	Entität für die Anpassung des Modells für die Umstellung mit einem möglichen Austausch von klassisch angetriebenen Kfz mit Verbrennungsmotor durch E-Kfz. Die Geschwindigkeit der Umstellung ist frei zu wählen. Im Modell wird angenommen das pro Kauf- und Verkaufsintervall die Höhe vom Wert der Entität <i>Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit</i> in ein E-Kfz umgewandelt wird.
Ø Schadstoffnorm (BG)	= IF THEN ELSE(Ø Schadstoffnorm>6, 0, IF THEN ELSE(Änderung von Fahrzeugen>0, Änderung von Fahrzeugen*(<i>Anpassungswert, für die durchschnittliche Verbesserung der Schadstoffnorm mit jedem Kfz kauf</i>) , 0)) ● = (<i>Startwert zur Anpassung des Modells an die durchschnittliche Schadstoffnorm im Logistiksystem</i>)	Entität für die Anpassung des Modells mit der zum Beginn der Untersuchung vorliegende durchschnittlichen Euro-Schadstoffnorm bei Lieferfahrzeugen des zu untersuchenden Logistiksystems. Die Schadstoffnorm hat einen Einfluss auf die Einfahrerlaubnis der Fahrzeuge, die zu zahlenden Steuern und den Verbrauch der Fahrzeuge. Für die Schadstoffnorm wird eine Änderung mit jeder Anpassung im FP angenommen. Für die Anpassung der Schadstoffnorm ist analog zur Änderung des Alters privater Pkw eine Funktion zu erstellen, durch das Zurückgreifen auf den FP des zu untersuchenden Unternehmens, die die weitere Entwicklung des durchschnittlichen Alters abbildet.
Anzahl einfahrberechtigter Fahrzeuge	= max(0,IF THEN ELSE(Einfahrbeschränkung>=1, Anzahl von Lieferfahrzeugen*(max(Klassische	Mit hohen Werten von Schadstoffen in der Luft bei gleichzeitig strengeren Luftreinhaltestandards ist eine häufig

Entität	Gleichung	Erläuterung
	<p>Fahrzeuge -IF THEN ELSE(Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit auf Alternative Antriebe>0, Time*(Erneuerungszyklus+Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit auf Alternative Antriebe)/365 , 0),0)/(Klassische Fahrzeuge+Erneuerbar betriebene Fahrzeuge))/(2^ Härte der Einfahrbeschränkungen) +Anzahl von Lieferfahrzeuge*(MIN(Erneuerbar betriebene Fahrzeuge +IF THEN ELSE(Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit auf Alternative Antriebe>0, Time*(Erneuerungszyklus+Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit auf Alternative Antriebe)/365 , 0),Klassische Fahrzeuge+Erneuerbar betriebene Fahrzeuge)/(Erneuerbar betriebene Fahrzeuge+Klassische Fahrzeuge)))+IF THEN ELSE(Ø Schadstoffnorm>=5, ((Anzahl von Lieferfahrzeuge*(max(Klassische Fahrzeuge-IF THEN ELSE(Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit auf Alternative Antriebe>0, Time*(Erneuerungszyklus+Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit auf Alternative Antriebe)/365 , 0),0)/(Klassische Fahrzeuge+Erneuerbar betriebene)))**((2^ Härte der Einfahrbeschränkungen)-1)/2^ Härte der Einfahrbeschränkungen), IF THEN ELSE(((Anzahl von Lieferfahrzeuge*(max(Klassische Fahrzeuge-IF THEN ELSE(Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit auf Alternative Antriebe>0, Time*(Erneuerungszyklus+Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit auf Alternative Antriebe)/365 , 0),0)/(Klassische Fahrzeuge+Erneuerbar betriebene Fahrzeuge)))**((2^ Härte der Einfahrbeschränkungen)-1)/(2^ Härte der Einfahrbeschränkungen))**((Anpassungswert/Funktion für die Einfahrfähigkeit nach Schadstoffnorm) <=0, 0 ,((Anzahl von Lieferfahrzeuge*(max(Klassische Fahrzeuge-IF THEN ELSE(Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit auf Alternative Antriebe>0, Time*(Erneuerungszyklus+Umstieg und Um-</p>	<p>von der Politik umgesetzten Maßnahme die Einführung von Zonen mit EFBen, die der Hälfte der älteren bzw. mehr Schadstoffe ausstoßenden Kfz die Einfahrt in stark schadstoffbelastete Stadtteile verweigern. Für einen Logistikdienstleister ist die Einfahrtserlaubnis von Lieferfahrzeugen existenziell, um Lieferaufträge durchführen zu können.</p> <p>In der Entität <i>Anzahl einfahrberechtigter Fahrzeuge</i> wird daher bestimmt, wie viele Fahrzeuge aus dem FP in die Einfahrverbotszonen der Stadt fahren dürfen.</p> <p>Für die Bestimmung wird erneut die EFB für standardmäßig die Hälfte der Kfz angenommen, da diese Form der Beschränkung als charakteristisch identifiziert wurde.</p> <p>Für die Berechnung wird immer das Verhältnis der zum Beginn der Untersuchung gegebenen Fahrzeuge verwendet und auf die aktuelle Größe des FPs angewandt, um die Anzahl der unterschiedlichen Fahrzeugtypen zum jeweiligen Zeitpunkt zu bestimmen. Im Fall von einem Umstieg von klassischen Verbrennern auf erneuerbar betriebene Kfz wird dafür das Verhältnis der Fahrzeugtypen mithilfe der Zeit und den Anpassungsvariablen neu bestimmt.</p> <p>EFBen mit strengeren oder lascheren Einschränkungen, die einem anderen Anteil von Fahrzeugen die Einfahrt untersagen, werden mit der Entität Härte der EFBen beeinflusst.</p> <p>Das Ziel von EFBen ist i. d. R. eine Verbesserung der Luftqualität. Fahrzeuge mit geringem Schadstoffausstoß wird in diesem Fall eine Einfahrt gewährt. Für die Einbindung in das Modell wird der Sachverhalt mit der Einfahrerlaubnis für Kfz mit geringem Schadstoffausstoß als wahrscheinlichster Fall angenommen und abgebildet. Zur Anpassung der Entität an ein Fallbeispiel ist eine Funktion zur Einfahrerlaubnis aufzustellen. Zu beachten ist der Fahrzeugbestand zu Beginn der Untersuchung und um wie viel der durchschnittliche Schadstoffnormwert bei einem Kfz-Neukauf verändert</p>

Entität	Gleichung	Erläuterung
	stiegsgeschwindigkeit auf Alternative Antriebe)/365 , 0),0)/(Klassische Fahrzeuge+Erneuerbar betriebene Fahrzeuge))*((2^ Härte der Einfahrbeschränkungen)-1)/(2^ Härte der Einfahrbeschränkungen)) *((Anpassungswert/ Funktion für die Einfahrfähigkeit nach Schadstoffnorm)/100))), Anzahl von Lieferfahrzeuge))	wird. Mit den Zahlen zu den Wachstumsschritten durchschnittlichen Schadstoffnormwerte sind Rückschlüsse auf die Menge der in den Innenstadtbereich einfahrfähigen Kfz möglich. Mit der Regression kann eine Funktion für den Anteil der Kfz mit Einfahrgenehmigung nach Schadstoffnorm in die Gleichung integriert werden.
<i>Anzahl von Lieferfahrzeugen (BG)</i>	= Änderung von Fahrzeugen ● = Erneuerbar betriebene Fahrzeuge + Klassische Fahrzeuge	Die Entität <i>Anzahl von Lieferfahrzeugen</i> gibt die Größe des FPs zum jeweiligen Zeitpunkt an. Für die Modellierung wird die Annahme getroffen, dass der FP nur aus dem Logistikdienstleister zugehörigen Fahrzeugen besteht. Mietfahrzeuge werden bei Bedarf nicht angefordert. Weiterhin wird angenommen, dass der Bedarf von besonderen Lieferfahrzeugen für besondere Kundenwünsche nicht gegeben ist. Ggf. ist eine Anpassung der Modellierung der Fahrzeuge notwendig, wenn besondere Fahrzeugtypen mit bestimmten Eigenschaften modellrelevant erscheinen.
<i>Änderung von Fahrzeugen</i>	= IF THEN ELSE(<i>Fuhrparkanpassung</i> >0, IF THEN ELSE(Verzögerungsfunktion=1, Maximalwert insgesamt nötiger Fahrzeuge*(1+Sicherheitsrückstellungen/100)-Anzahl von Lieferfahrzeuge, 0),0)	FG der Anzahl von Fahrzeugen im Verhältnis zum Bedarf zum jeweiligen Zeitpunkt und einem zusätzlichen Sicherheitspuffer.
<i>Sicherheitsrückstellungen</i>	= (<i>Anpassungswert für die zusätzlichen Rückstellungen von Fahrzeugen in Prozent</i>)	Der Bedarf an Fahrzeugen entspricht dem aufkommenden Liefervolumen. Durch starke Schwankungen beim aufkommenden Liefervolumen kann die benötigte Fahrzeuganzahl des letzten Anpassungszykluses übersteigen. Um die Schwankungen beim Liefervolumen abzufangen wurde im Modell die Möglichkeit gegeben den Bedarf an Kfz, um einen Prozentwert anzupassen. Analog ist mit der Entität die Möglichkeit gegeben zu untersuchen, wie das Systemverhalten bei einem nicht den Bedarf deckenden FP reagiert.
<i>Fuhrparkanpassung</i>	= (<i>Wert für die Anpassung des Modells an zu untersuchende Belieferungsstrategien</i>)	Das Lieferaufkommen eines Logistikdienstleisters verändert sich und schwankt mit der Zeit. Logistikdienstleister können ihren FP entsprechend auf das Liefervolumen einstellen. Die Entität <i>Fuhrparkanpassung</i> bringt die

Entität	Gleichung	Erläuterung
		Möglichkeit der Kapazitätsanpassung entsprechend an den Bedarf in das Modell ein. Die Anpassung in bestimmten Zyklen wird mit dem Wert „1“ aktiviert und dem Wert „0“ deaktiviert.
<i>Verzögerungsfunktion</i>	= PULSE TRAIN(integer(365/Erneuerungszyklus), 1, integer(365/Erneuerungszyklus), 7300)	Die Entität <i>Verzögerungsfunktion</i> verwendet die Pulse Train Funktion, um entsprechend dem Eingangswert des Erneuerungszykluses in Zyklen Signale zu erzeugen. Durch das binäre Signal werden die Kaufzyklen bei der Anpassung der Größe des FPs initiiert.
<i>Maximalwert insgesamt nötiger Fahrzeuge (BG)</i>	= IF THEN ELSE(PULSE TRAIN(365/Erneuerungszyklus+1, 1, 365/Erneuerungszyklus, 7300)<>1, IF THEN ELSE(Maximalwert insgesamt nötiger Fahrzeuge>Anzahl insgesamt nötiger Fahrzeuge , 0, IF THEN ELSE(Maximalwert insgesamt nötiger Fahrzeuge=0, Anzahl insgesamt nötiger Fahrzeuge , Anzahl insgesamt nötiger Fahrzeuge-Maximalwert insgesamt nötiger Fahrzeuge)), -Maximalwert insgesamt nötiger Fahrzeuge +Anzahl insgesamt nötiger Fahrzeuge) ● = 0	Die Schwankungen der zu transportierenden Paletten beeinflussen in gleichem Maß die insgesamt an diesem Zeitpunkt benötigten Fahrzeuge. Die Entität <i>Maximalwert insgesamt nötiger Fahrzeuge</i> fungiert als HG für die Berechnung der Änderungsrate von Fahrzeugen und gleicht die Schwankungen des Tagesverkehrs aus. Durch die Berechnung wird der größte Bedarfswert innerhalb des Anpassungszyklus in der BG gespeichert. Mithilfe der Pulse Train Funktion wird der gespeicherte Wert einen Zeitschritt nach dem Kaufzyklus zurückgesetzt. An den anderen Tagen wird die Differenz zum größeren Wert in der BG addiert.
<i>Anzahl insgesamt nötiger Fahrzeuge</i>	= MIN(1000, max(1, Anzahl notwendiger Fahrzeuge +Anzahl zusätzlich nötiger Fahrzeuge))	In der Entität <i>Anzahl insgesamt nötiger Fahrzeuge</i> werden die HGn zur Bestimmung der benötigten Fahrzeuge zum jeweiligen Fahrzeug zusammengefasst.
<i>Anzahl notwendiger Fahrzeuge</i>	= max(1,IF THEN ELSE(Transportrate/(Ø Transportkapazität pro Fahrzeug*Ø Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag*Anzahl Fahrten pro Route)>=0 ,Transportrate/(Ø Transportkapazität pro Fahrzeug*Ø Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag*Anzahl Fahrten pro Route) ,0))	Die Entität <i>Anzahl notwendiger Fahrzeuge</i> bestimmt die Anzahl der Fahrzeuge, die für den Transport der am jeweiligen Tag transportierten Paletten notwendig sind.
<i>Anzahl noch zusätzlich nötiger Fahrzeuge</i>	= max(0,IF THEN ELSE(Nicht transportierte Paletten/(Ø Transportkapazität pro Fahrzeug*Ø Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag*Anzahl Fahrten pro Route)>0, Nicht transportierte Paletten/(Ø Transportkapazität pro Fahrzeug*Ø Anzahl der Routenfahrten pro Fahrzeug am Tag*Anzahl Fahrten pro Route) , 0))	Die Entität <i>Anzahl noch zusätzlich nötiger Fahrzeuge</i> bestimmt die Anzahl der Fahrzeuge, die für den Transport der am jeweiligen Tag nicht transportierten Paletten notwendig sind.

Entität	Gleichung	Erläuterung
<i>Auslastung der Fahrzeuge</i>	= MIN(100,max(0,Anzahl insgesamt nötiger Fahrzeuge*100/Anzahl von Lieferfahrzeuge))	Die Entität <i>Auslastung der Fahrzeuge</i> zeigt die Auslastung der Fahrzeuge in Bezug auf den jeweiligen Tag und den gesamten FP.
<i>Auslastung der Fahrzeuge nach Einfahrberechtigung</i>	= max(0,MIN(Anzahl insgesamt nötiger Fahrzeuge*100/Anzahl ein-fahrberechtigter Fahrzeuge,100))	Die Entität <i>Auslastung der Fahrzeuge nach Einfahrberechtigung</i> zeigt die Auslastung der Fahrzeuge in Bezug auf den FP, mit den zum jeweiligen Tag einfahrberechtigten Fahrzeugen.
<i>Auslastung Fahrzeuge mit Einfahrberechtigung begradigt</i>	= (SMOOTH3(Auslastung der Fahrzeuge nach Einfahrberechtigung,730))	Aufgrund der starken Schwankungen der Entität <i>Auslastung der Fahrzeuge nach Einfahrberechtigung</i> wird die Auslastung über mehrere Untersuchungstage geglättet. Unter der Annahme, dass das System am Ende des Untersuchungszeitraums einen eingeschwungenen Zustand angenommen hat, kann der geglättete Wert für einen Vergleich der Auslastung verwendet werden.

Anhang 22: Simulationsmodell - Fuhrparkmodell.

Simulationsmodell – Kostenmodell

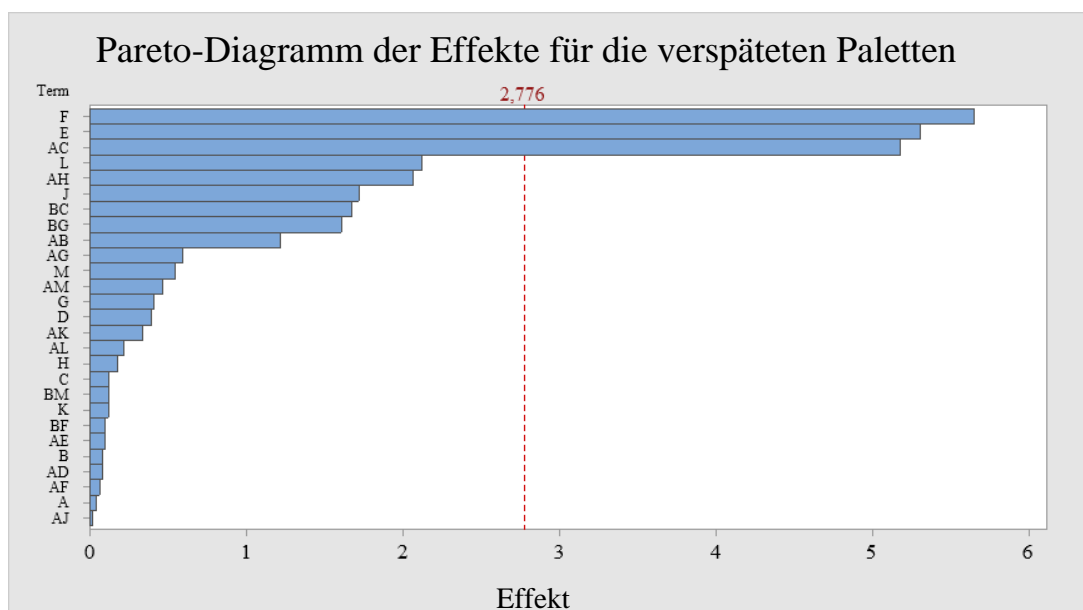
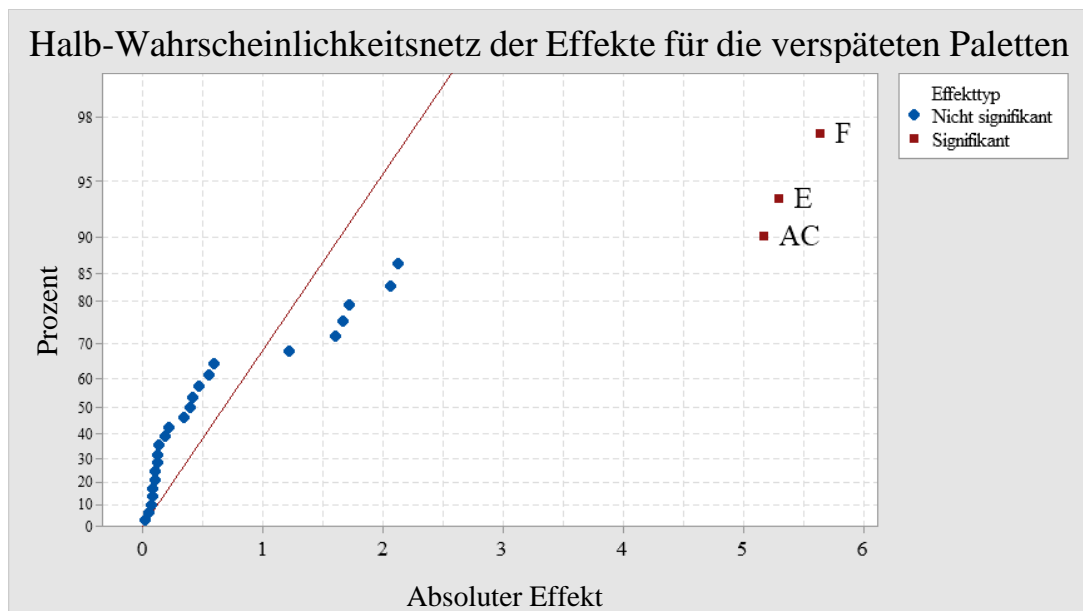
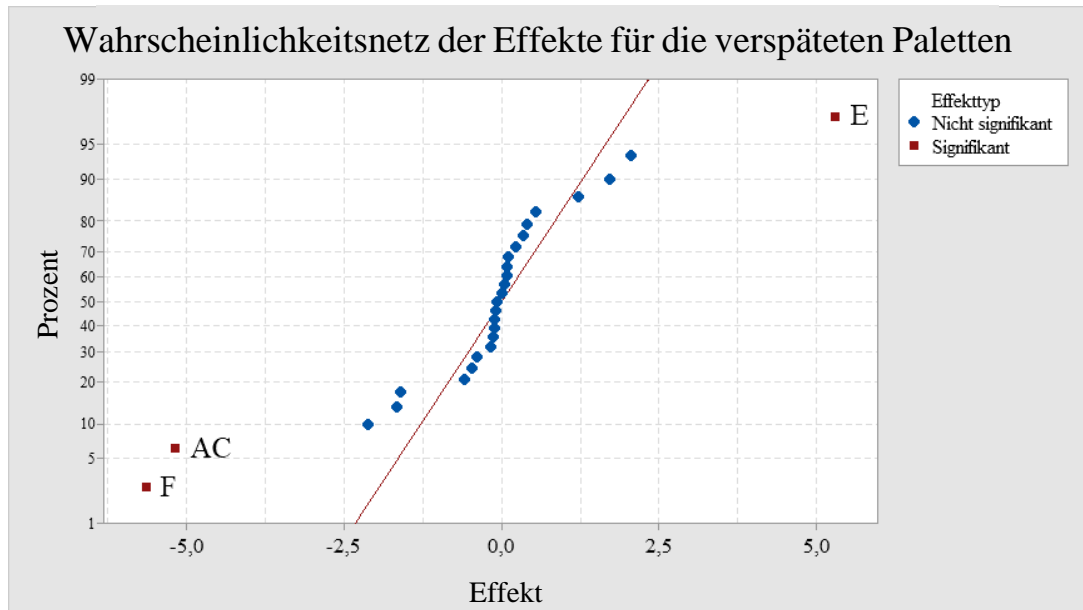
Entität	Gleichung	Erläuterung
<i>Strafzahlungen für nicht fristgerechte Lieferung</i>	$= \max(0, (\text{Anpassungswert für Strafzahlungen pro Palette und nicht rechtzeitig gelieferten Tag}) * \text{Nicht transportierte Paletten})$	Eine nicht fristgerecht zur Destination gelieferte Ware führt zu einer geringen Liefertreue. Neben der geringen Liefertreue sind je nach Lieferverträgen auch Strafzahlungen für nicht fristgerechte Lieferungen denkbar. Im Modell sind daher Anpassungen für die Summe der pro Tag n. r. t. P. vorzunehmen.
<i>Lohnkosten Lagerarbeiter</i>	$= \emptyset \text{ Einkommen} * (\text{Anpassungswert der Einkommen im Vergleich zum durchschnittlichen Einkommen im Agglomerationsraum}) / (365)$	Der Verdienst von Lagerarbeitern ist von unterschiedlichen Faktoren geprägt, wie Standorten, Unternehmensgrößen etc. geprägt. Im Modell sind die Einkommen daher individuell anzupassen an die Gegebenheiten.
<i>Lagerkosten</i>	$= \max(0, \text{Puffer} * \text{Mietpreisspiegel} * (12/365) + (\text{IF THEN ELSE}(\text{Puffer}/\text{Anzahl Lager} < 25000, 6 * \text{Anzahl Lager}, (\text{Puffer}/(\text{Anzahl Lager} * 25000))) * 6) * \text{Lohnkosten Lagerarbeiter} * \text{IF THEN ELSE}(\text{Arbeitsstunden pro Tag} = 7, 1, \text{IF THEN ELSE}(\text{Arbeitsstunden pro Tag} = 14, 2, 3))) + 27.4) + \text{Anzahl Lager} * 28.3 + \text{IF THEN ELSE}(\text{Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche} < 1, \text{Anzahl Lager} * (2 * \text{Lohnkosten Lagerarbeiter} * \text{IF THEN ELSE}(\text{Arbeitsstunden pro Tag} = 7, 1, \text{IF THEN ELSE}(\text{Arbeitsstunden pro Tag} = 14, 2, 3))) + 20), 0))$	Die Kosten der Lagerhaltung setzen sich aus den Unterhaltskosten für die Miete der Halle und das Arbeitsmaterial, sowie die Lohnkosten der Arbeitnehmer zusammen. Im Modell wurden diese Kosten ebenfalls berücksichtigt und ermittelt. Etwaige Ausgaben für Fortbildungen, Feiern etc. wurden dagegen als für bei dem gewählten Detaillierungsgrad vernachlässigbar eingeschätzt und werden nicht abgebildet. Für die Lagerflächenkosten wird die Lagerfläche und der Mietpreisspiegel bei Lagerhallen im Agglomerationsraum verwendet. Für die Lohnkostenberechnung wird die Menge an Lagern und Lagerfläche berücksichtigt. Für die Anzahl der Arbeitnehmer wird eine Annahme von sechs Arbeitnehmern pro Lager getroffen. Ausgenommen sind Fälle, in denen die Fläche des Lagers 25000 Quadratmetern übersteigt. Beim Überschreiten erfolgt die Berechnung anteilig zur Fläche. Für das Arbeitsmaterial wird ein fester Kostenfaktor von 10000€ pro Jahr und Lager angenommen. Für den Fall, dass die Lager auch als Konsolidierungscenter fungieren, werden zwei zusätzliche Arbeitnehmer pro Lager und 7300 Euro pro Jahr für die Kosten angenommen. Bei Mehrschichtbetrieb werden die Kosten für Lohn entsprechend vervielfacht. Die Kosten für die Wartung oder Neuanschaffung von Material die zuvor als Festbeträge eingeplant wurden, werden für den Fall von Mehrschichtbetrieben als konstant angenommen.
<i>Unterhaltskosten Fahrzeuge</i>	$= \text{IF THEN ELSE}(\text{Umschaltung Unterhaltskosten} = 0, \text{IF THEN ELSE}(\text{Klassische Fahrzeuge} > 0, \text{Zu fahrende Strecke} * ((0.32 - \emptyset \text{ Schadstoffnorm}/40) * 1.369 + 0.2) + (\text{Anpas-}))$	Die Unterhaltskosten der Fahrzeuge unterscheiden sich nach dem Funktionsprinzip der Antriebe, Bauart und dem Verkehrsträger auf dem sie sich bewegen. Das Alter der Fahrzeuge führt außerdem zu einer weiterführenden Effizienzsteigerung.

