

Masterarbeit

Bewertung von Distanzmetriken für ein Supply-Chain-Simulationsmodell

Johannes Raps

Matrikelnummer 190243

Master Logistik

Ausgegeben am: 03.05.2017

Eingereicht am: 17.10.2017

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe

M.Sc. Astrid Klüter

Technische Universität Dortmund

Fakultät Maschinenbau

Fachgebiet IT in Produktion und Logistik

www.itpl.mb.tu-dortmund.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
1. Einleitung	3
2. Globale Urbanisierung und Anforderungen an Distributionsnetzwerke.....	6
2.1. Grundlagen logistischer Distributionsnetzwerke	6
2.2. Distributionsnetzwerke vor dem Hintergrund der globalen Urbanisierung.....	10
2.3. Forschung und Innovation im Bereich urbaner Distribution.....	11
3. Grundlagen der Simulation sowie der Modellierung von Distributionsnetzwerken	14
3.1. Grundlagen der Simulation	14
3.2. Grundlagen der Modellierung.....	18
3.3. Modellierung logistischer Systeme	20
3.4. Charakterisierung gängiger Distanzmetriken	23
4. Stadt- und Verkehrsstrukturen	27
4.1. Stadtformen und Straßenstrukturtypen.....	27
4.2. Möglichkeiten der quantitativen Unterscheidung urbaner Strukturen	30
5. Anwendung und Vergleich gängiger Distanzmetriken	35
5.1. Methode, Modellerstellung und Datengrundlage	35
5.2. Anwendung von Distanzmetriken auf wechselnde Stadtbilder	38
5.2.1. Anwendungsfall Buenos Aires	40
5.2.2. Anwendungsfall Tokio.....	42
5.2.3. Anwendungsfall Berlin.....	44
5.2.4. Anwendungsfall Los Angeles	46
5.2.5. Anwendungsfall Mogadischu	49
5.3. Städteübergreifende Betrachtung und Bewertung der Ergebnisse	51
6. Integration stadtformabhängiger Distanzmetriken in Simulationstools.....	61
6.1. Wechselnde Stadtformen und Distanzmetriken in Simulationstools	61
6.2. Validierung des erarbeiteten Konzeptes	64
7. Zusammenfassung und Ausblick.....	68

Literaturverzeichnis	70
Abbildungsverzeichnis	74
Tabellenverzeichnis	76
Formelverzeichnis.....	77
Abkürzungsverzeichnis.....	78
Anhang 1: Schaffung der Datengrundlage.....	79
Anhang 2: Abfrage der Realdistanzen	84
Eidesstattliche Versicherung	87

1. Einleitung

Entwicklungen, welche unser Leben über Jahrzehnte hinweg prägen und verändern, werden als Megatrends bezeichnet. Neben der digitalen und der mobilen Revolution sowie einem umfassenden Nachhaltigkeitsgedanken zählt auch die Urbanisierung zu den Megatrends unserer Zeit (Lehmacher 2015). Bis 2050 werden voraussichtlich 70% der Weltbevölkerung in den großen Ballungszentren der Erde leben, die Zahl sogenannter Megacities – Städten mit mehr als zehn Millionen Einwohnern – nimmt beständig zu (Bretzke 2013). So rechnen die Vereinten Nationen (2014b) bereits mit 41 solcher Megastädte für das Jahr 2030. Darüber hinaus bilden sich im Zuge der globalen Urbanisierung auch zunehmend megaurbane Räume. Diese Ballungsräume entstehen durch die enge Verflechtung mehrerer mittelgroßer und großer Städte. Ein gutes Beispiel für eine solche Agglomeration ist unter anderem auch die Metropolregion Rhein-Ruhr mit 11.9 Millionen Einwohnern (Bretzke 2013). Eines der Hauptprobleme solcher Ballungsräume stellt insbesondere die sich zunehmend verschärfende Verkehrssituation dar. Das Verkehrsaufkommen wächst weltweit häufig deutlich schneller als die vorhandene Infrastruktur, was in letzter Konsequenz zu einem drohenden Verkehrskollaps in vielen Städten führt (Lehmacher 2015). Zudem verschärft der zunehmende E-Commerce-Handel und das damit stark ansteigende Paketaufkommen die Problematik (Lehmacher 2015). Frachtverkehr ist somit zwar einer der Gründe für die Überlastung der urbanen Verkehrsinfrastrukturen – gleichzeitig aber auch ein Opfer dieser Entwicklung (Bretzke 2013).

Um die urbane Versorgung auch in Zukunft weiterhin gewährleisten zu können, sind neue Versorgungskonzepte nötig. Lehmacher (2015) beschreibt diesbezüglich unter anderem die Nutzung der Nachtstunden oder bestehender Nahverkehrsnetzwerke für die innerstädtische Warendistribution (Lehmacher 2015). Ein weiterer nennenswerter Ansatz ist beispielsweise der Einsatz von Urban Consolidation Centern (UCC). Diese sind außerhalb des Stadtzentrums platziert und bilden einen Konsolidierungspunkt für sämtliche Logistikdienstleister. Erhalten Kunden wie beispielsweise Krankenhäuser oder Behörden Lieferungen von unterschiedlichen Dienstleistern, können deren Sendungen im UCC gebündelt und anschließend konsolidiert ins Stadtzentrum geliefert werden (Lehmacher 2015).

Für die Umsetzung neuer Logistik-Konzepte zur urbanen Versorgung müssen Logistikunternehmen ihre bestehenden Distributionsnetzwerke anpassen oder gegebenenfalls komplett neu konzipieren. Dabei stellt die Konfiguration eines solchen Distributionsnetzwerkes eine äußerst komplexe Aufgabenstellung dar. Die Gründe dafür sind vielfältig. So erschwert beispielsweise die hohe Anzahl interdependenter Teilprobleme innerhalb der Netzwerkkonfiguration die Planung. Auch historisch gewachsene Strukturen, beispielsweise in Form von Logistikimmobilien, schränken die Planungsflexibilität aus Sicht der Dienstleister ein (Bretzke 2015). Ein weiterer wesentlicher struktureller Aspekt ist auch die Morphologie der Stadt, in der das jeweilige Distributionsnetzwerk angewendet werden soll. Grob unterschieden wird dabei zwischen organisch gewachsenen Formen, die unter lokalen Einschränkungen gewachsen sind und geplanten Stadtformen, die unter umfangreichen Beschränkungen geplant wurden (Louf und Barthelemy 2014). Genauer untergliedert

werden können Städte anhand ihrer Straßenstruktur. Diversifizierungskriterium ist dabei sowohl die Größe und Form der Blocks einer Stadt als auch deren Anordnung. Hinsichtlich dieser Untergliederung existieren vier typische Gruppen urbaner Straßenstrukturtypen (Louf und Barthelemy 2014). Für Logistikdienstleister stellen solche urbanen Infrastrukturnetze keine Gestaltungsobjekte, sondern vielmehr Rahmenbedingungen dar. Logistische Netzwerke nutzen städtische Verkehrsadern für die Umsetzung urbaner Versorgungskonzepte (Bretzke 2015).

Um die dargestellte Komplexität solcher Systeme zu beherrschen, werden zunehmend Verfahren der ereignisdiskreten Simulation entwickelt und eingesetzt. Damit können Systeme nach der realistischen Abbildung aller relevanten Aspekte auf ihre Reaktion bezüglich veränderbarer Stellgrößen untersucht werden. Die dadurch erlangten Erkenntnisse sind anschließend auf das Realsystem übertragbar (Eley 2012). Dabei ist es besonders wichtig, realistische Eingangsparameter zu definieren, da sich frühe Festlegungen in besonderem Maß auf die späteren Simulationsergebnisse auswirken (Bungartz et al. 2009). Besonders zu nennen ist in diesem Zusammenhang das EU-Projekt U-TURN, bei dem unter anderem existierende Warenflüsse der Lebensmittelindustrie in Stadtgebieten analysiert und mit Hilfe eines Simulationstools alternative Logistikstrategien erarbeitet werden sollen (U-Turn 2017). In einer vorhergehenden Abschlussarbeit wurde für die Metropolregion Athen bereits ein Faktor zur optimalen Approximation von Wegstrecken innerhalb der City-Logistik-Simulation erarbeitet. Athen weist dabei die typischen städtebaulichen Kennzeichen einer historisch ungeplant gewachsenen Stadt des Mittelmeerraumes auf (Chorianopoulos et al. 2010). Ob dieser Faktor auch zur Simulation von Distributionsnetzwerken in anderen Städten mit entsprechend anderer Stadtmorphologie verwendet werden kann, wurde noch nicht untersucht.

Das Ziel der Untersuchungen besteht in der Bewertung von Distanzmetriken für ein Supply-Chain-Simulationsmodell und soll die Frage klären, ob und inwiefern Wegstreckenapproximationen vor dem Hintergrund unterschiedlicher Stadtformen übertragbar sind. Grob sind dazu vier Teilaufgaben zu bearbeiten. Zunächst gilt es, als erste Teilaufgabe, ein umfassendes Verständnis über die globale Urbanisierung und die daraus resultierenden Anforderungen an die Logistik sowie über Grundlagen der Simulation und der Modellierung von Distributionsnetzwerken zu schaffen. In der zweiten Teilaufgabe werden Stadtmorphologien und deren Charakteristiken herausgearbeitet und präsentiert, wobei der Fokus auf verkehrsrelevanten Eigenschaften liegt. Die dritte Teilaufgabe besteht in der Untersuchung unterschiedlicher Distanzmetriken. Dazu werden gängige Distanzmetriken nach einer kurzen Charakterisierung unter Berücksichtigung ihrer Zusammenhänge, Eigenschaften und Besonderheiten anhand von Beispielfällen auf die im zweiten Teilziel dargestellten Stadtmorphologien angewendet und verglichen. Dabei gilt es festzustellen, ob bestehende Approximationen in bisherigen Simulationsmodellen auch vor dem Hintergrund wechselnder Stadtbauformen hinreichend sind oder ob Anpassungen vorgenommen werden müssen. In der vierten und letzten Teilaufgabe ist darzulegen, wie die erarbeiteten Erkenntnisse zur verbesserten Simulation innerstädtischer Distributionsnetzwerke in Simulationstools eingebunden werden können.

Die Bearbeitung der beschriebenen Problemstellung soll nachfolgend geschildert werden. Zum Einstieg werden mittels einer umfassenden Literaturrecherche die globale Urbanisierung und die

sich daraus ergebenden Anforderungen an Distributionsnetzwerke beschrieben. Aktuelle Forschungsansätze innerhalb dieses Themenbereichs werden kurz beleuchtet. Im Anschluss werden Grundlagen der Simulation und der Modellierung von Distributionsnetzwerken dargestellt. Innerhalb dieses Themenblocks sollen zunächst die Grundlagen der Simulation erläutert und in einem zweiten Schritt die Modellentwicklung logistischer Netzwerke beschrieben werden. Im Anschluss erfolgt die Zusammenführung der beiden beschriebenen Teilbereiche und die derzeitige Abbildung von Distributionsnetzwerken in der Simulation wird aufgezeigt. Zudem werden gängige Distanzmetriken vorgestellt und entsprechend ihrer Unterschiede, Zusammenhänge und Charakteristika voneinander abgegrenzt. Bezüglich des Themas Simulation sollen nachfolgend lediglich konzeptionelle Ansätze verfolgt werden. Die direkte Arbeit am Simulationstool ist im Rahmen der Untersuchungen nicht vorgesehen.

Ein weiterer Kernbereich hinsichtlich der Aufgabenstellung ist die Betrachtung abweichender Strukturen hinsichtlich Stadtbau und -entwicklung. Dazu werden verschiedene typische stadtmorphologische Formen aufgezeigt und beschrieben. Insbesondere stehen in diesem Teilabschnitt städtebauliche und verkehrsrelevante Eigenschaften im Fokus. Zu Beginn dieses Kapitels soll zunächst die Unterscheidungsgrundlage sowie die Kriterien zur Kategorisierung verschiedener stadtgeografischer Merkmale aufgezeigt werden. Nach der Kategorisierung und der Darstellung der spezifischen Eigenschaften jedes stadtmorphologischen Typs wird exemplarisch für jede Kategorie eine Beispielstadt vorgestellt. Die entsprechende Beispielstadt soll in der weiteren Bearbeitung als Grundlage für die Anwendungsbeispiele im nächsten Teilziel dienen.

Um Wegstrecken in der Simulation umzusetzen, werden Distanzmetriken zu deren Approximation verwendet. Dabei kann zwischen verschiedenen Berechnungsansätzen unterschieden werden. Der Vergleich gängiger Distanzmetriken vor dem Hintergrund wechselnder Stadtformen steht im Fokus des folgenden Teilziels. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden zunächst Untersuchungsmethode und Vorgehen zum Abgleich der approximierten Distanzen mit den Realdistanzen erläutert. Anschließend erfolgt die Anwendung der vorgestellten Distanzmetriken auf die im vorhergehenden Teilziel vorgestellten Beispielstädte der städtebaulichen Kategorien. Nach Gegenüberstellung und Vergleich der Ergebnisse schließt das Kapitel mit der Zusammenfassung und Analyse der erlangten Erkenntnisse. Das anschließende Kapitel widmet sich der Erstellung eines Konzeptes zur Nutzung der erlangten Kenntnisse in Simulationsexperimenten. Die Beschreibung des zu erstellenden Konzeptes erfolgt mit Bezug auf die Darstellung zur Arbeitsweise von Simulationstools und der Modellierung von Distributionsnetzwerken, die im zweiten Teilziel stattfinden. Hinsichtlich der Konzepterstellung wird zunächst beschrieben, wie unterschiedliche Stadtformen in Simulationstools eingebunden werden können. Anschließend werden auf konzeptioneller Ebene Möglichkeiten zur stadtformbedingten Wegstreckenapproximation in Simulationstools und die sich daraus ergebenden Potentiale dargestellt.

2. Globale Urbanisierung und Anforderungen an Distributionsnetzwerke

Mit dem Jahreswechsel 2007/2008 lebten weltweit zum ersten Mal mehr Menschen in Städten als in ländlichen Regionen. In Zukunft wird sich die Quote der weltweit in urbanen Agglomerationen lebenden Menschen bis 2030 auf über 60% erhöhen. Menschen erhoffen sich durch das Leben in Städten häufig verbesserte Lebensbedingungen. Es ist beispielsweise für viele Arbeitnehmer oft einfacher, in urbanen Räumen eine attraktive Arbeitsstelle zu finden. Tatsächlich stellen Metropolregionen extrem leistungsfähige Wirtschaftssysteme dar. So beanspruchen Städte lediglich 3% der Erdoberfläche, erwirtschaften aber ungefähr 80% der globalen Wirtschaftsleistung. Die Wirtschaftskraft von Städten führt dabei zur Nachfrage nach unterschiedlichsten Gütern. Nicht zuletzt deshalb erhöht sich somit der Bedarf an Mobilität, Transport und leistungsfähiger Logistik in urbanen Regionen. In vielen Städten kann die Verkehrsinfrastruktur jedoch nicht in gleichem Maße wachsen wie das kontinuierlich zunehmende Verkehrsaufkommen, weshalb viele Städte mittlerweile vor einem Verkehrsinfarkt stehen (Lehmacher 2015). Der ständig zunehmende Frachtverkehr als Teil urbaner Distributionssysteme ist einer der Treiber der Verkehrsproblematik in vielen Städten – gleichzeitig aber auch ein Opfer dieser Thematik (Bretzke 2013). Das folgende Kapitel befasst sich zunächst mit den Grundlagen und Strukturen logistischer Distributionsnetzwerke. Anschließend werden die Anforderungen beschrieben, welche sich durch die globale Urbanisierung für Distributionsnetzwerke ergeben. Das Kapitel schließt mit Beispielen aktueller Forschungsansätze zur urbanen Warendistribution.

2.1. Grundlagen logistischer Distributionsnetzwerke

Bretzke (2015) beschreibt den Netzwerkbegriff als ein geordnetes Durchflusssystem aus hierarchisch und geografisch angeordneten, im Hinblick auf ein Leistungsziel komplementären Ressourcenknoten. Diese Ressourcenknoten werden durch Verkehrs- und Informationswege („Kanten“) verbunden. Einem Netzwerk fällt die Aufgabe zu, in einem Leistungsverbund Quellen (z.B. Fertigwarenläger von Produktionsstätten) bedarfsgerecht und wirtschaftlich mit Senken (Abnehmern) zu verbinden. Dabei stellen Netzwerke geschlossene Systeme dar, die quasi immer in umfassendere offene Netze eingebunden sind. Diesbezüglich ist auch die Abgrenzung zwischen logistischen Netzwerken und Verkehrsinfrastruktur von besonderer Relevanz. Während logistische Netze von Unternehmen zur Erbringung logistischer Leistungen genutzt werden, werden Verkehrsinfrastrukturelemente in der Regel staatlich bereitgestellt. Somit stellen Infrastrukturnetze aus Unternehmenssicht keine Gestaltungsobjekte, sondern Rahmenbedingungen dar. Sie beeinflussen und limitieren logistische Netzwerke beispielsweise hinsichtlich deren Fließfähigkeit. Güterströme fließen somit auf Verkehrsadern durch logistische Netzwerke (Bretzke 2015).

Wesentliche Eigenschaften logistischer Distributionssysteme sind insbesondere ein von der Quelle aus gesteuerter Warenfluss und ein divergentes Muster. Dabei ist der nachfolgend genutzte

logistische Distributionsbegriff klar von der volkswirtschaftlichen Bedeutung als Gestaltung von Absatzkanälen abzugrenzen und beschreibt ausschließlich die bedarfsorientierte Verteilung von Waren in logistischen Netzwerken (Bretzke 2015). Ein Distributionssystem der Konsumgüterindustrie hat beispielsweise zur Aufgabe, die hergestellten Produkte aus einem oder wenigen Werken an viele Anlieferpunkte zu verteilen. Typischerweise enthält ein Netzwerk zur deutschlandweiten Distribution drei Transportstufen: Transporte von Werken zu Zentrallägern, Transporte von Zentrallägern zu Umschlags- oder Transshipmentpunkten und schließlich die Feinverteilung von Umschlagspunkten zu den Kunden. Zudem ist gelegentlich die Direktbelieferung von Kunden ab Werk oder eines der Zentralläger für größere Sendung sinnvoll, um Skaleneffekte zu erzielen (Fleischmann 2008).

Abbildung 1 stellt die beschriebenen drei Transportstufen exemplarisch dar.

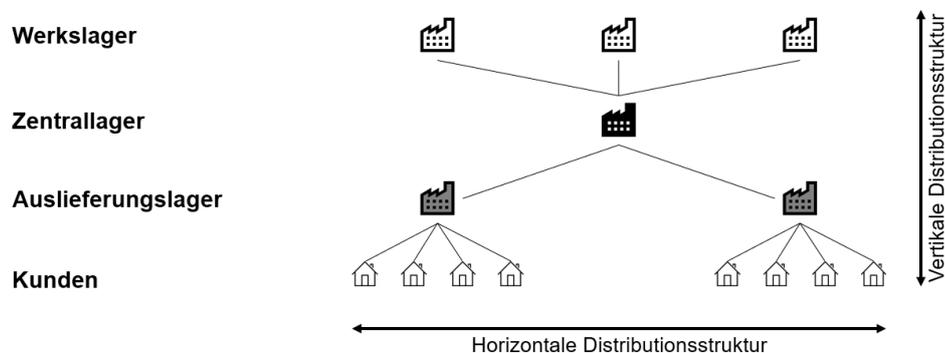


Abbildung 1: Stufen eines Distributionsnetzes nach Vastag (2008) und Fleischmann (2008)

Aus Abbildung 1 lässt sich zudem die Unterscheidung zwischen horizontaler und vertikaler Distributionsstruktur gut erkennen. Die vertikale Struktur eines Distributionsnetzes steht demnach für die Anzahl der Lagerstufen, die von der Produktion der Güter im Werk bis zur Zustellung beim Kunden durchlaufen werden. Diesbezüglich lassen sich Distributionssysteme weiter in ein- und mehrstufige Systeme untergliedern. Während in einstufigen Systemen lediglich ein einziger Umschlagvorgang (z.B. im Zentrallager) erfolgt, finden in mehrstufigen Systemen mehrere Umschlagvorgänge statt. In der Praxis sind bis zu drei vertikale Lagerstufen denkbar, welche jeweils verschiedene Aufgaben wahrnehmen. Dabei ist zu beachten, dass eine hohe Stufigkeit zwar einerseits kurze Wege und Lieferzeiten auf der letzten Stufe und damit prinzipiell niedrigere Transportkosten auf dieser Stufe ermöglicht, allerdings auch mit hohen Beständen und Lagerhaltungskosten im gesamten System einhergeht. Zudem führt eine große Anzahl an Stufen unweigerlich zu komplexerer Material- und Informationssteuerung (Vastag 2008). Jede weitere Stufe ist somit mit zusätzlichen Kosten verbunden. Daher wird in der Regel versucht die Anzahl der Stufen in einem Distributionssystem möglichst gering zu halten (Bretzke 2015).

Dem gegenüber steht die horizontale Distributionsstruktur für die Anzahl der Lager je Stufe sowie deren Standorte und Zuordnung zu den jeweiligen Absatzgebieten. Die benötigte Anzahl der Lager je horizontaler Distributionsstufe ergibt sich in der Regel aus der Funktion der Lager- und Umschlagpunkte und deren Entfernung zum Kunden. Generell gilt, dass mit einer zunehmenden

Anzahl von Lagerorten auch die Bestandskosten steigen, während die Transportkosten von den Lägern zu den Kunden abnehmen. Aus dieser gegenläufigen Kostenbeziehung ergibt sich eine komplexe Entscheidungssituation, die mit entsprechenden Lösungsverfahren jedoch zumindest prinzipiell optimal gelöst werden kann (Vastag 2008).