Entität	Gleichung	Erläuterung
	<p><i>sungswert im Fall einer Mautgebüh- r in der Stadt die Laufleistung- abhängig bezahlt werden muss</i>))*(((Klassische Fahr- zeuge+Erneuerbar betriebene Fahrzeuge)^(-1))*((Klassische Fahrzeuge -IF THEN ELSE(Umstieg und Umstiegs- geschwindigkeit auf Alternative Antriebe>0, MIN(Klassische Fahrzeuge, Time*(Erneuerungs- zyklus+Umstieg und Umstiegs- geschwindigkeit auf Alternative Antriebe)/365), 0))),0)+IF THEN ELSE(Erneuerbar betrie- bene Fahrzeuge>0, Zu fahrende Strecke*(0.2+0.2773+(Anpas- sungswert im Fall einer Maut- gebüh- r in der Stadt die Laufleistung- abhängig bezahlt werden muss)))*(((Klassische Fahr- zeuge+Erneuerbar betriebene Fahrzeuge)^(-1))*((Erneuerbar betriebene Fahrzeuge +IF THEN ELSE(Umstieg und Um- stiegsgeschwindigkeit auf Alter- native Antriebe>0, MIN(Klassi- sche Fahrzeuge,(Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit auf Alternative Antriebe+Erneue- rungszyklus)*Time/365), 0))), IF THEN ELSE(Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit auf Alternative Antriebe>0, Zu fah- rende Stre- cke*(0.2+0.2773)*MIN((Um- stieg und Umstiegsgeschwindig- keit auf Alternative An- triebe+Erneuerungszyk- lus)*Time/365,Klassische Fahr- zeuge)/Klassische Fahrzeuge, 0))+Anzahl von Lieferfahrzeuge *(((Klassische Fahrzeuge+Er- neuerbar betriebene Fahr- zeuge)^(-1))*((Klassische Fahr- zeuge -IF THEN ELSE(Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit auf Alternative Antriebe>0, MIN(Klassische Fahr- zeuge, Time*(Erneuerungszyk- lus+Umstieg und Umstiegsge- schwindigkeit auf Alternative Antriebe)/365) , 0)))*(1.33+8.22+(Anpassungs- wert im Fall einer Mautgebüh- r</p>	<p>Diese Eigenschaften wurden in die Model- lierung eines Logistiksystems übernommen. Bei klassischen verbrennungsbetriebenen Fahrzeugen wurden Praxiswerte für den Die- selverbrauch und die Instandhaltung als Nä- herungswerte herangezogen. Der Ausgangsverbrauch von Lkw mit Ver- brennungsmotor wurde danach auf 32 Liter bei 100 Kilometern festgelegt, bei einem Treibstoffpreis von 1,360 € pro Liter. Die laufenden Verschleißkosten wurden auf 0,2Euro den Kilometer festgelegt. Die An- nahme des festen Dieselpreises ist unter Um- ständen nicht gerechtfertigt. Aufgrund der bisherigen unzuverlässigen Prognosen für den Treibstoffpreis wird jedoch trotzdem diese Vereinfachung eines leicht erhöhten festen Treibstoffpreises getroffen. Sollten geplante Steuererleichterungen oder Erhö- hungen bekannt sein, sind zumindest diese festen Kostenfaktoren im Modell zu integrie- ren. Bei Elektrolieferwagen sind bisher nur weni- ger Erfahrungswerte bekannt. Praxiswerte zeigen jedoch eine mögliche Ersparnis bei den laufenden Kilometerkosten von sieben Cent pro Kilometer. Diese Kosten wurden entsprechend den von einem modernen Ver- brennungsmotor für Ausgangswerte von Elektrolieferwagen zurückgerechnet. Die Kosten für die Reparatur, Reifen und In- spektionen werden analog zum Verbrenner mit 0,2 Euro pro Kilometer angenommen. Neben den laufenden Kosten sind für alle Fahrzeuge Steuern, Inspektionen und Versi- cherungsbeiträge zu entrichten. Aufgrund von Erfahrungswerten in Höhe von 3850 Euro im Jahr wurden diese Summen für Ver- brenner-Lkw in das Modell aufgenommen. Im Fall von einer BS mit autonomen Fahr- zeugen sind individuell angepasste Werte an die verwendete Technik aufzustellen. Im Fall von Mautgebühren in der Stadt sind die Kosten in die Berechnungsformeln zu integ- rieren. Je nach den zu entrichtenden Mautge- bühren sind laufleistungsunabhängige oder laufleistungsabhängige Gebühren in die Be- rechnung zu integrieren. Bei den laufleis- tungsabhängigen Gebühren ist ggf. eine Un- terscheidung bei den Gebühren für erneuer- bar betriebene Fahrzeuge und klassisch be- triebenen Fahrzeugen zu berücksichtigen.</p>

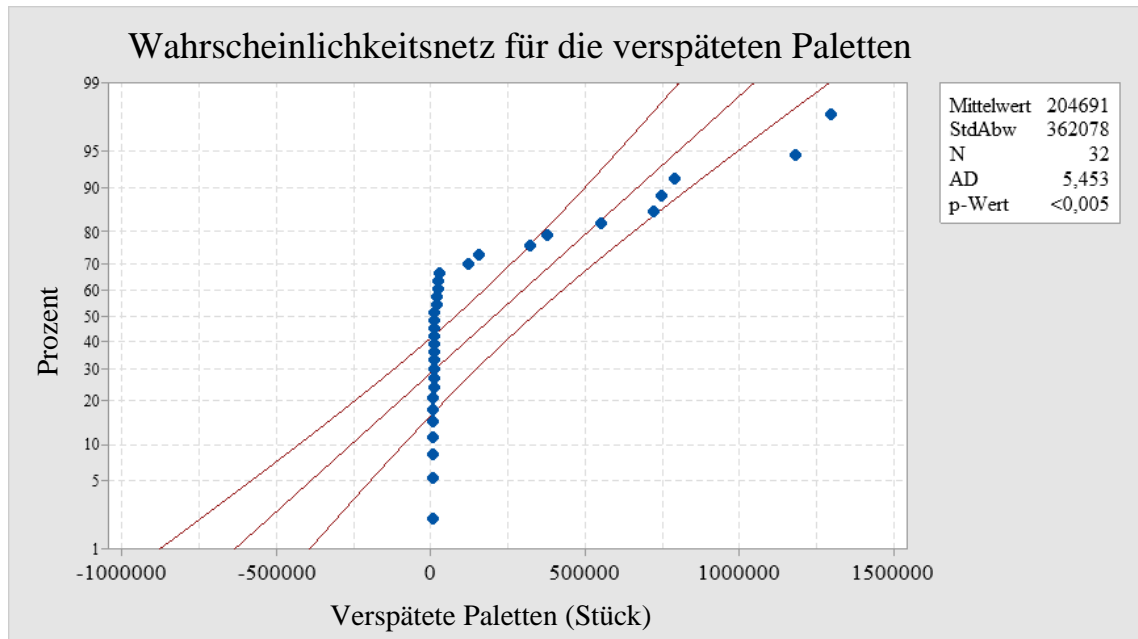
Entität	Gleichung	Erläuterung
	<p><i>in der Stadt die Laufleistungs-unabhängig bezahlt werden muss</i>))+IF THEN ELSE(Erneuerbar betriebene Fahrzeuge>0, Anzahl von Lieferfahrzeuge*((Klassische Fahrzeuge+Erneuerbar betriebene Fahrzeuge)^(-1)) *(Erneuerbar betriebene Fahrzeuge+IF THEN ELSE(Umstieg und Umstiegs-geschwindigkeit auf Alternative Antriebe>0, MIN(Klassische Fahrzeuge, (Umstieg und Umstiegs-geschwindigkeit auf Alternative Antriebe+Erneuerungszyklus)*Time/365), 0), IF THEN ELSE(Umstieg und Umstiegs-geschwindigkeit auf Alternative Antriebe>0, MIN(Klassische Fahrzeuge,(Umstieg und Umstiegs-geschwindigkeit auf Alternative Antriebe+Erneuerungszyklus)*Time/365),0))*(1.14+7.33), Zu fahrende Strecke*(0.1+0.15) +(0.41+0.27)*Anzahl von Lieferfahrzeugen+5479.45)</p>	
<i>Umschaltung Unterhaltskosten</i>	= (<i>Anpassungswert für die Umschaltung der zu Untersuchenden Konzepte im Bezug auf die Unterhaltskosten</i>)	Variable für die Anpassung der Unterhaltskosten auf eine grundlegend andere BS. Die Anpassung erfolgt über den Wert „0“ für klassische BSn und „1“ für weitestgehend autonome BSn
<i>Lohnkosten Fahrer</i>	= max(0,Ø Einkommen*(<i>Anpassungswert der Einkommen im Vergleich zum durchschnittlichen Einkommen im Agglomerationsraum</i>)/ (365*24*60*60))	Variable für die Ermittlung der Kosten der Fahrer umgerechnet in Sekunden, um die Kosten der Fahrzeit anzupassen.
<i>Lieferkosten</i>	= max(0,+IF THEN ELSE(Umschaltung Unterhaltskosten<>0, Lohnkosten Fahrer*172800 , Benötigte Lieferzeit*Lohnkosten Fahrer)+Unterhaltskosten Fahrzeuge)	Variable für die Ermittlung der Lieferkosten. Für die Aufstellung der Lieferkosten sind die Faktoren die Lieferzeit und Lieferstrecke relevant. Mit ansteigendem Verkehrsaufkommen steigen die benötigten Lieferzeiten und die an die Lieferzeiten gebundenen Kosten an. Ebenfalls relevant für Lieferzeiten ist die Entladung der Ware. Bei zeitkritischen Distributionszielen können durch ein hohes Verkehrsaufkommen Schwankungen bei Ankunftszeit auftreten, die an der Lieferrampe zu zusätzlichen Wartezeiten führen. Für die Bestimmung der Kosten wird nur der Zeitaufwand und nicht die benötigte Anzahl von einzustellenden Arbeitern verwendet. Die zu fahrende Strecke bei den Lieferungen wird

Entität	Gleichung	Erläuterung
		über Wartungskosten mit in die Berechnung der Lieferkosten aufgenommen. Im Fall der Untersuchung autonomer Belieferungssysteme, sind die Lohnkosten für die Fahrer in Verbindung mit der Fahrzeit obsolet. Im Folgenden wird jedoch angenommen, dass zwei Arbeitnehmer rund um die Uhr den autonomen Lieferbetrieb überwachen müssen. Die Entladung der Ware wird bei der Berechnung ebenfalls als automatisiert angenommen.
<i>Kostenentwicklung</i>	= max(0, Lagerkosten+Lieferkosten+Strafzahlungen für nicht fristgerechte Lieferungen)	Im Modell werden für die Darstellung der Kosten alle zuvor berechneten Kostenanteile in der Entität <i>Kostenentwicklung</i> zusammengeführt. Die FG <i>Kostenentwicklung</i> zeigt die Kosten für den jeweiligen Tag auf und fließt in die BG <i>Laufende Kosten</i> ein.
<i>Laufende Kosten</i> (BG)	= <i>Kostenentwicklung</i> ● = 0	Die laufenden Kosten eines Unternehmens sind ein bedeutender Faktor für die Zukunftsfähigkeit. Daher wurde im Modell die Entität <i>Laufende Kosten</i> als Summenfunktion hinzugefügt. Die Funktion summiert dafür die gesamten Kosten über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg auf.

Anhang 23: Simulationsmodell – Kostenmodell.

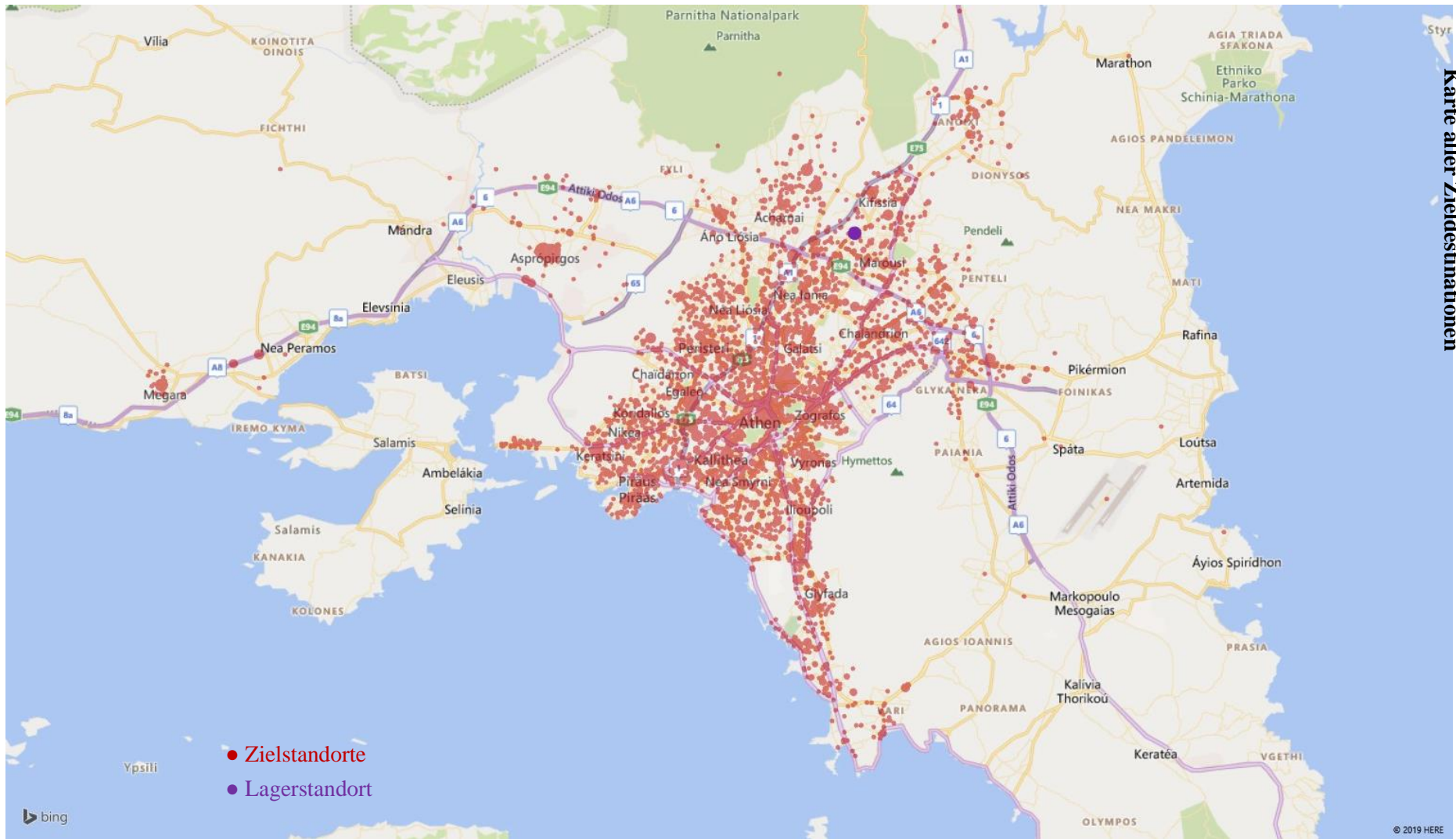


Anhang 24: Beispieldiagramme für die Effekte der Faktoren auf verspätete Paletten.



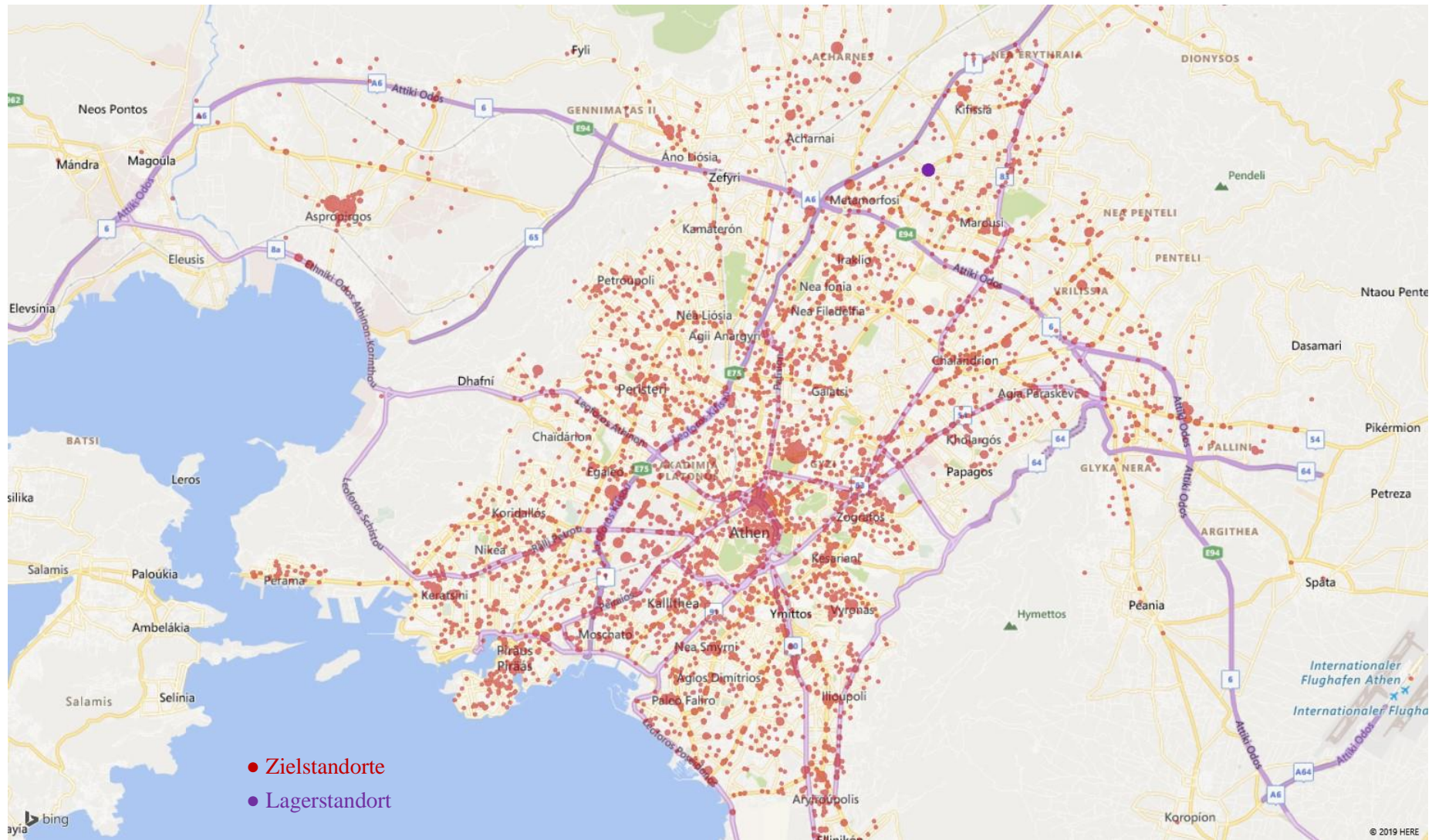
Anhang 25: Beispieldiagramm für das Wahrscheinlichkeitsnetz bei nicht rechtzeitig transportierten Paletten.

Karte aller Zieldestinationen



Anhang 26: Karte aller Zieldestinationen und Lagerstandorten.

Karte der Zieldestinationen mit Schwerpunkt Athen



Anhang 27: Karte der Zieldestinationen und Lagerstandorte mit der Fokussierung auf den Agglomerationsraum Athen.

Schadstoffnormen bei Fahrzeugen des Logistikdienstleisters

Schadstoffnorm	Anzahl Fahrzeuge
Euro-1	12
Euro-2	17
Euro-3	51
Euro-4	10
Euro-5	3
Euro-6	0

Anhang 28: Schadstoffnormen bei Fahrzeugen.

Ausgewählte Eingangsfaktoren zur Anpassung des Modells

Entität	Einheit	Wertebereich
<i>Einwirkungsfaktor von Staus</i>	Dimensionslos	[0,5]
<i>Schadstoffgrenzwert</i>	Dimensionslos	[50,700]
<i>Fahrzeit pro Route</i>	Sekunde	[60,90000]
<i>Zu fahrende Strecke pro Route</i>	Kilometer	[1,300]
<i>Umschaltung Unterhaltskosten</i>	Dimensionslos	{0,1}
<i>Anzahl durchgeführter Routenfahrten</i>	Fahrten	[1,200]
<i>Ziele pro Route</i>	Ziele/Route	[1,60]
<i>Anzahl Fahrten pro Route</i>	Fahrten/Route	[1,30]
<i>Arbeitsstunden pro Tag</i>	Stunde	[5,24]
<i>Fahrzeugkapazität</i>	Palette	[1,50]
<i>Anzahl Lager</i>	Stück	{1, 2, 3, ..., 20}
<i>Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche</i>	Prozent	[10,100]
<i>Erneuerbar betriebene Fahrzeuge</i>	Stück	[0,900]
<i>Klassische Fahrzeuge</i>	Stück	[0,900]
<i>Fuhrparkanpassung</i>	Dimensionslos	{0,1}
<i>Umstieg und Umstiegsgeschwindigkeit</i>	Autos pro Erneuerungszyklus	[0,5]
<i>Entladezeit je Palette</i>	Sekunde	[1,300]
<i>Entladezeit Pauschale</i>	Sekunde	[1,900]

Anhang 29: Ausgewählte Eingangsfaktoren zur Anpassung des Modells.

Übersicht des Versuchsplans

Faktoren:	12	Basisversuchsplan:	12; 64	Auflösung:	IV
Durchläufe:	64	Replikationen:	1	Fraktion:	1/64

Einbindung der Eingangsfaktoren vom Versuchsplan in das Simulationsmodell

Eingangsfaktoren für den teilkfaktoriellen Versuchsplan (Anhang 31)		Übersetzung für die Eingabefaktoren der teilkfaktoriellen Versuchsplanung	Ausprägungen des Versuchsplans und Eingabewerte im Simulationsmodell (kursiv und fett)			
			Niedrig (-)		Hoch (+)	
Faktor 1	<i>Anzahl der Lager</i>	A	1	1	3	3
Faktor 2	<i>Anteil der vorzuhaltenden Lagerfläche</i>	B	50%	50	100%	100
Faktor 3	<i>Anzahl der Kfz</i>	C	60	60	100	100
Faktor 4	<i>E-Kfz-Quote</i>	D	0%	0	25%	25
Faktor 5	<i>Umstieg und Umstiegs- geschwindigkeit</i>	E	×	0	✓	1
Faktor 6	<i>Ø Fahrzeit</i>	F	4000	4000	8000	8000
Faktor 7	<i>Ø Fahrweg</i>	G	15	15	100	100
Faktor 8	<i>Schadstoffgrenzwert</i>	H	350	350	450	450
Faktor 9	<i>Einwirkung von Staus</i>	I	×	0	✓	1
Faktor 10	<i>Entladezeit pro Palette</i>	J	C	45	A	90
	<i>Entladezeitpauschale</i>	Verkettet mit J*	C	150	A	300
Faktor 11	<i>Unterhaltskosten</i>	K	G	0	H	1
	<i>Arbeitsstunden pro Tag</i>	Verkettet mit K*	G	7	H	7
	<i>Fahrzeugkapazität</i>	Verkettet mit K*	G	11,55	H	11,55
	<i>Anzahl durchgeführter Routenfahrten</i>	Verkettet mit K*	G	35,4	H	35,4
	<i>Ziele pro Route</i>	Verkettet mit K*	G	4,46	H	4,46
Faktor 12	<i>Fuhrparkanpassung</i>	L	×	0	✓	1

*Die Faktoren wurden miteinander verkettet, um realistische Wirkzusammenhänge bereits bei der Untersuchung des Systemverhaltens abzubilden.

Versuchsplangeneratoren: G = DEF; H = ABC; J = BCDE; K = BCDF; L = ABEF; M = ACE

Aliasstruktur: I = DEFG = ABCH = BCDEJ = BCDFK = ABEFL = ACEFM = ABCDEFGH = BCFGJ = BCEGK = ABDGL = ACDGM = ADEHJ = ADFHK = CEFHL = BEFHM = EFJK = ACDFJL = ABDFJM = ACDEKL = ABDEKM = BCLM = AFGHJ = AEGHK = CDGHL = BDGHM = DGJK = ACEGJL = ABEGJM = ACFGKL = ABFGKM = BCDEFGLM = AB-CEFJK = BDFHJL = CDFHJM = BDEHKL = CDEHKM = AHLM = ABJKL = ACJKM = DEJLM = DFKLM = ABCDGHJK = BEGHJL = CEGHJM = BFGHKL = CFGHKM = ADEFGHLM = ABDEFGJKL = ACDEFGJKM = FGJLM = EGKLM = CHJKL = BHJKM = ABCDEHJLM = ABCDFHJLM = BCEFJKLM = CDEFGHJKL = BDEFGHJKM = ABCFGHJLM = ABCEGHKLM = BCDGJKLM = AEFHJKLM = ADGHJKLM

Aliasstruktur für die bei der teilkfaktoriellen Versuchsplanung durchgeführten Vertauschung von Eingangsfaktoren

(bis zur dritten Ordnung)

I
A + BCH + HLM

B + ACH + CLM
C + ABH + BLM
D + EFG + GJK
E + DFG + FJK
F + DEG + EJK
G + DEF + DJK
H + ABC + ALM
J + DGK + EFK
K + DGJ + EFJ
L + AHM + BCM
M + AHL + BCL
AB + CH + DGL + EFL + JKL
AC + BH + DGM + EFM + JKM
AD + BGL + CGM + EHJ + FHK
AE + BFL + CFM + DHJ + GHK
AF + BEL + CEM + DHK + GHJ
AG + BDL + CDM + EHK + FHJ
AH + BC + LM + DEJ + DFK + EGK + FGJ
AJ + BKL + CKM + DEH + FGH
AK + B JL + CJM + DFH + EGH
AL + HM + BDG + BEF + BJK
AM + HL + CDG + CEF + CJK
BD + AGL + CEJ + CFK + GHM
BE + AFL + CDJ + CGK + FHM
BF + AEL + CDK + CGJ + EHM
BG + ADL + CEK + CFJ + DHM
BJ + AKL + CDE + CFG + HKM
BK + AJL + CDF + CEG + HJM
BL + CM + ADG + AEF + AJK
BM + CL + DGH + EFH + HJK
CD + AGM + BEJ + BFK + GHL
CE + AFM + BDJ + BGK + FHL
CF + AEM + BDK + BGJ + EHL
CG + ADM + BEK + BFJ + DHL
CJ + AKM + BDE + BFG + HKL
CK + AJM + BDF + BEG + HJL
DE + FG + AHJ + BCJ + JLM
DF + EG + AHK + BCK + KLM
DG + EF + JK + ABL + ACM + BHM + CHL
DH + AEJ + AFK + BGM + CGL
DJ + GK + AEH + BCE + ELM
DK + GJ + AFH + BCF + FLM
DL + ABG + CGH + EJM + FKM
DM + ACG + BGH + EJL + FKL
EH + ADJ + AGK + BFM + CFL
EJ + FK + ADH + BCD + DLM
EK + FJ + AGH + BCG + GLM
EL + ABF + CFH + DJM + GKM
EM + ACF + BFH + DJL + GKL
FH + ADK + AGJ + BEM + CEL
FL + ABE + CEH + DKM + GJM
FM + ACE + BEH + DKL + GJL
GH + AEK + AFJ + BDM + CDL
GL + ABD + CDH + EKM + FJM

GM + ACD + BDH + EKL + FJL
HJ + ADE + AFG + BKM + CKL
HK + ADF + AEG + BJM + CJL
JL + ABK + CHK + DEM + FGM
JM + ACK + BHK + DEL + FGL
KL + ABJ + CHJ + DFM + EGM
KM + ACJ + BHJ + DFL + EGL
ABM + ACL + BHL + CHM + DEK + DFJ + EGJ + FGK

Versuchsplantabelle mit Anordnung der Ausprägungen

Durchlauf Nr.	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M
1	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-
2	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-
3	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+
4	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-
5	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-
6	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
7	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-
8	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+	-	-
10	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-
11	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-
12	+	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+
13	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-
14	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-
15	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	-	+
16	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	-	+
17	-	-	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+
18	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-
19	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-
20	-	-	+	-	+	-	+	+	+	-	-	+
21	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+
22	-	+	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-
23	+	+	-	-	+	-	+	-	+	-	-	+
24	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
25	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+
26	-	-	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-
27	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-
28	-	-	+	+	+	-	-	+	-	+	-	+
29	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-
30	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-
31	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
32	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+
33	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+
34	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-
35	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+
36	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	-
37	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+
38	-	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	+
39	+	+	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-
40	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-
41	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-
42	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+
43	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+

Durchlauf Nr.	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M
44	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+
45	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-
46	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+
47	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+
48	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
49	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+
50	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-
51	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
52	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+
53	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+
54	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+
55	+	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	-
56	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	+
57	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
58	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-
59	+	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-	+
60	+	+	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-
61	-	-	-	+	+	-	-	-	+	-	-	-
62	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+
63	-	+	-	-	+	+	-	+	+	+	-	+
64	-	-	-	+	-	+	-	-	-	+	-	-

Anhang 30: Daten der teilfaktoriellen Versuchsplanung.