Bezüglich ihrer Transportstruktur können logistische Netzwerke zur Distribution zudem grundsätzlich in dezentrale und zentrale Netze unterschieden werden. Ein Transportnetz besteht aus diversen regionalen Umschlagspunkten, die jeweils ein bestimmtes Einzugsgebiet bedienen. Die Bedienung dieser Einzugsgebiete geschieht sowohl im Vorlauf (auch: Sammelfahrten oder Pick-Up-Touren) als auch im Nachlauf (auch: Verteilfahrten oder Letzte Meile) im Allgemeinen mit kleineren Fahrzeugen als im Hauptlauf. In zentralen Netzwerken (auch: Hub and Spoke-Netzwerke) sind alle regionalen Umschlagspunkte mit einem zentralen Umschlagspunkt verbunden, über den die Ladungen aus den jeweiligen Regionen auf den Hauptläufen umsortiert und gebündelt werden. Alle Transporte in einem solchen System finden als gebrochene Transporte über den zentralen Umschlagspunkt statt. In dezentralen Netzen sind alle regionalen Umschlagspunkte in den Hauptläufen über direkte Transporte miteinander verbunden. Auf diesen finden regelmäßige Hin- und Rückläufe statt. (Gudehus 2012).

Gerade die letzte Meile ist dabei in der Regel jedoch deutlich teurer als der Hauptlauf. Die Gründe dafür sind beispielsweise das ungünstige Verhältnis von Anschaffungskosten und Nutzlast der im Nachlauf eingesetzten Fahrzeuge oder auch die geringe Durchschnittsauslastung dieser Fahrzeuge. Eine geringe Durchschnittsauslastung im Nachlauf resultiert einerseits aus der sukzessiven Fahrzeugentleerung während einer Tour und andererseits aus fehlenden Rückfrachten bei Verteilfahrten bzw. leeren Anfahrten zu Tourbeginn bei Sammelfahrten. Daher sind Bündelungseffekte bei Zustellverkehren besonders wichtig. Dies zeigt sich auch daran, dass die entscheidende Variable auf der letzten Meile nicht in der Startauslastung der Fahrzeuge besteht, sondern vielmehr in der Dichte der Touren und in der Auslieferungsmenge pro Stopp. Die Dichte einer Tour entspricht dabei dem durchschnittlichen Abstand zwischen zwei Stopps (Bretzke 2014).

Nachfolgende Abbildung 2 stellt den eben beschriebenen Sachverhalt und die beiden Aufbauvarianten logistischer Netzwerke übersichtlich dar.

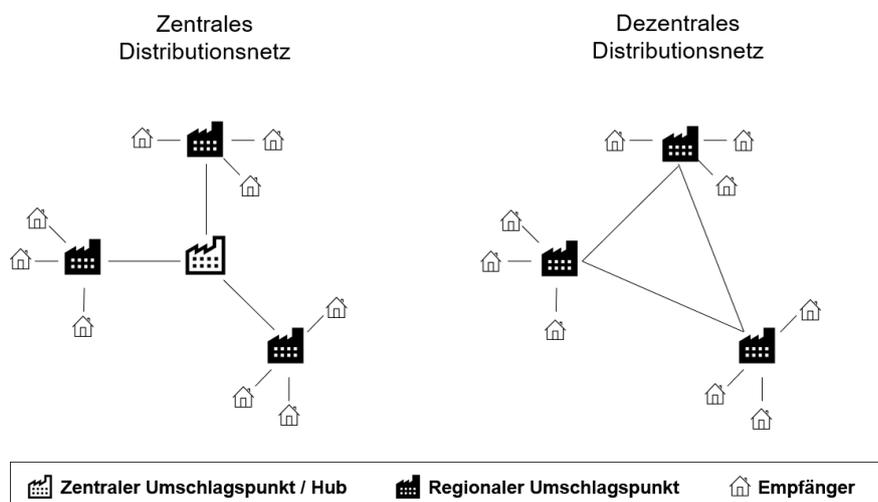


Abbildung 2: Zentrales und Dezentrales Transportnetz nach Gudehus (2012)

Während die Vorteile dezentraler Netze insbesondere in im Mittel kürzeren Distanzen und Transportzeiten zwischen den Umschlagspunkten liegen, bestehen die Nachteile vor allem in der geringeren Auslastung großer Transportmittel bei höheren Transportfrequenzen. Skaleneffekte sind in dezentralen Logistiknetzen daher nur schwer umsetzbar. Hub and Spoke-Systeme dagegen zielen auf die Nutzung solcher *Economies of Scale* ab. Somit können in zentralen Netzen für die Hauptläufe entweder größere Transportmittel gut ausgelastet betrieben oder kleinere Transportmittel mit einer entsprechend höheren Beförderungsfrequenz eingesetzt werden als in dezentralen Netzwerken. Zudem verringert sich die Anzahl der benötigten Transportrelationen zur Verbindung aller Netzwerkknoten von maximal $N(N-1)/2$ benötigten Relationen in dezentralen Netzen im Fall zentraler Netze um den maximalen Faktor von $(N-1)/2$. Nachteile zentraler Logistiknetze sind in Kostensteigerungen sowie Zeitverlusten für den zusätzlich nötigen Umschlag im Hub und in längeren Transportwegen für Lieferungen zwischen benachbarten Umschlagspunkten zu finden (Gudehus 2012).

Klassische Handelsunternehmen verwenden zur Filialversorgung typischerweise zentrale Versorgungsnetzwerke. Die Filialbelieferung erfolgt von einem Standort, die Bevorratung des Nachschubs wird zentral durchgeführt. Die Distributionszentren in solchen Versorgungsnetzen sind auf die Verarbeitung großer Mengen ausgerichtet. Für klassische Handelsunternehmen gestaltet sich diese zentrale Struktur bei der Vereinigung von Filial- und Internetgeschäft jedoch häufig problematisch. Einerseits fehlt die Nähe zum Kunden, andererseits sind die bestehenden Distributionszentren nicht auf die Bearbeitung vieler Aufträge mit wenigen Positionen ausgelegt. Im E-Commerce erfolgt die Ware Zustellung häufig durch Logistikdienstleister. Diese Dienstleister verwenden in der Regel eine stark dezentrale Struktur, um große Flächen abzudecken und näher am Kunden operieren zu können. Große Internetshops betreiben mittlerweile häufig eigene Distributionszentren, um Wettbewerbsvorteile zu generieren. Diese sind im Gegensatz zu den Distributionszentren des klassischen Handels jedoch auf wenige Positionen pro Auftrag bei einer entsprechend großen Anzahl an Aufträgen ausgelegt (Alicke 2005).

In der Praxis bestehen logistische Netzwerke in der Regel aus einer Kombination zentraler und dezentraler Netze. Dies liegt vor allem an je nach Region unterschiedlichen Anforderungen und unregelmäßig verteilten Frachtaufkommen zwischen den verschiedenen Regionen (Gudehus 2012). Laut Logistikdienstleistern besteht die in diesem Abschnitt beschriebene letzte Meile in Transportnetzwerken üblicherweise aus 20 bis 50 Zustellungen in Gebieten mit hoher Bevölkerungsdichte und legt dabei eine Gesamtdistanz von 150 bis 200 Meilen zurück (Goodman 2005). Über die jeweils gemittelten Werte und die Umrechnung von Meilen in Kilometer ergibt sich somit eine durchschnittliche Distanz von ca. acht Kilometern, die typischerweise zwischen den Zustellpunkten bei Versorgungsverkehren der letzten Meile liegen.

Der Vollständigkeit halber soll abschließend an dieser Stelle auch der Order Penetration Point (OPP) erwähnt werden. Der OPP beschreibt in logistischen Distributionsnetzwerken den Punkt, an dem der Übergang von planbasierten (auch: Push) zu auftragsbasierten (auch: Pull) Prozessen stattfindet. Er entspricht zudem auch dem letzten Punkt der Lieferkette, an dem noch Bestände gelagert werden (Bretzke 2015).

2.2. Distributionsnetzwerke vor dem Hintergrund der globalen Urbanisierung

Verkehrsstaus werden als das Hauptproblem von Megacities angesehen und stellen dabei sowohl Themen hinsichtlich Energie- und Wasserversorgung als auch bezüglich Gesundheit und Sicherheit in den Schatten (Bretzke 2013). Dabei wird gerade die Kombination aus überlasteten Verkehrsinfrastrukturen, umweltpolitisch motivierten staatlichen Interventionen und dem zunehmend steigenden Ölpreis zu einer neuen Herausforderung für Logistikdienstleister. Bretzke (2015) sieht vor diesem Szenario je nach Ausgangssituation auch die Möglichkeit eines Trends zur verstärkten Dezentralisierung logistischer Netzwerke. In mehrstufigen dezentralen Netzen wird zudem der Order Penetration Point - und damit einhergehend auch die Bestände – zunehmend in Kundennähe verschoben. Dadurch können nach Bretzke (2014) mehrere positive Effekte erzielt werden, welche ausschließlich in dezentralen Netzen möglich sind:

Die Varianz des täglichen Auftragseingangs verliert durch die umfassendere Push-Strategie und die daraus resultierende Verschiebung des OPP ihren Einfluss auf die Kapazitätsauslastung in den Hauptläufen.

Die Frequenz der Hauptläufe zur Versorgung der Lager kann auftragsunabhängig festgelegt werden, was eine bessere Planbarkeit und somit die gleichmäßig hohe Auslastung der Primärtransporte ermöglicht.

Die zunehmende Unberechenbarkeit von Transportzeiten durch Staus beeinflussen dezentrale Netze durch die beschriebene Verschiebung des OPP weniger, da Primärtransporte besser planbar sind und so beispielsweise in Nachstunden verlegt werden können.

Insgesamt können somit stabile Lieferzeiten und kurze Fahrzeugumlaufzeiten realisiert werden, während auch Umwelt, Kostenrechnung und Verkehrsinfrastruktur entlastet werden. Gleichzeitig ist es jedoch enorm wichtig, ein stufenübergreifendes integriertes Bestandsmanagement umzusetzen, um die Gefahr des bei entkoppelten Dispositionsstufen drohenden „Bullwhipeffekts“ zu eliminieren (Bretzke 2014). Zudem sind Unternehmen heutzutage oft dazu gezwungen, sowohl auf vertikaler als auch auf horizontaler Ebene ihres erweiterten Supply-Chain-Netzwerkes mit Partnern zu kollaborieren. Dabei werden seitens der Partner häufig integrierte Prozesse und Systeme gefordert. Somit muss ein Umdenken von Unternehmens-Denken zu Netzwerk-Denken stattfinden (Handfield et al. 2013).

Ein weiterer wesentlicher Faktor ist die Veränderung der Siedlungsstruktur. Da Ballungsräume einerseits rapide wachsen und ländliche Regionen andererseits immer dünner besiedelt sind, werden alternative Logistikkösungen gefordert. Diese Lösungen müssen es ermöglichen, Güter sowohl in den überlasteten Innenstädten als auch über weite Entfernungen in ländlichen Gebieten kundentreue, zeitnah, umweltschonend und nicht zuletzt auch kostengünstig zu liefern. Gerade in zunehmend dünner besiedelten ländlichen Gebieten sind Transport und Zustellung von Gütern mit traditionellen Konzepten in Zukunft kaum wirtschaftlich umzusetzen. Die Gründe dafür liegen insbesondere in der geringen Dichte der Zustell- und Abholpunkte und der daraus resultie-

renden geringen Auslastung der genutzten Fahrzeuge. Dieser Sachverhalt führt in letzter Konsequenz zur Reduzierung des Lieferservice. Vor diesem Hintergrund existieren unterschiedlichste Ansätze, welche sich beispielsweise auf eine umfassendere Shareconomy beziehen (Lehmacher 2015). Diese sollen jedoch nachfolgend nicht näher betrachtet werden. Es stehen lediglich urbane Versorgungsszenarien im Fokus.

Neben den genannten strukturellen Herausforderungen spielt auch der Umweltaspekt eine zunehmend wichtigere Rolle. So entstehen 40% der beim Landtransport aufkommenden CO₂-Emissionen in den Städten. Durch die extrem hohe Bevölkerungsdichte in urbanen Räumen werden auch die Anforderungen an die Logistik vor allem in Bezug auf Feinstaubemissionen, Stickoxide und Lärm in Städten somit ungleich herausfordernder. Von politischer Seite wird versucht, der zunehmenden Schadstoffbelastung unter anderem durch die Einführung von Umweltzonen entgegenzuwirken. Im Ruhrgebiet bilden beispielsweise die Städte Bochum, Bottrop, Castrop-Rauxel, Dortmund, Essen, Gelsenkirchen, Gladbeck, Herne, Herten, Mülheim/Ruhr, Oberhausen und Recklinghausen eine einzige Umweltzone (Lehmacher 2015). Logistikunternehmen müssen sich vor diesem Hintergrund anpassen. So stellte die Deutsche Post DHL die Zustellung in Bonn und dem Bonner Umland auf Elektrofahrzeuge um. Pro Jahr sollen durch die Nutzung von 141 speziell für die Ziele der Deutschen Post DHL entwickelten Elektrofahrzeuge bis zu 500 Tonnen CO₂ pro Jahr eingespart werden können (Deutsche Post DHL 2013). Andere Ansätze zur Verkehrsentslastung seitens der Politik wurden beispielsweise in Form einer City-Maut bereits 2003 in London umgesetzt. Obwohl diese zu Beginn als Erfolgsmodell galt, hat sich die Durchschnittsgeschwindigkeit von 19 Kilometer pro Stunde im Jahr 2008 innerhalb von neun Jahren auf ein Rekordtief von aktuell nur noch 13 Stundenkilometern im März 2017 verringert (statista.com 2017; Finke 2017). Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich die Distributionsstruktur logistischer Netzwerke vor dem Hintergrund der fortschreitenden Urbanisierung voraussichtlich zunehmend dezentralisieren wird. Weitere Herausforderungen bestehen in verkehrspolitischen Einschränkungen wie beispielsweise Umweltzonen oder Road-Pricing-Modellen.

2.3. Forschung und Innovation im Bereich urbaner Distribution

Zur Bewältigung der logistischen Herausforderungen, welche sich durch die globale Urbanisierung und den sich daraus ergebenden Anforderungen stellen, sind neue Logistikkonzepte nötig. Diese werden sowohl seitens der Wissenschaft als auch von Seiten der Wirtschaft kontinuierlich gefördert. Der Spielraum neuer Logistik- und Versorgungskonzepte ist dabei weit gefächert und deckt sowohl Infrastrukturelle als auch Technologie- und Prozessorientierte Ansätze ab.

Bezüglich zukünftiger infrastruktureller Rahmenbedingungen sind sich Marktexperten einig, dass der Bedarf an kleinen oder mittelgroßen Lägern in Innenstädten aufgrund des stark wachsenden E-Commerce in Zukunft zunehmen wird. Dieser Bedarf ergibt sich aus der zunehmenden Verschiebung des OPP in Richtung der Kunden, um Same-Day- und Same-Hour-Lieferungen umsetzen zu können. Aus der wachsenden Anzahl von Online-Lebensmittelhändlern lässt sich zudem ein steigender Bedarf an für Frischelogistik geeigneten Flächen ableiten. Das enorme Tempo der Entwicklung von Konzepten zur urbanen Versorgung birgt jedoch auch einige Unsicherheiten, da unklar ist, welche Konzepte sich auch langfristig bewähren. Ein Ansatz in diesem Bereich besteht

beispielsweise in sogenannten Hybridgebäuden. Diese eignen sich sowohl für klassische Ver- und Entsorgungslogistik im Filialgeschäft als auch für E-Commerce-Modelle. In Expertenkreisen herrscht über dieses Konzept jedoch Uneinigkeit. Einige Experten ziehen Hybridgebäuden klassische Logistikanlagen mit flexibel aufteilbaren Flächen vor. Gerade infolge der Start-up-Welle geht der Trend allerdings klar zu immer kürzeren Mietzeiten und der Nachfrage nach kleinteiligen aber flexibel an die Nutzerbedürfnisse anpassbaren Flächen (Bennühr 2017).

Als logistische Schlüsseltechnologien für die nahe Zukunft identifizieren Logistikberatungen beispielsweise künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen, Sensortechnik sowie digitale Vernetzung. Auch und insbesondere die technologischen Fortschritte im Kontext mobiler Energiespeicher werden als zukünftige Schlüsseltechnologie mit enormem Disruptionspotenzial angesehen. In diesem Bereich wurden bereits deutliche Verbesserungen erreicht, wobei auch in Zukunft mit weiteren Fortschritten zu rechnen ist. Gerade leistungsfähige Batterien bilden die Grundlage für eine Vielzahl technologischer Techniken wie Drohnen oder auch Elektrofahrzeuge (Gross und Wolff 2017). Allgemein wird Elektromobilität für zukünftige urbane Distributionsszenarien eine zunehmend wichtigere Rolle spielen. Dies bedeutet gleichzeitig jedoch auch eine große Herausforderung hinsichtlich der Stromversorgung der genutzten Geräte (Bennühr 2017). Oftmals handeln Logistikunternehmen bezüglich des Themas Elektromobilität allerdings nicht ausschließlich aus ökologischen Gründen. Häufig spielt auch die Sicherstellung der Zustell- und Abholtätigkeit in Innenstädten eine zentrale Rolle. Wenn Innenstädte aufgrund der zunehmenden Feinstaubbelastung gesperrt werden, droht Logistikdienstleistern dadurch eine maßgebliche Beeinträchtigung des operativen Geschäfts (Lehmacher 2015). Vor diesem Hintergrund erproben Logistikdienstleister auch alternative Ansätze zur urbanen Feinverteilung. So steht der Begriff „disruptive Logistik“ beispielsweise für Geschwindigkeitssteigerungen in der Auslieferung, welche mit innovativen Lösungen für die letzte Meile gekoppelt sind. Ein gutes Beispiel stellt das Prime-Air-Projekt von Amazon dar. Im Wesentlichen basiert dieses Konzept auf dem Einsatz von Drohnen. Diese Fluggeräte könnten auf der letzten Meile eingesetzt werden und die überlasteten urbanen Transportwege überfliegen. Auch wenn die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Drohnen in Innenstädten noch nicht geschaffen wurde, stößt der Ansatz zur Verwendung kleinerer Transportmittel zur urbanen Feinverteilung dennoch vorwiegend auf Zustimmung. So experimentieren Paketdienstleister neben der Verwendung von Drohnen unter anderem auch mit Lastenfahrrädern oder kleinen Elektrofahrzeugen für Transporte auf der letzten Meile (Rodenhäuser und Rauch 2015).

Andere Konzepte zur innerstädtischen Feinverteilung wurden teilweise schon erfolgreich umgesetzt. So errichtete ein französischer Logistikanbieter in Paris bis 2015 acht urbane Läger, welche ein außerstädtisches Zentrallager ablösen. Mit diesem Konzept soll die urbane Distribution effizienter organisiert und zudem von kleinen Elektrofahrzeugen und schadstoffarmen Transportern durchgeführt werden. Bezüglich der innerstädtischen Feinverteilung sind außerdem Konzepte denkbar, bei denen Online-Shops eng mit anderen Dienstleistern kooperieren. Wird im Online-Shop bestellt und ein kooperierender lokaler Einzelhändler hat den gekauften Artikel vorrätig, werden die entsprechenden Lieferinformationen an den Online-Shop weitergegeben und die Bereitstellung des Artikels erfolgt durch den lokalen Einzelhändler. Die Zustellung wird von lokalen

Lieferservices durchgeführt. Bei diesem Konzept, welches in Großbritannien bereits erfolgreich umgesetzt wurde, sind Wunsch-Lieferzeiten von 90 Minuten denkbar (Lehmacher 2015).

Im Rahmen des EffizienzCluster LogistikRuhr wurde ein weiterer Ansatz zum Thema „Urban Retail Logistics“ untersucht. Auch dabei ging es konkret um die Weiterentwicklung der Feindistribution. Im Zentrum der Betrachtungen stand die Verwendung eines Urban Hub als zentraler Umschlagpunkt für die logistische Abwicklung hoch individualisierter Warenströme. Das Urban Hub nimmt dabei die Bündelung unternehmens- und sortimentsübergreifender Warenströme zur urbanen Versorgung vor und agiert als infrastruktueroptimierter und ressourcenschonend ausgerichteter Logistikstandort. Zudem wurden innerhalb des Projektes Konzepte zur geräuscharmen Nachtlieferung oder zur intelligenten Versorgung innenstädtischer Filialen erarbeitet. Zum Funktionieren des Urban Hubs ist eine erhebliche Intelligenz nötig, welche durch den Einsatz eines „Urban Information Systems“ erreicht wird (EffizienzCluster LogistikRuhr 2017). Der große Vorteil beim Einsatz eines Urban Hubs besteht insbesondere in der kooperativen Nutzung des Hubs. Somit kann die Anzahl der zur urbanen Versorgung benötigten Liefertouren deutlich verringert werden, während diese Touren entsprechend besser ausgelastet sind (Rodenhäuser und Rauch 2015). Für Dortmund wäre durch die Nutzung eines Urban Hubs beispielsweise eine Reduktion der LKW-Einfahrten um bis zu 30% möglich (EffizienzCluster LogistikRuhr 2017).

3. Grundlagen der Simulation sowie der Modellierung von Distributionsnetzwerken

Im logistischen Kontext bietet Simulation die Möglichkeit zur detaillierten Abbildung dynamischer Systeme mitsamt deren stochastischen Eigenschaften und komplexen Beziehungen zwischen den einzelnen Systemkomponenten. Über Zählungen und Messungen während eines Simulationslaufs können Aussagen über das Systemverhalten getroffen werden (Goedicke 2013). Insbesondere aufgrund ihrer Komplexität sind zahlreiche Planungsprobleme mit logistischem Hintergrund für den Einsatz von Simulationswerkzeugen prädestiniert, wobei das Spektrum simulationstechnischer Einsatzmöglichkeiten enorm weit gefächert ist. Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Detaillierungsgrade können beispielsweise sowohl einzelne Produktionsanlagen als auch komplette Supply Chains modelliert werden. Dabei ist anzumerken, dass die jeweils relevanten Systemkomponenten je nach Modellierungszweck variieren. Die Vorteile beim Einsatz von Simulationstechnik in logistischen Systemen sind vielfältig. Alternative Strategien können untersucht und mit entsprechenden Kenngrößen bewertet werden. Somit bilden Simulationswerkzeuge eine unterstützende Grundlage zur Entscheidungsfindung. Zudem erlauben Simulationsmodelle eine schnelle Reaktion auf veränderte Situationen und ermöglichen weiterhin die Berücksichtigung unscharfer und stochastischer Daten (Eley 2012). Das nachfolgende Kapitel legt den Fokus auf die Grundlagen von Simulation und Modellierung und soll als theoretische Grundlage für die weitere Bearbeitung dienen. Dazu werden zunächst allgemeine Grundlagen der Simulation beschrieben. Anschließend wird die Modellbildung mit speziellem Fokus auf logistische Distributionsnetzwerke beleuchtet. Danach werden Distributionsnetzwerke und deren Umsetzung in Simulationsmodellen aufgezeigt. Die Charakterisierung gängiger Distanzmetriken bildet den Abschluss des Kapitels.

3.1. Grundlagen der Simulation

Gemäß der Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure 3633 Blatt 1 (2014) ist Simulation das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Ereignissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt. Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden.

Ein System stellt dabei eine Menge von Objekten (auch Komponenten oder Elemente) dar, welche untereinander in Beziehung stehen können und in der Regel durch Attribute (auch Eigenschaften) charakterisiert werden. Alle Objekte eines Systems, deren Beziehungen untereinander sowie die Werte der jeweiligen Attribute bestimmen den Zustand des Systems. Zudem ist ein System häufig in eine Systemumwelt mit gewissen Abhängigkeiten eingebettet (Hedtstück 2013). Simulation ist

somit das Nachbilden eines Systems, während das zugehörige Modell als Simulationsmodell bezeichnet wird. Ein Experiment oder auch Simulationslauf ist die Nachbildung des Systemverhaltens mit einem Modell über einen bestimmten Zeitraum. Die Zeitspanne der Systemanalyse wird als Simulationszeitraum bezeichnet. Demgegenüber steht die Simulationszeit, welche die im realen System voranschreitende Zeit im Simulationsmodell abbildet (Eley 2012).

Abbildung 3 stellt unterschiedliche Systemtypen und deren Ausprägungen übersichtlich dar.

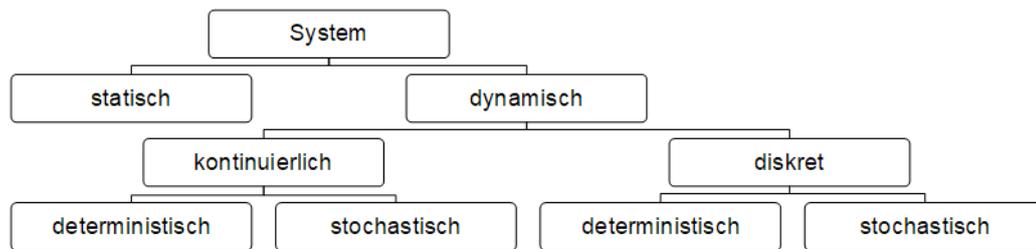


Abbildung 3: Unterschiedliche Systemtypen nach Hedtstück (2013)

Simulationsexperimente als dynamische Systeme können entsprechend der in Abbildung 3 dargestellten Systemtypen grundsätzlich nach kontinuierlichen und diskreten Simulationsmethoden unterschieden werden. In der kontinuierlichen Simulation erfolgt zu jedem Zeitpunkt eine stetige Abbildung der Zustandsvariablen über eine Menge gekoppelter Differentialgleichungen. Dem gegenüber steht die Methode der diskreten Simulation, die durch eine Betrachtung von Zustandsänderungen innerhalb des Systems zu diskreten trennbaren Zeitpunkten gekennzeichnet ist (Goedicke 2013). Der Zeitpunkt an dem das Ereignis eintritt hat in Prozessen in der Praxis dabei in der Regel einen stochastischen Hintergrund und kann somit nicht vorhergesagt werden. Ist eine Vorhersage bezüglich eines Ereignisses möglich, handelt es sich um ein deterministisches System (Hedtstück 2013). Diskrete Simulationsmethoden können weiterhin in zeitgesteuerte und ereignisorientierte diskrete Simulationsmethoden unterteilt werden. Wenn die Simulationszeit einer Simulation in – im Allgemeinen – gleich großen Zeitintervallen erhöht wird und die Zustandsänderungen jeweils nach Ablauf eines Intervalls erfasst werden, werden zeitgesteuerte diskrete Simulationsmethoden eingesetzt. Werden Zustandsänderungen registriert sobald ein Ereignis eintritt, handelt es sich um ereignisdiskrete Simulation. In Logistiksystemen werden in der Regel ereignisdiskrete Simulationsexperimente angewendet, da die Veränderung von Systemzuständen innerhalb solcher Systeme typischerweise durch stochastische Ereignisse verursacht wird. Prinzipiell sind auch statische und analytische Berechnungsverfahren geeignet, um Aussagen über die zu untersuchenden logistischen Systeme zu liefern. Allerdings ist die Bearbeitung typischerweise dynamischer logistischer Problemstellungen und der damit verbundenen Komplexität mit analytischen Berechnungsverfahren nur sehr bedingt möglich (Goedicke 2013).

Nachfolgend wird ein Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien erläutert, welches in Abbildung 4 dargestellt ist.

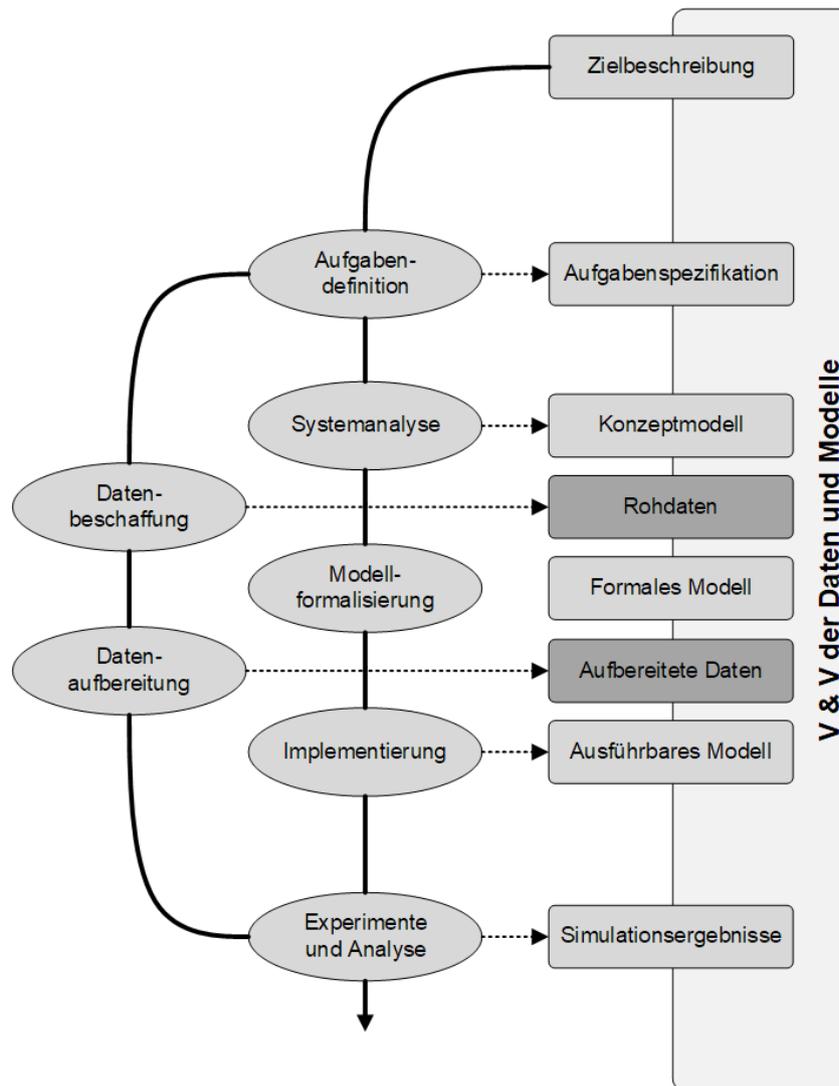


Abbildung 4: Vorgehensmodell bei Simulationsstudien nach Rabe et al. (2008)

Abbildung 4 stellt die elementar zu bearbeitenden Phasen einer Simulationsstudie übersichtlich dar. Im Modell werden Projektphasen als Ellipsen und Phasenergebnisse als abgerundete Kästen dargestellt. Ob die Simulationsstudie intern Beauftragt oder an einen externen Dienstleister vergeben wird, spielt dabei keine Rolle. Die Projektphasen einer Simulationsstudie sind somit Aufgaben- und Systemanalyse, Modellformalisierung, Implementierung sowie Experimente und Analyse. Die einzelnen Phasenergebnisse können beispielsweise Modelle und Dokumente sein, wobei auch eine Kombination aus beidem möglich ist. Die Zielbeschreibung am Anfang einer Simulationsstudie bildet die Ausgangsbasis einer Simulationsstudie und ist somit nicht als Phasenergebnis zu betrachten. Die Projektphasen „Datenbeschaffung“ und „Datenaufbereitung“ mit den Phasenergebnissen „Rohdaten“ und „Aufbereitete Daten“ sind in Abbildung 4 grafisch von den übrigen Phasen abgegrenzt, da sie im Gegensatz zu den übrigen Phasen einer Simulationsstudie zeitlich, inhaltlich und hinsichtlich der involvierten Personen unabhängig von der Modellierung erfolgen können. Das Vorgehensmodell schreibt lediglich vor, dass Rohdaten zur Datenaufbereitung vorausgesetzt werden, die Resultate der Aufgabenspezifikation von der Datenbeschaffung verwendet werden und dass aufbereitete Daten zur Anwendung des ausführbaren Modells vorhanden sein müssen. Weiterhin fällt auf, dass im in Abbildung 4 abgebildeten Vorgehensmodell

bei Simulationsstudien Verifikation und Validierung (V&V) nicht als eigenständige Phasen dargestellt sind. V&V wird häufig als abschließender Schritt bei der Implementierung eines Simulationsmodells betrachtet. Zu diesem Zeitpunkt ist die Durchführung von V&V allerdings wirtschaftlich unsinnig, da ein frühzeitiges Erkennen und Beheben etwaiger Fehler in dieser späten Phase in der Regel nicht mehr möglich ist. Auch aufgrund der enormen Komplexität von Simulationsmodellen kann eine rein auf den Endergebnissen basierende V&V nicht zuverlässig sein. Somit ist eine durchgängige V&V in allen Phasen des Modellierungsprozesses erforderlich. Bei jedem sinnvollen Zwischenstand im Modellierungsprozess ist dieser unmittelbar zu validieren, um Fehler im Modell frühzeitig erkennen und beheben zu können. Mit dieser Vorgehensweise können die Auswirkungen auftretender Fehler hinsichtlich des Modellierungsaufwands bestmöglich begrenzt werden (Rabe et al. 2008).

Somit stellt die an Abbildung 4 gut zu erkennende durchgehende Verifikation und Validierung (V&V) der Daten und Modelle eine äußerst wichtige Aufgabe im Modellierungsprozesse dar. Verifikation beschreibt dabei die Überprüfung, ob ein Modell hinsichtlich seiner Beschreibungsart korrekt in eine andere Beschreibungsart überführt wurde. Das verifizierte Modell soll also als korrekt angesehen werden können. Dazu ist anzumerken, dass die vollständige Korrektheit eines Modells aufgrund der gegebenen Komplexität von Simulationsstudien in der Regel nicht komplett überprüft werden kann und sich häufig auf die Überprüfung des Programmcodes beschränkt (Rabe et al. 2008). Im Gegensatz dazu entspricht Validierung der kontinuierlichen Überprüfung, ob das Modellverhalten das abgebildete System hinreichend genau wiedergibt. Dazu können beispielsweise empirisch erhobene Daten aus dem realen System mit Daten verglichen werden, welche durch das Modell geliefert wurden. Die erhobenen Daten müssen allerdings zunächst hinsichtlich ihrer Validität geprüft werden. Genauso müssen aus realen Systemen stammende Daten, welche in das Simulationsmodell einfließen sollen, valide sein. Somit umfasst die Validierung auch die (teilweise unabhängige) Validierung erfasster Daten (Rabe et al. 2008). Zusammenfassend klärt Validierung also die Frage „lösen wir die richtigen Gleichungen?“, während Verifikation die Frage „lösen wir die Gleichungen richtig?“ beantwortet (Bungartz et al. 2009).

Simulationstools werden wie beschrieben häufig zur Lösung komplexer logistischer Probleme genutzt. Die Implementierung von Simulationsmodellen an sich stellt allerdings selbst eine äußerst komplexe Planungsaufgabe dar. Insofern nimmt die Qualitätssicherung in Simulationsstudien eine besondere Rolle ein. Als Erfolgskriterien für Simulationsstudien sind nach Eley (2012) insbesondere folgende Punkte anzusehen:

- Sorgfältige Projektvorbereitung
- Konsequente Dokumentation
- Durchgängige Verifikation und Validierung
- Kontinuierliche Integration des Auftraggebers
- Systematische Projektdurchführung

3.2. Grundlagen der Modellierung

Vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung sind in Bezug auf Abbildung 4 insbesondere die Projektphasen und Phasenergebnisse bezüglich Modellbildung und -formalisierung relevant. Ein Modell stellt eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems dar. Als Erweiterung dazu ist ein Simulationsmodell ein Modell, welches zu Simulationszwecken erstellt wurde. Eine wesentliche Eigenschaft eines Simulationsmodells ist seine Experimentierbarkeit (Kuhn und Wenzel 2008). Dabei ist die Modellbildung von besonderer Relevanz, da in Simulationsstudien gerade die Festlegungen zu einem frühen Zeitpunkt der Studie die späteren Simulationsergebnisse maßgeblich bestimmen (Bungartz et al. 2009). Becker et al. (2012) definieren vor dem Hintergrund der Modelbildung sechs Grundsätze ordnungsgemäßer Modellierung:

Grundsatz der Richtigkeit: Beschreibt die syntaktische und semantische Richtigkeit eines Modells. Das Modell ist also in Struktur und Verhalten korrekt.

Grundsatz der Relevanz: Besagt, dass in einem Modell lediglich Sachverhalte modelliert werden, die für den zugrundeliegenden Modellierungszweck relevant sind.

Grundsatz der Wirtschaftlichkeit: Bedeutet, dass ein Modell so detailliert wie nötig, wegen der Kosten für zunehmenden Detailgrad aber auch so abstrakt wie möglich ist.

Grundsatz der Klarheit: Fokussiert auf die Verständlichkeit eines Modells. Insbesondere sind leichte Lesbarkeit, Anschaulichkeit und Verständlichkeit wichtig.

Grundsatz der Vergleichbarkeit: Besitzt zwei Aspekte. Einerseits sollen gleiche Abläufe in der Realität auch im Modell gleich sein. Zudem sollen Modelle in unterschiedlichen Modellierungssprachen zur Vergleichbarkeit ineinander überführbar sein.

Grundsatz des systematischen Aufbaus: Stellt sicher, dass die Konsistenz des Gesamtmodells gewährleistet wird, wenn Sachverhalte aus unterschiedlichen Sichten beschrieben werden.

Bezüglich Modellierungsansätzen existieren drei grundsätzliche Vorgehensmodelle: Top-down, Bottom-up und Middle-out. Der Top-down-Ansatz startet in der Regel mit einem abstrakten Systemmodell, welches im Lauf der Modellierung jeweils um relevante und detailliertere Komponenten ergänzt wird. Unter Umständen können mit diesem Ansatz sehr schnell gute Modelle generiert werden, sofern zwischen für die Verfeinerung relevanten und für die Verfeinerung nicht relevanten Modellkomponenten differenziert werden kann. Der Bottom-up-Ansatz wird häufig dann verfolgt, wenn bereits kleinere Modellkomponenten verfügbar sind und baut auf kleinen Komponenten aufbauend größere Strukturen. Generell besteht bei diesem Ansatz allerdings die Gefahr, zu detailliert zu modellieren, da der Start auf der Detailebene erfolgt. Die Middle-out-Modellierung stellt einen Ansatz dar, der gegenüber den bereits vorgestellten Vorgehensweisen weniger strukturiert und dafür eher pragmatisch ist. Die Modellierung startet bei der als am wichtigsten erachteten Komponente der Problemlösung, um welche dann die zur Funktion nötige Umgebung entwickelt wird. Im Projektalltag wird gerade dieser Ansatz häufig verfolgt. Jedoch ist es in der Modellierungspraxis unüblich, lediglich eines der beschriebenen Modellierungsverfahren zu nutzen. In der Regel werden Verfahren verwendet, welche in mehreren Iterationen alle dargestellten

Ansätze anwenden. Dabei erfolgt die grobe Modellerstellung mittels Top-down-Ansatz und die Detaillierung unter Zuhilfenahme bereits bestehender Komponenten mittels Bottom-up-Verfahren. Sofern bereits eine Teilproblemlösung vorliegt, wird diese per Middle-out-Ansatz als Startpunkt genutzt (Wenzel et al. 2008).

Die relevanten Projektphasen der Modellierung entsprechend dem in Abschnitt 3.1 vorgestelltem Vorgehensmodell einer Simulationsstudie sowie deren jeweiliger Modelltyp als Phasenergebnisse werden zum besseren Verständnis nochmals in Abbildung 5 dargestellt.

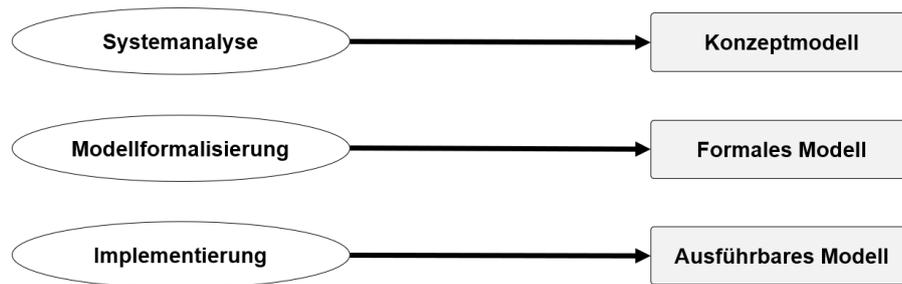


Abbildung 5: Projektphasen zur Modellbildung nach Rabe et al. (2008)

Entsprechend Abbildung 5 resultiert die Systemanalyse im Konzeptmodell. Das Konzeptmodell wird genutzt, um für die Modellformalisierung und die Implementierung die notwendigen Grundlagen zu schaffen (Wenzel et al. 2008). Den Fokus der Systemanalyse bildet die Festlegung aller relevanten Elemente eines realen Systems sowie deren Modellierungsgenauigkeit und Modellierungsmechanismen. Wenn irrelevante Aspekte in die Modellbildung einbezogen werden, sinkt die Effizienz der Modellbildung und der Modellausführung. Im Gegensatz dazu resultiert aus der Vernachlässigung wesentlicher Zusammenhänge ein für die Aufgabenstellung ungeeignetes Modell (Rabe et al. 2008). Ein Konzeptmodell ist rein deskriptiv und beinhaltet eine erste noch nicht formale Beschreibung der zu modellierenden Realität. Es sind bereits die Systemgrenzen sowie alle Systemfunktionen und deren Wechselwirkungen enthalten (Wenzel et al. 2008). Zudem beschreibt das Konzeptmodell sowohl den Umfang des zu erstellenden Modells als auch den erforderlichen Detaillierungsgrad (Rabe et al. 2008). Gerade aufgrund dieser frühen Festlegungen, die sich jedoch auf sämtliche nachfolgende Modellierungsphasen auswirken und die Grundlage dieser Modellierungsphasen bilden, ist die Phase der Systemanalyse für den Modellierungsprozess von besonderer Relevanz.

Die Modellformalisierung, an deren Ende das formale Modell steht, stellt die nächste Phase des Modellierungsprozesses dar. Es wird versucht die Verhaltensweisen und Interaktionen aller Entitäten, die das System umfasst, zu beschreiben. Im Unterschied zum Konzeptmodell besteht in der Phase der Modellformalisierung der Zwang zur Formalisierung. Das formale Modell muss bereits alle für die spätere Implementierung nötigen Bestandteile wie beispielsweise Modellstruktur oder Komponenten und deren Detaillierungsgrad enthalten. Zu beachten ist in der Phase der Modellformalisierung zudem, dass noch nicht für ein bestimmtes Simulationstool modelliert wird, sondern für eine bestimmte Problemstellung (Wenzel et al. 2008; Sanchez 2007). Bei der Modeller-

stellung stellt das ausführbare Modell das primäre Ziel dar. Im Gegensatz zum ausführbaren Modell stellen sowohl das Konzeptmodell als auch das formale Modell eher Zwischenergebnisse dar (Wenzel et al. 2008). In der Implementierungsphase wird zur Realisierung des ausführbaren Modells das formale Modell als Phasenergebnis der Modellformalisierung in eine tatsächliche Implementierung umgesetzt. Hinsichtlich der Implementierung gelten die vier Grundsätze, den Implementierungsaufwand gering zu halten, ein möglichst leicht verständliches Modell zu implementieren, dieses Modell bei Bedarf leicht anpassen zu können sowie eine kurze Ausführungszeit des Modells anzustreben (Wenzel et al. 2008).