Teilfaktorieller Versuchsplan															
Durch- lauf Nr.	Eingangsfaktoren im Simulationsmodell												Ergebnisse als Mittelwerte der Replikationen		
	Fak- tor 1 / A	Fak- tor 2 /B	Fak- tor 3 /C	Fak- tor 4 /D	Fak- tor 5 /E	Fak- tor 6 /F	Fak- tor 7 G	Fak- tor 8 /H	Fak- tor 9 /I	Fak- tor 10 /J	Fak- tor 11 /L	Fak- tor 12 /M	Laufende Kosten (In tausend Euro)	Nicht rechtzeitig transportierte Pa- letten (In tausend Paletten)	Auslastung des Fuhr- parks (In Pro- zent)
1	1	50%	100	25%	✓	8000	100	450	×	A	H	×	101.208	573.348	50,22
2	3	100%	100	0%	×	8000	100	450	✓	A	G	×	60.509	0	25,33
3	1	100%	60	25%	×	4000	100	450	✓	C	G	✓	44.963	161	28,57
4	1	50%	100	0%	×	4000	15	450	×	A	H	×	54.268	25	24,17
5	3	100%	60	0%	✓	8000	15	330	✓	C	H	×	85.872	126.958	40,39
6	3	100%	100	25%	×	4000	100	450	×	A	H	✓	101.986	0	27,30
7	1	100%	100	25%	×	4000	100	330	×	A	G	×	49.089	0	22,41
8	1	100%	100	0%	✓	8000	15	330	×	A	G	×	31.634	2.830	30,81
9	1	50%	60	0%	✓	4000	100	330	×	C	G	×	37.029	0	25,16
10	1	50%	100	25%	×	4000	100	450	✓	C	H	×	96.960	0	24,77
11	1	100%	100	0%	×	4000	15	330	✓	C	G	×	30.523	0	22,77
12	3	50%	100	0%	✓	8000	15	330	✓	C	G	✓	42.163	147	26,97
13	3	50%	60	25%	✓	8000	100	450	✓	C	G	×	49.442	194	28,98
14	1	100%	60	25%	×	8000	15	450	✓	A	H	×	13.951.190	2.211.916.800	100,00
15	3	100%	60	25%	✓	4000	15	330	×	C	G	✓	44.207	76	27,06
16	3	100%	60	0%	×	8000	100	330	×	C	G	✓	54.921	237	30,98
17	1	50%	100	25%	×	8000	15	450	✓	A	G	✓	25.215	377	26,19
18	3	100%	100	25%	✓	4000	15	450	✓	A	G	×	50.011	0	15,86
19	1	100%	60	0%	×	8000	100	450	×	C	H	×	6.225.462	974.348.096	99,98
20	1	50%	100	0%	✓	4000	100	450	✓	A	G	✓	39.460	372	26,55
21	1	50%	60	25%	✓	8000	100	330	✓	C	H	✓	97.120	36	26,35
22	1	100%	60	25%	✓	4000	15	450	×	C	H	×	65.926	9.783	34,85

Teilfaktorieller Versuchsplan

Durch- lauf Nr.	Eingangsfaktoren im Simulationsmodell												Ergebnisse als Mittelwerte der Replikationen		
	Fak- tor 1 / A	Fak- tor 2 /B	Fak- tor 3 /C	Fak- tor 4 /D	Fak- tor 5 /E	Fak- tor 6 /F	Fak- tor 7 G	Fak- tor 8 /H	Fak- tor 9 /I	Fak- tor 10 /J	Fak- tor 11 /L	Fak- tor 12 /M	Laufende Kosten (In tausend Euro)	Nicht rechtzeitig transportierte Pa- letten (In tausend Paletten)	Auslastung des Fuhr- parks (In Pro- zent)
23	3	100%	60	0%	✓	4000	100	330	✓	A	G	✓	54.866	164	26,96
24	3	100%	60	0%	×	4000	15	330	×	A	H	×	84.571	0	20,61
25	3	100%	100	0%	×	4000	15	450	✓	C	H	✓	84.346	0	27,18
26	1	50%	60	0%	×	8000	100	330	✓	A	G	×	3.457.597	605.334.016	99,96
27	3	100%	100	25%	×	8000	15	450	×	C	G	×	50.283	0	15,76
28	1	50%	100	25%	✓	4000	15	450	×	C	G	✓	18.300	206	27,09
29	3	50%	60	0%	×	4000	15	450	✓	C	G	×	41.215	0	22,40
30	3	50%	60	25%	×	4000	100	450	×	A	G	×	50.027	0	25,04
31	3	50%	100	25%	✓	8000	100	330	×	A	G	✓	49.029	64	26,87
32	1	100%	100	25%	✓	4000	15	330	✓	A	H	✓	65.739	0	26,86
33	3	50%	60	0%	✓	4000	100	450	×	C	H	✓	95.882	0	27,20
34	3	50%	100	25%	×	8000	15	330	✓	A	H	×	78.546	0	24,86
35	3	100%	60	25%	×	8000	15	330	✓	A	G	✓	48.321	150	28,66
36	1	50%	100	0%	✓	8000	15	450	✓	C	H	×	79.437	3.118.920	75,55
37	3	50%	60	25%	✓	4000	15	450	✓	A	H	✓	78.284	0	27,25
38	1	100%	60	25%	✓	8000	100	450	×	A	G	✓	47.128	263	26,07
39	3	100%	60	25%	✓	8000	100	330	×	A	H	×	102.374	13.970	35,53
40	3	50%	100	25%	✓	4000	15	330	×	C	H	×	78.546	0	10,60
41	1	100%	60	0%	✓	4000	100	450	✓	A	H	×	116.756	1.402.762	62,13
42	1	50%	60	0%	✓	8000	15	330	×	A	H	✓	58.969	1	26,52
43	1	50%	100	0%	×	8000	100	450	×	C	G	✓	40.936	512	27,76
44	3	50%	60	25%	×	8000	15	450	×	C	H	✓	78.349	0	26,84

Teilfaktorieller Versuchsplan															
Durch- lauf Nr.	Eingangsfaktoren im Simulationsmodell												Ergebnisse als Mittelwerte der Replikationen		
	Fak- tor 1 / A	Fak- tor 2 /B	Fak- tor 3 /C	Fak- tor 4 /D	Fak- tor 5 /E	Fak- tor 6 /F	Fak- tor 7 G	Fak- tor 8 /H	Fak- tor 9 /I	Fak- tor 10 /J	Fak- tor 11 /L	Fak- tor 12 /M	Laufende Kosten (In tausend Euro)	Nicht rechtzeitig transportierte Pa- letten (In tausend Paletten)	Auslastung des Fuhr- parks (In Pro- zent)
45	1	100%	100	25%	✓	8000	100	330	✓	C	G	×	48.920	4.912	31,25
46	1	100%	100	25%	×	8000	15	330	×	C	H	✓	65.915	7	26,38
47	1	100%	100	0%	✓	4000	100	330	×	C	H	✓	103.699	0	27,03
48	3	100%	100	25%	✓	8000	100	450	✓	C	H	✓	102.085	10	27,02
49	1	100%	60	0%	×	4000	15	450	×	A	G	✓	27.163	422	29,02
50	3	100%	60	25%	×	4000	100	330	✓	C	H	×	102.219	0	21,14
51	1	50%	60	0%	×	4000	15	330	✓	C	H	✓	58.789	0	26,87
52	3	50%	100	0%	×	4000	15	330	×	A	G	✓	39.822	187	31,17
53	1	50%	60	25%	×	4000	100	330	×	A	H	✓	96.796	0	26,89
54	3	50%	60	0%	×	8000	100	450	✓	A	H	✓	96.063	0	26,85
55	3	50%	60	0%	✓	8000	15	450	×	A	G	×	41.769	1.977	31,17
56	1	100%	100	0%	×	8000	100	330	✓	A	H	✓	104.104	4	26,53
57	3	50%	100	0%	✓	4000	100	330	✓	A	H	×	96.194	0	14,44
58	3	50%	100	0%	×	8000	100	330	×	C	H	×	96.190	0	19,43
59	3	50%	100	25%	×	4000	100	330	✓	C	G	✓	47.585	192	30,33
60	3	100%	100	0%	✓	4000	100	450	×	C	G	×	57.596	0	9,41
61	1	50%	60	25%	✓	4000	15	330	✓	A	G	×	22.308	224.159	41,08
62	3	100%	100	0%	✓	8000	15	450	×	A	H	✓	84.416	0	27,03
63	1	100%	60	0%	✓	8000	15	450	✓	C	G	✓	28.811	653	25,82
64	1	50%	60	25%	×	8000	15	330	×	C	G	×	34.669	1.901.215	69,45

Anhang 31: Teilfaktorieller Versuchsplan mit Ausprägungen und Ergebnissen.

Ausführliche Ergebniswerte beim teilfaktoriellen Versuchsplan

Durchlauf Nr.	Mittelwert der laufenden Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 1 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 2 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 3 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Mittelwert der nicht rechtzeitig transportierten Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 1 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 2 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 3 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Mittelwert der Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 1 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 2 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 3 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)
1	101,21	101,66	100,61	101,36	573,35	625,10	508,01	586,94	50,22	50,96	49,69	50,01
2	60,51	60,58	60,45	60,50	0,00	0,00	0,00	0,00	25,33	23,15	26,95	25,89
3	44,96	45,07	44,86	44,96	0,16	0,07	0,37	0,04	28,57	27,43	29,52	28,77
4	54,27	45,07	58,84	58,90	0,02	0,07	0,00	0,00	24,17	27,43	22,58	22,51
5	85,87	86,17	85,43	86,01	126,96	147,84	104,08	128,96	40,39	40,81	40,23	40,12
6	101,99	102,05	101,89	102,01	0,00	0,00	0,00	0,00	27,30	27,22	27,57	27,10
7	49,09	49,18	49,02	49,07	0,00	0,00	0,00	0,00	22,41	21,76	23,18	22,30
8	31,63	31,69	31,59	31,61	2,83	2,77	3,70	2,02	30,81	30,73	30,88	30,81
9	37,03	37,09	36,99	37,01	0,00	0,00	0,00	0,00	25,16	25,18	25,17	25,11
10	96,96	97,04	96,88	96,95	0,00	0,00	0,00	0,00	24,77	24,85	24,75	24,72
11	30,52	30,59	30,47	30,51	0,00	0,00	0,00	0,00	22,77	21,49	24,14	22,69
12	42,16	42,20	42,13	42,16	0,15	0,04	0,17	0,23	26,97	26,90	27,41	26,59
13	49,44	49,49	49,41	49,43	0,19	0,38	0,09	0,11	28,98	29,13	28,94	28,87
14	13.951,19	13.975,46	13.780,34	14.097,76	2.211.916,80	2.215.737,09	2.184.746,75	2.235.266,56	100,00	100,00	100,00	100,00
15	44,21	44,27	44,15	44,21	0,08	0,00	0,10	0,13	27,06	27,04	27,37	26,75
16	54,92	55,00	54,85	54,91	0,24	0,26	0,36	0,09	30,98	29,60	32,60	30,75
17	25,22	25,28	25,18	25,19	0,38	0,18	0,63	0,32	26,19	26,11	26,19	26,26
18	50,01	50,07	49,96	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,86	15,95	15,80	15,82
19	6.225,46	6.300,44	6.187,97	6.187,97	974.348,10	986.241,47	968.401,41	968.401,41	99,98	99,98	99,98	99,98

Ausführliche Ergebniswerte beim teilfaktoriellen Versuchsplan

Durchlauf Nr.	Mittelwert der laufenden Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 1 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 2 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 3 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Mittelwert der nicht rechtzeitig transportierten Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 1 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 2 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 3 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Mittelwert der Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 1 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 2 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 3 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)
20	39,46	39,53	39,42	39,43	0,37	0,05	0,59	0,48	26,55	26,24	26,66	26,73
21	97,12	97,20	96,99	97,16	0,04	0,00	0,08	0,03	26,35	26,50	26,56	25,99
22	65,93	66,01	65,71	66,07	9,78	12,29	8,06	9,00	34,85	34,93	34,86	34,75
23	54,87	54,94	54,80	54,86	0,16	0,07	0,10	0,33	26,96	27,00	27,11	26,76
24	84,57	84,60	84,40	84,71	0,00	0,00	0,00	0,00	20,61	20,69	20,58	20,57
25	84,35	84,39	84,27	84,38	0,00	0,00	0,00	0,00	27,18	27,20	27,44	26,89
26	3.457,60	3.485,89	3.388,37	3.498,53	605.334,02	610.340,80	593.077,82	612.583,42	99,96	99,96	99,96	99,96
27	50,28	50,34	50,23	50,27	0,00	0,00	0,00	0,00	15,76	14,97	16,39	15,90
28	18,30	18,34	18,27	18,29	0,21	0,01	0,31	0,30	27,09	27,06	27,25	26,96
29	41,21	41,25	41,19	41,21	0,00	0,00	0,00	0,00	22,40	20,69	23,84	22,68
30	50,03	50,07	49,99	50,02	0,00	0,00	0,00	0,00	25,04	23,68	26,14	25,30
31	49,03	49,09	48,99	49,01	0,06	0,08	0,09	0,02	26,87	26,72	26,99	26,91
32	65,74	65,79	65,66	65,77	0,00	0,00	0,00	0,00	26,86	26,90	27,17	26,53
33	95,88	95,93	95,78	95,94	0,00	0,00	0,00	0,00	27,20	27,15	27,37	27,09
34	78,55	78,57	78,51	78,56	0,00	0,00	0,00	0,00	24,86	24,95	24,82	24,82
35	48,32	48,37	48,27	48,32	0,15	0,08	0,19	0,18	28,66	28,51	29,15	28,33
36	79,44	79,87	78,73	79,71	3.118,92	3.175,87	3.006,47	3.174,42	75,55	75,96	75,53	75,16
37	78,28	78,30	78,20	78,35	0,00	0,00	0,00	0,00	27,25	27,18	27,52	27,05
38	47,13	47,16	47,16	47,07	0,26	0,27	0,27	0,24	26,07	26,16	26,16	25,90

Ausführliche Ergebniswerte beim teilfaktoriellen Versuchsplan

Durchlauf Nr.	Mittelwert der laufenden Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 1 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 2 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 3 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Mittelwert der nicht rechtzeitig transportierten Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 1 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 2 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 3 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Mittelwert der Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 1 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 2 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 3 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)
39	102,37	102,48	102,15	102,49	13,97	18,20	12,10	11,61	35,53	35,68	35,51	35,41
40	78,55	78,57	78,51	78,56	0,00	0,00	0,00	0,00	10,60	10,63	10,60	10,57
41	116,76	117,21	116,44	116,61	1.402,76	1.451,59	1.363,49	1.393,20	62,13	62,82	61,77	61,81
42	58,97	59,00	58,88	59,03	0,00	0,00	0,00	0,00	26,52	26,46	26,72	26,37
43	40,94	41,03	40,87	40,90	0,51	0,40	0,96	0,18	27,76	26,67	28,34	28,27
44	78,35	78,37	78,26	78,42	0,00	0,00	0,00	0,00	26,84	26,78	27,04	26,68
45	48,92	49,06	48,81	48,88	4,91	6,42	4,55	3,76	31,25	31,36	31,26	31,13
46	65,92	65,97	65,83	65,94	0,01	0,00	0,00	0,02	26,38	26,38	26,53	26,22
47	103,70	103,85	103,62	103,62	0,00	0,00	0,00	0,00	27,03	26,87	27,11	27,11
48	102,09	102,19	102,03	102,03	0,01	0,00	0,02	0,02	27,02	26,79	27,14	27,14
49	27,16	27,22	27,13	27,14	0,42	0,03	0,95	0,28	29,02	27,83	29,76	29,48
50	102,22	102,28	102,03	102,35	0,00	0,00	0,00	0,00	21,14	21,23	21,13	21,05
51	58,79	58,78	58,78	58,82	0,00	0,00	0,00	0,00	26,87	27,01	27,01	26,59
52	39,82	39,87	39,78	39,82	0,19	0,25	0,04	0,28	31,17	29,72	33,15	30,63
53	96,80	96,87	96,67	96,84	0,00	0,00	0,00	0,00	26,89	26,85	27,08	26,74
54	96,06	96,11	95,96	96,12	0,00	0,00	0,00	0,00	26,85	26,81	27,12	26,60
55	41,77	41,80	41,75	41,76	1,98	2,84	1,62	1,47	31,17	31,34	31,10	31,08
56	104,10	104,21	103,99	104,11	0,00	0,00	0,00	0,01	26,53	26,84	26,73	26,02
57	96,19	96,24	96,14	96,20	0,00	0,00	0,00	0,00	14,44	14,52	14,41	14,40

Ausführliche Ergebniswerte beim teilfaktoriellen Versuchsplan												
Durchlauf Nr.	Mittelwert der laufenden Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 1 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 2 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 3 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Mittelwert der nicht rechtzeitig transportierten Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 1 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 2 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 3 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Mittelwert der Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 1 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 2 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 3 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)
58	96,19	96,24	96,14	96,20	0,00	0,00	0,00	0,00	19,43	19,47	19,44	19,37
59	47,58	47,64	47,54	47,58	0,19	0,02	0,33	0,22	30,33	29,65	31,40	29,92
60	57,60	57,67	57,54	57,58	0,00	0,00	0,00	0,00	9,41	9,35	9,45	9,41
61	22,31	22,61	21,97	22,35	224,16	251,58	194,75	226,15	41,08	41,62	40,51	41,10
62	84,42	84,49	84,38	84,38	0,00	0,00	0,00	0,00	27,03	26,91	27,08	27,08
63	28,81	28,87	28,78	28,78	0,65	0,25	1,25	0,45	25,82	25,46	25,96	26,02
64	34,67	34,67	35,27	34,07	1.901,22	1.898,57	1.962,80	1.842,28	69,45	67,62	71,98	68,76

Anhang 32: Ausführliche Ergebniswerte beim teilfaktoriellen Versuchsplan.

Laufende Kosten

Kodierte Koeffizienten

Term der Koeffizienten	Effektivität	Koeffizient
Konstante		430527614
Anzahl der Lager	-721824718	-360912359
Anteil der Lagerfläche	524919998	262459999
Anzahl der Kfz	-731385701	-365692851
E-Kfz-Quote	135365898	67682949
E-Kfz-Erneuerung	-731356691	-365678345
Fahrzeit je Route	733860123	366930062
Fahrweg je Route	-115793246	-57896623
Schadstoffgrenzwert	519285070	259642535
Einwirkungen von Staus	350545444	175272722
Entladezeit	-349282867	-174641433
Unterhaltskosten	563211032	281605516
Fuhrparkanpassung	-734465825	-367232912
Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche	-518077582	-259038791
Anzahl der Lager*Anzahl der Kfz	732068625	366034312
Anzahl der Lager*E-Kfz-Quote	-135684794	-67842397
Anzahl der Lager*E-Kfz-Erneuerung	731218087	365609044
Anzahl der Lager*Fahrzeit je Route	-733048950	-366524475
Anzahl der Lager*Fahrweg je Route	128683684	64341842
Anzahl der Lager*Schadstoffgrenzwert	-518232692	-259116346
Anzahl der Lager*Einwirkungen von Staus	-350060916	-175030458
Anzahl der Lager*Entladezeit	348914871	174457435
Anzahl der Lager*Unterhaltskosten	-521701077	-260850539
Anzahl der Lager*Fuhrparkanpassung	733025902	366512951
Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Quote	346203391	173101695
Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Erneuerung	-518363578	-259181789
Anteil der Lagerfläche*Fahrzeit je Route	516657717	258328859
Anteil der Lagerfläche*Fahrweg je Route	-348097418	-174048709
Anteil der Lagerfläche*Einwirkungen von Staus	135883581	67941791
Anteil der Lagerfläche*Entladezeit	-137223914	-68611957
Anteil der Lagerfläche*Unterhaltskosten	731646317	365823159
Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung	-518675722	-259337861
Anzahl der Kfz*E-Kfz-Quote	-136358264	-68179132
Anzahl der Kfz*E-Kfz-Erneuerung	732741498	366370749
Anzahl der Kfz*Fahrzeit je Route	-730955925	-365477962
Anzahl der Kfz*Fahrweg je Route	135567458	67783729
Anzahl der Kfz*Einwirkungen von Staus	-348740490	-174370245
Anzahl der Kfz*Entladezeit	350048694	175024347
E-Kfz-Quote*E-Kfz-Erneuerung	-137486342	-68743171
E-Kfz-Quote*Fahrzeit je Route	135942800	67971400
E-Kfz-Quote*Fahrweg je Route	-732261702	-366130851
E-Kfz-Quote*Schadstoffgrenzwert	348213376	174106688
E-Kfz-Quote*Einwirkungen von Staus	516646845	258323422
E-Kfz-Quote*Entladezeit	-518952169	-259476085
E-Kfz-Quote*Unterhaltskosten	348273218	174136609
E-Kfz-Quote*Fuhrparkanpassung	-135577567	-67788783
E-Kfz-Erneuerung*Schadstoffgrenzwert	-516919818	-258459909
E-Kfz-Erneuerung*Einwirkungen von Staus	-348060760	-174030380
E-Kfz-Erneuerung*Entladezeit	348963596	174481798

Term der Koeffizienten	Effektivität	Koeffizient
E-Kfz-Erneuerung*Unterhaltskosten	-516346311	-258173156
E-Kfz-Erneuerung*Fuhrparkanpassung	731036889	365518445
Fahrzeit je Route*Schadstoffgrenzwert	518587446	259293723
Fahrzeit je Route*Unterhaltskosten	517786169	258893084
Fahrzeit je Route*Fuhrparkanpassung	-732506349	-366253174
Fahrweg je Route*Schadstoffgrenzwert	-348739306	-174369653
Fahrweg je Route*Unterhaltskosten	-341585901	-170792950
Fahrweg je Route*Fuhrparkanpassung	136281409	68140705
Schadstoffgrenzwert*Einwirkungen von Staus	137207637	68603819
Schadstoffgrenzwert*Entladezeit	-136058470	-68029235
Einwirkungen von Staus*Unterhaltskosten	136901315	68450657
Einwirkungen von Staus*Fuhrparkanpassung	-349895658	-174947829
Entladezeit*Unterhaltskosten	-135383804	-67691902
Entladezeit*Fuhrparkanpassung	348702339	174351169
Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung	517829851	258914925

Varianzanalyse

Quelle	Freiheitsgrade	korrigierte Summe der Quadrate (Maß der Streuung)	korrigiertes Mittel der Quadrate (Vom Modell erklärte Streuung)
Modell	63	2,33778E+20	3,71076E+18
Linear	12	6,09255E+19	5,07713E+18
Anzahl der Lager	1	8,33649E+18	8,33649E+18
Anteil der Lagerfläche	1	4,40866E+18	4,40866E+18
Anzahl der Kfz	1	8,55880E+18	8,55880E+18
E-Kfz-Quote	1	2,93183E+17	2,93183E+17
E-Kfz-Erneuerung	1	8,55812E+18	8,55812E+18
Fahrzeit je Route	1	8,61681E+18	8,61681E+18
Fahrweg je Route	1	2,14529E+17	2,14529E+17
Schadstoffgrenzwert	1	4,31451E+18	4,31451E+18
Einwirkungen von Staus	1	1,96611E+18	1,96611E+18
Entladezeit	1	1,95198E+18	1,95198E+18
Unterhaltskosten	1	5,07531E+18	5,07531E+18
Fuhrparkanpassung	1	8,63104E+18	8,63104E+18
2-Faktor-Wechselwirkungen	50	1,68562E+20	3,37124E+18
Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche	1	4,29447E+18	4,29447E+18
Anzahl der Lager*Anzahl der Kfz	1	8,57479E+18	8,57479E+18
Anzahl der Lager*E-Kfz-Quote	1	2,94566E+17	2,94566E+17
Anzahl der Lager*E-Kfz-Erneuerung	1	8,55488E+18	8,55488E+18
Anzahl der Lager*Fahrzeit je Route	1	8,59777E+18	8,59777E+18
Anzahl der Lager*Fahrweg je Route	1	2,64952E+17	2,64952E+17
Anzahl der Lager*Schadstoffgrenzwert	1	4,29704E+18	4,29704E+18
Anzahl der Lager*Einwirkungen von Staus	1	1,96068E+18	1,96068E+18
Anzahl der Lager*Entladezeit	1	1,94787E+18	1,94787E+18
Anzahl der Lager*Unterhaltskosten	1	4,35475E+18	4,35475E+18
Anzahl der Lager*Fuhrparkanpassung	1	8,59723E+18	8,59723E+18
Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Quote	1	1,91771E+18	1,91771E+18
Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Erneuerung	1	4,29921E+18	4,29921E+18

Quelle	Freiheits- grade	korrigierte Summe der Quadrate (Maß der Streuung)	korrigiertes Mittel der Quadrate (Vom Modell erklärte Streuung)
Anteil der Lagerfläche*Fahrzeit je Route	1	4,27096E+18	4,27096E+18
Anteil der Lagerfläche*Fahrweg je Route	1	1,93875E+18	1,93875E+18
Anteil der Lagerfläche*Einwirkungen von Staus	1	2,95430E+17	2,95430E+17
Anteil der Lagerfläche*Entladezeit	1	3,01286E+17	3,01286E+17
Anteil der Lagerfläche*Unterhaltskosten	1	8,56490E+18	8,56490E+18
Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung	1	4,30439E+18	4,30439E+18
Anzahl der Kfz*E-Kfz-Quote	1	2,97497E+17	2,97497E+17
Anzahl der Kfz*E-Kfz-Erneuerung	1	8,59056E+18	8,59056E+18
Anzahl der Kfz*Fahrzeit je Route	1	8,54875E+18	8,54875E+18
Anzahl der Kfz*Fahrweg je Route	1	2,94057E+17	2,94057E+17
Anzahl der Kfz*Einwirkungen von Staus	1	1,94592E+18	1,94592E+18
Anzahl der Kfz*Entladezeit	1	1,96055E+18	1,96055E+18
E-Kfz-Quote*E-Kfz-Erneuerung	1	3,02440E+17	3,02440E+17
E-Kfz-Quote*Fahrzeit je Route	1	2,95687E+17	2,95687E+17
E-Kfz-Quote*Fahrweg je Route	1	8,57932E+18	8,57932E+18
E-Kfz-Quote*Schadstoffgrenzwert	1	1,94004E+18	1,94004E+18
E-Kfz-Quote*Einwirkungen von Staus	1	4,27078E+18	4,27078E+18
E-Kfz-Quote*Entladezeit	1	4,30898E+18	4,30898E+18
E-Kfz-Quote*Unterhaltskosten	1	1,94071E+18	1,94071E+18
E-Kfz-Quote*Fuhrparkanpassung	1	2,94100E+17	2,94100E+17
E-Kfz-Erneuerung*Schadstoffgrenzwert	1	4,27530E+18	4,27530E+18
E-Kfz-Erneuerung*Einwirkungen von Staus	1	1,93834E+18	1,93834E+18
E-Kfz-Erneuerung*Entladezeit	1	1,94841E+18	1,94841E+18
E-Kfz-Erneuerung*Unterhaltskosten	1	4,26582E+18	4,26582E+18
E-Kfz-Erneuerung*Fuhrparkanpassung	1	8,55064E+18	8,55064E+18
Fahrzeit je Route*Schadstoffgrenzwert	1	4,30293E+18	4,30293E+18
Fahrzeit je Route*Unterhaltskosten	1	4,28964E+18	4,28964E+18
Fahrzeit je Route*Fuhrparkanpassung	1	8,58505E+18	8,58505E+18
Fahrweg je Route*Schadstoffgrenzwert	1	1,94591E+18	1,94591E+18
Fahrweg je Route*Unterhaltskosten	1	1,86689E+18	1,86689E+18
Fahrweg je Route*Fuhrparkanpassung	1	2,97162E+17	2,97162E+17
Schadstoffgrenzwert*Einwirkungen von Staus	1	3,01215E+17	3,01215E+17
Schadstoffgrenzwert*Entladezeit	1	2,96191E+17	2,96191E+17
Einwirkungen von Staus*Unterhaltskosten	1	2,99872E+17	2,99872E+17
Einwirkungen von Staus*Fuhrparkanpas- sung	1	1,95883E+18	1,95883E+18
Entladezeit*Unterhaltskosten	1	2,93260E+17	2,93260E+17
Entladezeit*Fuhrparkanpassung	1	1,94549E+18	1,94549E+18
3-Faktor-Wechselwirkungen	1	4,29036E+18	4,29036E+18
Anzahl der Lager*Anteil der Lagerflä- che*Fuhrparkanpassung	1	4,29036E+18	4,29036E+18
Fehler	0	*	*
Gesamt	63	2,33778E+20	

Regressionsgleichung in nicht kodierten Einheiten

Mittelwert	430527614 - 360912359 Anzahl der Lager
der	+ 262459999 Anteil der Lagerfläche - 365692851 Anzahl der Kfz
laufenden	= + 67682949 E-Kfz-Quote - 365678345 E-Kfz-Erneuerung
Kosten	+ 366930062 Fahrzeit je Route - 57896623 Fahrweg je Route
	+ 259642535 Schadstoffgrenzwert
	+ 175272722 Einwirkungen von Staus - 174641433 Entladezeit
	+ 281605516 Unterhaltskosten - 367232912 Fuhrparkanpassung
	- 259038791 Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche
	+ 366034312 Anzahl der Lager*Anzahl der Kfz
	- 67842397 Anzahl der Lager*E-Kfz-Quote
	+ 365609044 Anzahl der Lager*E-Kfz-Erneuerung
	- 366524475 Anzahl der Lager*Fahrzeit je Route
	+ 64341842 Anzahl der Lager*Fahrweg je Route
	- 259116346 Anzahl der Lager*Schadstoffgrenzwert
	- 175030458 Anzahl der Lager*Einwirkungen von Staus
	+ 174457435 Anzahl der Lager*Entladezeit
	- 260850539 Anzahl der Lager*Unterhaltskosten
	+ 366512951 Anzahl der Lager*Fuhrparkanpassung
	+ 173101695 Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Quote
	- 259181789 Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Erneuerung
	+ 258328859 Anteil der Lagerfläche*Fahrzeit je Route
	- 174048709 Anteil der Lagerfläche*Fahrweg je Route
	+ 67941791 Anteil der Lagerfläche*Einwirkungen von Staus
	- 68611957 Anteil der Lagerfläche*Entladezeit
	+ 365823159 Anteil der Lagerfläche*Unterhaltskosten
	- 259337861 Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung
	- 68179132 Anzahl der Kfz*E-Kfz-Quote
	+ 366370749 Anzahl der Kfz*E-Kfz-Erneuerung
	- 365477962 Anzahl der Kfz*Fahrzeit je Route
	+ 67783729 Anzahl der Kfz*Fahrweg je Route
	- 174370245 Anzahl der Kfz*Einwirkungen von Staus
	+ 175024347 Anzahl der Kfz*Entladezeit
	- 68743171 E-Kfz-Quote*E-Kfz-Erneuerung
	+ 67971400 E-Kfz-Quote*Fahrzeit je Route
	- 366130851 E-Kfz-Quote*Fahrweg je Route
	+ 174106688 E-Kfz-Quote*Schadstoffgrenzwert
	+ 258323422 E-Kfz-Quote*Einwirkungen von Staus
	- 259476085 E-Kfz-Quote*Entladezeit
	+ 174136609 E-Kfz-Quote*Unterhaltskosten
	- 67788783 E-Kfz-Quote*Fuhrparkanpassung
	- 258459909 E-Kfz-Erneuerung*Schadstoffgrenzwert
	- 174030380 E-Kfz-Erneuerung*Einwirkungen von Staus
	+ 174481798 E-Kfz-Erneuerung*Entladezeit
	- 258173156 E-Kfz-Erneuerung*Unterhaltskosten
	+ 365518445 E-Kfz-Erneuerung*Fuhrparkanpassung
	+ 259293723 Fahrzeit je Route*Schadstoffgrenzwert
	+ 258893084 Fahrzeit je Route*Unterhaltskosten
	- 366253174 Fahrzeit je Route*Fuhrparkanpassung
	- 174369653 Fahrweg je Route*Schadstoffgrenzwert
	- 170792950 Fahrweg je Route*Unterhaltskosten
	+ 68140705 Fahrweg je Route*Fuhrparkanpassung
	+ 68603819 Schadstoffgrenzwert*Einwirkungen von Staus
	- 68029235 Schadstoffgrenzwert*Entladezeit
	+ 68450657 Einwirkungen von Staus*Unterhaltskosten

- 174947829 Einwirkungen von Staus*Fuhrparkanpassung
- 67691902 Entladezeit*Unterhaltskosten
+ 174351169 Entladezeit*Fuhrparkanpassung
+ 258914925 Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung

Anhang 33: Ergebnisse der Effektivitätsanalyse aller Faktoren bei den laufenden Kosten.