Bei der Modellierung entspricht der Grundsatz der Relevanz insbesondere auch der Bestimmung des Detaillierungsgrades und ist somit von zentraler Bedeutung. Generell gilt es ein Modell zu erstellen, welches so abstrakt wie möglich ist. Zu detaillierte Modelle können sich beispielsweise negativ auf die Laufzeit auswirken und somit den Aufwand eines Experiments erheblich steigern. Zugleich ist die modellbasierte Problemlösung nicht oder nur unzureichend möglich, wenn zu abstrakt modelliert wurde. Hier gilt es einen guten Kompromiss zwischen Modellierungsaufwand und Ergebnisgenauigkeit zu finden (Wenzel et al. 2008). Wenzel et al. (2008) empfehlen zur erfolgreichen Modellierung generell folgendes Vorgehen:

- Beginn mit einfachem Modell

- Schrittweise komplexere Modellierung

- Erhöhung der Komplexität zuerst an der für den Modellzweck wichtigsten Stelle

- Regelmäßige Durchführung von V&V

- Eventuell rückwirkende Vereinfachung des Modells bei erfolglosen Modellerweiterungen

3.3. Modellierung logistischer Systeme

Ein logistisches System besteht aus unterschiedlichen Komponenten, die in der Regel weiter untergliedert werden können. Die Beziehung zwischen einzelnen Komponenten wird durch die Aufbaustruktur beschrieben, während die Ablaufstruktur innerhalb der Komponenten von Regeln und Attributen bestimmt wird. Die Schnittstellen zur Umwelt des betrachteten Systems, welche nicht mehr modelliert werden soll, werden als Systemgrenzen bezeichnet. Dennoch steht diese Umwelt durch Quellen und Senken in Beziehung mit dem System und liefert einen gewissen Input oder erhält Output vom System (Goedicke 2013). Innerhalb der Systemgrenzen besteht die Modellierung von Versorgungsnetzwerken aus mehreren Teilen, welche jeweils gewisse Eigenschaften innehaben, und als Submodelle bezeichnet werden. Die Summe aller Submodelle ergibt schließlich das globale Modell, welches über die Modelldatenbank realisiert wird. Dabei repräsentiert jedes Modell eine Instanz der Modelldatenbank. Ein Versorgungsnetzwerk besteht grundsätzlich aus einer gewissen Anzahl an Lieferanten, Produzenten, Vertriebshändlern, Großhändlern und Einzelhändlern. Dabei ist es durchaus möglich die Systemgrenzen so festzulegen, dass lediglich ein bestimmter Abschnitt des Supply-Netzwerkes betrachtet wird (Stefanovic et al. 2009). Der Entwurf zur Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure 4465 Blatt 1 (2016) liefert eine um-

fangreiche Beschreibung zur Modellbildung und von Beschreibungsmitteln zur speziell logistischen Modellerstellung. Insbesondere wird eine systematische Vorgehensweise aufgezeigt, die von einer logistischen Aufgabenstellung zu einem aussagefähigen Modell führt. Die Richtlinie behandelt ereignisdiskrete Modelle und ist als Rahmenwerk zur Modellbildung logistischer Systeme und deren Prozessen und Informationsflüssen zu sehen.

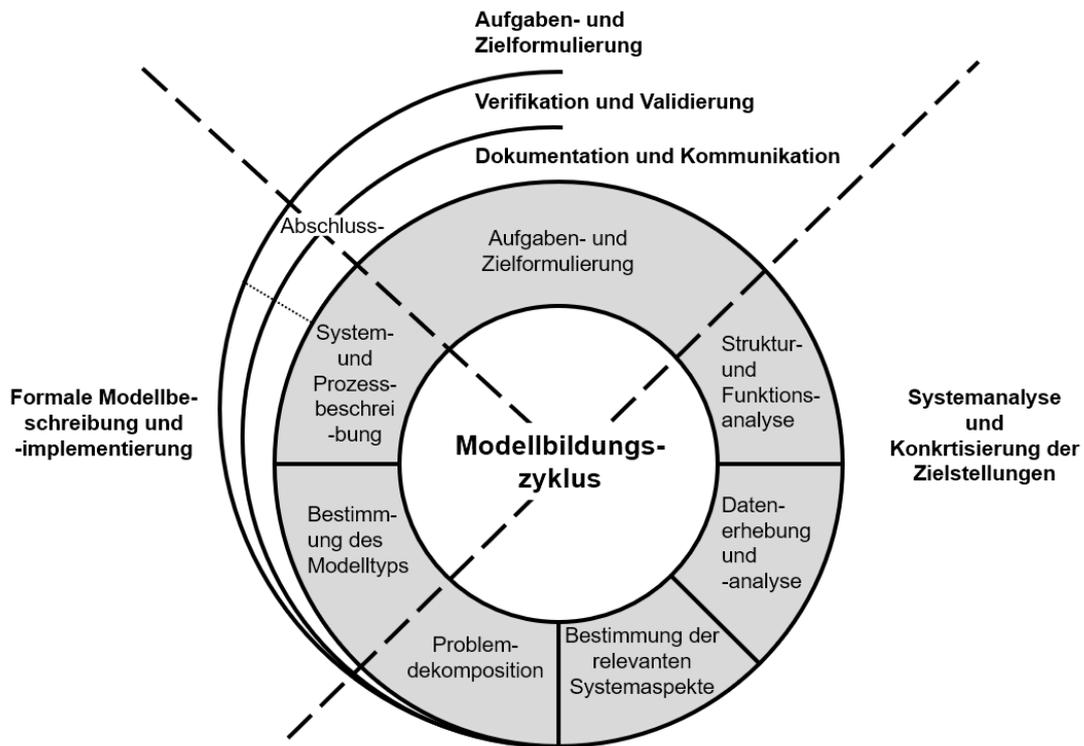


Abbildung 6: Modellbildungszyklus nach der Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure 4465 Blatt 1 (2016)

Die Erstellung eines aussagekräftigen Modells für logistische Problemstellungen erfolgt entsprechend der in Abbildung 6 dargestellten und nachfolgend beschriebenen Phasen. Dabei ist anzumerken, dass der Modellbildungsprozess keinen idealen, determinierten und unumkehrbaren Prozess darstellt, sondern durch die parallele und iterative Bearbeitung einzelner Aufgaben gekennzeichnet ist. (Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure 4465 Blatt 1 2016):

Aufgaben- und Zielformulierung: Stellt die einzige Teilaufgabe der gleichnamigen Phase der Aufgaben- und Zielformulierung dar. Umfasst die Beschreibung der Aufgaben und Ziele, die die Modellierung eines logistischen Systems erfüllen soll und die Festlegung der Rahmenbedingungen, unter denen die Systemstudie erfolgt. Als Beschreibungsmittel werden in dieser Phase natürliche Sprache, Zeichnungen oder auch Darstellungsgraphen wie z.B. Netzpläne empfohlen.

Struktur- und Funktionsanalyse: Ist eine Teilaufgabe der Systemanalyse und Konkretisierung der Ziele. In dieser Phase beginnt die Konkretisierung der Ziele. Insbesondere müssen die relevanten Ursachen-Wirkungsbeziehungen festgelegt werden. Es werden bereits formale Beschreibungsmittel eingesetzt, um Beziehungen zwischen Systemelementen zu beschreiben und quantitative Informationen zuzuordnen. Zu diesem Zweck haben sich Datenflussdiagramme,

UML und Geschäftsprozessmodelle bewährt. Zudem werden in dieser Phase die Systemgrenzen festgelegt. Das Ergebnis der Struktur- und Funktionsanalyse ist ein erstes Konzeptmodell.

Datenerhebung und -analyse: Wie bereits die Struktur- und Funktionsanalyse ist auch die Datenerhebung und -analyse eine Teilaufgabe der Systemanalyse und Konkretisierung der Ziele. Die Datenerhebung stellt eine aufwendige Phase dar, wobei der Umfang der Datenaufnahme von der Komplexität des Systems abhängt. Obwohl sich erst in den Phasen der Problemdekomposition sowie der System- und Prozessbeschreibung klärt welche Daten konkret benötigt werden, bilden diese Daten die Grundlage der System- und Prozessbeschreibung. Somit sind diese Phasen mit der Datenerhebung- und Analyse in einem iterativen Prozess verbunden. Bewährte Beschreibungsmittel sind Darstellungsgraphen, Tabellen und Listen, explorative Statistik oder auch ERM. Als Phasenergebnis liegen die Daten als empirisches Material mit unvollständigen Parametern und Zufallsgrößen sowie unbekanntem Verteilungsgesetzen vor.

Bestimmung der relevanten Modellaspekte: Diese Phase ist eine der wichtigsten Phasen im Modellierungsprozess. Auf Basis des erzielten Systemverständnisses und der bisher gewonnenen Informationen werden die relevanten Systemaspekte festgelegt. Diese Systemaspekte werden im weiteren Verlauf modelliert. Dabei ist häufig zwischen Aufwand und Nutzen zur Modellierung bestimmter Systemaspekte abzuwägen. Empfohlene Beschreibungsmittel in dieser Phase sind Entscheidungstabellen, Organigramme und Vorranggraphen. Auch die Bestimmung der relevanten Modellaspekte stellt eine Teilaufgabe der Systemanalyse und Konkretisierung der Ziele dar.

Problemdekomposition: Durch die Bearbeitung der bisher erfolgten Phasen entsteht in der Regel ein tieferes Verständnis des Ausgangsproblems. Nach der Bestimmung der relevanten Modellaspekte kann somit häufig eine verfeinerte Beschreibung der Aufgabenstellung erfolgen. Neben den vorangehend beschriebenen Aufgaben bildet auch die Problemdekomposition eine Teilaufgabe der Systemanalyse und Konkretisierung der Ziele. Bei der Problemdekomposition wird im Einzelfall festgestellt, wie die übergeordnete Zielstellung auf Teilprobleme heruntergebrochen werden kann. Diese Zerlegung der Problemstellung in Teilprobleme sollte insbesondere bei der Modellierung komplexer Systeme in Betracht gezogen werden.

Bestimmung des Modelltyps: Die Bestimmung eines bestimmten Modelltyps stellt eine wichtige Entscheidung des Modellierungsprozesses dar. Während die vorgelagerten Phasen primär zum verbesserten Systemverständnis dienen, werden mit der Festlegung des Modelltyps die Weichen für die nachgelagerten Analyseschritte gestellt. Somit stellt die Bestimmung des Modelltyps eine Entscheidung über die grundsätzliche Vorgehensweise dar. Diese Bestimmung des Modelltyps entspricht einer Teilaufgabe der formalen Modellbeschreibung und -implementierung. Die wichtigsten Faktoren zur Bestimmung des Modelltyps sind einerseits die Eigenschaften des Systems und andererseits die zu treffenden Aussagen. Abschließend soll noch erwähnt werden, dass es in besonderen Fällen auch sinnvoll sein kann, für unterschiedliche Aspekte der Problemstellung verschiedene Modelltypen zu verwenden und diese Aspekte anschließend getrennt zu analysieren.

System- und Prozessbeschreibung: Die letzte Phase der Modellerstellung ist ebenfalls eine Teilaufgabe der Formalen Modellbeschreibung und -implementierung. In dieser Phase wird ein

Modell erstellt, mit dem durch die Anpassung vorgegebener Parameter quantitative Bewertungen möglich sind. Ein solches Modell wird als experimentierbares Modell bezeichnet. Sofern ein Simulationswerkzeug eingesetzt werden soll, erfolgt die Implementierung des Modells auf Basis der formalen Beschreibung. Beschreibungsmittel in dieser Phase sind Programmier- und Simulationssprachen, Constraint Programming (für Optimierungsmodelle) oder auch mathematische Formeln (z.B. für Warteschlangenmodelle).

Zusätzlich zu den beschriebenen Phasen der Modellbildung kommen Verifikation und Validierung sowie Dokumentation und Kommunikation als kontinuierliche Aufgaben, welche in jeder Modellbildungsphase anfallen. Neben der ständigen Validierung sämtlicher Zwischenergebnisse des Modellierungsprozesses ist eine konsequente und kontinuierliche Dokumentation in allen Phasen der Modellbildung wichtig.

3.4. Charakterisierung gängiger Distanzmetriken

Um zu Simulationszwecken Wegstrecken in Transportnetzwerken abzubilden, ist es nicht zwingend nötig Realdistanzen zu verwenden. Unter Zuhilfenahme diverser mathematischer Funktionen, welche in der Literatur an unterschiedlichster Stelle beschrieben wurden, können die benötigten Wegstrecken auch approximiert werden. Dabei ist es prinzipiell ebenso möglich, kürzeste Routen mittels Dijkstra-Algorithmus oder vergleichbaren Algorithmen zu finden. Dies ist jedoch unter Umständen mit erheblichem Rechenaufwand verbunden (Alanis 2014). Zudem geht die Nutzung exakterer Berechnungsverfahren häufig mit erhöhten Kosten, längerer Berechnungszeit und zusätzlich benötigtem Expertenwissen einher (Apparicio et al. 2003). Demgegenüber stehen Distanzmetriken zur Abschätzung realer Distanzen. Diese können im Gegensatz zu exakten Suchalgorithmen mittels geographischer Koordinaten relativ einfach berechnet werden (Apparicio et al. 2008). Nachfolgend erfolgt die Charakterisierung und ein Vergleich der Zusammenhänge gängiger Distanzmetriken.

Die nachfolgend vorgestellten Metriken erfordern Parameter zur Anpassung und Optimierung der jeweiligen Funktion. Diese werden im Folgenden mit k , p und s bezeichnet und besitzen je nach Distanzfunktion unterschiedliche Anwendungsintervalle oder optimale Ausprägungen je Anwendungszweck. Im Rahmen der Charakterisierung verschiedener Distanzmetriken werden diese Werte aufgezeigt und spezifiziert, sofern dies möglich ist. Dabei ist anzumerken, dass die Notation der Distanzmetriken insbesondere hinsichtlich der Parameterbezeichnung je nach Quelle und Autor variieren kann. Nachfolgend wurde die Parameterbezeichnung jedoch entsprechend angepasst, um die Vergleichbarkeit der verschiedenen Metriken zu garantieren.

Die einfachste der beschriebenen Distanzmetriken stellt die euklidische Distanz dar. Diese beschreibt die kürzeste physikalische Distanz zwischen zwei Punkten und ist im Allgemeinen als Luftlinie bekannt. In einigen wenigen Fällen, wie beispielsweise bei Bewegungen über freie Flächen, ist die euklidische Distanz eine passende Methode zur Messung einer Wegstrecke. Bei der Wegstreckenapproximation in Metropolregionen stellt die euklidische Distanz allerdings eher eine grobe Abschätzung der tatsächlich zurückgelegten Distanz dar (Apparicio et al. 2003). Gleichzeitig bildet sie jedoch die Basis für exaktere Approximationsverfahren.

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (2)$$

Innerhalb der dargestellten Funktionen (1) und (2) beschreiben x und y – jeweils mit den Ausprägungen x_i , x_j sowie y_i und y_j – Punkte innerhalb eines zweidimensionalen Raums. Die Werte für x und y können dabei über die Werte von Latitude (auch: Geographische Breite) und Longitude (auch: Geographische Länge) einer Koordinate bestimmt werden. Am Beispiel eines rechtwinkligen Dreiecks veranschaulicht stellt die euklidische Distanz (1) die Hypotenuse dar, während die Manhattan-Distanz (2) aus der Summe der beiden Kathetenlängen gebildet wird. Apparicio et al. (2003) kommen zu dem Schluss, dass sich sowohl die einfache euklidische Distanz als auch die Manhattan-Distanz in Innenstädten im Allgemeinen zur Wegstreckenapproximation eignen. Werden allerdings Distanzen abgeschätzt, welche weiter vom Stadtzentrum entfernt sind, produzieren diese Metriken zunehmend schwerwiegende und wechselhafte Fehler. Eine häufig genutzte Methode zur Approximation von Realdistanzen ist die Gewichtung der einfachen euklidischen Distanz mit einem entsprechenden Gewichtungsfaktor. Die Anwendung solch geradliniger Distanzmodelle ermöglicht unter Umständen nah am jeweiligen Optimum liegende Lösungen, selbst wenn die Lieferungen über unterschiedliche Routen durchgeführt werden (Love und Morris 1972).

$$d_{ij}(k) = k * \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3)$$

Der in Formel (3) genutzte Faktor k beschreibt die Konstante, mit welcher die euklidische Distanz gewichtet wird. Dieser Gewichtungsfaktor kann je nach Untersuchungszweck unterschiedliche Werte annehmen. Beispielsweise nutzen Cleophas und Ehmke (2014) bei ihrer Untersuchung zur profitableren Gestaltung von Frei-Haus-Belieferungen in Ballungszentren zur Distanzabschätzung mit gewichteten euklidischen Distanzen den Faktor 1,5, um eine Annäherung an kürzeste Wege innerhalb des Straßennetzes zu erhalten. Für den Fall $k=1$ ergibt sich für die in (3) abgebildete Formel folglich die einfache euklidische Distanz. Der optimale Parameterbereich der gewichteten euklidischen Distanz besteht für $1 \leq k \leq 2$. (Love und Morris 1972)

Einen anderen Ansatz, welcher es durch entsprechende Parameteranpassungen ermöglicht die beiden eingangs vorgestellten Distanzfunktionen abzubilden, stellt die Minkowski-Distanz dar.

$$d_m(p) = \left[\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (4)$$

Interessante Aspekte der in Formel (4) dargestellten Minkowski-Distanz (auch l_p -Distanz) bestehen insbesondere für die Parameter $p=1$ und $p=2$ (Love und Morris 1972). Unter Anwendung dieser Punkte können sowohl die einfache euklidische Distanz als auch die Manhattan-Distanz berechnet werden. Während sich für $p=1$ die Manhattan-Distanz ergibt, wird für $p=2$ die euklidische Distanz dargestellt. Im Allgemeinen besteht auch der optimale Parameterbereich der Minkowski-Distanz zwischen diesen beiden markanten Punkten für $1 \leq p \leq 2$ (Love und Morris 1972). Love und Morris (1972) wendeten verschiedene Distanzfunktionen auf zwei Beispieldatensätze an. Der erste Datensatz bezog sich auf den US-Bundesstaat Wisconsin, der zweite Datensatz auf die USA als Ganzes. Dabei ergaben beide Testläufe ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der optimalen Parameter je Funktion und zeigten zudem die Überlegenheit der gewichteten Minkowski-Distanz gegenüber der gewichteten euklidischen Distanz. Wie für die einfache euklidische Distanz existiert auch für die Minkowski-Distanz eine gewichtete Variante:

$$d_m(k, p) = k * \left[\sum_{i=1}^2 |x_i - y_i|^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (5)$$

Ähnlich der gewichteten euklidischen Distanz wird auch bei der gewichteten Minkowski-Distanz ein Faktor k verwendet, mit dem die einfache Minkowski-Distanz multipliziert wird. Sofern $k=1$ gilt, ergibt sich wie bei der einfachen Minkowski-Distanz für $p=2$ die einfache euklidische Distanz und für $p=1$ die Manhattan-Distanz. Sofern $p=2$ gilt und eine Variable (k) verwendet wird, lässt sich somit auch die gewichtete euklidische Distanz mit der gewichteten Minkowski-Distanz abbilden. Der optimale Parameterbereich für die gewichtete Minkowski-Distanz besteht für $0 \leq k, p \leq 2$ (Love und Morris 1972).

Im Rahmen ihrer Untersuchungen zur Modellierung innerstädtischer Distanzen mittels mathematischer Funktionen wendeten Love und Morris (1972) auch die nachfolgende Funktion (6) an:

$$d_m(k, p, s) = k * \left[\sum_{i=1}^2 |x_i - y_i|^p \right]^{\frac{1}{s}} \quad (6)$$

Die in (6) abgebildete Distanzfunktion wurde von Love und Morris im Jahr 1972 ohne genauere namentliche Definition vorgestellt und verwendet. Auch andere Autoren nutzen diese Distanzmetrik an verschiedenen Stellen zur Approximation von Wegstrecken, verweisen dabei jedoch stets auf Love und Morris. Zumal auch der Artikel von Love und Morris zeitlich vor den Artikeln der referenzierenden Autoren erschien, wird die in (6) abgebildete Distanzfunktion im Folgenden als „Formel nach Love und Morris“ bezeichnet.

Resultierend bezeichnen Love und Morris (1979) die in (6) dargestellte Distanzfunktion am Ende ihrer Untersuchungen als die exakteste der betrachteten Funktionen. Dabei wick der Wert von s

bei der Anwendung auf Beispieldistanzen nicht maßgeblich vom Wert für p ab. Der optimale Parameterbereich für die Funktion nach Love und Morris besteht für $0 \leq k, p, s \leq 2$ (Love und Morris 1972). Für die dargestellte Formel (6) existieren folgende Spezialfälle:

$$d_1 = d(k, 2, 2), \quad k > 0,$$

$$d_2 = d(k, p, p), \quad k, p > 0,$$

$$d_3 = d(k, p, s), \quad k, p, s > 0$$

Der erste Fall d_1 entspricht der gewichteten euklidischen Distanz, während d_2 die gewichtete Minkowski-Distanz abbildet. Im dritten Fall d_3 werden schließlich alle verfügbaren Parameter verwendet und können entsprechend angepasst werden. Love und Morris erzielten mit $k=1,15$ sowie $p=s=1,78$ für die USA als Ganzes gute Ergebnisse. Dabei ist anzumerken, dass diese Werte nicht für andere Regionen übernommen werden können und jeweils neu berechnet werden müssen. Dies gestaltet sich in der Regel sehr rechenintensiv (Berens und Körling 1983). Gegenstand der anschließenden Untersuchungen sind somit folgende Distanzmetriken:

Euklidische Distanz

Manhattan-Distanz

Gewichtete Euklidische Distanz

Minkowski-Distanz

Gewichtete Minkowski-Distanz

Formel nach Love und Morris

4. Stadt- und Verkehrsstrukturen

Urbane Strukturen werden durch ablesbare Netzformen, Stadtfeldern, Parzellen und Gebäude, sowie der Logik derer Entstehung gebildet. Bei der Analyse von Stadtformen werden Gesetzmäßigkeiten von Netzen, Flächen oder Baustrukturen gesucht, die sich aus der Entwicklungsgeschichte eines Ortes gebildet haben und die der vorliegenden Struktur zugrunde liegen. Stadtmorphologie beschreibt die Wissenschaft der Gestalt- und Formlehre urbaner Strukturen. Dabei ist jede einzelne Stadt und deren Stadtstruktur durch die gegebenen topologischen Rahmenbedingungen sowie spezifische historische Entwicklungs- und Veränderungsprozesse geprägt (Reicher 2014). Da Infrastrukturelemente wie in Abschnitt 2.1 beschriebenen Rahmenbedingungen für Distributionsnetzwerke darstellen, ist ein Verständnis über urbane Strukturen zu Simulationszwecken urbaner Distributionsnetzwerke von elementarer Relevanz. Dies bezieht sich dabei nicht ausschließlich auf das Netzwerkdesign von Logistikdienstleistern, sondern auch auf die Modellbildung und die Abbildung urbaner Versorgungsnetzwerke in der Simulation. Anwendung und Vergleich der in Punkt 3.4 beschriebenen Distanzmetriken auf wechselnde Stadtformen stellen den Kernpunkt der nachfolgenden Untersuchungen dar. Zur Durchführung einer solchen Analyse sind stadtformrelevante Kriterien zur Diversifizierung unterschiedlicher Stadtstrukturen nötig. Daher sollen im nachfolgenden Kapitel zunächst Möglichkeiten zur Kategorisierung unterschiedlicher Stadtformen und Straßenstrukturtypen erläutert werden. Anschließend wird ein Ansatz zur quantitativen Diversifizierung unterschiedlicher Stadtstrukturtypen beschrieben und Möglichkeiten zur konzeptionellen Umsetzung eines solchen Ansatzes in Simulationsexperimenten vorgestellt.

4.1. Stadtformen und Straßenstrukturtypen

Zur Unterscheidung verschiedener Stadtbilder existieren diverse Ansätze. Das wohl naheliegendste Diversifizierungskriterium stellt die Unterscheidung nach bewusst geplanten oder ungeplanten Stadtmustern dar. In der Literatur werden geplante Strukturen zudem weiter nach erkennbaren Arten regulärer Strukturen untergliedert. Dabei ist zunächst zu klären, welche Art von Strukturen beschrieben werden sollen. Grundsätzlich existieren diverse Möglichkeiten zur Strukturbildung (Marshall 2005). Im weiteren Verlauf der Untersuchungen soll auch in Hinblick auf die Aufgabenstellung die urbane Straßenstruktur als Diversifikationsmerkmal unterschiedlicher städtebaulicher Typen verwendet werden. Inwiefern aus Straßenstrukturen Informationen zur quantifizierten Diversifizierung unterschiedlicher Städte gewonnen werden können, wird im anschließenden Abschnitt 4.2 dargestellt. Im Allgemeinen können Forschungen zur Stadtökologie und urbaner Strukturen dabei auf drei unterschiedlich granularen Ebenen stattfinden (Weiland 2015):

Mikroebene: Untersuchung einzelner konkreter Flächen oder Standorte.

Mesoebene: Untersuchung von Stadtstrukturtypen oder Stadtteilen.

Makroebene: Untersuchung großer Stadtgebiete oder der gesamten Stadt bis hin zur Stadtregion.

Vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung mit besonderem Fokus auf urbane Distributionsnetzwerke scheinen hinsichtlich der aufgezählten Ebenen insbesondere die Makro- und Mesoebene relevant zu sein. Dennoch bezieht die in nachfolgendem Abschnitt 4.2 vorgestellte Methode zur quantitativen Unterscheidung urbaner Strukturen neben Untersuchungen auf Makro- und Mesoebene auch Betrachtungen auf der Mikroebene ein. Somit sind alle Ebenen zur Klassifizierung urbaner Strukturen wichtig. Abbildung 7 stellt beispielhaft drei mögliche Stadtstrukturmodelle auf Makroebene dar. Dabei sind die jeweiligen Zentren der Strukturmodelle schwarz eingefärbt und variieren hinsichtlich ihrer Anordnung je nach Modell.

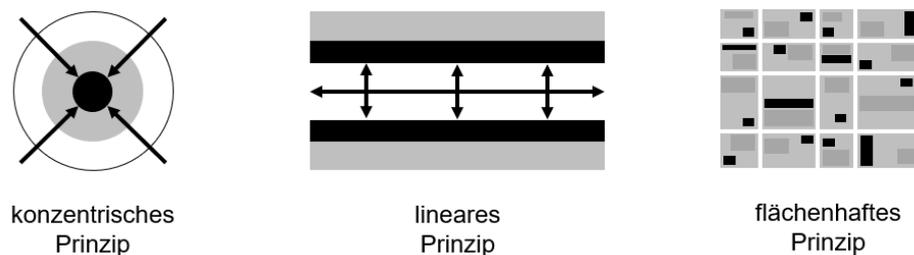


Abbildung 7: Mögliche urbane Strukturmodelle nach Reicher (2014)

Konzentrische Strukturmodelle sind, wie in Abbildung 7 gut zu erkennen ist, durch ein ausgeprägtes Zentrum mit klarem strukturellem Mittelpunkt, einem radial auf das Zentrum ausgerichteten Verkehrsnetz sowie durch zu den Rändern abnehmender Bedeutungs- und Funktionsdichte gekennzeichnet. Dieser Strukturtyp ist häufig zu finden. Das liegt insbesondere an der historischen Stadtentwicklung, die sich oft vom Stadtkern ausgehend entwickelte. Ein zweites mögliches Modell ist das lineare Strukturmodell. Lineare Strukturmodelle besitzen eine bandartige zentrale Struktur ohne klaren Mittelpunkt sowie eine linear angeordnete Verkehrsinfrastruktur in Form eines Verkehrskorridors. Zudem ist die Bedeutungs- und Funktionsdichte linear verteilt. Der beschriebene Verkehrskorridor bildet das Rückgrat solcher Strukturen. Gleichzeitig beschränkt er die Bandbreite leistungsfähiger Infrastruktur. Diese Infrastruktur wird häufig durch stern- oder kammförmige Bänder ergänzt. Die dritte und letzte in Abbildung 7 gezeigte Strukturmodellvariante stellt das flächenhafte Strukturmodell dar. Solche Strukturtypen besitzen kein ausgeprägtes Zentrum und das Verkehrsnetz ist flächig ausgerichtet. Zudem sind die Funktionen idealerweise homogen und möglichst dezentral über die gesamte Fläche verteilt. Solch eine Verteilung ist jedoch stark vereinfacht und wird häufig nur annäherungsweise erreicht. Bei dieser Strukturmodellvariante bestehen insbesondere Vorteile bei der Ausbildung tragfähiger Sub-Zentren als Grundlage netzwerkartiger Modelle (Reicher 2014).

In der Literatur existieren verschiedenste Typologien für die Makro- oder Mesoebene von Straßenstrukturtypen. Allein Marshall (2005) sammelte 32 unterschiedliche Ansätze für verschiedene Strukturtypologien. Die ältesten Quellen reichen zurück bis ins Jahr 1920, während die neuere Quellen von 2001 datieren. Auch die Anzahl der innerhalb der aufgezählten Ansätze aufgezeigten Kategorien variiert stark. Während die meisten Ansätze nicht mehr als fünf Kategorien verwenden, existieren auch Strukturtypologien mit bis zu 21 verschiedenen Ausprägungen. Auffällig bei

den beschriebenen Kategorisierungsversuchen diverser Strukturtypologien ist die Häufung diverser sich wiederholender Schlagwörter wie „radial“, „rechteckig“ oder „linear“. Problematisch scheint dennoch insbesondere, dass einerseits nicht genügend Deskriptoren für die Vielzahl an unterschiedlichen Strukturtypen existieren und andererseits ein Überangebot der zur Beschreibung von Straßenstrukturen vorhandenen Begriffe besteht - zumal die verwendeten Begrifflichkeiten häufig die gleiche Bedeutung zu haben scheinen. So taucht beispielsweise der Begriff „Gitter“ zur Kategorisierung bemerkenswert oft auf. Allerdings ist es fraglich, ob in solchen Fällen ausschließlich derselbe bestimmte Strukturtyp beschrieben wird. Dem gegenüber stehen Begriffe wie „orthogonal“, „rechtwinklig“ oder „(Brat)Rost“. Diese Begriffe können für unterschiedliche Menschen die gleiche oder aber auch unterschiedliche Bedeutungen haben. Einen interessanten Ansatz zur Einordnung solcher Strukturen in den Kontext einer gesamten Stadt stellt vor diesem Hintergrund die ABCD-Typologie dar. Diese Typologie zur Stadtforschung wurde vor allem mit der Intention entwickelt, typische Straßenstrukturen aus diversen urbanen Analysen widerzuspiegeln. Vier typische Strukturtypen sind dabei anhand ihrer historischen Entwicklung vom historischen Stadtkern bis zu den Außenbezirken angeordnet (Marshall 2005).

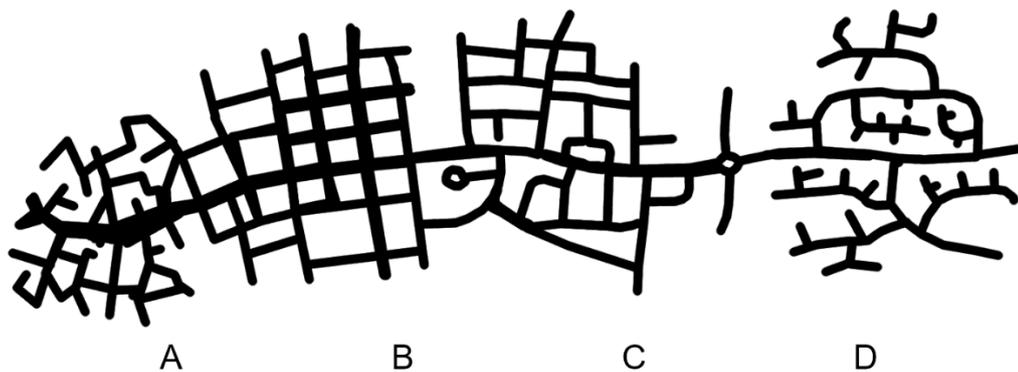


Abbildung 8: Beispielhafter Transekt der ABCD-Typologie nach Marshall (2005)

Der A-Typ ist typischerweise der Stadtkern älterer Städte. Dies gilt insbesondere, falls diese eine Stadtmauer besitzen oder besaßen. Die Struktur ist stark verwinkelt. Häufig wird durch die verwinkelte Anordnung der Straßen zudem eine rudimentäre Kreisform erzeugt. In der Regel entstanden solche Stadtformen in der Transportära der Fußgänger und Pferde. Strukturen des B-Typs entstehen typischerweise durch geplante Stadterweiterungen oder neu gegründeten Siedlungen. Innerhalb dieses Strukturtyps dominieren senkrechte Übergänge, welche in einem größeren Maßstab in einer Rasterform resultieren. Typischerweise kommen Strukturen des B-Typs in der Nähe des Stadtzentrums vor, können die Stadtstruktur aber auch stadtweit prägen. Im transporthistorischen Kontext entstanden solche Strukturen in der Ära der Pferde und Pferdewagen. Der in Abbildung 8 abgebildete C-Typ ist womöglich der am allgemeinsten gehaltene Typ und kann an unterschiedlichsten Orten innerhalb einer Siedlung gefunden werden. Charakteristischerweise treten Siedlungsstrukturen dieses Typs entlang arterieller Routen z.B. als vorstädtische Erweiterungen entlang radialer Routen auf. Strukturen des C-Typs entstanden erst in der Ära öffentlicher Transportmittel und Autos. D-Typen stehen typischerweise für moderne hierarchische Layouts und werden häufig mit krummlinigen Verteilstraßen assoziiert, welche Schleifen oder Veräste-

lungen bilden. Dieser Straßenstrukturtyp suggeriert eine Kombination aus Verteilungen, Nebenflüssen und ggf. möglichen Störungen. Entsprechend des historischen Hintergrunds solcher Strukturen entstanden diese in der Transportära des Autos (Marshall 2005).

4.2. Möglichkeiten der quantitativen Unterscheidung urbaner Strukturen

Auch wenn wie vorangehend beschrieben unterschiedlichste Versuche unternommen wurden, um urbane Strukturen zu kategorisieren, eignen sich solche Ansätze nicht oder nur sehr unzureichend für die Verwendung in Simulationswerkzeugen. Dies liegt insbesondere an nichtexistierenden Standards zur Beschreibung der urbanen Komplexität. Aus diesem Sachverhalt resultiert wie beschrieben eine unübersichtliche Vielzahl an Versuchen zur Kategorisierung urbaner Strukturen. Zudem beinhalten die Ansätze der einschlägigen Literatur trotz empirischer Beobachtungen noch so viel Subjektivität, dass sie zur Verwendung in Simulationstools ungeeignet sind. Die in Abschnitt 4.1 vorgestellten Klassifizierungen basieren vorrangig auf Straßennetzwerken. Dies ist jedoch aus zweierlei Gründen problematisch. Erstens ist der Straßenbegriff nicht eindeutig und rein geometrisch definiert. Zwar existieren diverse Möglichkeiten zur Definition von Straßen unter geometrischen Gesichtspunkten, diese enthalten jedoch immer einen gewissen Anteil an Willkür. Somit ist unklar, wie stark eine auf Straßen basierende Klassifizierung letztendlich wäre. Zweitens scheint das menschliche Auge eher die Verteilung von Formen, Flächen und Blocks wahrzunehmen, als Straßen (Louf und Barthelemy 2014). Wie unterschiedliche Informationen aus dem gleichen Muster extrahiert werden können, stellt Abbildung 9 dar.

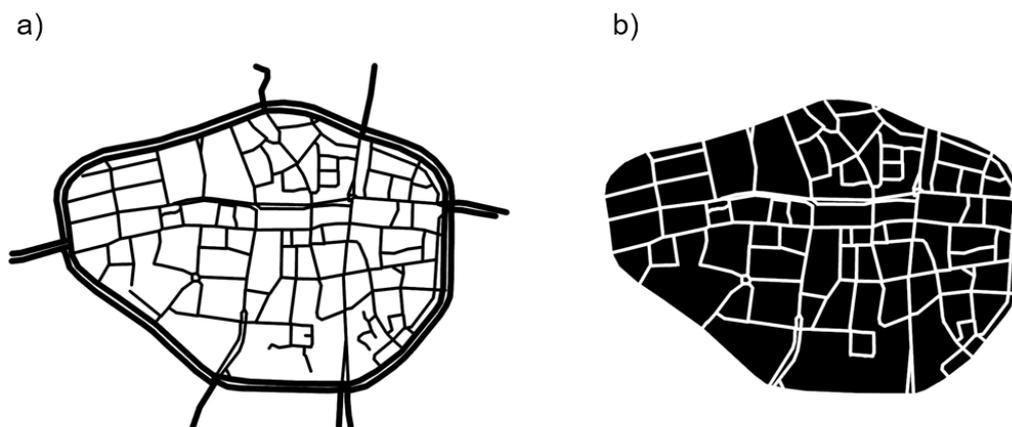


Abbildung 9: Extrahierung unterschiedlicher Informationen aus einem Muster nach Marshall (2005)

Abbildung 9 zeigt, wie aus einem Muster zweierlei Informationen gewonnen werden können. Während zur Informationsgewinnung bezüglich der Klassifizierungen von Transportnetzwerken Ansatz a) sinnvoll erscheint, ist Ansatz b) ein guter Ausgangspunkt für stadtmorphologische Untersuchungen. Muster können somit sowohl als Netzwerke als auch als Kachelung oder Tessellation dargestellt werden (Marshall 2005). Aus dieser Beobachtung folgt der Ansatz, sich bei der Diversifizierung von Stadtstrukturen auf Blocks statt Straßen zu fokussieren. Blocks können in

der Regel ohne Mehrdeutigkeit als die kleinste von Straßen begrenzte Fläche definiert werden. Während Straßen und Blocks die gleichen Informationen repräsentieren, sind diese Informationen mit Fokus auf Blocks einfacher zu extrahieren. Blocks stellen lediglich einfache geometrische Objekte (Polygone) dar, deren Attribute relativ simpel gemessen werden können. Somit bieten die Eigenschaften von Blocks und deren Verteilung gute und quantifizierbare Kriterien zu Klassifizierung urbaner Straßenstrukturen. Datenbasis der Analyse stellen also die extrahierten Blocks einer Stadt und deren auf den Flächenschwerpunkt des jeweiligen Blocks bezogene geografische Position dar. Wie schon beschrieben können Blocks und Polygone anschließend einfach charakterisiert werden (Louf und Barthelemy 2014).

Zunächst ist die Fläche eines Blocks eine nützliche Angabe. Die Verteilung der Blockflächen stellt bereits eine wichtige Information über das Blockmuster einer Stadt dar. Für unterschiedliche Städte weist die Verteilung der Flächengrößen von Blocks insbesondere verschiedenste Formen für kleine Flächen auf. Diese Verteilungen besitzen Ausläufer in Form größerer Blockflächen, deren Häufigkeit jedoch exponentiell abnimmt. Obwohl dieses scheinbar universelle Verhalten eine nützliche Einschränkung für die evolutionäre Modellierung urbaner Straßennetze liefert, lassen sich unterschiedliche Städte damit noch nicht voneinander unterscheiden. Dazu ist eine weitere Angabe nötig. Der nachfolgend dargestellte Faktor Φ wird in der Literatur als Verhältnis von Blockfläche (A) zu der durch den Block eingegrenzten Kreisfläche (A_C) definiert (Louf und Barthelemy 2014).

$$\Phi = \frac{A}{A_C} \quad (7)$$

Φ ist dabei immer kleiner als 1. Diesbezüglich gilt außerdem: Je kleiner der Wert ist, desto anisotropischer ist auch der betrachtete Block. Obwohl unterschiedliche Werte von Φ nicht zwangsläufig bestimmte Blockformen beschreiben, ermöglicht dieser Faktor dennoch eine gute Indikation der realen Blockform. So zeigt die Verteilung von Φ bei verschiedenen Stadtformen bereits deutliche Unterschiede. Zur eindeutigen Diversifizierung von Städten müssen letzten Endes allerdings formbezogene Informationen mit flächenbezogenen Informationen kombiniert werden. Dazu werden die Blocks zunächst entsprechend ihrer Fläche auf der y -Achse und entsprechend ihres Φ -Wertes auf der x -Achse in einem Koordinatensystem angelegt. Anschließend wird die gesamte Spannweite der Flächen auf der y -Achse in diverse Größenbereiche bezüglich der Blockflächen untergliedert. Der Vergleich dieser Mengen stellt letzten Endes die Basis der vorgestellten quantitativen Methode zur Unterscheidung urbaner Strukturen dar. Die aus den extrahierten Blocks generierten Informationen zu Form und Fläche geben also bereits den Fingerabdruck einer Stadt wider (Louf und Barthelemy 2014).

Als beispielhaftes Ergebnis zeigt Abbildung 10 den quantitativen Vergleich zwischen Tokio und New York.

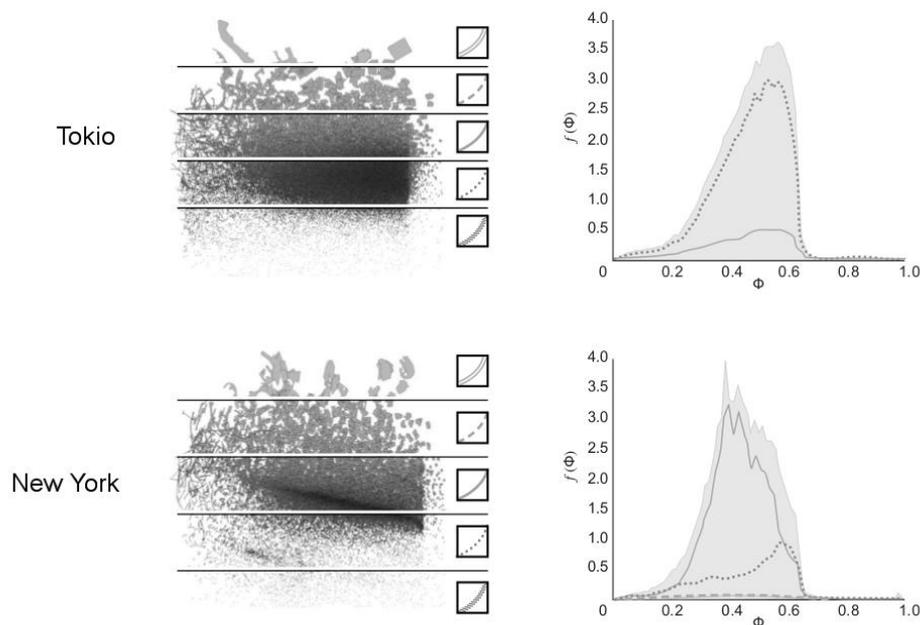


Abbildung 10: Quantitative Unterscheidung der Straßenmuster von Tokio und New York nach Louf und Barthelemy (2014)

Die wie beschrieben in verschiedene Bereiche eingeteilten Blocks sind in Abbildung 10 für die Städte Tokio und New York jeweils auf der linken Seite dargestellt. Um die Bereiche und deren Verteilungskurven deutlicher voneinander abzugrenzen, wurden die Bereiche in Abbildung 10 zudem visuell durch Trennlinien getrennt. Außerdem wurde der Verteilungskurve für jeden Blockgrößenbereich ein spezifischer Kurvenstil zugeteilt. Die in Abbildung 10 rechtsseitig dargestellten Kurven beschreiben jeweils die Verteilung von Φ pro Blockgrößenbereich. Die Fläche im Hintergrund der einzelnen Verteilungskurven entspricht der Summe aller Kurven und damit der Verteilung von Φ für die Gesamtheit der Zellen einer Stadt. An Abbildung 10 ist somit gut zu erkennen, dass Tokio und New York über eine ähnliche Verteilung hinsichtlich der Summen aller Kurven verfügen. Dennoch dominieren in Tokio kleinere Blocks, während das Stadtbild New Yorks vorwiegend aus mittelgroßen Zellen besteht. Dies ist an den entsprechenden Verteilungskurven für die jeweiligen Blockgrößen deutlich erkennbar. Zudem sind die Verteilungskurven mittlerer und kleiner Blockgrößenbereiche für beide Städte deutlich sichtbar. Demgegenüber bilden die Blockgrößenbereiche für sehr große sowie für sehr kleine Zellen in beiden Fällen jeweils lediglich äußerst niedrige Verteilungskurven (Louf und Barthelemy 2014).