Nicht rechtzeitig transportierte Paletten

Kodierte Koeffizienten

Term der Koeffizienten	Effektivität	Koeffizient
Konstante		59359128
Anzahl der Lager	-118709236	-59354618
Anteil der Lagerfläche	80521010	40260505
Anzahl der Kfz	-118486874	-59243437
E-Kfz-Quote	19697114	9848557
E-Kfz-Erneuerung	-118375644	-59187822
Fahrzeit je Route	118615850	59307925
Fahrweg je Route	-19863299	-9931650
Schadstoffgrenzwert	80742674	40371337
Einwirkungen von Staus	57664930	28832465
Entladezeit	-57498737	-28749368
Unterhaltskosten	80751164	40375582
Fuhrparkanpassung	-118717991	-59358996
Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche	-80512334	-40256167
Anzahl der Lager*Anzahl der Kfz	118477929	59238964
Anzahl der Lager*E-Kfz-Quote	-19704302	-9852151
Anzahl der Lager*E-Kfz-Erneuerung	118384568	59192284
Anzahl der Lager*Fahrzeit je Route	-118606907	-59303453
Anzahl der Lager*Fahrweg je Route	19856133	9928066
Anzahl der Lager*Schadstoffgrenzwert	-80751421	-40375711
Anzahl der Lager*Einwirkungen von Staus	-57657974	-28828987
Anzahl der Lager*Entladezeit	57505693	28752847
Anzahl der Lager*Unterhaltskosten	-80742567	-40371283
Anzahl der Lager*Fuhrparkanpassung	118709124	59354562
Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Quote	57556887	28778443
Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Erneuerung	-80668325	-40334162
Anteil der Lagerfläche*Fahrzeit je Route	80446745	40223373
Anteil der Lagerfläche*Fahrweg je Route	-57404644	-28702322
Anteil der Lagerfläche*Einwirkungen von Staus	19777375	9888688
Anteil der Lagerfläche*Entladezeit	-19929168	-9964584
Anteil der Lagerfläche*Unterhaltskosten	118486869	59243435
Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung	-80521006	-40260503
Anzahl der Kfz*E-Kfz-Quote	-19856106	-9928053
Anzahl der Kfz*E-Kfz-Erneuerung	118606863	59303431
Anzahl der Kfz*Fahrzeit je Route	-118384590	-59192295
Anzahl der Kfz*Fahrweg je Route	19704344	9852172
Anzahl der Kfz*Einwirkungen von Staus	-57505696	-28752848
Anzahl der Kfz*Entladezeit	57657968	28828984
E-Kfz-Quote*E-Kfz-Erneuerung	-19936349	-9968174
E-Kfz-Quote*Fahrzeit je Route	19770198	9885099
E-Kfz-Quote*Fahrweg je Route	-118477927	-59238964
E-Kfz-Quote*Schadstoffgrenzwert	57404599	28702299
E-Kfz-Quote*Einwirkungen von Staus	80438073	40219037
E-Kfz-Quote*Entladezeit	-80677034	-40338517
E-Kfz-Quote*Unterhaltskosten	57397711	28698855
E-Kfz-Quote*Fuhrparkanpassung	-19697186	-9848593
E-Kfz-Erneuerung*Schadstoffgrenzwert	-80446725	-40223363
E-Kfz-Erneuerung*Einwirkungen von Staus	-57397632	-28698816
E-Kfz-Erneuerung*Entladezeit	57563861	28781930
E-Kfz-Erneuerung*Unterhaltskosten	-80438053	-40219026

Term der Koeffizienten	Effektivität	Koeffizient
E-Kfz-Erneuerung*Fuhrparkanpassung	118375627	59187814
Fahrzeit je Route*Schadstoffgrenzwert	80668364	40334182
Fahrzeit je Route*Unterhaltskosten	80676999	40338500
Fahrzeit je Route*Fuhrparkanpassung	-118615807	-59307904
Fahrweg je Route*Schadstoffgrenzwert	-57556916	-28778458
Fahrweg je Route*Unterhaltskosten	-57563842	-28781921
Fahrweg je Route*Fuhrparkanpassung	19863286	9931643
Schadstoffgrenzwert*Einwirkungen von Staus	19929171	9964585
Schadstoffgrenzwert*Entladezeit	-19777376	-9888688
Einwirkungen von Staus*Unterhaltskosten	19936336	9968168
Einwirkungen von Staus*Fuhrparkanpassung	-57664912	-28832456
Entladezeit*Unterhaltskosten	-19770207	-9885104
Entladezeit*Fuhrparkanpassung	57498751	28749376
Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung	80512337	40256169

Varianzanalyse

Quelle	Freiheitsgrade	korrigierte Summe der Quadrate (Maß der Streuung)	korrigiertes Mittel der Quadrate (Vom Modell erklärte Streuung)
Modell	63	5,98287E+18	9,49662E+16
Linear	12	1,55592E+18	1,29660E+17
Anzahl der Lager	1	2,25470E+17	2,25470E+17
Anteil der Lagerfläche	1	1,03738E+17	1,03738E+17
Anzahl der Kfz	1	2,24626E+17	2,24626E+17
E-Kfz-Quote	1	6,20762E+15	6,20762E+15
E-Kfz-Erneuerung	1	2,24205E+17	2,24205E+17
Fahrzeit je Route	1	2,25116E+17	2,25116E+17
Fahrweg je Route	1	6,31281E+15	6,31281E+15
Schadstoffgrenzwert	1	1,04310E+17	1,04310E+17
Einwirkungen von Staus	1	5,32039E+16	5,32039E+16
Entladezeit	1	5,28977E+16	5,28977E+16
Unterhaltskosten	1	1,04332E+17	1,04332E+17
Fuhrparkanpassung	1	2,25503E+17	2,25503E+17
2-Faktor-Wechselwirkungen	50	4,32323E+18	8,64647E+16
Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche	1	1,03716E+17	1,03716E+17
Anzahl der Lager*Anzahl der Kfz	1	2,24592E+17	2,24592E+17
Anzahl der Lager*E-Kfz-Quote	1	6,21215E+15	6,21215E+15
Anzahl der Lager*E-Kfz-Erneuerung	1	2,24238E+17	2,24238E+17
Anzahl der Lager*Fahrzeit je Route	1	2,25082E+17	2,25082E+17
Anzahl der Lager*Fahrweg je Route	1	6,30826E+15	6,30826E+15
Anzahl der Lager*Schadstoffgrenzwert	1	1,04333E+17	1,04333E+17
Anzahl der Lager*Einwirkungen von Staus	1	5,31911E+16	5,31911E+16
Anzahl der Lager*Entladezeit	1	5,29105E+16	5,29105E+16
Anzahl der Lager*Unterhaltskosten	1	1,04310E+17	1,04310E+17
Anzahl der Lager*Fuhrparkanpassung	1	2,25470E+17	2,25470E+17
Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Quote	1	5,30047E+16	5,30047E+16
Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Erneuerung	1	1,04118E+17	1,04118E+17
Anteil der Lagerfläche*Fahrzeit je Route	1	1,03547E+17	1,03547E+17
Anteil der Lagerfläche*Fahrweg je Route	1	5,27247E+16	5,27247E+16

Quelle	Freiheitsgrade	korrigierte Summe der Quadrate (Maß der Streuung)	korrigiertes Mittel der Quadrate (Vom Modell erklärte Streuung)
Anteil der Lagerfläche*Einwirkungen von Staus	1	6,25831E+15	6,25831E+15
Anteil der Lagerfläche*Entladezeit	1	6,35475E+15	6,35475E+15
Anteil der Lagerfläche*Unterhaltskosten	1	2,24626E+17	2,24626E+17
Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung	1	1,03738E+17	1,03738E+17
Anzahl der Kfz*E-Kfz-Quote	1	6,30824E+15	6,30824E+15
Anzahl der Kfz*E-Kfz-Erneuerung	1	2,25081E+17	2,25081E+17
Anzahl der Kfz*Fahrzeit je Route	1	2,24239E+17	2,24239E+17
Anzahl der Kfz*Fahrweg je Route	1	6,21218E+15	6,21218E+15
Anzahl der Kfz*Einwirkungen von Staus	1	5,29105E+16	5,29105E+16
Anzahl der Kfz*Entladezeit	1	5,31911E+16	5,31911E+16
E-Kfz-Quote*E-Kfz-Erneuerung	1	6,35933E+15	6,35933E+15
E-Kfz-Quote*Fahrzeit je Route	1	6,25377E+15	6,25377E+15
E-Kfz-Quote*Fahrweg je Route	1	2,24592E+17	2,24592E+17
E-Kfz-Quote*Schadstoffgrenzwert	1	5,27246E+16	5,27246E+16
E-Kfz-Quote*Einwirkungen von Staus	1	1,03525E+17	1,03525E+17
E-Kfz-Quote*Entladezeit	1	1,04141E+17	1,04141E+17
E-Kfz-Quote*Unterhaltskosten	1	5,27120E+16	5,27120E+16
E-Kfz-Quote*Fuhrparkanpassung	1	6,20767E+15	6,20767E+15
E-Kfz-Erneuerung*Schadstoffgrenzwert	1	1,03547E+17	1,03547E+17
E-Kfz-Erneuerung*Einwirkungen von Staus	1	5,27118E+16	5,27118E+16
E-Kfz-Erneuerung*Entladezeit	1	5,30176E+16	5,30176E+16
E-Kfz-Erneuerung*Unterhaltskosten	1	1,03524E+17	1,03524E+17
E-Kfz-Erneuerung*Fuhrparkanpassung	1	2,24205E+17	2,24205E+17
Fahrzeit je Route*Schadstoffgrenzwert	1	1,04118E+17	1,04118E+17
Fahrzeit je Route*Unterhaltskosten	1	1,04140E+17	1,04140E+17
Fahrzeit je Route*Fuhrparkanpassung	1	2,25115E+17	2,25115E+17
Fahrweg je Route*Schadstoffgrenzwert	1	5,30048E+16	5,30048E+16
Fahrweg je Route*Unterhaltskosten	1	5,30175E+16	5,30175E+16
Fahrweg je Route*Fuhrparkanpassung	1	6,31280E+15	6,31280E+15
Schadstoffgrenzwert*Einwirkungen von Staus	1	6,35475E+15	6,35475E+15
Schadstoffgrenzwert*Entladezeit	1	6,25831E+15	6,25831E+15
Einwirkungen von Staus*Unterhaltskosten	1	6,35932E+15	6,35932E+15
Einwirkungen von Staus*Fuhrparkanpassung	1	5,32039E+16	5,32039E+16
Entladezeit*Unterhaltskosten	1	6,25378E+15	6,25378E+15
Entladezeit*Fuhrparkanpassung	1	5,28977E+16	5,28977E+16
3-Faktor-Wechselwirkungen	1	1,03716E+17	1,03716E+17
Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung	1	1,03716E+17	1,03716E+17
Fehler	0	*	*
Gesamt	63	5,98287E+18	

Regressionsgleichung in nicht kodierten Einheiten

Nicht rechtzeitig transportierte Paletten	=	59359128 - 59354618 Anzahl der Lager + 40260505 Anteil der Lagerfläche - 59243437 Anzahl der Kfz + 9848557 E-Kfz-Quote - 59187822 E-Kfz-Erneuerung + 59307925 Fahrzeit je Route - 9931650 Fahrweg je Route + 40371337 Schadstoffgrenzwert + 28832465 Einwirkungen von Staus - 28749368 Entladezeit + 40375582 Unterhaltskosten - 59358996 Fuhrparkanpassung - 40256167 Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche + 59238964 Anzahl der Lager*Anzahl der Kfz - 9852151 Anzahl der Lager*E-Kfz-Quote + 59192284 Anzahl der Lager*E-Kfz-Erneuerung - 59303453 Anzahl der Lager*Fahrzeit je Route + 9928066 Anzahl der Lager*Fahrweg je Route - 40375711 Anzahl der Lager*Schadstoffgrenzwert - 28828987 Anzahl der Lager*Einwirkungen von Staus + 28752847 Anzahl der Lager*Entladezeit - 40371283 Anzahl der Lager*Unterhaltskosten + 59354562 Anzahl der Lager*Fuhrparkanpassung + 28778443 Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Quote - 40334162 Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Erneuerung + 40223373 Anteil der Lagerfläche*Fahrzeit je Route - 28702322 Anteil der Lagerfläche*Fahrweg je Route + 9888688 Anteil der Lagerfläche*Einwirkungen von Staus - 9964584 Anteil der Lagerfläche*Entladezeit + 59243435 Anteil der Lagerfläche*Unterhaltskosten - 40260503 Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung - 9928053 Anzahl der Kfz*E-Kfz-Quote + 59303431 Anzahl der Kfz*E-Kfz-Erneuerung - 59192295 Anzahl der Kfz*Fahrzeit je Route + 9852172 Anzahl der Kfz*Fahrweg je Route - 28752848 Anzahl der Kfz*Einwirkungen von Staus + 28828984 Anzahl der Kfz*Entladezeit - 9968174 E-Kfz-Quote*E-Kfz-Erneuerung + 9885099 E-Kfz-Quote*Fahrzeit je Route - 59238964 E-Kfz-Quote*Fahrweg je Route + 28702299 E-Kfz-Quote*Schadstoffgrenzwert + 40219037 E-Kfz-Quote*Einwirkungen von Staus - 40338517 E-Kfz-Quote*Entladezeit + 28698855 E-Kfz-Quote*Unterhaltskosten - 9848593 E-Kfz-Quote*Fuhrparkanpassung - 40223363 E-Kfz-Erneuerung*Schadstoffgrenzwert - 28698816 E-Kfz-Erneuerung*Einwirkungen von Staus + 28781930 E-Kfz-Erneuerung*Entladezeit - 40219026 E-Kfz-Erneuerung*Unterhaltskosten + 59187814 E-Kfz-Erneuerung*Fuhrparkanpassung + 40334182 Fahrzeit je Route*Schadstoffgrenzwert + 40338500 Fahrzeit je Route*Unterhaltskosten - 59307904 Fahrzeit je Route*Fuhrparkanpassung - 28778458 Fahrweg je Route*Schadstoffgrenzwert - 28781921 Fahrweg je Route*Unterhaltskosten + 9931643 Fahrweg je Route*Fuhrparkanpassung + 9964585 Schadstoffgrenzwert*Einwirkungen von Staus - 9888688 Schadstoffgrenzwert*Entladezeit + 9968168 Einwirkungen von Staus*Unterhaltskosten
--	---	---

- 28832456 Einwirkungen von Staus*Fuhrparkanpassung
- 9885104 Entladezeit*Unterhaltskosten
+ 28749376 Entladezeit*Fuhrparkanpassung
+ 40256169 Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung

Anhang 34: Ergebnisse der Effektivitätsanalyse aller Faktoren bei den nicht rechtzeitig transportierten Paletten.

Auslastung der Fahrzeuge

Kodierte Koeffizienten

Term der Koeffizienten	Effektivität	Koeffizient
Konstante		32,06
Anzahl der Lager	-13,702	-6,851
Anteil der Lagerfläche	0,05368	0,02684
Anzahl der Kfz	-10,622	-5,311
E-Kfz-Quote	-2,394	-1,197
E-Kfz-Erneuerung	-3,736	-1,868
Fahrzeit je Route	11,604	5,802
Fahrweg je Route	0,5382	0,2691
Schadstoffgrenzwert	3,345	1,672
Einwirkungen von Staus	3,752	1,876
Entladezeit	-2,157	-1,079
Unterhaltskosten	3,934	1,967
Fuhrparkanpassung	-9,355	-4,678
Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche	0,3088	0,1544
Anzahl der Lager*Anzahl der Kfz	5,152	2,576
Anzahl der Lager*E-Kfz-Quote	1,8671	0,9335
Anzahl der Lager*E-Kfz-Erneuerung	3,665	1,832
Anzahl der Lager*Fahrzeit je Route	-6,683	-3,341
Anzahl der Lager*Fahrweg je Route	-0,5999	-0,2999
Anzahl der Lager*Schadstoffgrenzwert	-4,932	-2,466
Anzahl der Lager*Einwirkungen von Staus	-2,338	-1,169
Anzahl der Lager*Entladezeit	0,7029	0,3515
Anzahl der Lager*Unterhaltskosten	-3,889	-1,944
Anzahl der Lager*Fuhrparkanpassung	14,649	7,324
Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Quote	0,06533	0,03267
Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Erneuerung	-1,1742	-0,5871
Anteil der Lagerfläche*Fahrzeit je Route	-1,0805	-0,5403
Anteil der Lagerfläche*Fahrweg je Route	1,2500	0,6250
Anteil der Lagerfläche*Einwirkungen von Staus	-0,8608	-0,4304
Anteil der Lagerfläche*Entladezeit	-0,06398	-0,03199
Anteil der Lagerfläche*Unterhaltskosten	10,643	5,321
Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung	-0,003986	-0,001993
Anzahl der Kfz*E-Kfz-Quote	0,6219	0,3110
Anzahl der Kfz*E-Kfz-Erneuerung	6,937	3,468
Anzahl der Kfz*Fahrzeit je Route	-4,103	-2,052
Anzahl der Kfz*Fahrweg je Route	-1,9496	-0,9748
Anzahl der Kfz*Einwirkungen von Staus	-0,6864	-0,3432
Anzahl der Kfz*Entladezeit	2,325	1,163
E-Kfz-Quote*E-Kfz-Erneuerung	-0,11697	-0,05848
E-Kfz-Quote*Fahrzeit je Route	-2,020	-1,010
E-Kfz-Quote*Fahrweg je Route	-4,915	-2,458
E-Kfz-Quote*Schadstoffgrenzwert	-1,0895	-0,5447
E-Kfz-Quote*Einwirkungen von Staus	-1,8259	-0,9129
E-Kfz-Quote*Entladezeit	-2,510	-1,255
E-Kfz-Quote*Unterhaltskosten	-1,0461	-0,5230
E-Kfz-Quote*Fuhrparkanpassung	2,101	1,050
E-Kfz-Erneuerung*Schadstoffgrenzwert	1,5506	0,7753
E-Kfz-Erneuerung*Einwirkungen von Staus	1,3004	0,6502
E-Kfz-Erneuerung*Entladezeit	0,6170	0,3085
E-Kfz-Erneuerung*Unterhaltskosten	3,060	1,530

Term der Koeffizienten	Effektivität	Koeffizient
E-Kfz-Erneuerung*Fuhrparkanpassung	2,557	1,278
Fahrzeit je Route*Schadstoffgrenzwert	1,0060	0,5030
Fahrzeit je Route*Unterhaltskosten	2,781	1,391
Fahrzeit je Route*Fuhrparkanpassung	-12,260	-6,130
Fahrweg je Route*Schadstoffgrenzwert	-0,09985	-0,04992
Fahrweg je Route*Unterhaltskosten	-0,7339	-0,3669
Fahrweg je Route*Fuhrparkanpassung	-0,3893	-0,1946
Schadstoffgrenzwert*Einwirkungen von Staus	0,09401	0,04701
Schadstoffgrenzwert*Entladezeit	0,8447	0,4224
Einwirkungen von Staus*Unterhaltskosten	0,4744	0,2372
Einwirkungen von Staus*Fuhrparkanpassung	-4,143	-2,072
Entladezeit*Unterhaltskosten	1,8049	0,9025
Entladezeit*Fuhrparkanpassung	2,328	1,164
Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung	-0,5193	-0,2596

Varianzanalyse

Quelle	Freiheitsgrade	korrigierte Summe der Quadrate (Maß der Streuung)	korrigiertes Mittel der Quadrate (Vom Modell erklärte Streuung)
Modell	63	22105,7	350,88
Linear	12	9409,8	784,15
Anzahl der Lager	1	3004,0	3003,98
Anteil der Lagerfläche	1	0,0	0,05
Anzahl der Kfz	1	1805,1	1805,07
E-Kfz-Quote	1	91,7	91,73
E-Kfz-Erneuerung	1	223,3	223,29
Fahrzeit je Route	1	2154,4	2154,44
Fahrweg je Route	1	4,6	4,64
Schadstoffgrenzwert	1	179,0	179,00
Einwirkungen von Staus	1	225,2	225,24
Entladezeit	1	74,5	74,45
Unterhaltskosten	1	247,6	247,61
Fuhrparkanpassung	1	1400,3	1400,34
2-Faktor-Wechselwirkungen	50	12691,6	253,83
Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche	1	1,5	1,53
Anzahl der Lager*Anzahl der Kfz	1	424,6	424,61
Anzahl der Lager*E-Kfz-Quote	1	55,8	55,78
Anzahl der Lager*E-Kfz-Erneuerung	1	214,9	214,91
Anzahl der Lager*Fahrzeit je Route	1	714,6	714,57
Anzahl der Lager*Fahrweg je Route	1	5,8	5,76
Anzahl der Lager*Schadstoffgrenzwert	1	389,2	389,15
Anzahl der Lager*Einwirkungen von Staus	1	87,5	87,46
Anzahl der Lager*Entladezeit	1	7,9	7,91
Anzahl der Lager*Unterhaltskosten	1	241,9	241,94
Anzahl der Lager*Fuhrparkanpassung	1	3433,5	3433,49
Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Quote	1	0,1	0,07
Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Erneuerung	1	22,1	22,06
Anteil der Lagerfläche*Fahrzeit je Route	1	18,7	18,68
Anteil der Lagerfläche*Fahrweg je Route	1	25,0	25,00
Anteil der Lagerfläche*Einwirkungen von Staus	1	11,9	11,86

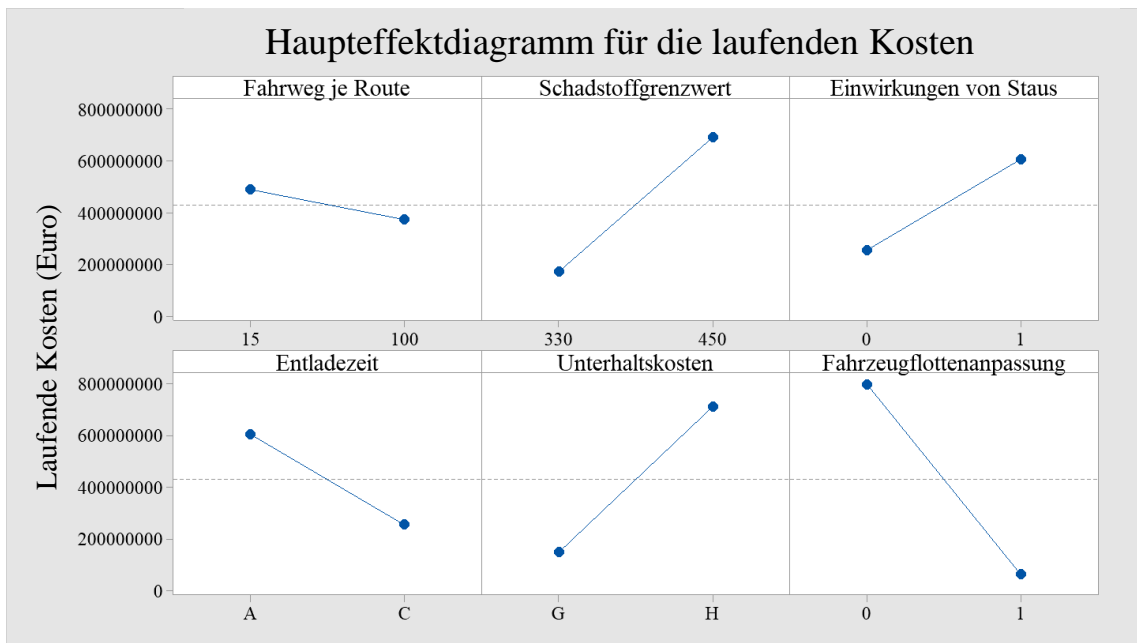
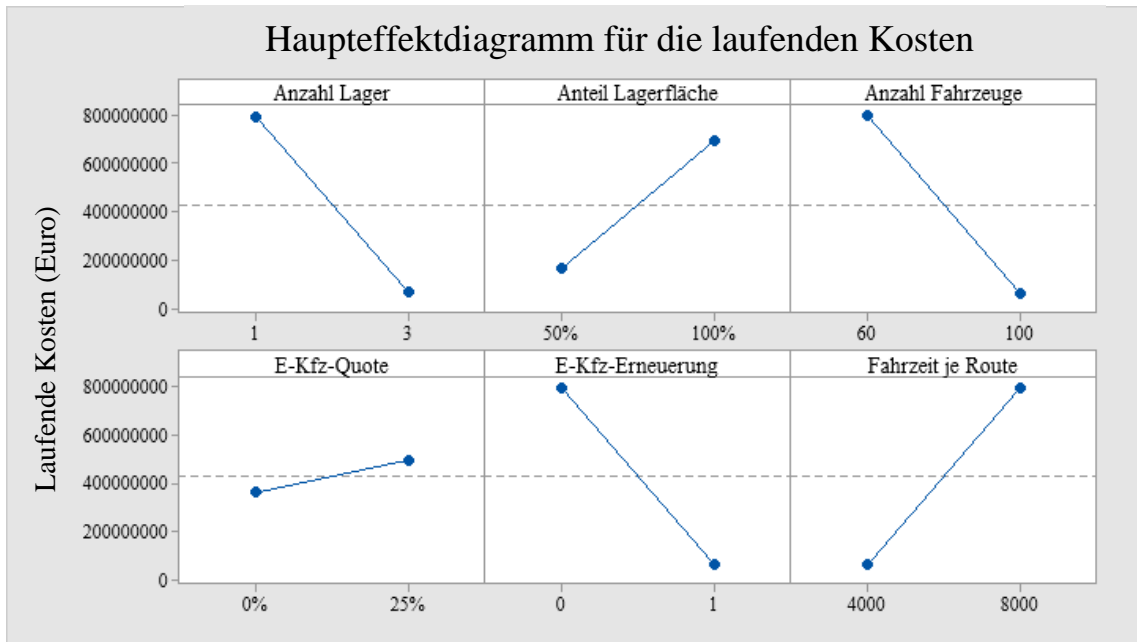
Quelle	Freiheitsgrade	korrigierte Summe der Quadrate (Maß der Streuung)	korrigiertes Mittel der Quadrate (Vom Modell erklärte Streuung)
Anteil der Lagerfläche*Entladezeit	1	0,1	0,07
Anteil der Lagerfläche*Unterhaltskosten	1	1812,4	1812,35
Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung	1	0,0	0,00
Anzahl der Kfz*E-Kfz-Quote	1	6,2	6,19
Anzahl der Kfz*E-Kfz-Erneuerung	1	769,9	769,90
Anzahl der Kfz*Fahrzeit je Route	1	269,4	269,36
Anzahl der Kfz*Fahrweg je Route	1	60,8	60,82
Anzahl der Kfz*Einwirkungen von Staus	1	7,5	7,54
Anzahl der Kfz*Entladezeit	1	86,5	86,51
E-Kfz-Quote*E-Kfz-Erneuerung	1	0,2	0,22
E-Kfz-Quote*Fahrzeit je Route	1	65,3	65,31
E-Kfz-Quote*Fahrweg je Route	1	386,6	386,58
E-Kfz-Quote*Schadstoffgrenzwert	1	19,0	18,99
E-Kfz-Quote*Einwirkungen von Staus	1	53,3	53,34
E-Kfz-Quote*Entladezeit	1	100,8	100,79
E-Kfz-Quote*Unterhaltskosten	1	17,5	17,51
E-Kfz-Quote*Fuhrparkanpassung	1	70,6	70,61
E-Kfz-Erneuerung*Schadstoffgrenzwert	1	38,5	38,47
E-Kfz-Erneuerung*Einwirkungen von Staus	1	27,1	27,06
E-Kfz-Erneuerung*Entladezeit	1	6,1	6,09
E-Kfz-Erneuerung*Unterhaltskosten	1	149,8	149,82
E-Kfz-Erneuerung*Fuhrparkanpassung	1	104,6	104,60
Fahrzeit je Route*Schadstoffgrenzwert	1	16,2	16,19
Fahrzeit je Route*Unterhaltskosten	1	123,8	123,77
Fahrzeit je Route*Fuhrparkanpassung	1	2404,9	2404,86
Fahrweg je Route*Schadstoffgrenzwert	1	0,2	0,16
Fahrweg je Route*Unterhaltskosten	1	8,6	8,62
Fahrweg je Route*Fuhrparkanpassung	1	2,4	2,42
Schadstoffgrenzwert*Einwirkungen von Staus	1	0,1	0,14
Schadstoffgrenzwert*Entladezeit	1	11,4	11,42
Einwirkungen von Staus*Unterhaltskosten	1	3,6	3,60
Einwirkungen von Staus*Fuhrparkanpassung	1	274,7	274,67
Entladezeit*Unterhaltskosten	1	52,1	52,12
Entladezeit*Fuhrparkanpassung	1	86,7	86,71
3-Faktor-Wechselwirkungen	1	4,3	4,31
Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung	1	4,3	4,31
Fehler	0	*	*
Gesamt	63	22105,7	