Die vorgestellte Methode erlaubt somit die quantitative Klassifizierung wechselnder Stadtformen. Louf und Barthelemy (2014) untersuchten weltweit insgesamt 131 Städte. Um die analysierten Städte in Gruppen zu untergliedern, werden deren Blocks zunächst entsprechend ihrer Blockfläche in zwei Mengen eingeteilt. Während die erste Menge Blockflächen von 10^3 m^2 bis 10^4 m^2 abdeckt, enthält die zweite Menge Blockflächen von 10^4 m^2 bis 10^5 m^2 . Blocks in diesen Größenordnungen dominierten die Untersuchungen. Daher werden Blocks mit Flächen von weniger als

10^3 m^2 sowie Blocks mit mehr als 10^5 m^2 zur Bildung der Hauptgruppen vernachlässigt. Anschließend wird die relative Häufigkeit der in den Mengen enthaltenen Blocks mit der Anzahl aller für die jeweilige Stadt untersuchten Blocks gebildet. Die globale Distanz zwischen dem Muster zweier Städten entspricht schlussendlich der Summe der Abweichung, die sich aus den absoluten Differenzen der wie beschrieben gebildeten Mengen beider Städte ergibt. Nachdem die Distanz zwischen dem Muster diverser Städte berechnet wurde, wird eine Distanzmatrix aller untersuchten Städte und deren Muster gebildet. Anhand dieser Distanzmatrix wird eine hierarchische Clusteranalyse durchgeführt. Auf dieser Clusteranalyse basiert ein Dendrogramm, welches die Klassifizierung der untersuchten Städte erlaubt. Mittels der vorgestellten Methode konnten für die analysierten Städte somit 4 Hauptkategorien gebildet werden, wobei innerhalb dieser Gruppen weitere Untergliederungen möglich sind (Louf und Barthelemy 2014).

Hinsichtlich der weiteren Untergliederung bildeten Louf und Barthelemy (2014) insgesamt vier Hauptgruppen. Diese vier Hauptgruppen werden in den nachfolgenden Untersuchungen verwendet. Zudem wird Gruppe 3 als mit Abstand größte dieser Stadtformgruppen nochmals sinnvoll in zwei Subgruppen mit einerseits vorwiegend europäischen und andererseits überwiegend amerikanischen Stadtformtypen unterteilt. Konkret ergab sich nach Louf und Barthelemy (2014) somit die folgende städtebauliche Untergliederung:

Gruppe 1: Vorwiegend mittelgroße Blocks, die von quadratischen und rechteckigen Formen dominiert werden. Diese Gruppe umfasst beispielsweise Buenos Aires.

Gruppe 2: Städte, in deren Stadtbild vor allem kleine Blocks mit einer Vielzahl unterschiedlicher Formen zu finden sind. Städte dieses Typs sind vorrangig in Südamerika sowie Asien und Ozeanien vorzufinden. Beispielhaft für diese Gruppe ist unter anderem die japanische Hauptstadt Tokio.

Gruppe 3: Ist Gruppe 2 insbesondere hinsichtlich der Vielzahl unterschiedlicher Formen sehr ähnlich. Diese sind in Städten der Gruppe 3 allerdings vorrangig von mittlerer Größe. Diese Gruppe umfasst weltweit die meisten Städte und dominiert insbesondere in Europa, Nordamerika sowie in Afrika und dem mittleren Osten. Aufgrund der Vielzahl der Städte, welche in diese Gruppe entfallen, ist eine weitere Untergliederung in zwei Subgruppen sinnvoll:

Gruppe 3.1: Beinhaltet unter anderem alle untersuchten europäischen Städte außer Athen. Zudem sind in dieser Subgruppe einige wenige amerikanische Städte, denen interessanterweise europäisches Flair nachgesagt wird, enthalten.

Gruppe 3.2: Beinhaltet unter anderem 15 von 22 untersuchten amerikanischen Städten. Nicht enthalten sind amerikanische Städte mit europäischem Flair wie beispielsweise Baltimore, Boston oder Pittsburgh. Diese Städte entfallen auf Subgruppe 3.1.

Gruppe 4: Enthält Städte, deren Stadtbild von kleinen, quadratischen Blocks in Kombination mit einigen wenigen rechteckigen Blocks geprägt ist. Beispielhaft für diese Gruppe steht die somalische Stadt Mogadischu.

Neben der beschriebenen Betrachtung kompletter Städte wendeten Louf und Barthelemy (2014) die beschriebene Methode zudem auch innerhalb New Yorks auf die unterschiedlichen Stadtteile Manhattan, Bronx, Queens, Brooklyn und Staten Island an. Diese Untersuchung resultierte in der

Feststellung, dass der stadtmorphologische Fingerabdruck New Yorks eine Kombination der stadtmorphologischen Fingerabdrücke der jeweils einzelnen Stadtteile darstellt. Somit können mit der vorgestellten Methode selbst die unterschiedlichen administrativen Distrikte innerhalb einer Stadt voneinander unterschieden werden.

Abschließend ist anzumerken, dass die vorgestellte Methode auch Einschränkungen besitzt. So fehlt eine systematische und quantitative Methode, um verschiedene Gegenden oder Distrikte jenseits rein administrativer Grenzen zu unterscheiden. Stadtmuster lassen sich häufig nicht durch administrative Begrenzungen eingrenzen. So ist es möglich, dass ein Stadtteil mehrere verschiedene stadtmorphologische Muster enthält. Dem Gegenüber besteht auch die Möglichkeit, dass sich ein einheitliches stadtmorphologisches Muster über mehrere administrative Bezirke erstreckt. Die quantitative Detailuntergliederung in stadtformorientierte Bereiche anhand der in einer Stadt vorherrschenden Blockmuster ist mit der vorgestellten Methode nicht möglich (Louf und Barthelemy 2014).

Trotz der Vereinfachungen, die die dargestellte Methode zur quantitativen Klassifizierung von Stadtformen enthält, stellt sie einen vielversprechenden und fortschrittlichen Ansatz dar. Insbesondere sticht die Methode hervor, da sie im Gegensatz zu den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Möglichkeiten zur Klassifizierung unterschiedlicher Stadtformen keinen subjektiven Ansatz verfolgt und somit die rein quantitative Klassifizierung von Städten anhand deren stadtmorphologischer Gegebenheiten erlaubt.

5. Anwendung und Vergleich gängiger Distanzmetriken

Nachdem in den Kapiteln 3 und 4 zunächst die theoretischen Grundlagen zu Simulation und Modellbildung sowie Möglichkeiten zur Diversifizierung unterschiedlicher Stadt- und Straßenstrukturformen beschrieben wurden, werden diese Grundlagen im folgenden Kapitel praktisch angewendet. Einführend wird zunächst die Methodik zum Vergleich der Ergebnisse und die verwendeten Vergleichskriterien vorgestellt. Anschließend wird die Vorgehensweise zur Datengewinnung beschrieben und aufgezeigt, unter welchen Kriterien die Datengrundlage generiert wurde. Vor dem Hintergrund der Datengewinnung werden zudem die Städte beschrieben, die im Rahmen der Vergleichsstudie als Beispielstädte der Anwendungsfälle dienen. Im Anschluss wird die Modellbildung zur Modellierung verschiedener urbaner Routen innerhalb der in den Anwendungsfällen vorgestellten Städten unter Beachtung der in den Abschnitten 3.2 und 3.3 dargestellten theoretischen Grundlagen erörtert. Auf Basis der so erstellten Modelle steht im nächsten Schritt die Anwendung und Auswertung der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Distanzmetriken im Fokus, die gleichzeitig auch den Kern der Untersuchungen darstellt. Zu diesem Zweck werden alle in Abschnitt 3.4 dargestellten Distanzfunktionen untersucht und deren Ergebnisse in entsprechenden Tabellen abgebildet. Anschließend werden die realen Distanzen, welche unter Zuhilfenahme diverser Routing-Services erstellt und abgefragt wurden, mit den Ergebnissen der Distanzfunktionen verglichen. Es wird erörtert, welche Distanzmetrik für die jeweilige Stadtform möglichst optimale Ergebnisse produziert und wie die vorgestellten Distanzfunktionen sich im gegenseitigen Vergleich verhalten. In einem anschließenden Schritt werden die Ergebnisse aller Anwendungsfälle zusammengefasst und Anwendungsfallübergreifend verglichen. So sollen die jeweils optimalen Metriken je Stadtform präsentiert und Zusammenhänge erörtert werden, sofern diese im Zuge der Berechnungen erarbeitet werden können. Abschließend erfolgt die Bewertung der erzielten Ergebnisse. In deren Umfang wird auch die weitere Untersuchung der jeweils besten Distanzmetriken durchgeführt und ein Konzept zur Nutzung der erlangten Erkenntnisse in Simulationsexperimenten aufgezeigt.

5.1. Methode, Modellerstellung und Datengrundlage

Zu Beginn des Kapitels sollen wie eingangs beschrieben zunächst die Kriterien erörtert werden, welche im weiteren Vorgehen zum Vergleich der Approximationsqualität der untersuchten Distanzfunktionen genutzt werden. Zu diesem Zweck haben sich in der Literatur zwei bestimmte Kriterien hervorgetan, welche auch im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen genutzt werden sollen. Die nachfolgend vorgestellten Kriterien geben Auskunft über die Approximationsqualität einer Distanzmetrik im Vergleich zur tatsächlichen Realdistanz. Somit wird durch diese Kriterien der qualitative Vergleich zwischen unterschiedlichen Distanzmetriken ermöglicht. Dabei bestehen zwischen den beiden Kriterien, wie auch bei den in Abschnitt 3.4 vorgestellten Distanzfunktionen, Zusammenhänge. Neben den spezifischen Eigenschaften der genutzten Kriterien wer-

den auch diese Zusammenhänge nachfolgend beschrieben. Das erste genutzte Kriterium AD beschreibt die Qualität einer Distanzfunktion als Summe absoluter Abweichungen (Love und Morris 1972):

$$AD_m = \sum_{1 \leq x < y \leq n} |d_m(x, y) - A(x, y)| \quad (8)$$

Für die in Funktion (8) verwendeten Parameter gilt:

m = Nummerierung der untersuchten Distanzfunktion

n = Anzahl der untersuchten Städte bzw. Routen

$A(x, y)$ = Reale Strecke zwischen den Punkten x und y

d_m = Mit Funktion m approximierte Distanz zwischen den Punkten x und y

Die Nutzung dieses Kriteriums impliziert, dass die verwendete Funktion lange Distanzen genauer abschätzt als kurze. Beispielsweise fällt eine 50-prozentige Abweichung bei einer Distanz von 10 km deutlich weniger ins Gewicht als bei einer Distanz von 100 km, obwohl der erzeugte Fehler proportional jeweils gleich ist. Dennoch ist die Verwendung dieses Kriteriums durchaus angemessen, sofern sich die Untersuchung eher auf absolute als auf proportionale Abweichungen fokussiert (Love und Morris 1972). Entgegen des vorgestellten Kriteriums AD als Summe absoluter Abweichungen, misst das SD-Kriterium die Qualität der Approximation mit Hilfe folgender Quadratsumme:

$$SD_m = \sum_{1 \leq x < y \leq n} \left(\frac{d_m(x, y) - A(x, y)}{\sqrt{A(x, y)}} \right)^2 \quad (9)$$

Die in Funktion (9) verwendeten Konstanten entsprechen den für Funktion 5.1 erläuterten Parametern. Es ist zudem gut erkennbar, dass AD in SD enthalten ist – wenn auch nicht als absolute Abweichung, sondern als Realabweichung. Zudem wird dieses Kriterium zusätzlich durch die Wurzel der Realdistanz dividiert und dieser Quotient anschließend quadriert. Das Kriterium für SD verhält sich gegenüber dem AD-Kriterium hinsichtlich großer Werte für $|d_m(x, y) - A(x, y)|$ sensibler. Zudem verfügt dieses Kriterium über attraktive statistische Eigenschaften. Mit der Division durch die Wurzel der Realdistanz wird erreicht, dass kurze Strecken verhältnismäßig gesehen mindestens so genau geschätzt werden wie längere Strecken. Somit misst das zweite Kriterium SD die Qualität einer Approximation auf eine bedeutend andere Art, als das erste Kriterium AD (Love und Morris 1972). Das SD-Kriterium ist also insbesondere zur Fehlerabschätzung längerer Strecken besser geeignet als das AD-Kriterium. Da die in Abschnitt 5.2 untersuchten Anwendungsfälle jedoch vornehmlich aus kurzen sowie einigen wenigen mittellangen Routen bestehen, soll die Approximationsqualität der Distanzfunktionen in den Anwendungsfällen mit dem

AD-Kriterium verglichen werden. Das SD-Kriterium findet im Rahmen der Anwendungsfälle keine Verwendung.

Zur Modellbildung wurde der in Abschnitt 3.2 vorgestellte Middle-Out-Ansatz angewendet. Ausgangspunkt bildeten die in Abschnitt 2.3 beschriebenen UCC's, welche zur Modellbildung als Ursprung urbaner Versorgungsverkehre angenommen wurden. Nachdem die Systemgrenzen wie nachfolgend noch ausführlicher beschrieben jedoch auf der letzten vertikalen Distributionsstufe liegen, wurde im weiteren Modellerstellungsprozess auch der Bottom-Up-Ansatz verfolgt. Dieser setzte an der untersten Ebene, den zu beliefernden urbanen Einrichtungen, an und entwickelte in Richtung der angenommenen UCC's. Bei der Modellerstellung wurde zudem entsprechend der in Kapitel 3.3 vorgestellten Richtlinie 4465 Blatt 1 vorgegangen und sich darüber hinaus an den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Grundsätzen ordnungsgemäßen Modellierens orientiert.

Das Ziel der Modellbildung liegt darin, ein einfaches Modell urbaner Distributionsrouten zu erstellen. Dieses Modell soll die Anwendung und den Vergleich der in Abschnitt 3.4 vorgestellten Distanzmetriken erlauben. Zum Zweck der Modellerstellung wird daher ein Netz zur urbanen Versorgung als Netzwerk innerstädtischer Versorgungsverkehre definiert und besteht dabei sowohl aus kurzen als auch aus mittellangen Strecken, welche jeweils miteinander verbunden und über das gesamte Stadtgebiet verteilt sind. Die Systemgrenze des Modells besteht inputseitig auf der letzten vertikalen Distributionsstufe. Outputseitig stellen die Empfänger der Ware die Systemgrenze dar. Da das Modell die letzte Meile eines Distributionsnetzwerks abbilden soll, sind die beschriebenen Systemgrenzen eine logische und aus der Aufgabenstellung resultierende Konsequenz. Die Belieferungspunkte werden mit geographischen Koordinaten jeweils durch Angabe der geographischen Breite und der geographischen Länge dargestellt. Eine Route entspricht somit der Entfernung zwischen zwei Belieferungspunkten. Um aus einzelnen Knoten einfache Routen zu bilden, kann der jeweils nachfolgende Knoten als Senke des aktuellen Knotens betrachtet werden. Somit stellt beispielsweise Punkt B die Senke für Punkt A und Punkt C die Senke für Punkt B dar. Sofern Punkt C der letzte betrachtete Netzwerkknoten ist, wird wiederum der Ausgangspunkt A als Senke angenommen. Unter Berücksichtigung des in Abschnitt 3.2 vorgestellten Modellierungsgrundsatzes der Wirtschaftlichkeit kann mit dieser Methode ein einfaches und gleichzeitig hinreichend genaues Modell gebildet werden.

Wie in Abschnitt 3.3 bereits beschrieben, stellt die anschließende Phase der Datenerhebung und -analyse auch für die vorliegende Modellierungsaufgabe eine ebenso wichtige wie aufwendige Aufgabenstellung dar. Die Datenerhebung erfolgte unter Zuhilfenahme des kostenfreien Online-Tools Overpass turbo. Overpass turbo ist ein frei nutzbares und auf dem ebenfalls kostenfrei nutzbaren Kartenservice OpenStreetMap basierendes Online-API, welches simple und unkomplizierte Datenabfragen und -ausgaben ermöglicht. Für die Modellierung eines urbanen Versorgungsnetzes wurden wie beschrieben lediglich einfache zufallsverteilte Koordinaten benötigt. Overpass turbo ermöglicht die Datenausgabe in definierbaren CSV-Files, welche im Anschluss an die Datenabfrage für die weitere Auswertung in Tabellenform überführt wurden. Eine beispielhafte Abfrage in Overpass turbo, die visualisierte Ausgabe der Datenpunkte sowie die entsprechende Datenausgabe im CSV-Format in Tabellenform sind in Anhang 1 enthalten.

Nachfolgend werden die für die jeweiligen Beispielstädte der nachfolgend untersuchten Anwendungsfälle genutzten Merkmale zur Datengewinnung kurz beschrieben:

Buenos Aires (Gruppe 1): Buenos Aires repräsentiert Stadtformgruppe 1 mit vorwiegend mittelgroßen Blocks. Die Eingrenzung nach Apotheken lieferte eine Menge an Knoten, die relativ gleichmäßig über das gesamte Stadtbild verteilt, jedoch gerade im Stadtzentrum vermehrt vorzufinden sind.

Tokio (Gruppe 2): Für die japanische Hauptstadt Tokio, die als Beispielstadt für Stadtformgruppe 2 dient und deren Stadtbild von kleinen unregelmäßigen Formen bestimmt wird, zeigten sich Bibliotheken als geeignetes Kriterium, um eine ausgewogene Verteilung der Zielknoten im Stadtgebiet zu erreichen.

Berlin (Gruppe 3.1): Auch für Berlin eignen sich, wie schon für Buenos Aires, Apotheken als Suchkriterien am besten. Gerade in Berlin, das die europäische Stadtform-Subgruppe 3.1 vertritt, sind Apotheken sehr gleichmäßig über das gesamte Stadtgebiet verteilt.

Los Angeles (Gruppe 3.2): Im Fall der kalifornischen Stadt Los Angeles, das exemplarisch für die Subgruppe der amerikanischen Städte steht, lieferte die Suche nach Apotheken keine ausreichend große Datengrundlage. Die Abfrage nach Fast-Food-Restaurants resultierte jedoch in gleichmäßig über die gesamte Stadt verteilten Knoten.

Mogadischu (Gruppe 4): Für Mogadischu, welches von Louf und Barthelemy (2014) als einzige Stadt in Stadtformgruppe 4 eingeteilt wurde, stellte sich die Situation komplizierter dar. Die Suche nach bestimmten Einrichtungen lieferte keine ausreichend große Datenmenge. Dies liegt vermutlich an der unzureichenden Pflege des vorhandenen Kartenmaterials seitens der OpenStreetMap-Community. Um eine Datengrundlage zu schaffen, wurde nach sämtlichen verfügbaren Amenities gefiltert. Dies ergab lediglich einen kleinen Datensatz, dessen Knoten allerdings sehr gleichmäßig über das Stadtgebiet verteilt sind.

Die Bestimmung der relevanten Modellaspekte kann bei der vorliegenden Modellierungsaufgabe größtenteils übersprungen werden. Das benötigte Modell ist in Umfang und Beschaffenheit insgesamt derart simpel, dass alle beschriebenen Modellaspekte als relevant anzusehen sind. Ebenso wie die Bestimmung der relevanten Modellaspekte ist auch die Problemdekomposition aufgrund der Schlichtheit des Modells wenig sinnvoll. Der Umfang des Modells ist für eine sinnvolle Problemdekomposition und der damit verbundenen Granulierung der Modellierungsaufgabe nicht groß genug. Wie in Abschnitt 3.3 dargestellt, sind die wichtigsten Faktoren zur Bestimmung des Modelltyps dessen Eigenschaften und die zu treffenden Aussagen. Das Modell besitzt vor allem statische Eigenschaften, da es lediglich aus einer Menge an Routen besteht. Die zu treffenden Aussagen bestehen insbesondere darin, welche der in Kapitel 3.4 beschriebenen Distanzmetriken reale urbane Versorgungsverkehre am exaktesten beschreibt. Die quantitative Bewertung der zu untersuchenden Distanzmetriken erfolgt mittels des eingangs vorgestellten AD-Kriteriums als Summe absoluter Abweichungen. Diese gilt es zu minimieren. Zu diesem Zweck kommen insbesondere Werkzeuge und Methoden der linearen Optimierung zum Einsatz.

5.2. Anwendung von Distanzmetriken auf wechselnde Stadtbilder

Im anschließenden Abschnitt erfolgt die Anwendung der in Abschnitt 3.4 vorgestellten Distanzmetriken auf die in Abschnitt 4.2 genannten Beispielstädte sowie die Auswertung und Beurteilung

der Ergebnisse. Um die unterschiedlichen Distanzmetriken vergleichen zu können wurde das in Abschnitt 5.1 beschriebene AD-Kriterium angewendet. Die Berechnung dieses Kriteriums als absolute Summe der produzierten Fehler pro Route erfolgte je Anwendungsfall für alle zu untersuchenden Distanzmetriken. Mittels Methoden der linearen Optimierung wurden die variablen Parameter der angewendeten Distanzfunktion anschließend optimiert, um die absolute Fehler-summe des AD-Kriteriums je Distanzmetrik zu minimieren. Diese Ergebnisse ermöglichen somit einerseits einen stadtinternen Vergleich der untersuchten Distanzmetriken und liefern andererseits gleichzeitig die optimalen Parameterwerte aller Metriken je Beispielstadt.

Die im Folgenden untersuchten Städte wurden in vorangehenden Kapiteln bereits genannt, sollen aber unter Nennung ihrer wesentlichen Charakteristika zu Beginn der Anwendungsfälle jeweils kurz vorgestellt werden. Zu den genannten Charakteristika zählen unter anderem Größe, Form und Verteilung der Häuserblocks, welche die wesentlichen Merkmale der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Methode zur quantitativen Unterscheidbarkeit von Stadtformen darstellen. Des Weiteren ist auch die geografische Lage der untersuchten Städte relevant. Da die Erde ein Ellipsoid darstellt, ändert sich auch die Entfernung der betrachteten Punkte vom Erdmittelpunkt entsprechend deren Lage auf dem Erdellipsoiden. Die Entfernung zum Erdmittelpunkt beeinflusst jedoch die Distanzberechnung und muss daher unbedingt beachtet werden.

Um die Qualität der approximierten Strecken bewerten zu können, müssen diese jeweils mit den Realdistanzen abgeglichen werden. Als Realdistanzen werden im Rahmen der Untersuchungen Fahrtstrecken gesehen, die durch einen Routing-Service ermittelt wurden. Um die Realdistanzen für die vorliegenden Datensätze nicht manuell abfragen zu müssen, wurde zu diesem Zweck ein Python-Skript entwickelt. Dieses Skript fragt die generierten Routen beim frei zugänglichen Routing-Service OpenRouteService ab. Konkret liest das entwickelte Python-Skript jeweils Quelle und Senke der entsprechenden Route aus einem bereitgestellten CSV-File aus, setzt diese Werte in dafür vorgesehene Platzhalter innerhalb einer Template-URL ein und stellt per API eine Anfrage an OpenRouteService. Nachdem der Zugriff genehmigt und die benötigten Daten von OpenRouteService ausgegeben wurden, werden die Distanzinformationen in ein entsprechendes Ausgabe-CSV-File zurückgeschrieben. Sowohl das beschriebene Python-Skript als auch beispielhafte CSV-Dateien in Tabellenform sind in Anhang 2 enthalten.

Nach einer kurzen Beschreibung der wesentlichen Charakteristika je Beispielstadt werden die Ergebnisse der eingangs beschriebenen Auswertungen in Tabellenform dargestellt und unter besonderer Betrachtung der jeweiligen Extremwerte beschrieben. Anschließend stellt ein Boxplot-Diagramm die realen Abweichungen und deren Streuung für alle untersuchten Distanzmetriken pro Beispielstadt übersichtlich und anschaulich dar. Diese Diagrammart eignet sich insbesondere zur übersichtlichen Darstellung vielfältiger Informationen zu Lage und Streuung der produzierten Fehler. Somit wird eine abschließende, anschauliche und umfangreiche Bewertung aller untersuchter Distanzmetriken je Anwendungsfall ermöglicht.

5.2.1. Anwendungsfall Buenos Aires

Die argentinische Hauptstadt Buenos Aires ist die Beispielstadt für den Anwendungsfall der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Stadtformgruppe 1. Buenos Aires bildet das Zentrum der Metropolregion Gran Buenos Aires, deren Einwohnerzahl von den Vereinten Nationen (2014a) für das Jahr 2015 auf ca. 15 Millionen Einwohner geschätzt wurde und die somit eine der größten Agglomerationen Südamerikas darstellt. Die Stadt liegt auf dem 34. Breitengrad südlicher Richtung sowie auf dem 58. Längengrad westlicher Richtung. Aus dieser Lage auf dem Erdellipsoid resultiert eine Entfernung zum Erdmittelpunkt von 6.371,31 km. Dieser Faktor wurde zur Wegstreckenapproximation im Anwendungsfall Buenos Aires genutzt. Das Stadtbild wird von mittelgroßen Blocks dominiert, deren Form vorwiegend quadratisch oder rechteckig ist. Kleine Blocks haben dabei beinahe ausschließlich quadratische Formen (Louf und Barthelemy 2014).

Das verwendete Modell innerstädtischer Versorgungsrouten basiert wie in Abschnitt 5.1 beschrieben auf der Verteilung von Apotheken. Diese sind gleichmäßig über das gesamte Stadtgebiet verteilt und liefern eine Datengrundlage für insgesamt 870 Routen. Die in Abschnitt 3.4 vorgestellten Distanzmetriken wurden auf diese Datengrundlage angewendet und mithilfe des in Abschnitt 5.1 beschriebenen AD-Kriteriums verglichen. Die Berechnungen ergaben das in Tabelle 1 abgebildete Ergebnis.

Tabelle 1: Berechnungsergebnisse im Anwendungsfall Buenos Aires (R = Spannweite; \bar{x} = arithmetisches Mittel; σ = Standardabweichung; gew. = gewichtet; L&M = Love und Morris)

Distanzmetriken	Min	Max	R	\bar{x}	σ	AD
Realdistanz	0,10	39,17	39,07	8,53	7,92	-
Euklidische Distanz	0,01	28,22	28,22	6,76	6,47	1.548,16
Manhattan-Distanz	0,01	39,09	39,08	8,72	8,44	926,34
Gew. euklidische Distanz ($k=1,231$)	0,01	34,75	34,74	8,31	7,96	558,10
Minkowski-Distanz ($p=1,173$)	0,01	35,29	35,28	8,03	7,74	767,73
Gew. Minkowski-Distanz ($k=1,215$ $p=1,380$)	0,01	39,27	39,26	9,12	8,76	713,54
Formel nach L&M ($k=1,084$; $p=1,772$; $s=1,682$)	0,01	38,01	38,01	8,57	8,50	661,01

Die Realdistanzen, die mit dem eingangs beschriebenen Python-Skript von der kostenfrei nutzbar und auf OpenStreetMap basierenden Plattform OpenRouteService abgefragt wurden, haben eine Spannweite von 39,07 km. Bezüglich dieser Realdistanzen beträgt die kürzeste abgefragte Strecke 0,10 km und die längste abgefragte Strecke 39,17 km. Über die Gesamtheit aller 870 abgefragten Routen ergibt sich hinsichtlich der Realdistanzen ein arithmetisches Mittel von 8,53 km sowie eine Standardabweichung von 7,92 km. Die Realdistanz liefert auch den größten Minimalwert aller untersuchten Metriken. Hinsichtlich der Maximalwerte ergibt sich der kleinste Maximalwert mit 28,22 km wie erwartet für die einfache euklidische Distanz. Auch bezüglich Spannweite, arithmetischem Mittel und Standardabweichung ergeben sich die niedrigsten Werte bei Anwendung der einfachen euklidischen Distanz. Der größte Maximalwert wird durch die gewichtete Minkowski-Distanz erreicht und beträgt 39,27 km. Auch die jeweils größten Werte der Kennzahlen Spannweite, arithmetisches Mittel und Standardabweichung werden von der gewichteten

Minkowski-Distanz produziert. Das beste Ergebnis hinsichtlich des Kriteriums AD als Summe der absoluten Abweichungen aller Routen ergibt sich für die gewichtete euklidische Distanz mit einer Gewichtung von $k=1,231$ und beträgt 558,10 km. Mit diesem Wert schneidet die gewichtete euklidische Distanz im Anwendungsfall Buenos Aires besser ab, als die übrigen angewendeten Distanzmetriken. Die Formel nach Love und Morris produziert als zweitbeste Distanzmetrik im Anwendungsfall Buenos Aires einen AD-Wert von 661,01 km und liegt damit in Summe 102,91 km höher als die gewichtete euklidische Distanz. Der höchste Wert des AD-Kriteriums ergibt sich für die einfache euklidische Distanz und beträgt 1.548,16 km.

Nach der Beschreibung der Ergebnisse erfolgt anschließend die Darstellung der realen Abweichungen aller untersuchten Routen je Distanzmetrik. Diese Darstellung geschieht mittels Boxplot-Diagramm in Abbildung 11.

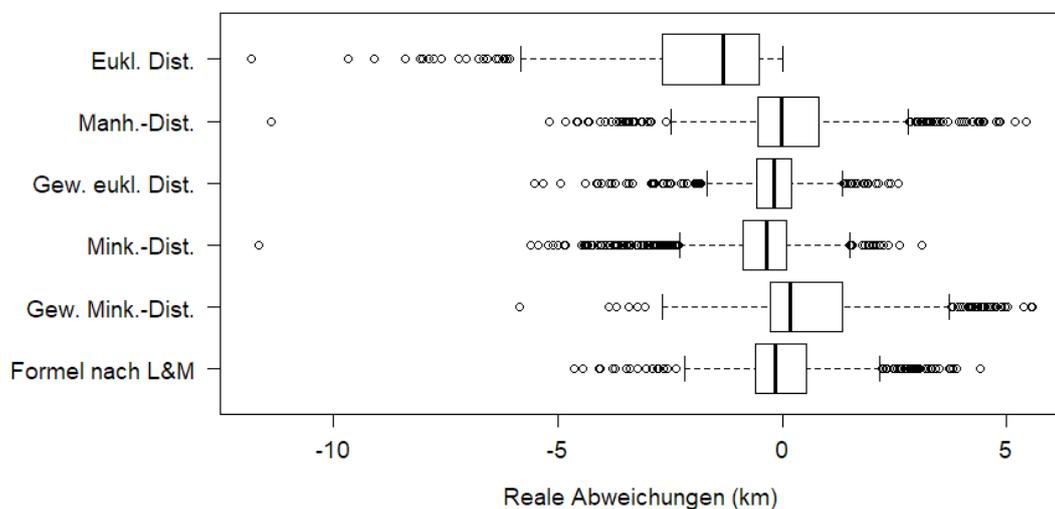


Abbildung 11: Boxplotdiagramm realer Abweichungen aller Distanzmetriken im Anwendungsfall Buenos Aires (eukl. = euklidisch; Dist. = Distanz; Manh. = Manhattan; gew. = gewichtet; Mink. = Minkowski; L&M = Love und Morris)

Abbildung 11 veranschaulicht in Form eines Boxplot-Diagramms die realen Abweichungen aller untersuchten Distanzmetriken sowie deren Lage und Streuung im Anwendungsfall Buenos Aires. Die gewichtete euklidische Distanz als exakteste Distanzfunktion im Anwendungsfall Buenos Aires verfügt über eine sehr spitze Kurtosis mit entsprechend kleinen Interquartilsabständen zwischen dem 25%- bzw. 75%-Quantil und dem Median. Eine spitze Kurtosis bedeutet, dass viele Werte auf einen kleinen Bereich konzentriert und somit sehr eng gestreut sind. Der Median liegt bei -0,17 km und damit ziemlich genau mittig zwischen dem ersten und dem dritten Quartil. Die Werte der Quartile des Boxplotdiagramms der gewichteten euklidischen Distanz liegen bei -0,57 km für das untere Quartil und bei 0,20 km für das obere Quartil. Dies lässt auf eine sehr ausgeglichene Verteilung der entsprechenden Realabweichungen schließen. Die Whisker des Boxplot-Diagramms der gewichteten euklidischen Distanz spannen einen Bereich von -1,68 km am unteren Whisker bis 1,33 km am oberen Whisker. Auffällig sind zudem die jeweils untersten Ausreißer der einfachen Minkowski-Distanz, der Manhattan-Distanz, der einfachen euklidischen Distanz und der gewichteten Minkowski-Distanz. Dabei handelt es sich jeweils um die gleiche bestimmte

Route, deren schnellste Reiseroute Stadtformbedingt durch einen relativ großen Umweg erreicht werden konnte. Somit wurde insbesondere im Fall der einfachen euklidischen Distanz ein auffallend großer Fehler produziert. Dieser lässt sich jedoch auch in den anderen genannten Metriken wiederfinden.

5.2.2. Anwendungsfall Tokio

Für die in Absatz 4.2 vorgestellten Stadtformtypen dient die japanische Hauptstadt Tokio als Beispielstadt der Stadtformgruppe 2. Tokio bildet zusammen mit Yokohama und Kawasaki eine Agglomeration. Die Metropolregion Tokio beheimatete im November 2016 ca. 35 Millionen Menschen und ist damit der bevölkerungsreichste Ballungsraum der Welt. Die Bevölkerungsdichte der Agglomeration beträgt ca. 5.400 Einwohner je Quadratkilometer (Auswärtiges Amt 2016). Geografisch liegt Tokio auf dem 35. Breitengrad nördlicher Richtung sowie auf dem 139. Längengrad östlicher Richtung. Aus dieser Lage resultiert eine Entfernung zum Erdmittelpunkt von 6.370,91 km, welche als Faktor zu Wegstreckenberechnung im Anwendungsfall Tokio genutzt wurden. Als Beispielstadt der Stadtformgruppe 2 zeichnet sich Tokio durch ein Stadtbild aus, das von kleinen Blocks dominiert wird. Deren Formen sind weit verteilt und haben unterschiedlichste Ausprägungen (Louf und Barthelemy 2014).

Für den Anwendungsfall Tokio basiert das Modell urbaner Versorgungsrouten wie in Abschnitt 5.1 beschrieben auf der Verteilung von Bibliotheken in der Innenstadt Tokios. Insgesamt ergab die Abfrage nach dieser Kategorie 754 Strecken. Das arithmetische Mittel der abgefragten Routen lag mit 15,79 km jedoch deutlich über der Durchschnittsdistanz der übrigen Anwendungsfälle, welche sich durchgehend im Bereich von ca. 10 km befinden. Dieses Ergebnis lässt sich vermutlich mit der Größe und der damit verbundenen Weitläufigkeit der Beispielstadt Tokio erklären. Um ein vergleichbares und konsistentes Ergebnis zu erhalten, wurden die längsten Routen aus dem Datensatz entfernt. Somit konnte das arithmetische Mittel der in Tokio untersuchten Routen an das der übrigen Anwendungsfälle angeglichen werden. Nach der beschriebenen Kürzung verblieben im Datensatz des Anwendungsfalls Tokio noch 655 untersuchte Strecken. Aus den Berechnung ergab sich das in Tabelle 2 dargestellte Ergebnis.

Tabelle 2: Berechnungsergebnisse im Anwendungsfall Tokio (R = Spannweite; \bar{x} = arithmetisches Mittel; σ = Standardabweichung; gew. = gewichtet; L&M = Love und Morris)

Distanzmetriken	Min	Max	R	\bar{x}	σ	AD
Realdistanz	0,67	37,24	36,57	10,03	9,80	-
Euklidische Distanz	0,51	33,00	32,49	7,81	7,87	1.452,78
Manhattan-Distanz	0,61	46,37	45,76	9,93	10,07	711,74
Gew. euklidische Distanz ($k=1,251$)	0,64	41,29	40,66	9,76	9,84	501,64
Minkowski-Distanz ($p=1,082$)	0,59	44,01	43,42	9,53	9,65	675,71
Gew. Minkowski-Distanz ($k=1,188$; $p=1,256$)	0,66	47,92	47,26	10,60	10,71	609,10
Formel nach L&M ($k=1,113$; $p=1,333$; $s=1,306$)	0,60	46,90	46,30	10,24	10,54	603,31

Für die abgefragten Realdistanzen ergibt sich im Anwendungsfall Tokio eine Spannweite von 36,57 km, welche sich zwischen der kürzesten Strecke mit 0,67 km und der längsten Strecke mit 37,24 km aufspannt. Das arithmetische Mittel der Realdistanzen beträgt nach der eingangs erläuterten Anpassung der Datengrundlage 10,03 km. Für die Standardabweichung der Realdistanzen beträgt der Wert im Anwendungsfall Tokio 9,80 km. Wie schon im Anwendungsfall Buenos Aires folgt die längste Minimaldistanz aus den Realdistanzen mit dem bereits beschriebenen Wert von 0,67 km. Die kürzeste Minimaldistanz ergibt sich mit 0,51 km für die einfache euklidische Distanz. Die einfache euklidische Distanz liefert auch die jeweils minimalen Werte der Kriterien „längste Strecke“, „Spannweite“, „arithmetisches Mittel“ und „Standardabweichung“. Gleichzeitig produziert die einfache euklidische Distanz mit 1.452,78 km die größte Summe absoluter Abweichungen im vorliegenden Anwendungsfall für die Stadt Tokio. Dieser Sachverhalt zeigt, dass bei der einfachen euklidischen Distanz sämtliche Strecken wie zu erwarten zu kurz approximiert werden. Die Maximalwerte der Kriterien „längste Strecke“, „Spannweite“, „arithmetisches Mittel“ und „Standardabweichung“ werden alle durch die gewichtete Minkowski-Distanz erreicht. Diese kann somit als Gegenpart zur einfachen euklidischen Distanz angesehen werden und approximiert die Distanzen im vorliegenden Anwendungsfall generell zu lang. Dennoch liegt der AD-Wert für die gewichtete Minkowski-Distanz mit insgesamt 609,10 km deutlich unter der AD-Summe der einfachen euklidischen Distanz. Der niedrigste und damit beste AD-Wert beträgt insgesamt 501,64 km und wird von der gewichteten euklidischen Distanz erreicht. Als optimaler Parameter zur Minimierung der AD-Summe ergibt sich im Anwendungsfall Tokio ein Gewichtungsfaktor $k=1,251$. Die absolute Fehlersumme der gewichteten euklidischen Distanz liegt damit deutlich unter der zweitniedrigsten absoluten Fehlersumme, die sich für die Formel nach Love und Morris unter Verwendung der Parameter $k=1,113$, $p=1,333$ und $s=1,306$ mit insgesamt 603,31 km ergibt.

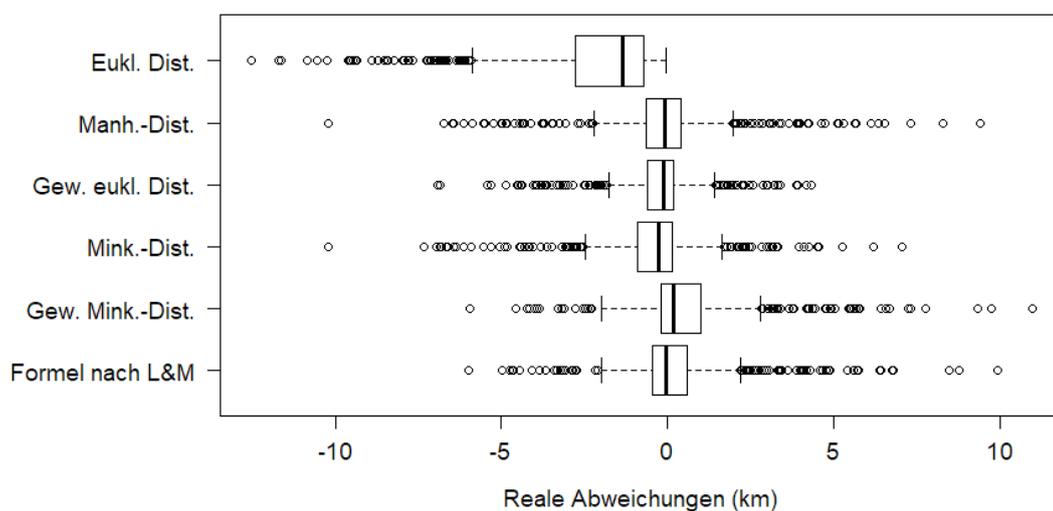


Abbildung 12: Boxplotdiagramm realer Abweichungen aller Distanzmetriken im Anwendungsfall Tokio (eukl. = euklidisch; Dist. = Distanz; Manh. = Manhattan; gew. = gewichtet; Mink. = Minkowski; L&M = Love und Morris)

Das in Abbildung 12 dargestellte Boxplot-Diagramm zeigt die Lage und Streuung der realen Abweichungen für alle Distanzmetriken im Anwendungsfall Tokio. Auffällig ist insbesondere das Boxplot der gewichteten euklidischen Distanz. Die Box zeigt eine äußerst spitze Kurtosis. Dies

lässt auf eine kompakte Verteilung der Realabweichungen schließen. Zudem ist auch der von beiden Whiskern aufgespannte Bereich von -1,77 km am unteren Whisker bis 1,39 km am oberen Whisker im Vergleich zu den anderen in Abbildung 12 dargestellten Boxplots sehr klein, was diesen Schluss bekräftigt. Abschließend befinden sich auch die Ausreißer der gewichteten euklidischen Distanz in einem schmalen Korridor als die Ausreißer der übrigen dargestellten Distanzmetriken. Die Abweichungen dieser Distanzmetrik sind somit auf einem sehr geringen Abschnitt gestreut, was für die Approximationsgenauigkeit der gewichteten euklidischen Distanz spricht. Markant sind hinsichtlich der in Abbildung 12 dargestellten Approximationsabweichungen insbesondere auch die unteren Ausreißer, die für die Minkowski-Distanz, die Manhattan-Distanz und für die gewichtete Minkowski-Distanz und für die Formel nach Love und Morris jeweils von derselben Strecke verursacht werden. Der unterste Ausreißer der einfachen euklidischen Distanz wird von einer anderen Strecke geliefert. Lediglich im Fall der gewichteten euklidischen Distanz verursachen alle beiden Routen jeweils extreme Ausreißer. Diese können jedoch in Abbildung 12 schlecht erkannt werden, da beide Werte nahezu deckungsgleich sind und somit kaum als unterschiedliche Markierungen wahrgenommen werden. Die beiden beschriebenen Strecken sind mit jeweils über 30 km zudem sehr lang. Dies erklärt auch die Abweichungen, da zur Abfrage der Realdistanzen das Kriterium „schnellste Route“ gewählt wurde. Diese konnte in den vorliegenden Fällen jeweils durch Umwege erreicht werden.