Regressionsgleichung in nicht kodierten Einheiten

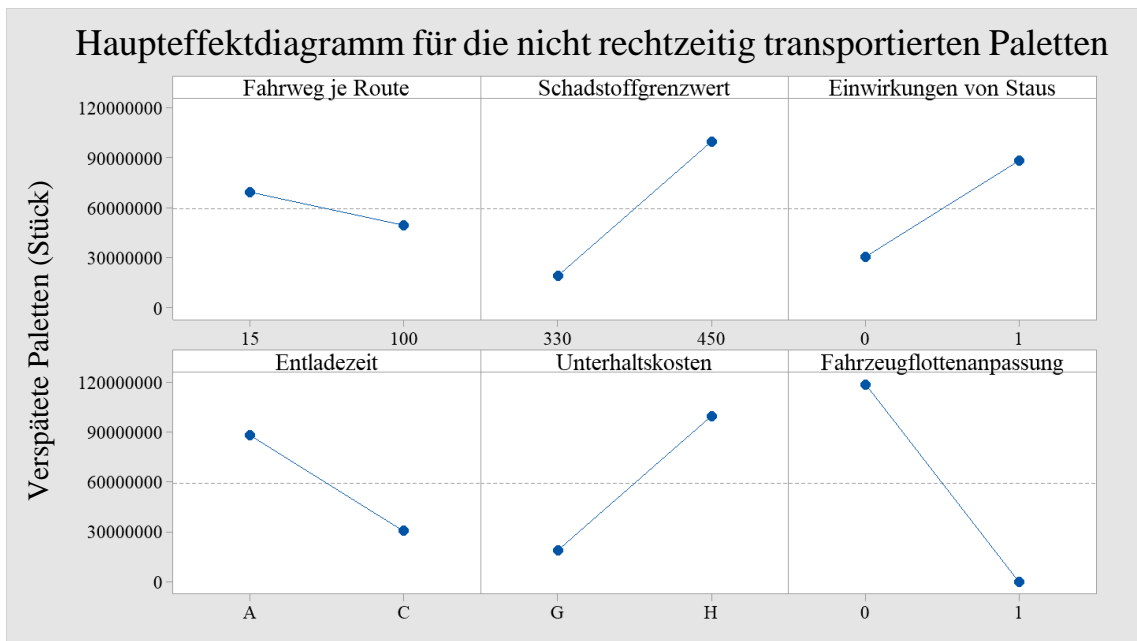
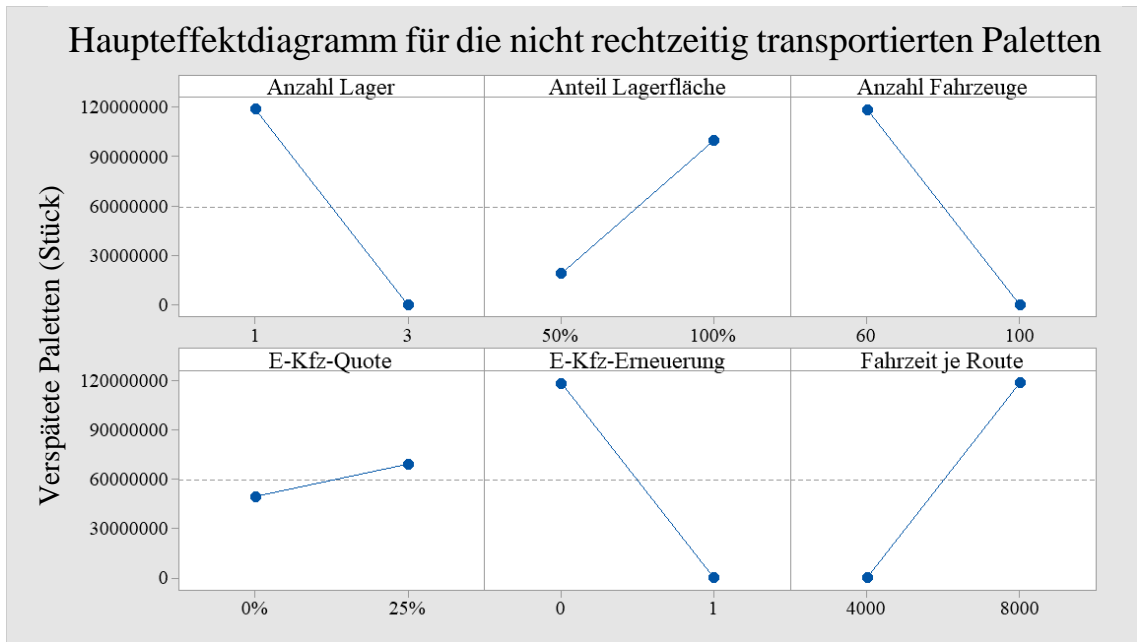
Auslastung der Fahrzeuge	=	32,06 - 6,851 Anzahl der Lager + 0,02684 Anteil der Lagerfläche - 5,311 Anzahl der Kfz - 1,197 E-Kfz-Quote - 1,868 E-Kfz-Erneuerung + 5,802 Fahrzeit je Route + 0,2691 Fahrweg je Route + 1,672 Schadstoffgrenzwert + 1,876 Einwirkungen von Staus - 1,079 Entladezeit + 1,967 Unterhaltskosten - 4,678 Fuhrparkanpassung
--------------------------	---	---

+ 0,1544 Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche
 + 2,576 Anzahl der Lager*Anzahl der Kfz
 + 0,9335 Anzahl der Lager*E-Kfz-Quote
 + 1,832 Anzahl der Lager*E-Kfz-Erneuerung
 - 3,341 Anzahl der Lager*Fahrzeit je Route
 - 0,2999 Anzahl der Lager*Fahrweg je Route
 - 2,466 Anzahl der Lager*Schadstoffgrenzwert
 - 1,169 Anzahl der Lager*Einwirkungen von Staus
 + 0,3515 Anzahl der Lager*Entladezeit
 - 1,944 Anzahl der Lager*Unterhaltskosten
 + 7,324 Anzahl der Lager*Fuhrparkanpassung
 + 0,03267 Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Quote
 - 0,5871 Anteil der Lagerfläche*E-Kfz-Erneuerung
 - 0,5403 Anteil der Lagerfläche*Fahrzeit je Route
 + 0,6250 Anteil der Lagerfläche*Fahrweg je Route
 - 0,4304 Anteil der Lagerfläche*Einwirkungen von Staus
 - 0,03199 Anteil der Lagerfläche*Entladezeit
 + 5,321 Anteil der Lagerfläche*Unterhaltskosten
 - 0,001993 Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung
 + 0,3110 Anzahl der Kfz*E-Kfz-Quote
 + 3,468 Anzahl der Kfz*E-Kfz-Erneuerung
 - 2,052 Anzahl der Kfz*Fahrzeit je Route
 - 0,9748 Anzahl der Kfz*Fahrweg je Route
 - 0,3432 Anzahl der Kfz*Einwirkungen von Staus
 + 1,163 Anzahl der Kfz*Entladezeit
 - 0,05848 E-Kfz-Quote*E-Kfz-Erneuerung
 - 1,010 E-Kfz-Quote*Fahrzeit je Route
 - 2,458 E-Kfz-Quote*Fahrweg je Route
 - 0,5447 E-Kfz-Quote*Schadstoffgrenzwert
 - 0,9129 E-Kfz-Quote*Einwirkungen von Staus
 - 1,255 E-Kfz-Quote*Entladezeit
 - 0,5230 E-Kfz-Quote*Unterhaltskosten
 + 1,050 E-Kfz-Quote*Fuhrparkanpassung
 + 0,7753 E-Kfz-Erneuerung*Schadstoffgrenzwert
 + 0,6502 E-Kfz-Erneuerung*Einwirkungen von Staus
 + 0,3085 E-Kfz-Erneuerung*Entladezeit
 + 1,530 E-Kfz-Erneuerung*Unterhaltskosten
 + 1,278 E-Kfz-Erneuerung*Fuhrparkanpassung
 + 0,5030 Fahrzeit je Route*Schadstoffgrenzwert
 + 1,391 Fahrzeit je Route*Unterhaltskosten
 - 6,130 Fahrzeit je Route*Fuhrparkanpassung
 - 0,04992 Fahrweg je Route*Schadstoffgrenzwert
 - 0,3669 Fahrweg je Route*Unterhaltskosten
 - 0,1946 Fahrweg je Route*Fuhrparkanpassung
 + 0,04701 Schadstoffgrenzwert*Einwirkungen von Staus
 + 0,4224 Schadstoffgrenzwert*Entladezeit
 + 0,2372 Einwirkungen von Staus*Unterhaltskosten
 - 2,072 Einwirkungen von Staus*Fuhrparkanpassung
 + 0,9025 Entladezeit*Unterhaltskosten
 + 1,164 Entladezeit*Fuhrparkanpassung
 - 0,2596 Anzahl der Lager*Anteil der Lagerfläche*Fuhrparkanpassung

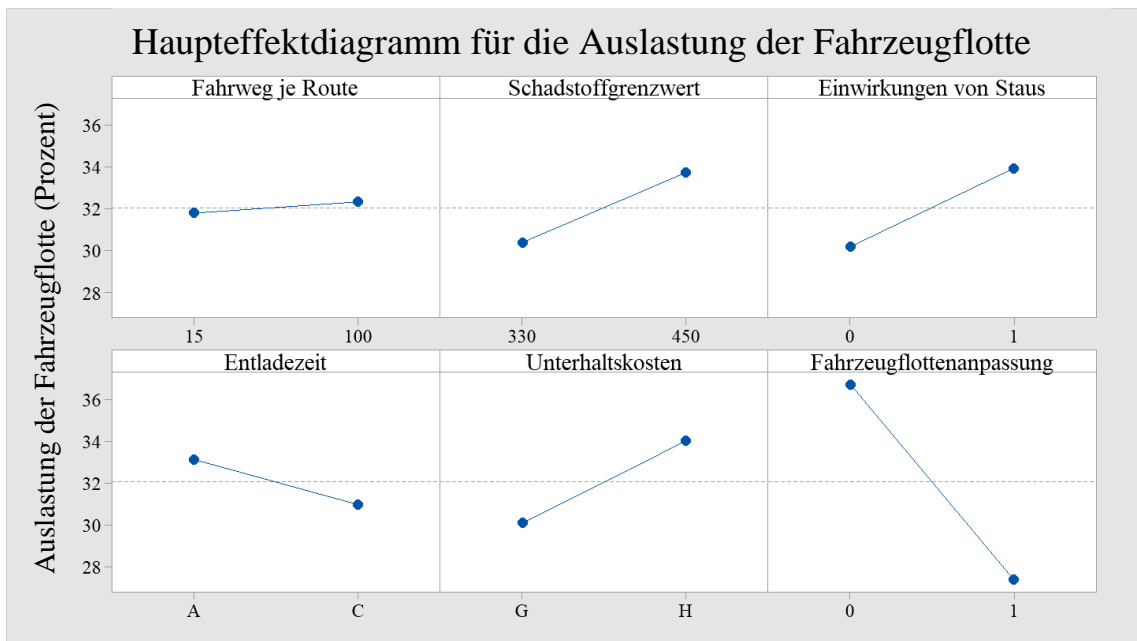
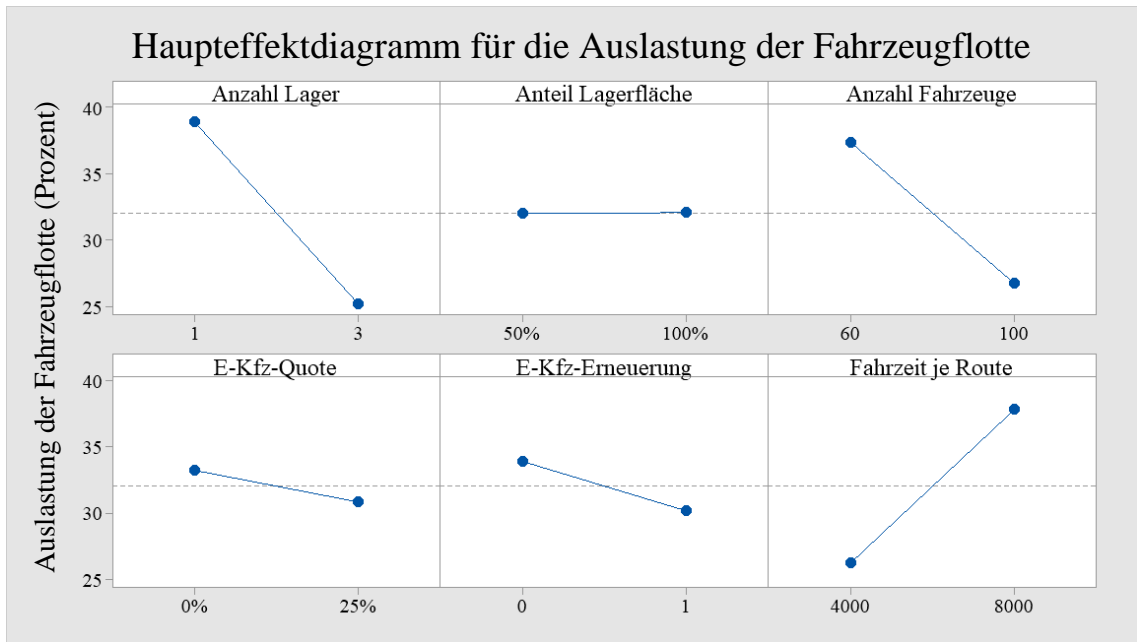
Anhang 35: Ergebnisse der Effektivitätsanalyse aller Faktoren bei der Auslastung der Fahrzeuge.



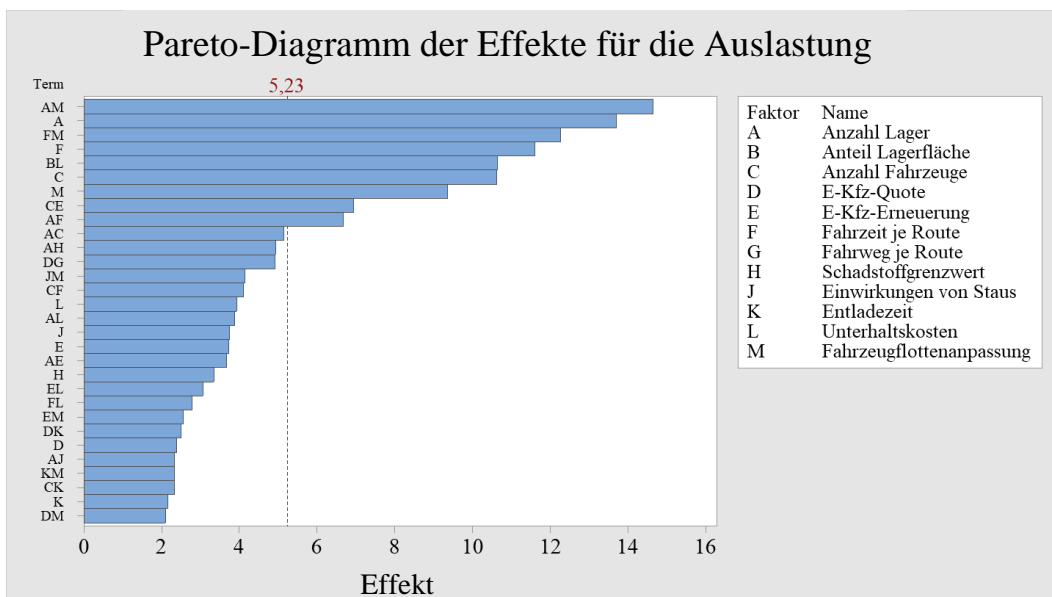
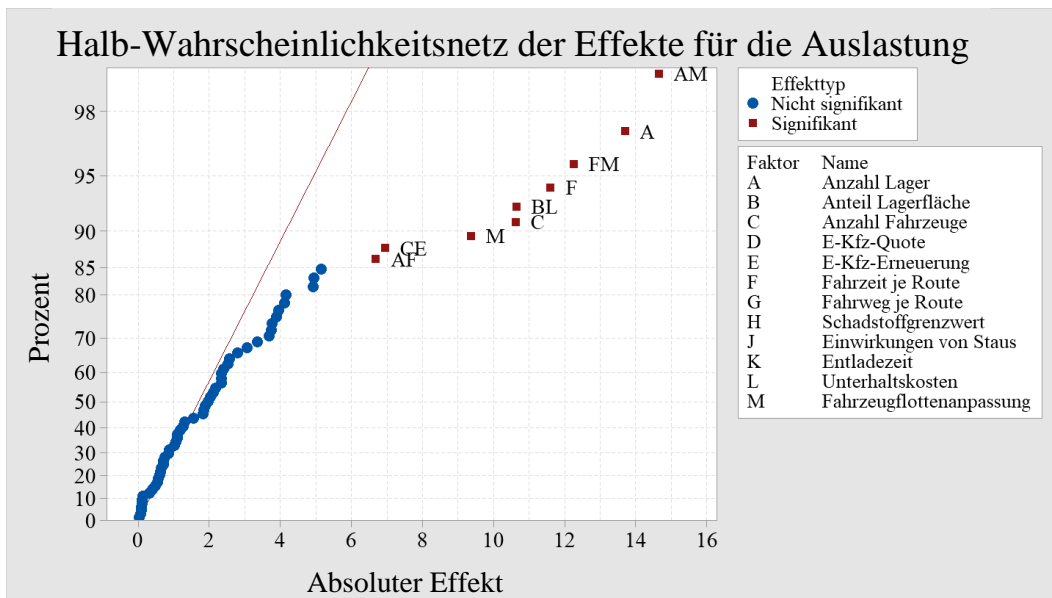
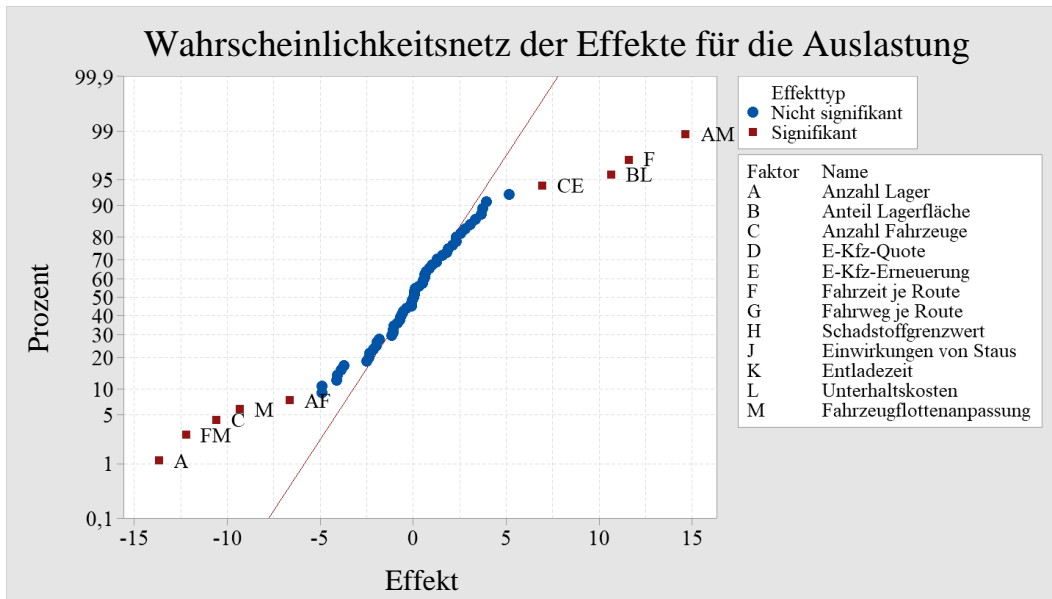
Anhang 36: Haupteffektdiagramm für die laufenden Kosten.



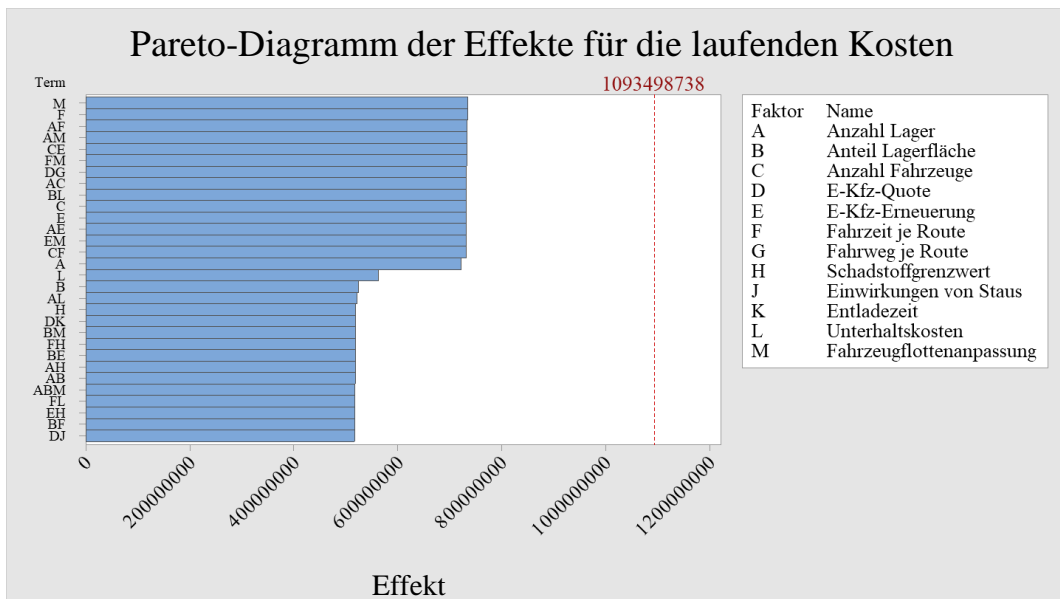
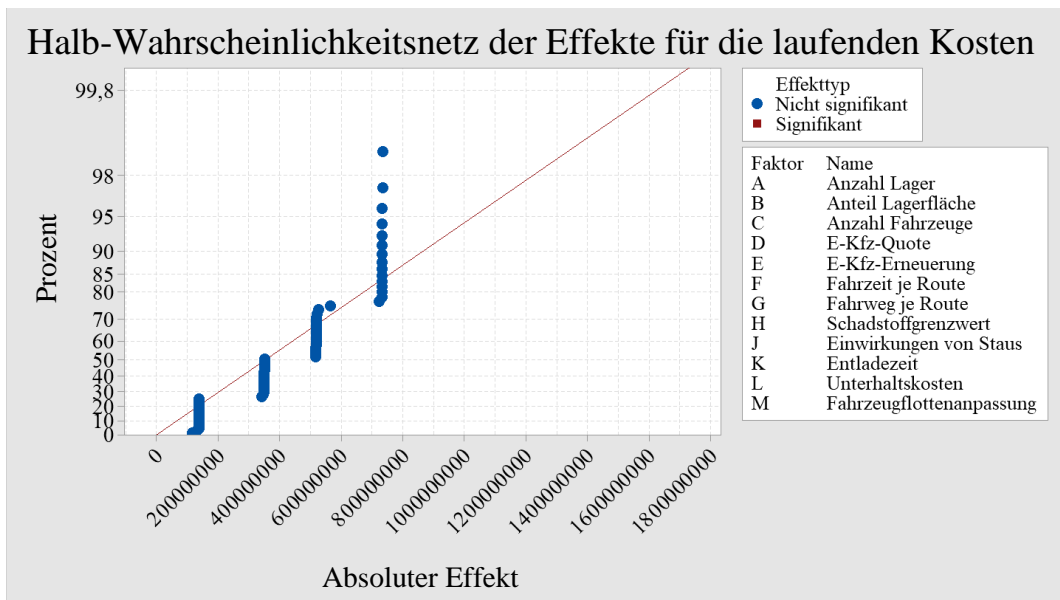
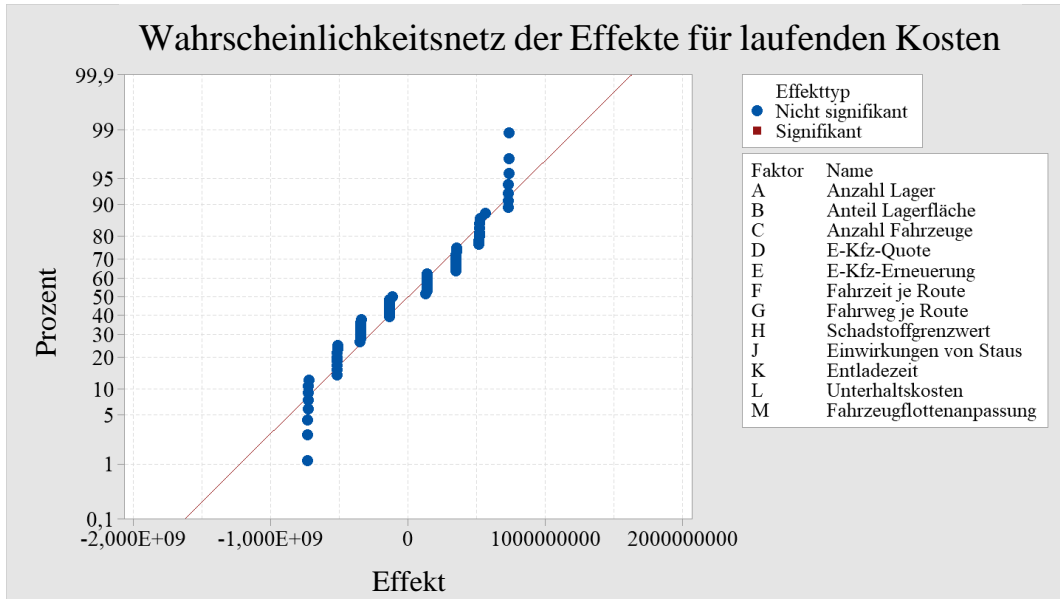
Anhang 37: Haupteffektdiagramm für die verspäteten Paletten.



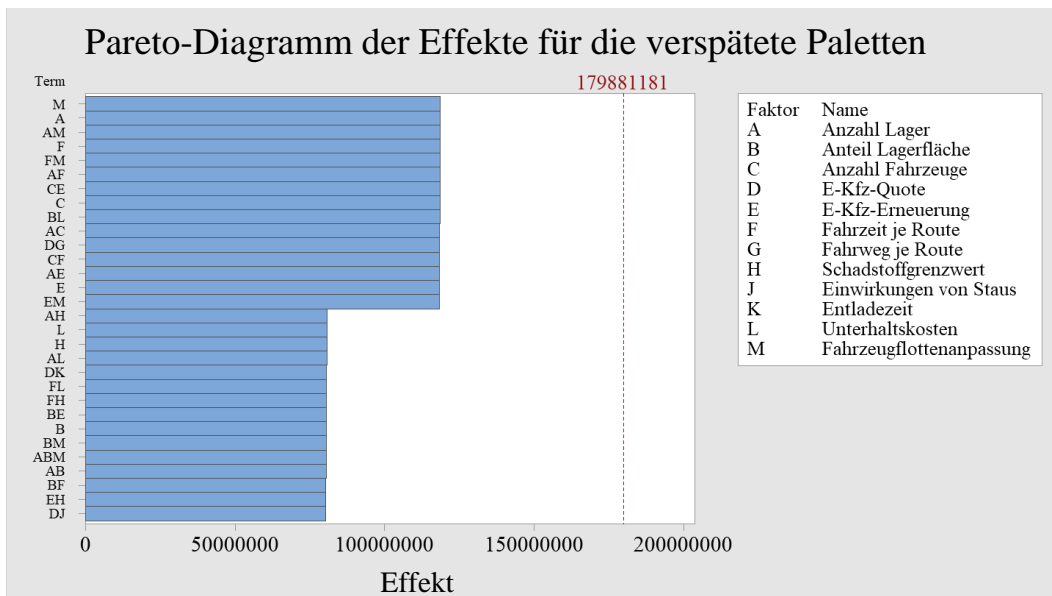
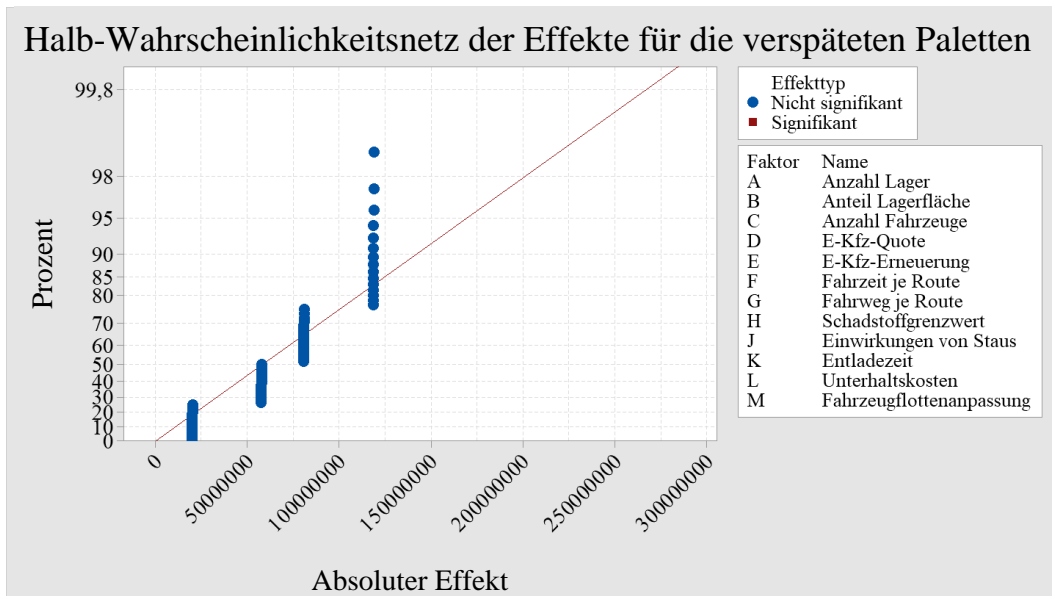
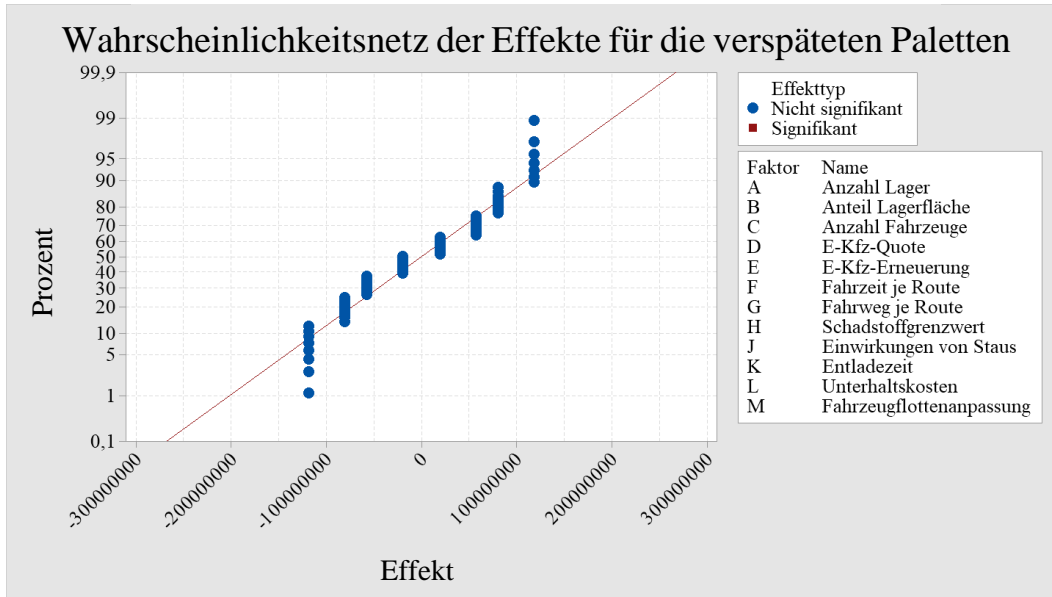
Anhang 38: Haupteffektdiagramm der Auslastung des Fuhrparks.



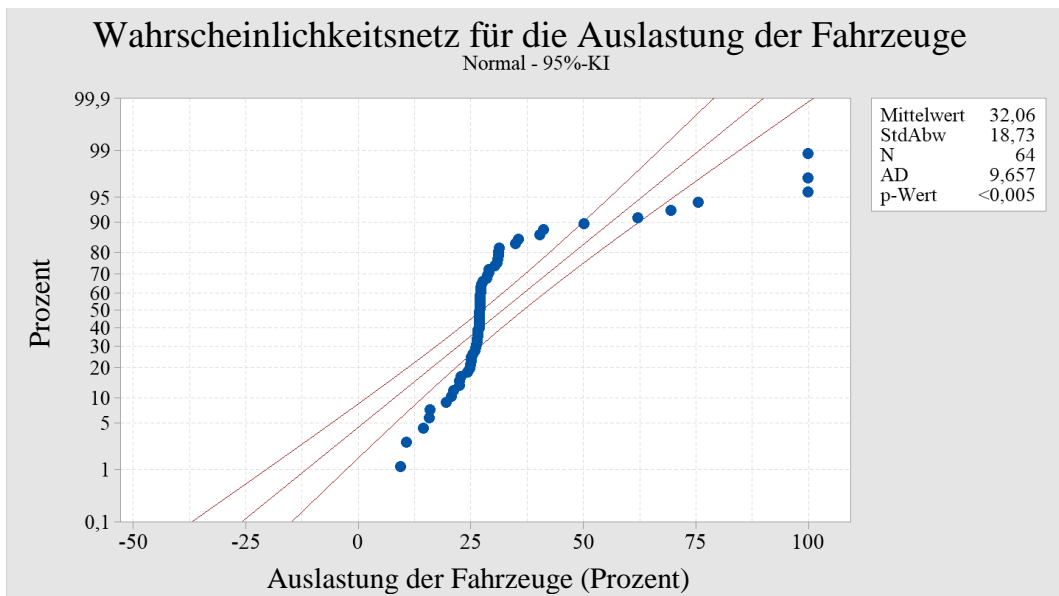
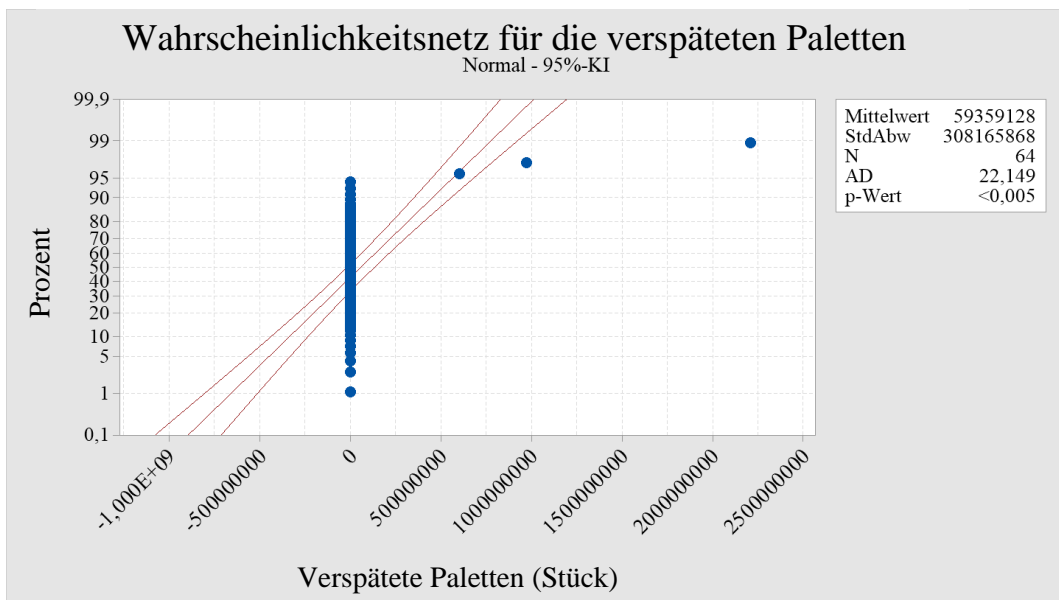
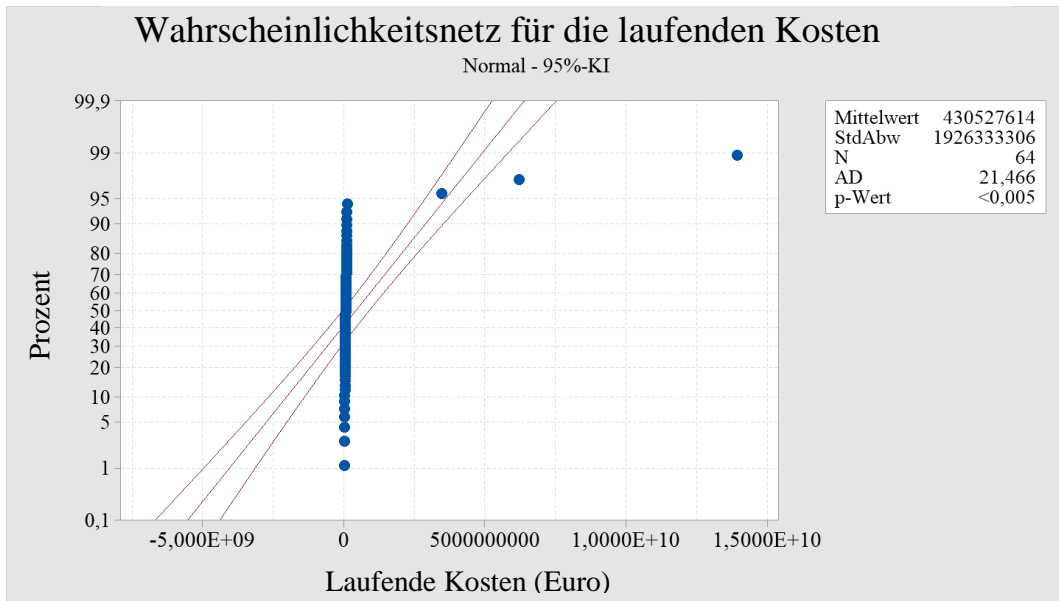
Anhang 39: Effekte der Faktoren auf die Auslastung des Fuhrparks.



Anhang 40: Effekte der Faktoren auf die laufenden Kosten.



Anhang 41: Effekte der Faktoren auf verspäteten Paletten.



Anhang 42: Wahrscheinlichkeitsnetze der drei messbaren Bewertungskriterien.

Verweisliste für die Belieferungsstrategien bei den Experimenten mit Belieferungsstrategien	
Belieferungsstrategie Nr.	Belieferungsstrategie
1	Vergleichsdurchlauf (Routenfahrten ohne Konsolidierungen)
2	Direktbelieferung
3	Vier Kapazitätsanpassungen des Fuhrparks pro Jahr
4	Zwölf Kapazitätsanpassungen des Fuhrparks pro Jahr
5	Eine Kapazitätsanpassung des Fuhrparks pro Jahr
6	24 Kapazitätsanpassungen des Fuhrparks pro Jahr
7	Langsame Umstellung auf E-Kfz
8	Schlagartige Umstellung auf eine 25% E-Kfz-Quote
9	Cargocap Kleinstzug-Konzept (35 Fahrzeuge)
10	Cargocap Kleinstzug-Konzept (37 Fahrzeuge)
11	Cargocap Kleinstzug-Konzept (40 Fahrzeuge)
12	Cargocap Kleinstzug-Konzept (45 Fahrzeuge)
13	Verwendung mehrerer Lager (3 Lager)
14	Verwendung mehrerer Lager (5 Lager)
15	Konsolidierungscenter
16	Nachtfahrten
17	Bessere Lieferbedingungen
18	Zwei-Schichtbetrieb
19	Drei-Schichtbetrieb
20	Veränderte Fuhrparkgröße (100 Fahrzeuge)
21	Veränderte Fuhrparkgröße (120 Fahrzeuge)
22	Reduzierte Schadstoffgrenzwerten
23	Anteil der Ziele innerhalb der Einfahrbeschränkung auf 58 Prozent erhöht
24	Anteil der Ziele innerhalb der Einfahrbeschränkung auf 84 Prozent erhöht
25	Kleinere Fuhrparkgröße mit regelmäßiger Anpassung

Verweisliste für die Belieferungsstrategien bei den Experimenten mit Belieferungsstrategien	
Belieferungsstrategie Nr.	Belieferungsstrategie
26	Kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen und Nachtfahrten
27	Kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen, Nachtfahrten und Zwei-Schichtbetrieb
28	Kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen und besseren Lieferbedingungen
29	Kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen, besseren Lieferbedingungen und Zwei-Schichtbetrieb
30	Kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen, besseren Lieferbedingungen und Drei-Schichtbetrieb
31	Drei Lagern und Konsolidierung
32	Drei Lager, Konsolidierung, kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen und besseren Lieferbedingungen,
33	Drei Lager, Konsolidierung, kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen, bessere Lieferbedingungen und Direktbelieferungen
34	Drei Lager, kleinerer Fuhrpark, regelmäßige Anpassungen und besseren Lieferbedingungen
35	Drei Lager, kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen, Schaffung besserer Lieferbedingungen und Direktbelieferungen
36	58 Prozent der Ziele in Einfahrbeschränkungen und reduzierter Schadstoffgrenzwert
37	84 Prozent der Ziele in Einfahrbeschränkungen und reduzierter Schadstoffgrenzwert
38	Ausgangslage Fahrverbot und E-Kfz-Quote von 25 Prozent
39	Ausgangslage Fahrverbot und E-Kfz-Quote von 50 Prozent
40	Ausgangslage Fahrverbot und langsame E-Kfz-Umstellung
41	Ausgangslage Fahrverbot, langsame E-Kfz-Umstellung, kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen und drei Lagern
42	Ausgangslage Fahrverbot, langsame Umstellung auf E-Kfz, weniger Fahrzeuge, drei Lager, Fuhrparkanpassung, verbesserte Lieferbedingungen und Zwei-Schichtbetrieb
43	Ausgangslage Fahrverbot, langsame Umstellung auf E-Kfz, weniger Fahrzeuge, drei Lager, Fuhrparkanpassung, verbesserte Lieferbedingungen und Direktbelieferungen
44	Ausgangslage Fahrverbot, langsame Umstellung auf E-Kfz, weniger Fahrzeuge, drei Lager, Fuhrparkanpassung, verbesserte Lieferbedingungen Direktbelieferungen und Zwei-Schichtbetrieb
45	Cargocap Kleinstzug-Konzept mit mehreren Lagern
46	Cargocap Kleinstzug-Konzept mit mehreren Lagern und Konsolidierung

Anhang 43: Verweisliste für die Durchlaufnummern bei den Experimenten für die Bewertung von Belieferungsstrategien.

Verweisliste für die Faktoren und Ergebnisse bei den Experimenten mit Belieferungsstrategien						
Faktor Nr.	Faktor	Einheit		Ergebnis Nr.	Ergebniswert als Mittelwerte der Replikationen	Einheit
1	Anzahl der Lager	(Stück)		1	Laufende Kosten	(in Mio. Euro)
2	Anteil der Lagerfläche	(Prozent)		2	Nicht rechtzeitig transportierte Paletten	(In tausend Paletten)
3	Anzahl der Kfz	(Stück)		3	Auslastung des Fuhrparks	(Prozent)
4	E-Kfz-Quote	(Prozent)				
5	E-Kfz- Erneuerung	(Fallunterscheidung)				
6	Ø Fahrzeit	(Sekunde)				
7	Ø Fahrweg	(Kilometer)				
8	Schadstoffgrenzwert	(Dimensionslos)				
9	Einwirkung von Staus	(Fallunterscheidung)				
10	Entladezeit	(Fallunterscheidung)				
11	Unterhaltskosten	(Fallunterscheidung)				
12	Fuhrparkanpassung	(Fallunterscheidung)				
13	Umschaltung Routenfahrt	(Fallunterscheidung)				
14	Erneuerungszyklus	(Stück pro Jahr)				

Anhang 44: Verweisliste für die Faktoren und Ergebnisse bei den Experimenten für die Bewertung von Belieferungsstrategien.

Versuchsplan für die Bewertung von Belieferungsstrategien																	
Belieferungsstrategie Nr.:	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5	Faktor 6	Faktor 7	Faktor 8	Faktor 9	Faktor 10	Faktor 11	Faktor 12	Faktor 13	Faktor 14	Ergebnis Nr.1	Ergebnis Nr.2	Ergebnis Nr.3
1	1	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	G	×	W	4	47,4	5,2	36,6
2	1	100%	112	0%	×	2787,1	36,4	450	✓	A	G	×	Y	4	66,9	0,0	22,3
3	1	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	G	✓	W	4	45,2	0,2	27,1
4	1	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	G	✓	W	12	43,2	4,2	27,8
5	1	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	G	✓	W	1	46,0	0,2	27,6
6	1	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	G	✓	W	24	53,7	574,6	31,8
7	1	100%	112	0%	✓	6611,7	78,9	450	✓	A	G	×	W	4	46,2	5,2	32,5
8	1	100%	112	25%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	G	×	W	4	46,7	5,2	34,5
9	1	100%	35	100%	×	2122,7	27,7	450	×	B	H	×	Z	4	77,2	7,4	17,3
10	1	100%	37	100%	×	2122,7	27,7	450	×	B	H	×	Z	4	77,1	1,1	16,3
11	1	100%	40	100%	×	2122,7	27,7	450	×	B	H	×	Z	4	77,0	0,0	15,1
12	1	100%	45	100%	×	2122,7	27,7	450	×	B	H	×	Z	4	77,0	0,0	13,4
13	3	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	G	×	W	4	41,2	0,0	24,7
14	5	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	G	×	W	4	43,8	0,0	21,7
15	1	50%	112	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	G	×	W	4	41,4	5,2	36,6
16	1	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	450	×	A	G	×	W	4	46,7	0,1	31,9
17	1	100%	112	0%	×	6281,1	78,9	450	×	C	G	×	W	4	45,7	0,0	24,3
18	1	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	F	×	W	4	50,5	0,0	18,2
19	1	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	D	×	W	4	53,6	0,0	10,6
20	1	100%	100	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	G	×	W	4	47,3	51,4	41,7
21	1	100%	120	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	G	×	W	4	47,9	1,0	34,1
22	1	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	350	✓	A	G	×	W	4	47,4	5,2	38,9
23	1	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	G	×	W	4	47,4	6,1	36,6

Versuchsplan für die Bewertung von Belieferungsstrategien																	
Belieferungsstrategie Nr.:	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5	Faktor 6	Faktor 7	Faktor 8	Faktor 9	Faktor 10	Faktor 11	Faktor 12	Faktor 13	Faktor 14	Ergebnis Nr.1	Ergebnis Nr.2	Ergebnis Nr.3
24	1	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	G	×	W	4	50,7	279,2	39,6
25	1	100%	50	0%	×	6611,7	78,9	350	✓	A	G	✓	W	4	43,2	4,2	27,8
26	1	100%	50	0%	×	6611,7	78,9	350	×	A	G	✓	W	4	42,0	3,2	27,6
27	1	100%	50	0%	×	6611,7	78,9	350	×	A	F	✓	W	4	43,7	1,7	29,7
28	1	100%	50	0%	×	6611,7	78,9	350	×	C	G	✓	W	4	40,3	3,2	28,2
29	1	100%	50	0%	×	6611,7	78,9	350	×	C	F	✓	W	4	42,4	2,0	29,9
30	1	100%	50	0%	×	6611,7	78,9	350	×	C	F	✓	W	4	45,0	1,7	32,6
31	3	50%	112	0%	×	6611,7	78,9	450	✓	A	G	×	W	4	38,0	0,0	24,7
32	3	50%	50	0%	×	6611,7	78,9	450	×	C	G	✓	W	4	31,0	1,8	29,4
33	3	50%	50	0%	×	2787,1	36,4	450	×	C	G	✓	Y	4	39,2	0,0	30,4
34	3	100%	50	0%	×	6611,7	78,9	450	×	C	G	✓	W	4	34,1	1,8	29,4
35	3	100%	50	0%	×	2787,1	36,4	450	×	C	G	✓	Y	4	42,3	0,0	30,4
36	1	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	350	✓	A	G	×	W	4	47,4	6,9	38,9
37	1	100%	112	0%	×	6611,7	78,9	350	✓	A	G	×	W	4	52,4	413,6	43,2
38	1	100%	112	25%	×	6611,7	78,9	350	✓	A	G	×	W	4	47,8	91,3	37,4
39	1	100%	112	50%	×	6611,7	78,9	350	✓	A	G	×	W	4	46,0	11,1	34,0
40	1	100%	112	0%	✓	6611,7	78,9	350	✓	A	G	×	W	4	46,2	5,7	33,0
41	3	100%	50	0%	✓	6611,7	78,9	350	×	C	G	✓	W	4	34,0	1,4	27,0
42	3	100%	50	0%	✓	6611,7	78,9	350	×	C	F	✓	W	4	41,4	1,2	27,0
43	3	100%	50	0%	✓	2787,1	36,4	350	×	C	G	✓	Y	4	41,9	0,0	26,9
44	3	100%	50	0%	✓	2787,1	36,4	350	×	C	F	✓	Y	4	49,3	0,0	27,2
45	3	100%	45	100%	×	2122,7	27,7	450	×	B	H	×	Z	4	84,2	0,0	7,4
46	3	50%	45	100%	×	2122,7	27,7	450	×	B	H	×	Z	4	86,1	0,0	7,4

Anhang 45: Vollständige Auflistungen der bewerteten Belieferungsstrategien.

Ausführliche Ergebniswerte bei den Experimenten der Belieferungsstrategien

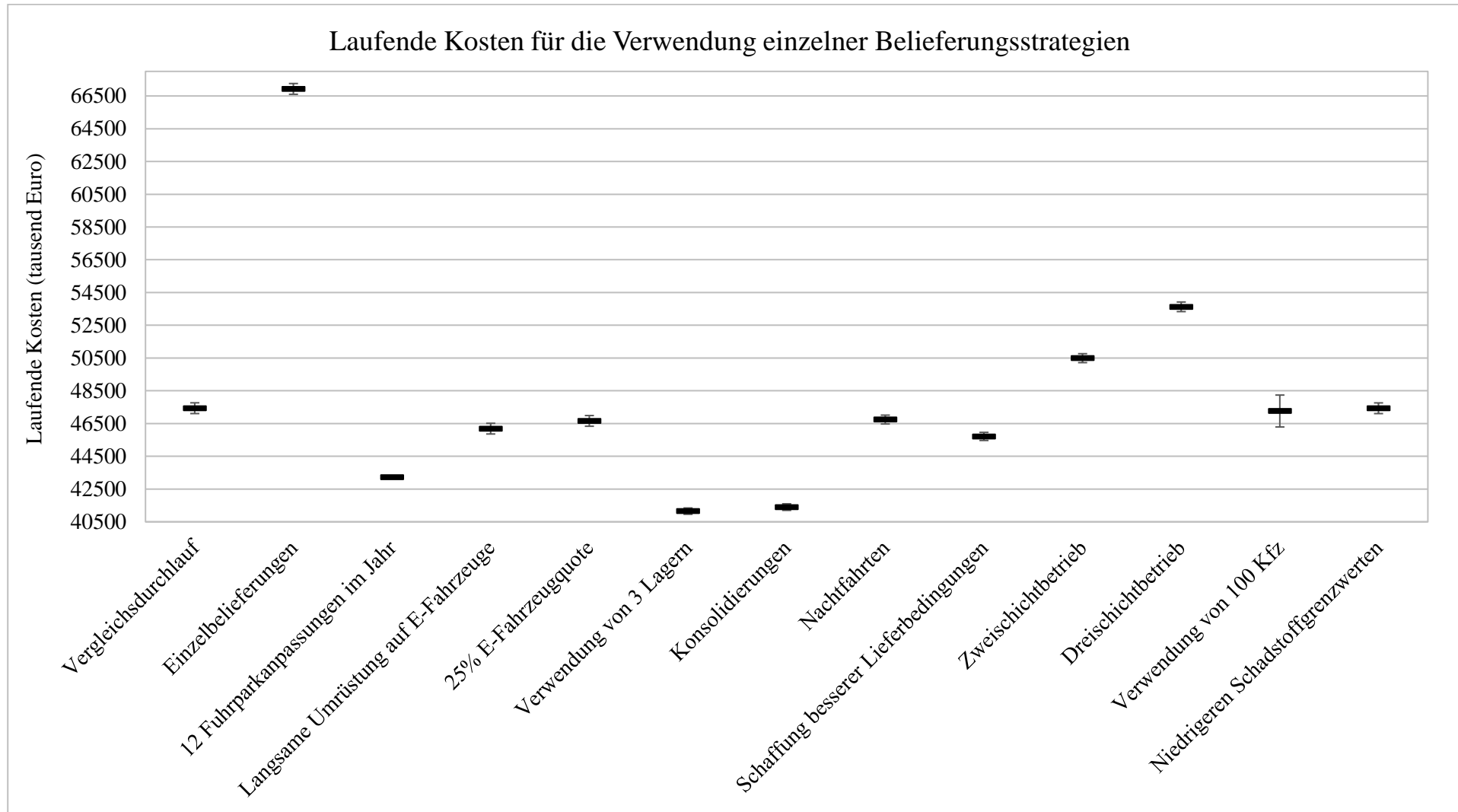
Belieferungsstrategie Nr.	Mittelwert der laufenden Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 1 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 2 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 3 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Mittelwert der nicht rechtzeitig transportierten Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 1 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 2 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 3 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Mittelwert der Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 1 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 2 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 3 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)
1	47,44	47,53	47,32	47,45	5,20	6,46	2,82	6,34	36,58	33,35	38,88	37,50
2	66,93	67,05	66,84	66,90	0,00	0,00	0,00	0,00	22,26	20,60	23,62	22,56
3	45,15	45,32	44,99	45,15	0,25	0,32	0,28	0,15	27,07	26,31	27,99	26,91
4	43,23	43,20	43,25	43,24	4,22	4,35	5,78	2,53	27,82	27,66	28,37	27,43
5	46,03	46,20	45,88	46,01	0,22	0,12	0,23	0,30	27,62	25,44	29,79	27,62
6	53,74	55,83	52,94	52,43	574,55	696,15	514,26	513,24	31,77	31,87	32,13	31,32
7	46,19	46,29	46,07	46,21	5,20	6,46	2,82	6,34	32,54	31,83	32,90	32,89
8	46,66	46,76	46,55	46,68	5,20	6,46	2,82	6,34	34,55	32,59	35,86	35,19
9	77,25	77,23	76,92	77,59	7,41	10,50	5,90	5,82	17,32	17,41	17,31	17,25
10	77,10	77,07	76,77	77,46	1,09	1,50	0,81	0,94	16,34	16,41	16,33	16,28
11	77,04	77,04	76,71	77,37	0,00	0,00	0,00	0,00	15,11	15,17	15,10	15,05
12	76,99	77,01	76,66	77,28	0,00	0,00	0,00	0,00	13,43	13,49	13,43	13,38
13	41,15	41,22	41,10	41,14	0,00	0,00	0,00	0,00	24,74	22,63	26,47	25,12
14	43,84	43,90	43,78	43,83	0,00	0,00	0,00	0,00	21,65	19,82	23,15	21,99
15	41,40	41,46	41,33	41,41	5,20	6,46	2,82	6,34	36,58	33,35	38,88	37,50
16	46,74	46,84	46,67	46,72	0,10	0,27	0,04	0,00	31,86	29,05	33,98	32,54
17	45,71	45,80	45,65	45,69	0,00	0,00	0,00	0,00	24,25	22,19	25,90	24,68
18	50,49	50,59	50,42	50,46	0,00	0,00	0,00	0,00	18,18	16,63	19,43	18,49
19	53,63	53,74	53,55	53,59	0,00	0,00	0,00	0,00	10,59	9,68	11,31	10,77

Ausführliche Ergebniswerte bei den Experimenten der Belieferungsstrategien

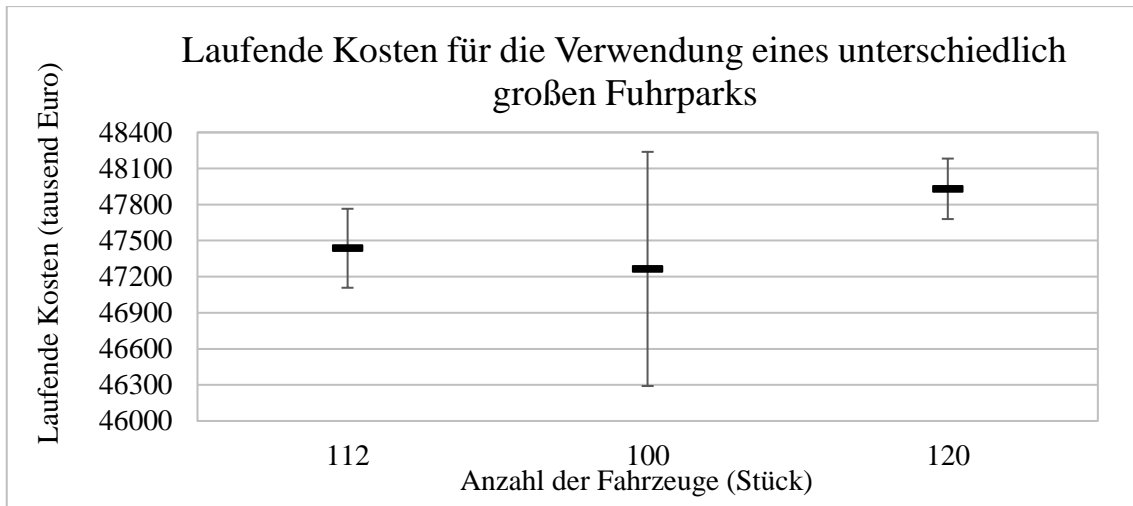
Belieferungsstrategie Nr.	Mittelwert der laufenden Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 1 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 2 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 3 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Mittelwert der nicht rechtzeitig transportierten Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 1 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 2 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 3 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Mittelwert der Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 1 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 2 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 3 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)
20	47,26	47,63	47,04	47,13	51,36	67,39	36,39	50,29	41,67	38,29	44,08	42,66
21	47,93	48,01	47,85	47,93	1,01	1,21	0,40	1,43	34,07	31,05	36,26	34,91
22	47,43	47,53	47,32	47,45	5,20	6,46	2,82	6,34	38,90	36,67	40,72	39,31
23	47,44	47,54	47,34	47,46	6,13	7,09	3,70	7,61	36,58	33,36	38,90	37,49
24	50,75	49,63	51,74	50,87	279,17	143,31	377,48	316,70	39,63	34,73	43,31	40,85
25	43,20	43,17	43,20	43,24	4,22	4,35	5,78	2,53	27,80	27,64	28,35	27,42
26	42,01	42,04	41,94	42,06	3,20	4,40	3,51	1,67	27,59	27,75	27,48	27,53
27	43,67	43,68	43,62	43,70	1,75	1,22	2,90	1,12	29,73	29,10	30,26	29,84
28	40,34	40,29	40,25	40,48	3,18	4,58	3,53	1,44	28,24	28,20	28,57	27,96
29	42,39	42,40	42,30	42,46	1,96	2,14	2,95	0,79	29,91	28,95	30,54	30,26
30	45,01	44,99	44,99	45,05	1,71	2,11	2,11	0,91	32,56	32,94	32,94	31,78
31	38,02	38,06	37,98	38,01	0,00	0,00	0,00	0,00	24,74	22,63	26,47	25,12
32	30,97	30,97	30,97	30,98	1,81	1,69	2,85	0,88	29,37	28,54	30,01	29,55
33	39,21	39,29	39,18	39,17	0,00	0,00	0,00	0,00	30,43	28,63	32,24	30,42
34	34,11	34,14	34,08	34,12	1,81	1,69	2,85	0,88	29,37	28,54	30,01	29,55
35	42,35	42,46	42,29	42,30	0,00	0,00	0,00	0,00	30,43	28,63	32,24	30,42
36	47,45	47,54	47,34	47,46	6,87	8,06	4,21	8,35	38,92	36,70	40,75	39,32
37	52,36	52,07	52,84	52,15	413,56	337,22	491,51	411,96	43,22	39,70	46,27	43,68
38	47,76	47,70	47,70	47,88	91,25	82,15	86,73	104,88	37,45	35,84	38,47	38,05

Ausführliche Ergebniswerte bei den Experimenten der Belieferungsstrategien												
Belieferungsstrategie Nr.	Mittelwert der laufenden Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 1 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 2 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Replikation 3 laufende Kosten (In Mio. Euro)	Mittelwert der nicht rechtzeitig transportierten Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 1 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 2 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Replikation 3 nicht rechtzeitig transportierte Paletten (In tausend Paletten)	Mittelwert der Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 1 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 2 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)	Replikation 3 Auslastung des Fuhrparks (In Prozent)
39	45,97	46,04	45,86	46,00	11,05	11,25	7,62	14,29	34,03	33,26	34,50	34,33
40	46,19	46,29	46,09	46,21	5,66	7,11	3,22	6,64	33,04	32,56	33,29	33,28
41	34,01	34,06	33,99	33,98	1,39	0,81	2,24	1,11	26,99	26,89	27,22	26,85
42	41,36	41,42	41,33	41,34	1,21	0,74	2,07	0,83	27,02	26,77	27,21	27,08
43	41,86	41,95	41,78	41,85	0,00	0,00	0,00	0,00	26,92	26,95	27,10	26,72
44	49,33	49,42	49,26	49,32	0,00	0,00	0,00	0,00	27,20	27,12	27,39	27,08
45	84,24	84,27	84,00	84,45	0,00	0,00	0,00	0,00	7,39	7,42	7,38	7,39
46	86,08	86,09	85,96	86,18	0,00	0,00	0,00	0,00	7,39	7,42	7,38	7,39

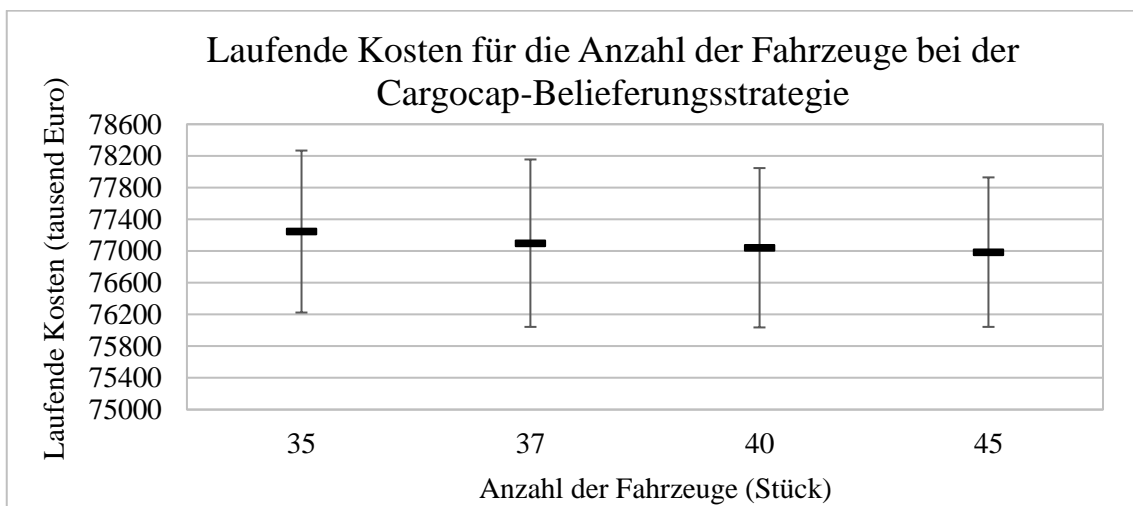
Anhang 46: Ausführliche Ergebniswerte bei den Experimenten der Belieferungsstrategien.



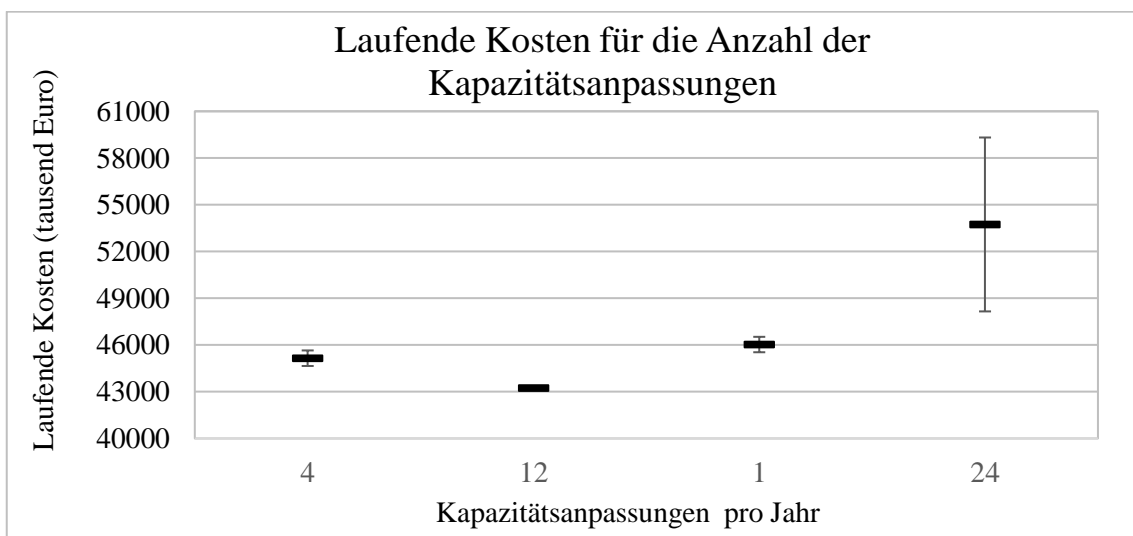
Anhang 47: Konfidenzintervall für die Ergebnisse der grundlegenden Belieferungsstrategien.



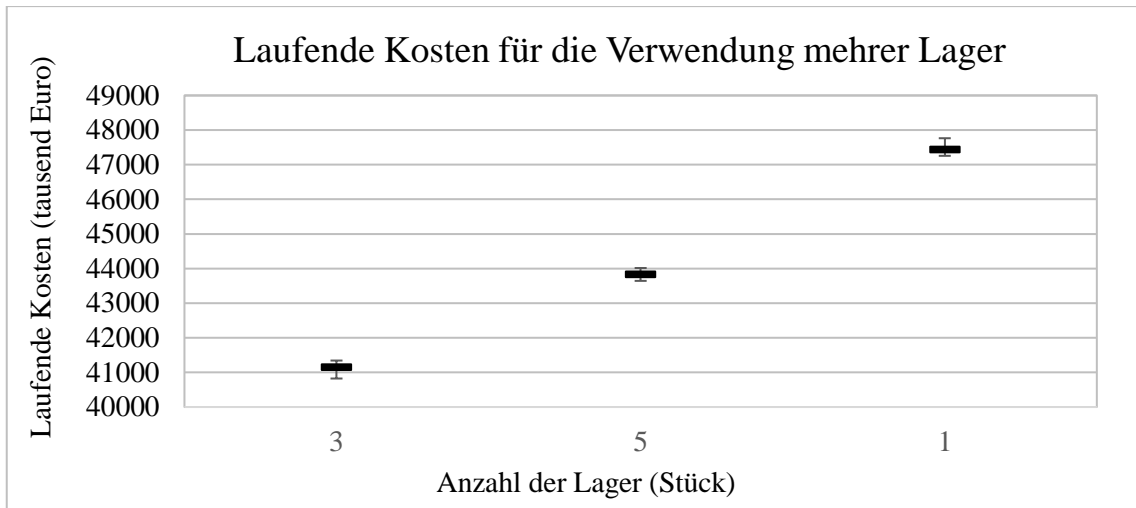
Anhang 48: Konfidenzintervall für die laufenden Kosten bei der Verwendung eines unterschiedlich großen Fuhrparks.



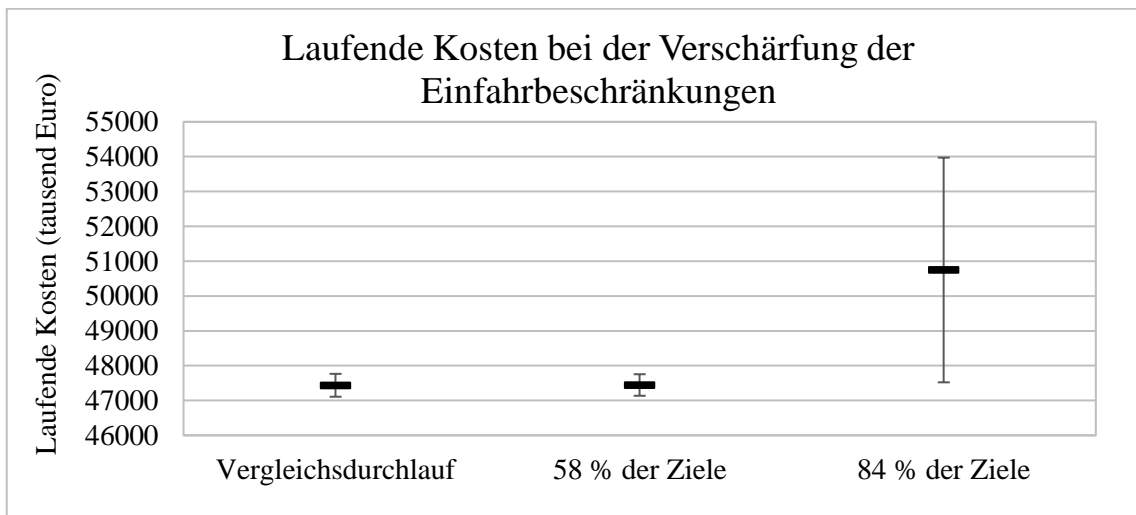
Anhang 49: Konfidenzintervall für die laufenden Kosten bei der Anzahl der Fahrzeuge in der Cargocap Belieferungsstrategie.



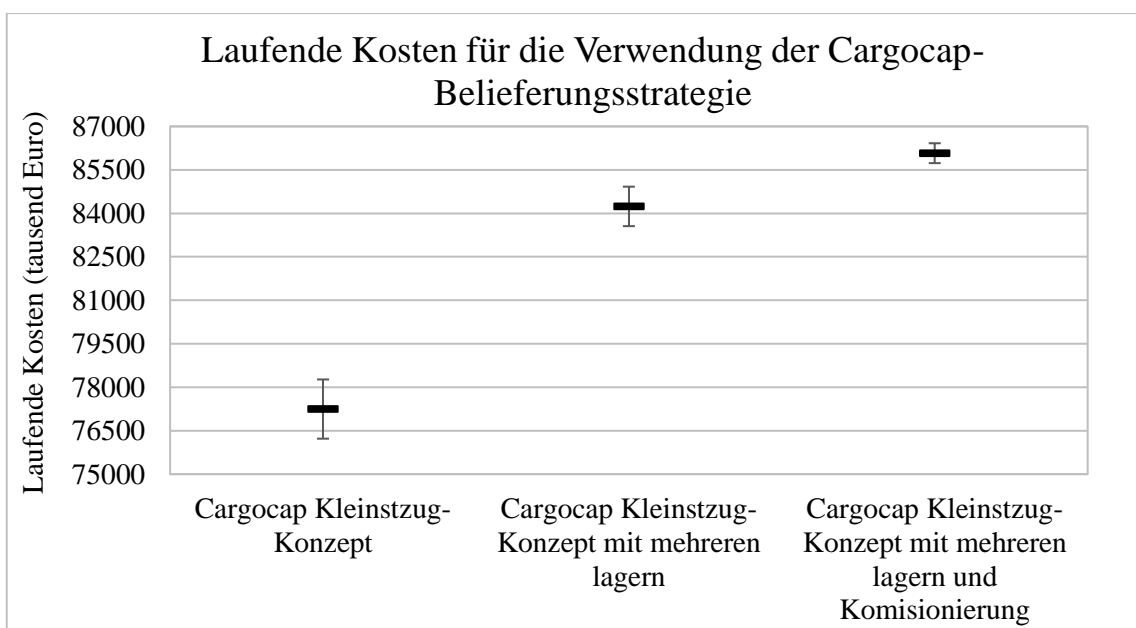
Anhang 50: Konfidenzintervall für die laufenden Kosten bei der Anzahl der Kapazitätsanpassungen im Fuhrpark.



Anhang 51: Konfidenzintervall für die laufenden Kosten bei der Verwendung mehrerer Lager.



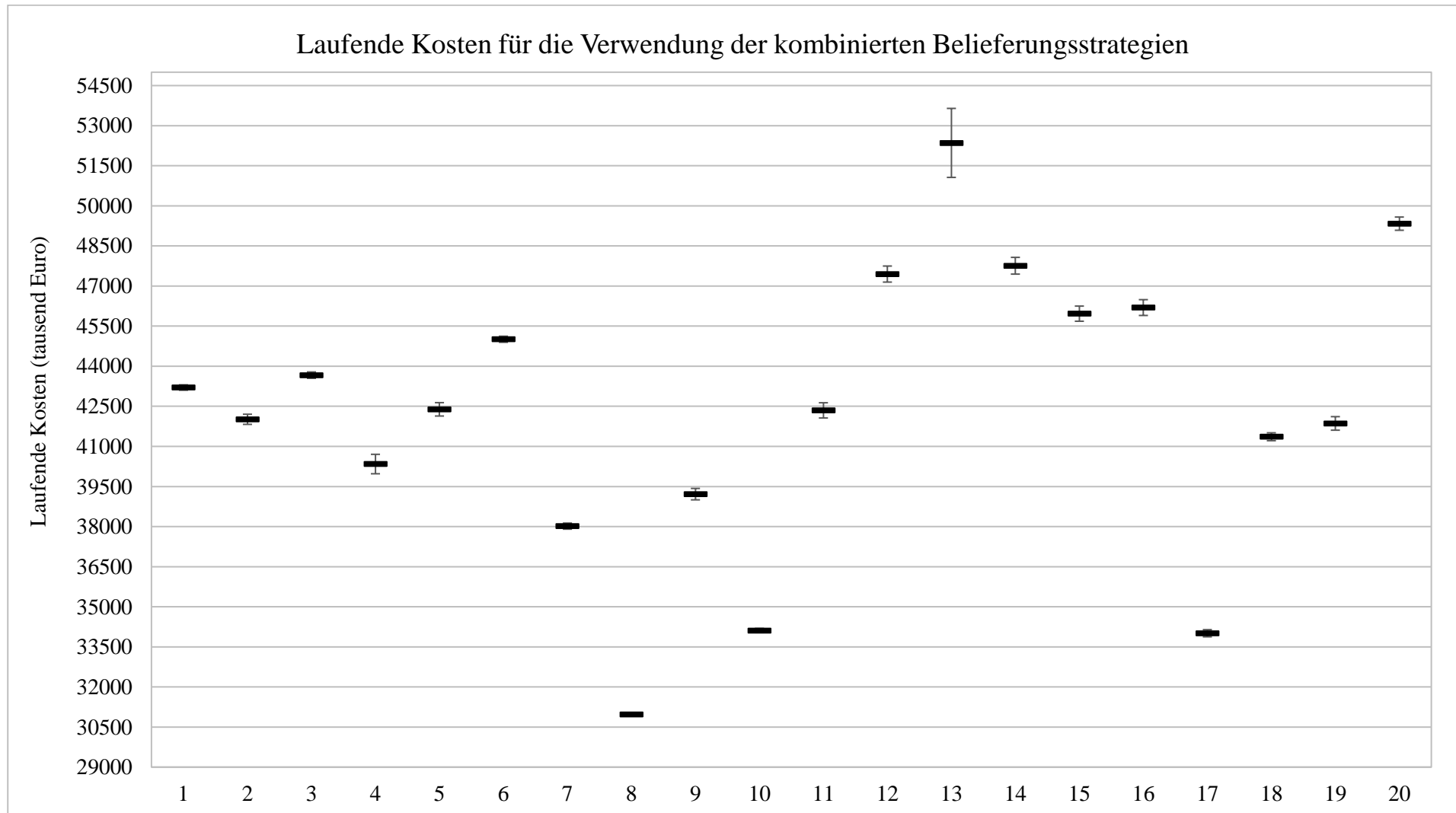
Anhang 52: Konfidenzintervalle für die laufenden Kosten bei der Verschärfung der Einfahrbeschränkungen.



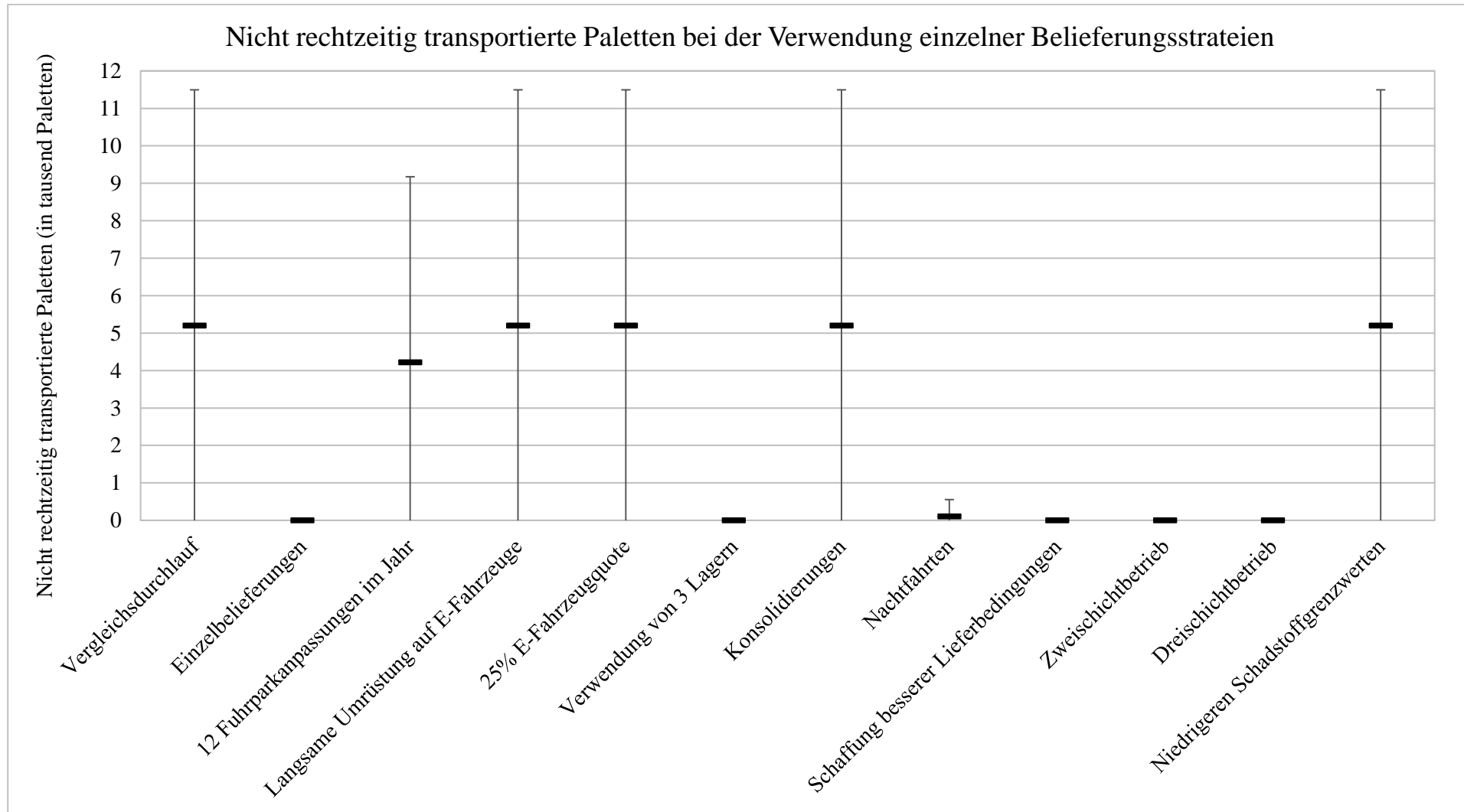
Anhang 53: Konfidenzintervalle für die laufenden Kosten für bei der Verwendung der Cargocap Belieferungsstrategie in Kombination mit weiteren Belieferungsstrategien.

Kombination an Belieferungsstrategien	Verweisnummer
Kleinere Fuhrparkgröße mit regelmäßiger Anpassung	1
Kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen und Nachtfahrten	2
Kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen, Nachtfahrten und Zwei-Schichtbetrieb	3
Kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen und besseren Lieferbedingungen	4
Kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen, besseren Lieferbedingungen und Zwei-Schichtbetrieb	5
Kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen, besseren Lieferbedingungen und Drei-Schichtbetrieb	6
Drei Lagern und Konsolidierung	7
Drei Lager, Konsolidierung, kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen und besseren Lieferbedingungen	8
Drei Lager, Konsolidierung, kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen, bessere Lieferbedingungen und Direktbelieferungen	9
Drei Lager, kleinerer Fuhrpark, regelmäßige Anpassungen und besseren Lieferbedingungen	10
Drei Lager, kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen, Schaffung besserer Lieferbedingungen und Direktbelieferungen	11
58 Prozent der Ziele in Einfahrbeschränkungen und reduzierter SGW	12
84 Prozent der Ziele in Einfahrbeschränkungen und reduzierter SGW	13
Ausgangslage des verschärften Fahrverbots und eine E-Kfz-Quote von 25 Prozent	14
Ausgangslage der verschärften Einfahrbeschränkung und eine E-Kfz-Quote von 50 Prozent	15
Ausgangslage der verschärften Einfahrbeschränkung und eine langsame E-Kfz-Umstellung	16
Ausgangslage der verschärften Einfahrbeschränkung, langsame E-Kfz-Umstellung, kleinerer Fuhrpark mit regelmäßigen Anpassungen und drei Lagern	17
Ausgangslage der verschärften Einfahrbeschränkung, langsame Umstellung auf E-Kfz, weniger Fahrzeuge, drei Lager, Fuhrparkanpassung, verbesserte Lieferbedingungen und Zwei-Schichtbetrieb	18
Ausgangslage der verschärften Einfahrbeschränkung, langsame Umstellung auf E-Kfz, weniger Fahrzeuge, drei Lager, Fuhrparkanpassung, verbesserte Lieferbedingungen und Direktbelieferungen	19
Ausgangslage der verschärften Einfahrbeschränkung, langsame Umstellung auf E-Kfz, weniger Fahrzeuge, drei Lager, Fuhrparkanpassung, verbesserte Lieferbedingungen, Direktbelieferungen und Zwei-Schichtbetrieb	20
Cargocap Kleinstzug-Konzept mit mehreren Lagern (3)	21
Cargocap Kleinstzug-Konzept mit mehreren Lagern (3) und Konsolidierung	22

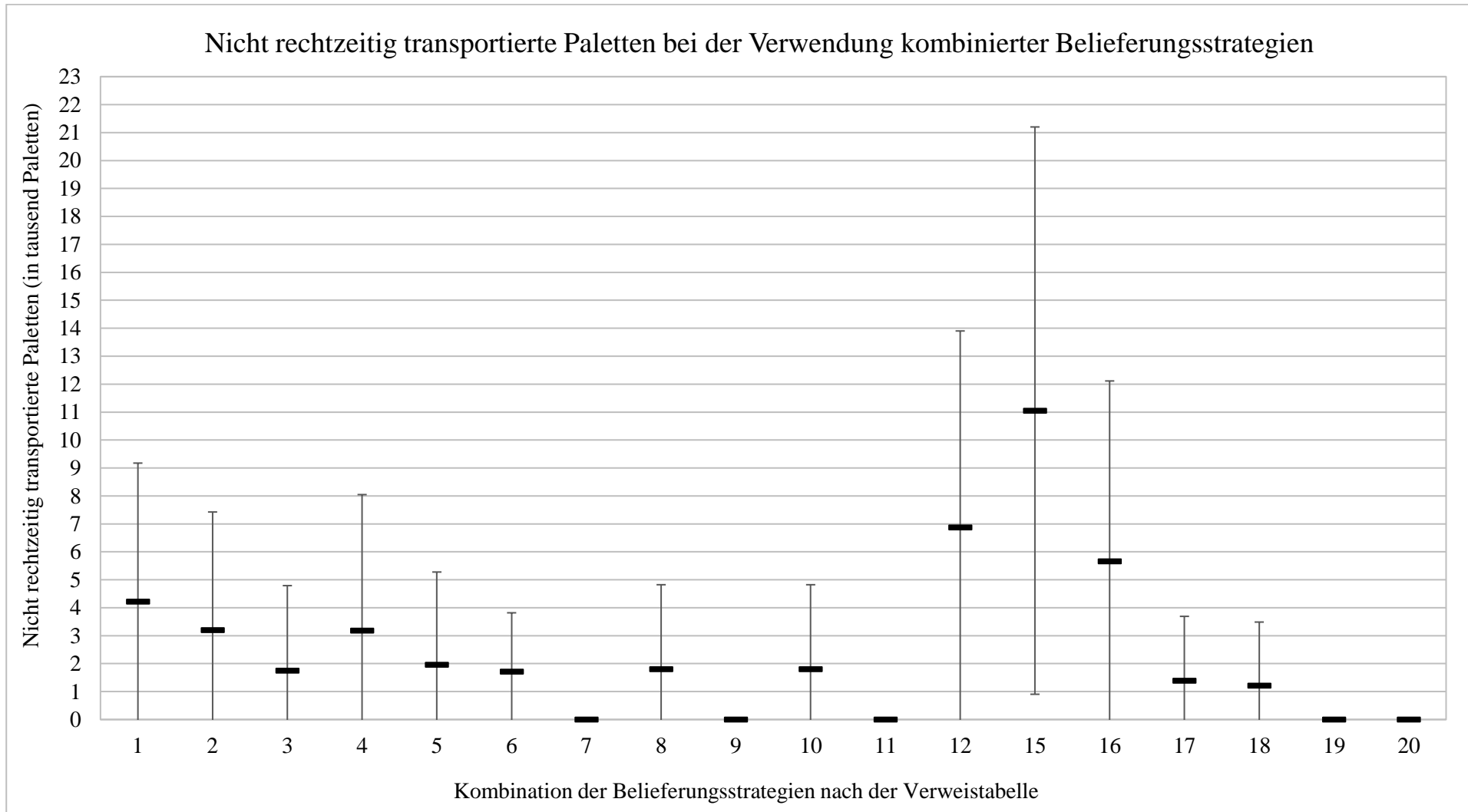
Anhang 54: Verweisnummerntabelle für die Darstellung der Belieferungsstrategiekombinationen in Konfidenzintervallen.



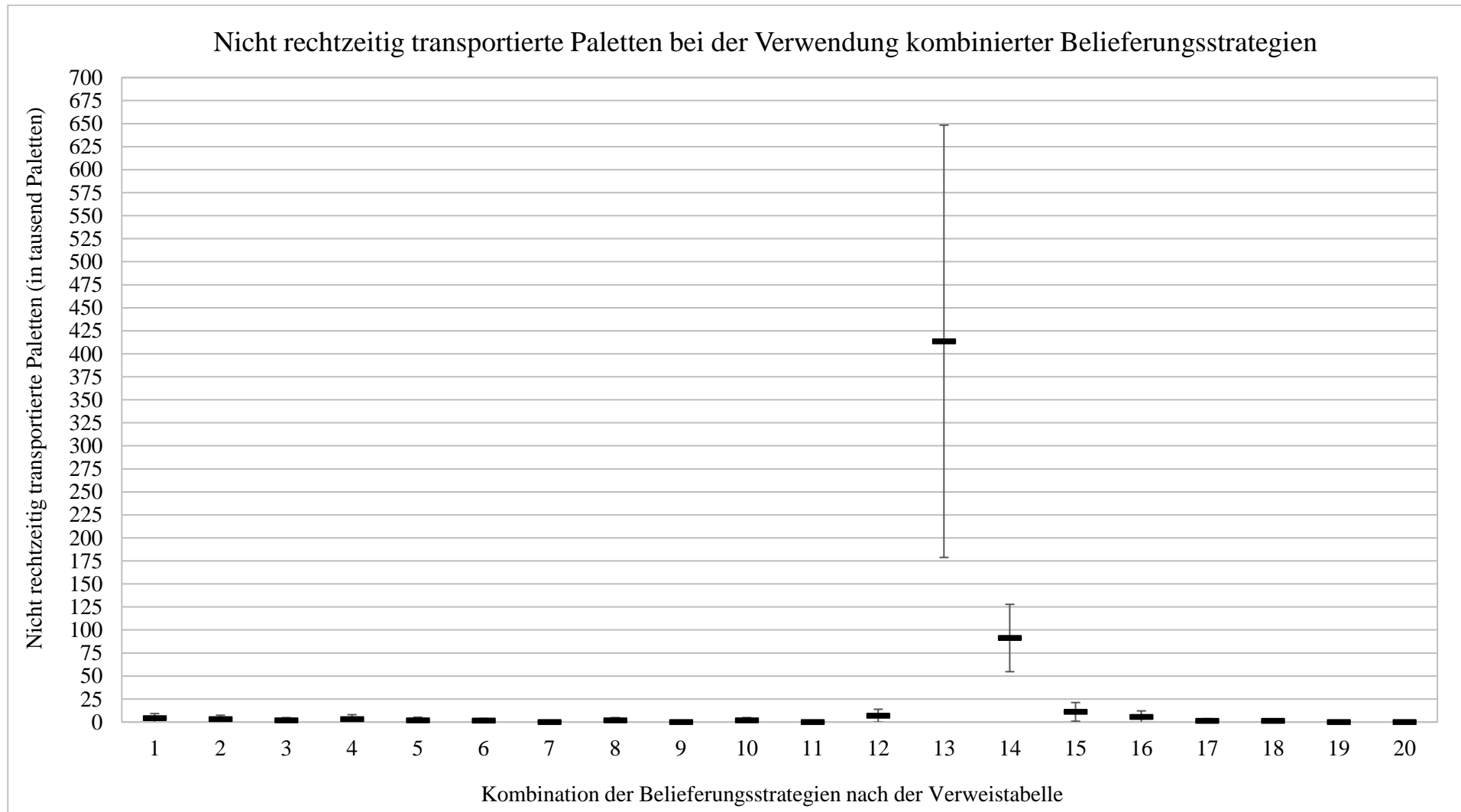
Anhang 55: Konfidenzintervalle für die laufenden Kosten bei der Verwendung der Belieferungsstrategien in Kombination miteinander.



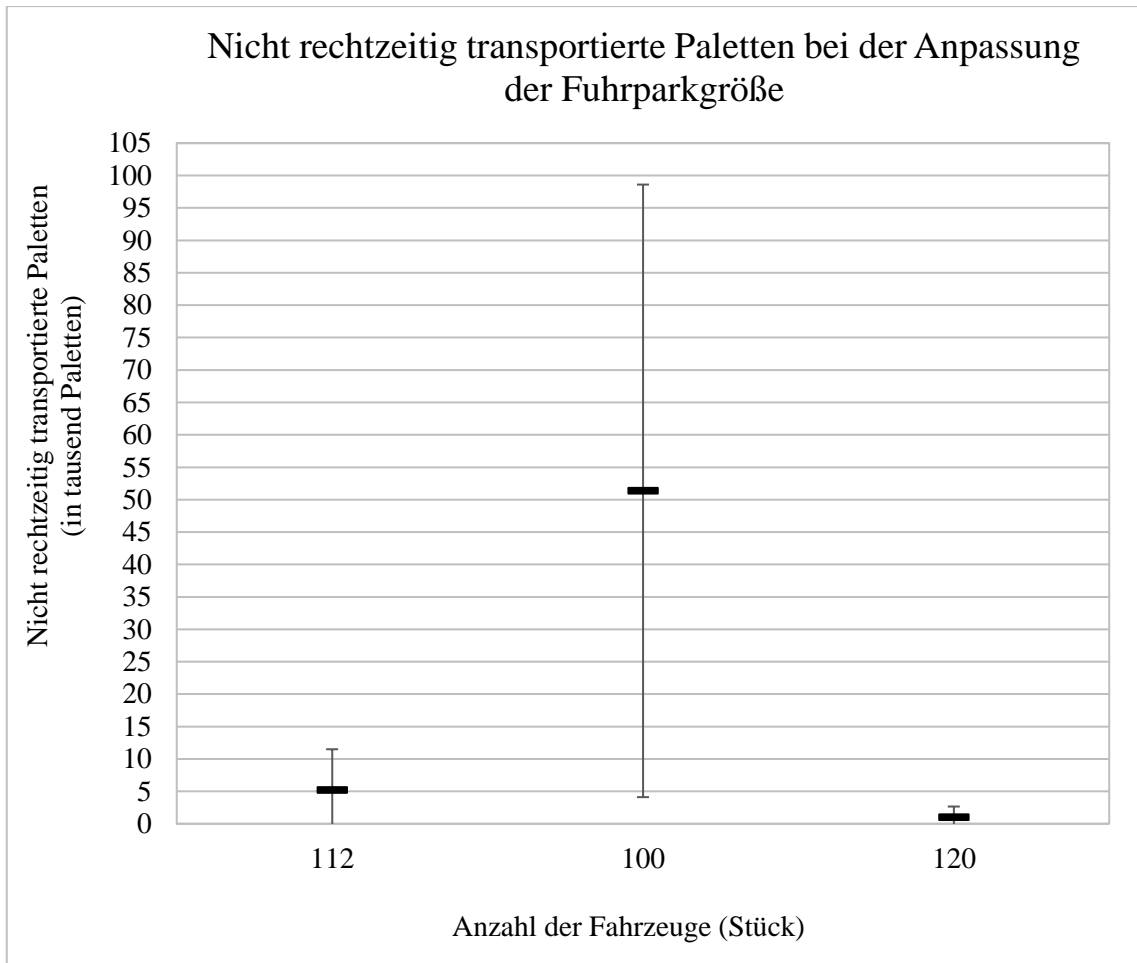
Anhang 56: Konfidenzintervalle für die nicht rechtzeitig transportierten Paletten bei der Verwendung einzelner Belieferungsstrategien.



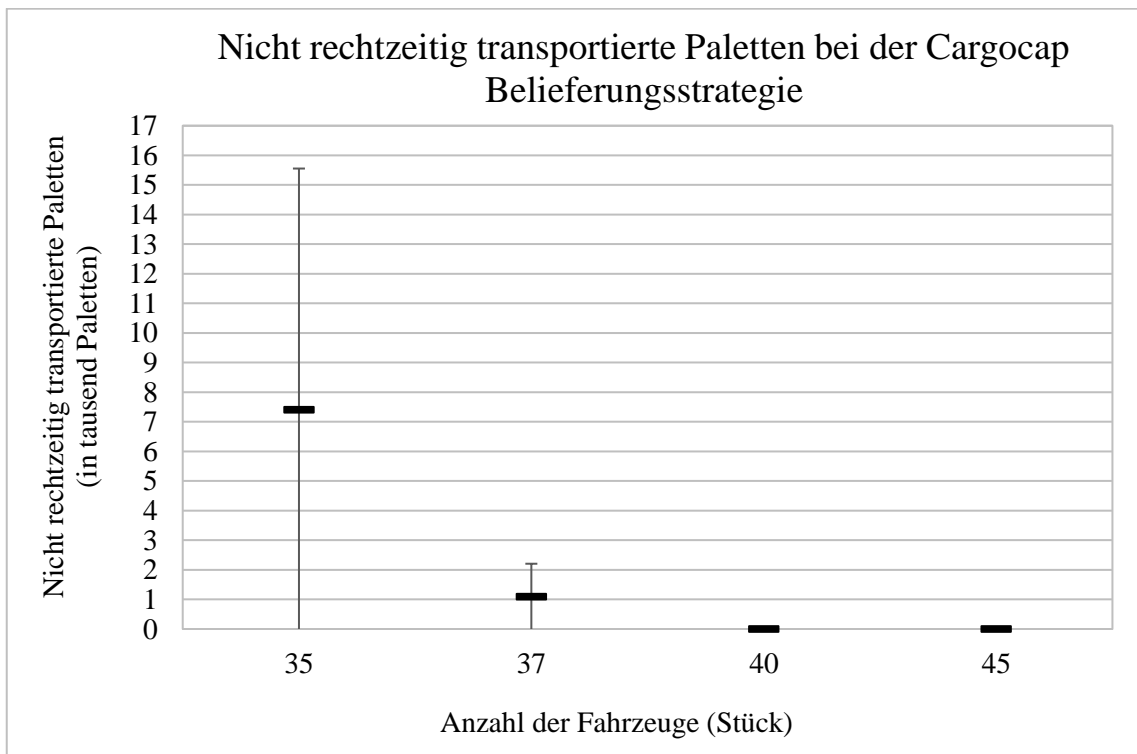
Anhang 57: Konfidenzintervalle für die nicht rechtzeitig transportierten Paletten bei der Verwendung kombinierter Belieferungsstrategien.



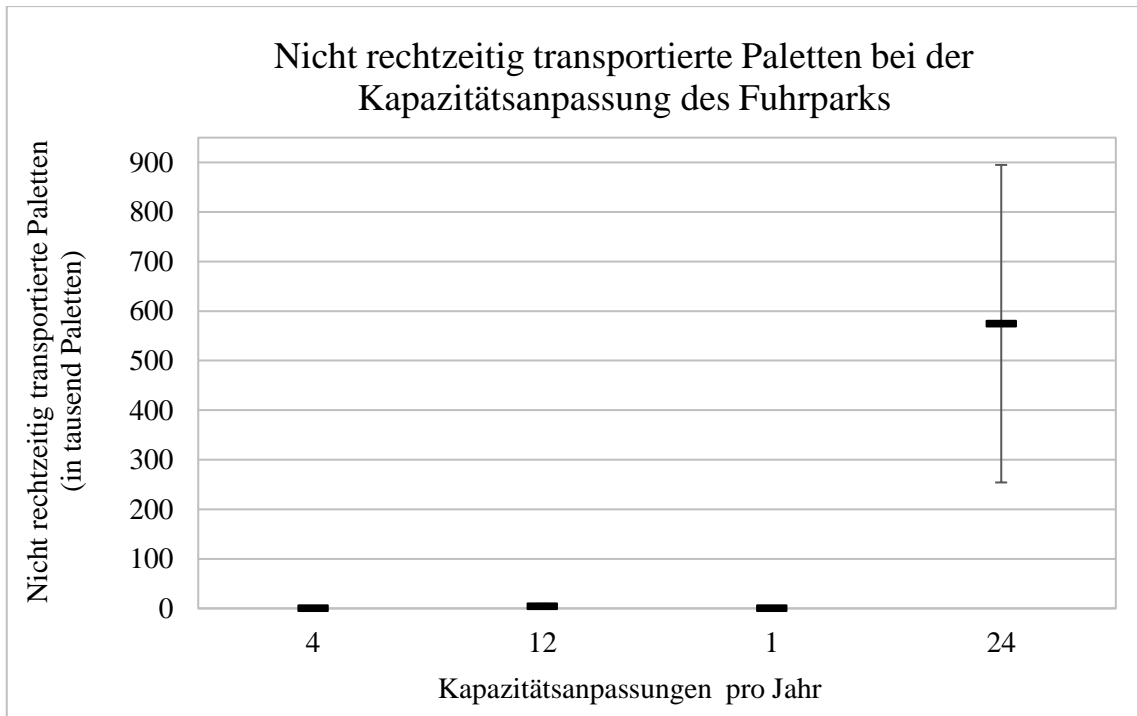
Anhang 58: Konfidenzintervalle für die nicht rechtzeitig transportierten Paletten bei der Verwendung kombinierter Belieferungsstrategien im Vergleich zur Ausgangslage bei veränderten Randbedingungen.



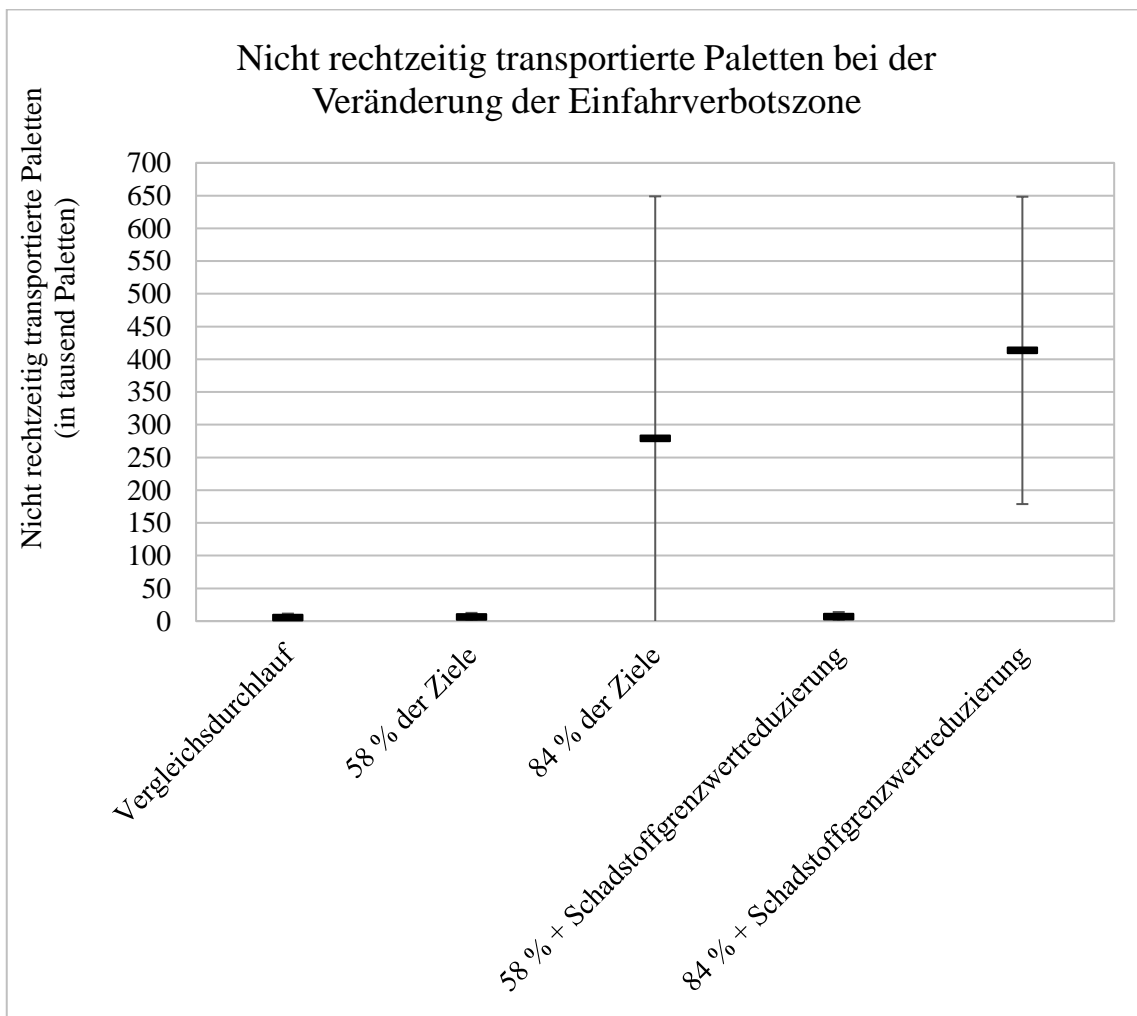
Anhang 59: Konfidenzintervalle für die nicht rechtzeitig transportierten Paletten bei der Anpassung der Fuhrparkgröße.



Anhang 60: Konfidenzintervalle für die nicht rechtzeitig transportierten Paletten bei der Cargocap Belieferungsstrategie.



Anhang 61: Konfidenzintervalle für die nicht rechtzeitig transportierten Paletten bei der Kapazitätsanpassung des Fuhrparks.



Anhang 62: Konfidenzintervalle für die nicht rechtzeitig transportierten Paletten bei Veränderung der Einfahrverbotszone.

Bewertung der kombinierten Belieferungsstrategien																							
Bewertungskriterium \ Belieferungsstrategie	Priorität	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11	
		Liefertreue	8	5	40	5	40	6	48	5	40	6	48	6	48	9	72	6	48	9	72	8	64	8	64
Laufende Kosten	9	7	63	7	63	7	63	8	72	7	63	7	63	8	72	8	72	9	81	6	54	9	81
Investitionskosten	6	7	42	7	42	7	42	6	36	6	36	6	36	6	36	5	30	5	30	6	36	6	36
Ausgereiftheit der Strategie	6	6	36	6	36	6	36	5	30	5	30	4	24	7	42	8	48	6	36	8	48	6	36
Zukunftsfähigkeit	5	8	40	7	35	8	40	7	35	8	40	8	40	8	40	8	40	5	25	8	40	5	25
Auslastung der Fahrzeuge	2	4	8	4	8	4	8	4	8	4	8	5	10	4	8	4	8	4	8	4	8	4	8
Nutzungsmöglichkeiten von Vorteilen	3	0	0	3	9	3	9	9	27	9	27	9	27	0	0	9	27	9	27	9	27	9	27
Organisatorische Probleme	7	8	56	7	49	6	42	8	56	6	42	5	35	8	56	8	56	8	56	8	56	8	56
Wirtschaftlicher Betrieb trotz Gesetzesverschärfung	6	9	54	8	48	7	42	8	48	8	48	8	48	6	36	8	48	3	18	8	48	3	18
Rechtliche Herausforderungen bei der Umstellung	6	9	54	8	48	8	48	8	48	8	48	8	48	9	54	8	48	8	48	8	48	8	48
Gewichtete Priorität		393		378		378		400		390		379		416		425		401		429		399	
Rang		7		10		10		5		8		9		3		2		4		1		6	
= Effektivität der Belieferungsstrategie auf ein Bewertungskriterium		= Multiplikator zwischen Effektivität und Priorität										Priorität: 1 = niedrig 9 = hoch											

Anhang 63: Bewertungstabelle der kombinierten Belieferungsstrategien.

Bewertung der kombinierten Belieferungsstrategien im verschärften Fahrverbotsfall																				
Bewertungskriterium	Belieferungsstrategie	Priorität	14		15		16		17		18		19		20		21		22	
			Liefertreue	8	1	8	3	24	5	40	6	48	6	48	9	72	9	72	9	72
Laufende Kosten	9	7	63	7	63	7	63	8	72	7	63	8	72	8	72	4	36	3	27	
Investitionskosten	6	3	18	2	12	5	30	4	24	3	18	3	18	3	18	0	0	0	0	
Ausgereiftheit der Strategie	6	5	30	4	24	5	30	5	30	2	12	3	18	2	12	2	12	2	12	
Zukunftsfähigkeit der Strategie	5	6	30	7	35	8	40	9	45	9	45	6	30	6	30	9	45	9	45	
Auslastung der Fahrzeuge	2	5	10	5	10	5	10	4	8	4	8	4	8	4	8	1	2	1	2	
Nutzungsmöglichkeiten von Vorteilen	3	4	12	4	12	4	12	4	12	9	27	9	27	9	27	9	27	9	27	
Organisatorische Probleme	7	3	21	2	14	5	35	4	28	3	21	4	28	3	21	3	21	2	14	
Wirtschaftlicher Betrieb trotz Gesetzesverschärfung	6	7	42	8	48	8	48	8	48	8	48	6	36	6	36	9	54	9	54	
Rechtliche Herausforderungen bei der Umstellung	6	6	36	6	36	7	42	8	48	6	36	6	36	6	36	9	54	9	54	
Gewichtete Priorität			270	278	350	363	326	345	332	323	307									
Rang			9	8	2	1	5	3	4	6	7									
= Effektivität der Belieferungsstrategie auf ein Bewertungskriterium		= Multiplikator zwischen Effektivität und Priorität						Priorität: 1 = niedrig 9 = hoch												

Anhang 64: Bewertungstabelle der kombinierten Belieferungsstrategien im verschärften Fahrverbotsfall.

Eidesstattliche Versicherung (Affidavit)

Kullik, Stephan

Name, Vorname
(Last name, first name)

149262

Matrikelnr.
(Enrollment number)

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit/Masterarbeit* mit dem folgenden Titel 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.

I declare in lieu of oath that I have completed the present Bachelor's/Master's* thesis with the following title independently and without any unauthorized assistance. I have not used any other sources or aids than the ones listed and have documented quotations and paraphrases as such. The thesis in its current or similar version has not been submitted to an auditing institution.

Titel der Bachelor-/Masterarbeit*:
(Title of the Bachelor's/ Master's* thesis):

Anwendung von System Dynamics zur Bewertung von Belieferungsstrategien
im Kontext der City-Logistik

*Nichtzutreffendes bitte streichen
(Please choose the appropriate)

Ort, Datum
(Place, date)

Unterschrift
(Signature)

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:

Official notification:

Any person who intentionally breaches any regulation of university examination regulations relating to deception in examination performance is acting improperly. This offense can be punished with a fine of up to €50,000.00. The competent administrative authority for the pursuit and prosecution of offenses of this type is the chancellor of TU Dortmund University. In the case of multiple or other serious attempts at deception, the examinee can also be unenrolled, section 63, subsection 5 of the North Rhine-Westphalia Higher Education Act (*Hochschulgesetz*).

The submission of a false affidavit will be punished with a prison sentence of up to three years or a fine.

As may be necessary, TU Dortmund will make use of electronic plagiarism-prevention tools (e.g. the "turnitin" service) in order to monitor violations during the examination procedures.

I have taken note of the above official notification:**

Ort, Datum
(Place, date)

Unterschrift
(Signature)

****Please be aware that solely the German version of the affidavit ("Eidesstattliche Versicherung") for the Bachelor's/ Master's thesis is the official and legally binding version.**