5.2.3. Anwendungsfall Berlin

Stadtformgruppe 3 stellte in der in Absatz 4.2 vorgestellten stadtmorphologischen Untergliederung die mit Abstand größte Gruppe dar. Zudem beinhaltet diese Stadtformgruppe einen Großteil der untersuchten europäischen und amerikanischen Städte. Nicht zuletzt deshalb wurde diese Stadtformgruppe zur Anwendung der in Absatz 3.4 beschriebenen Distanzmetriken in zwei Subgruppen unterteilt, die jeweils exemplarisch für europäische bzw. amerikanische Stadtformtypen stehen. Als Repräsentant europäischer Stadtformtypen wurde die deutsche Hauptstadt Berlin ausgewählt. Das Stadtbild Berlins wird von Blocks mittlerer Größe dominiert, welche in unterschiedlichsten Formen existieren. Berlin ist mit ca. 3,5 Millionen Einwohnern die bevölkerungsreichste Stadt Deutschlands und umfasst eine Gesamtfläche von 892 Quadratkilometern (Berlin.de 2017). Die deutsche Hauptstadt bildet zusammen mit Brandenburg die als „Hauptstadtregion Berlin-Brandenburg“ bezeichnete Metropolregion. Auf über 30.000 km² lebten in dieser Agglomeration im Jahr 2014 rund 5,9 Millionen Menschen (Berlin-Brandenburg.de 2017). Berlin liegt auf dem 52. Breitengrad nördlicher Richtung sowie auf dem 13. Längengrad östlicher Richtung. Der für die Berechnungen verwendete Abstand zum Erdmittelpunkt beträgt in Berlin, das zwischen 34 m und 122 m über Normalhöhennull liegt, 6.364,79 km.

Zu Erstellung der Datengrundlage wurden Apotheken als Kategorie verwendet, da diese gleichmäßig über das gesamte Berliner Stadtgebiet verteilt sind. Daraus ergab sich für das Modell eine Datengrundlage von insgesamt 674 Strecken. Das arithmetische Mittel dieser Strecken entsprach der Vorgabe von ca. 10 km, so dass der Datensatz nicht wie in den Anwendungsfällen Tokio und Los Angeles gekürzt werden musste. Tabelle 3 stellt die Ergebnisse der Berechnungen im Anwendungsfall Berlin dar.

Tabelle 3: Berechnungsergebnisse im Anwendungsfall Berlin (R = Spannweite; \bar{x} = arithmetisches Mittel; σ = Standardabweichung; gew. = gewichtet; L&M = Love und Morris)

Distanzmetriken	Min	Max	R	\bar{x}	σ	AD
Realdistanz	0,02	36,18	36,15	9,35	6,96	-
Euklidische Distanz	0,02	24,41	24,39	7,46	5,66	1.277,78
Manhattan-Distanz	0,03	33,49	33,46	9,57	7,41	686,87
Gew. euklidische Distanz ($k=1,228$)	0,03	29,98	29,96	9,16	6,94	418,00
Minkowski-Distanz ($p=1,147$)	0,03	30,76	30,74	8,91	6,86	582,96
Gew. Minkowski-Distanz ($k=1,211$; $p=1,350$)	0,03	34,20	34,17	10,08	7,71	529,08
Formel nach L&M ($k=1,065$; $p=1,678$; $s=1,590$)	0,02	32,89	32,87	9,45	7,43	482,80

Die Realdistanzen im Anwendungsfall Berlin spannen sich zwischen der kürzesten abgefragten Strecke mit 0,02 km und der längsten abgefragten Strecke mit 36,18 km über insgesamt 36,15 km. Für die Kriterien „längste Strecke“ und „Spannweite“ entsprechen die Werte der Realdistanzen auch den Maximalwerten im Anwendungsfall Berlin. Der Minimalwert beider Kriterien wird jeweils von der einfachen euklidischen Distanz erreicht und beträgt für das Kriterium „längste Strecke“ 24,41 km und für die Spannweite 24,39 km. Die gewichtete Minkowski-Distanz bildet mit den im Anwendungsfall Berlin optimalen Parametern $k=1,211$ und $p=1,350$ auch die Maximalwerte für das arithmetische Mittel und die Standardabweichung. Hier ergeben sich Werte von 10,08 km für das arithmetische Mittel und 7,71 km für die Standardabweichung. Die kleinsten Werte dieser Kategorien ergeben sich für die euklidische Distanz mit einem arithmetisches Mittel von 7,46 km sowie einer Standardabweichung von 5,66 km. Die einfache euklidische Distanz produziert durch die kontinuierlich zu kurze Approximation der Strecken im Anwendungsfall Berlin mit 1.277,78 km den größten Fehler hinsichtlich der Summe absoluter Abweichungen. Die kleinste Fehlersumme ergibt sich durch Anwendung der gewichteten euklidischen Distanz bei einer Gewichtung mit dem Faktor $k=1,228$ und beträgt insgesamt 418,00 km.

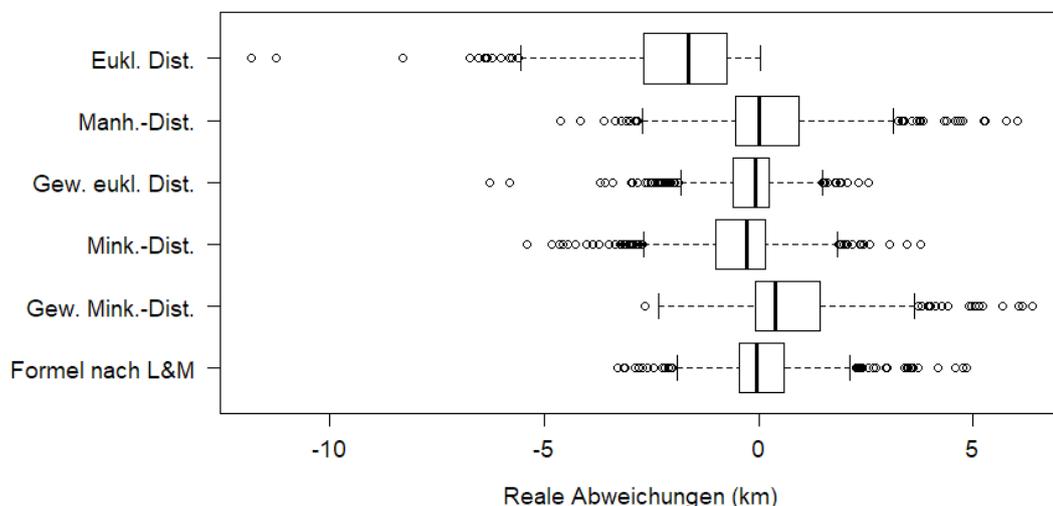


Abbildung 13: Boxplotdiagramm realer Abweichungen aller Distanzmetriken im Anwendungsfall Berlin (eukl. = euklidisch; Dist. = Distanz; Manh. = Manhattan; gew. = gewichtet; Mink. = Minkowski; L&M = Love und Morris)

Das in Abbildung 13 abgebildete Boxplotdiagramm aller im Anwendungsfall Berlin untersuchten Distanzmetriken zeigt übersichtlich die Lage und Streuung der realen Abweichungen im Anwendungsfall Berlin in km. Im Anwendungsfall Berlin ergibt sich für die gewichtete euklidische Distanz eine vergleichsweise spitze Kurtosis sowie eine geringe Spannweite zwischen Minimum und Maximum. Insgesamt spannt sich die Spannweite zwischen -1,81 km als Minimum sowie 1,48 km als Maximum und deckt damit einen Bereich von 3,28 km zwischen oberem und unterem Whisker ab. Somit sind die realen Abweichungen der gewichteten euklidischen Distanz im Anwendungsfall Berlin im Vergleich zu den übrigen angewendeten Distanzmetriken in einem sehr kleinen Bereich gestreut. Dies spricht für die Approximationsgenauigkeit der gewichteten euklidischen Distanz. Auffällig sind diesbezüglich auch die extremsten unteren Ausreißer, die insbesondere bei den Boxplots für die gewichtete euklidische Distanz sowie für die einfache euklidische Distanz gut erkennbar sind. Die jeweils extremsten beiden unteren Ausreißer dieser Distanzmetriken wurden bei der Approximation der gleichen Routen produziert. Bei der einfachen euklidischen Distanz ergeben sich zwei weitere auffällige untere Ausreißer. Deren Werte sind nahezu deckungsgleich und damit schwer als zwei verschiedene Werte erkennbar. Alle beschriebenen Ausreißer werden bei der Approximation von Strecken mit mehr als 29 km Streckenlänge produziert. Somit produzieren euklidische Distanzen im Anwendungsfall Berlin gerade auf langen Strecken extremere Abweichungen als Minkowski-Distanzen. Gleichzeitig scheint sich die gewichtete euklidische Distanz insbesondere zur Approximation kürzerer Strecken besonders gut zu eignen, wie auch die Beschreibung des Boxplotdiagramms für diese Distanzmetrik zeigt. Zusammenfassend lässt das in Abbildung 13 abgebildete Boxplotdiagramm den Schluss zu, dass sich die gewichtete euklidische Distanz insbesondere zur Approximation kurzer und mittellanger urbaner Strecken hervorragend eignet, jedoch vor allem auf längeren Routen mitunter extreme Ausreißer produziert.

5.2.4. Anwendungsfall Los Angeles

Wie schon für den Anwendungsfall Berlin beschrieben, wurde die sehr große Stadtformgruppe 3 in zwei weitere Subgruppe untergliedert. Während die erste Subgruppe vorwiegend europäische Städte beinhaltet, ist in der zweiten Subgruppe ein Großteil der amerikanischen Städte enthalten. Dabei entfallen wie in Abschnitt 4.2 bereits beschrieben interessanterweise amerikanische Städte, denen europäisches Flair nachgesagt wird, auch auf die europäische Subgruppe der Stadtformgruppe drei. Für die amerikanische Subgruppe 3.2 wurde die kalifornische Stadt Los Angeles als Beispielstadt ausgewählt. Das Stadtgebiet von Los Angeles beheimatete im Jahr 2016 vier Millionen Menschen. Während im sogenannten „County of Los Angeles“ 10,2 Millionen leben, zählte die „Los Angeles Five-County Area“ im Jahr 2016 18,8 Millionen Einwohner – und damit mehr als alle US-Bundestaaten außer Kalifornien, Texas, New York und Florida (Discoverlosangeles.com 2017). Die geografische Lage der kalifornischen Metropole befindet sich auf dem 34. Breitengrad nördlicher Richtung sowie auf dem 118. Längengrad westlicher Richtung. Für die Distanzberechnungen im Anwendungsfall Los Angeles wurde eine Entfernung zum Erdmittelpunkt von 6.371,47 km verwendet, die aus der geografischen Lage der Stadt resultiert. Für Form und Verteilung der Blocks in Los Angeles gelten ähnliche Eigenschaften wie im Anwendungsfall Berlin. Auf der Mikroebene dominieren mittelgroße Blocks unterschiedlichster Formen. Für den Anwendungsfall Los Angeles als Repräsentant der Subgruppe amerikanischer Städte ist jedoch gut erkennbar, dass das Stadtbild insbesondere auf der Mesoebene von mittelgroßen Blocks bestimmt

wird. Diese Blocks sind im Vergleich zu den übrigen Anwendungsfällen jedoch auffallend linear angeordnet.

Zur Erstellung der Datengrundlage wurden im Anwendungsfall Los Angeles Fast-Food-Restaurants als Attribut zur Filterung verwendet. Insgesamt ergab sich somit eine Datengrundlage von 564 Strecken. Diese Datengrundlage wurde jedoch, wie in Abschnitt 5.2.2 schon für den Anwendungsfall Tokio beschrieben, um die jeweils längsten Strecken gekürzt, um ein vergleichbares arithmetisches Mittel der Realdistanzen aller Anwendungsfälle zu erhalten. Im Anwendungsfall Los Angeles wurden zudem einige wenige sehr kurze Routen entfernt, bei denen sich Start- und Zielpunkt im selben Gebäude befanden und die somit keine realistischen Entfernungen ergaben. Der bereinigte Datensatz im Anwendungsfall Los Angeles umfasste nach der beschriebenen Anpassung noch 455 Strecken. Die Ergebnisse der Berechnungen werden in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Berechnungsergebnisse im Anwendungsfall Los Angeles (R = Spannweite; \bar{x} = arithmetisches Mittel; σ = Standardabweichung; gew. = gewichtet; L&M = Love und Morris)

Distanzmetriken	Min	Max	R	\bar{x}	σ	AD
Realdistanz	0,02	38,05	38,03	10,35	11,84	-
Euklidische Distanz	0,01	34,00	33,99	8,19	9,51	977,88
Manhattan-Distanz	0,01	45,65	45,64	10,46	12,26	473,42
Gew. euklidische Distanz ($k=1,225$)	0,01	41,64	41,63	10,04	11,65	388,93
Minkowski-Distanz ($p=1,076$)	0,01	43,52	43,51	10,06	11,77	436,70
Gew. Minkowski-Distanz ($k=1,076$; $p=1,155$)	0,01	44,89	44,88	10,47	12,22	426,99
Formel nach L&M ($k=1,008$; $p=1,437$; $s=1,385$)	0,01	43,10	43,09	10,04	11,90	402,43

Für die Realdistanzen im Anwendungsfall Los Angeles ergibt sich nach der eingangs beschriebenen Kürzung des Datensatzes ein arithmetisches Mittel von 10,35 km sowie eine Spannweite von 38,03 km. Diese spannt sich zwischen der kürzesten Realdistanz mit 0,02 km und der längsten Realdistanz mit 38,05 km auf. Die minimale Realdistanz von 0,02 km entspricht zudem dem Höchstwert der Minimaldistanzen im Anwendungsfall Los Angeles. Für die Standardabweichung der Realdistanzen im Anwendungsfall Los Angeles ergibt sich ein Wert von 11,84 km. Wie schon in den Anwendungsfällen für Berlin, Tokio und Buenos Aires, liefert die einfache euklidische Distanz minimale Werte in den Kategorien „Maximaldistanz“, „Spannweite“, „arithmetisches Mittel“ und „Standardabweichung“. Die von der einfachen euklidischen Distanz produzierte Summe absoluter Abweichungen liegt mit 977,88 km deutlich über den AD-Werten der übrigen Distanzmetriken. Die jeweils höchsten Werte der Kategorien „Maximaldistanz“, „Spannweite“ und „Standardabweichung“ ergeben sich im Anwendungsfall Los Angeles bei Anwendung der Manhattan-Distanz. Mit einem Wert von 10,47 km liefert die gewichtete Minkowski-Distanz zudem den höchsten Wert für das arithmetische Mittel im Anwendungsfall Los Angeles.

Hinsichtlich der in Tabelle 4 abgebildeten optimalen Parameter sind zudem die Ausprägungen der einfachen Minkowski-Distanz und der gewichteten Minkowski-Distanz auffällig. Für diese Distanzfunktionen ergibt sich eine optimale Parametrierung von $k=1,076$ für die einfache Minkowski-Distanz und $k=1,076$ sowie $p=1,155$ für die gewichtete Minkowski-Distanz. Auffällig sind

diese Werte, da für diese Metriken bei entsprechender Parameterwahl jeweils die Manhattan-Distanz resultiert. Wie in Abschnitt 3.4 dargestellt, ergibt sich die Manhattan-Distanz bei der einfachen Minkowski-Distanz für $k=1$ und bei der gewichteten Minkowski-Distanz für $k=p=1$. Somit liegen die jeweils optimalen Parameter der beiden untersuchten Minkowski-Distanzen im Anwendungsfall Los Angeles nah an den zur Darstellung der Manhattan-Distanz verwendeten Parameterwerten. Dies lässt die Vermutung zu, dass sich die eingangs des aktuellen Abschnitts beschriebenen städtebaulichen Eigenschaften der in Abschnitt 4.2 definierten Stadtformgruppe 3.2 auf die Wegstreckenapproximation auswirken. Dieser Sachverhalt wird in Abschnitt 5.3 vor dem Hintergrund der städteübergreifenden Betrachtungen näher erläutert.

Die minimale Summe absoluter Abweichungen wird im vorliegenden Anwendungsfall bei Anwendung der gewichteten euklidischen Distanz mit einer Gewichtung von $k=1,225$ erreicht und beträgt 388,93 km. Dennoch liegen die AD-Werte der übrigen Distanzfunktionen mit Ausnahme der einfachen euklidischen Distanz nah am durch die gewichtete euklidische Distanz erreichten Optimum.

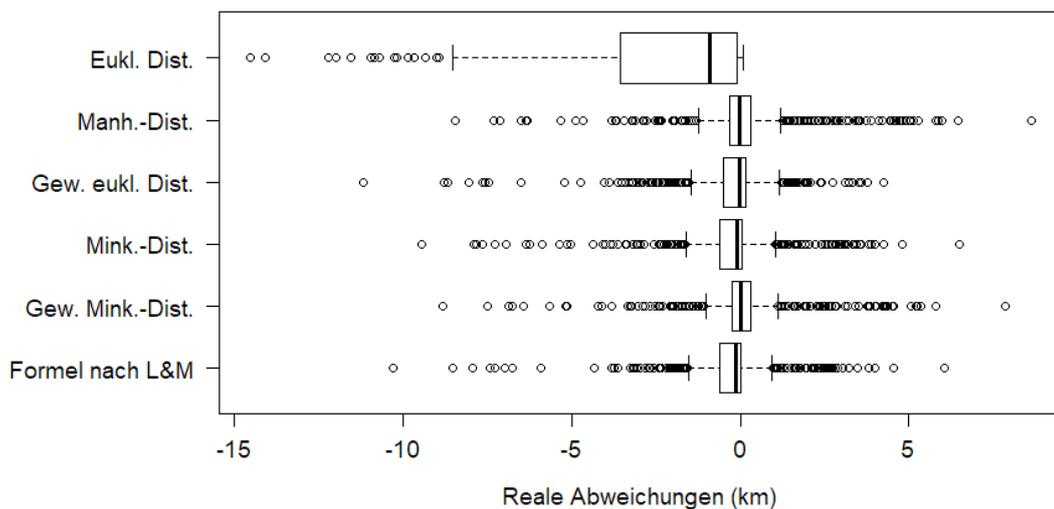


Abbildung 14: Boxplotdiagramm realer Abweichungen aller Distanzmetriken im Anwendungsfall Los Angeles (eukl. = euklidisch; Dist. = Distanz; Manh. = Manhattan; gew. = gewichtet; Mink. = Minkowski; L&M = Love und Morris)

Abbildung 14 stützt die aus der Betrachtung von Tabelle 4 resultierende Vermutung hinsichtlich der sich annähernden Approximationsqualität der im Anwendungsfall Los Angeles verwendeten Distanzmetriken. So liegen die in Abbildung 14 als Boxplotdiagramm dargestellten Realabweichungen der unterschiedlichen im Anwendungsfall Los Angeles angewendeten Distanzmetriken äußerst eng beieinander. Mit Ausnahme der einfachen euklidischen Distanz weisen die Boxen aller Distanzmetriken eine äußerst spitze Kurtosis und damit extrem kleine Interquartilsabstände zwischen dem 25- und dem 75%-Quartil auf. Auch der zwischen dem oberen und dem unteren Whisker aufgespannte Bereich ist bei allen Distanzmetriken bemerkenswert ähnlich. Der geringste Abstand zwischen dem oberen und dem unteren Quartil, welche in den Boxplotdiagrammen die Box darstellen, wird von der gewichteten Minkowski-Distanz erreicht. Dabei liegen jedoch alle Distanzmetriken im Anwendungsfall Los Angeles wie beschrieben bemerkenswert nah beieinander. Gleichzeitig fällt auf, dass alle Distanzmetriken außer der einfachen euklidischen Distanz für den

vorliegenden Anwendungsfall enorm viele Ausreißer liefern. Dies erlaubt den Schluss, dass einige Routen im Anwendungsfall Los Angeles von Minkowski-Distanzen besser und teilweise sogar deutlich besser approximiert werden als von der gewichteten euklidischen Distanz. Gleichzeitig produzieren die angewendeten Minkowski-Distanzen auch in größerem Ausmaß Ausreißer als die gewichtete euklidische Distanz. Zusammenfassend ergibt sich für die gewichtete euklidische Distanz im Anwendungsfall Los Angeles die geringste Summe absoluter Abweichungen. Somit ist diese Distanzmetrik zur Wegstreckenapproximation im Anwendungsfall Los Angeles insgesamt am besten geeignet. Gleichzeitig werden einige Strecken von Minkowski-Distanzen exakter abgeschätzt, was insbesondere auf die gewichtete Minkowski-Distanz zutrifft.

5.2.5. Anwendungsfall Mogadischu

Die somalische Hauptstadt Mogadischu repräsentiert die in Abschnitt 4.2 vorgestellte Stadtformgruppe 4. Mogadischu liegt im Süden Somalias an der Küste zum Indischen Ozean. Schätzungen des Auswärtigen Amtes (2017) zufolge beheimatet die afrikanische Stadt deutlich über eine Million Einwohner einschließlich einer großen Anzahl Binnenvertriebener, während die Vereinten Nationen (2014a) die Bevölkerung Mogadischus auf 2,14 Millionen Menschen im Jahr 2015 schätzten. Damit ist Mogadischu die bevölkerungsreichste Stadt Somalias. Innerhalb der von Louf und Barthelemy (2014) untersuchten Städte nimmt Mogadischu eine spezielle Rolle ein und ist die einzige untersuchte Stadt, die in Stadtformgruppe 4 eingeteilt wurde. Das Stadtbild von Mogadischu ist vorrangig von kleinen quadratischen sowie einigen wenigen rechteckigen Blocks geprägt. Mogadischu liegt lediglich rund 200 km nördlich des Äquators und somit auf dem zweiten Breitengrad nördlicher Richtung. Hinsichtlich der geografischen Länge liegt die somalische Stadt auf dem 45. Längengrad östlicher Richtung. Aus dieser Lage resultiert eine Entfernung zum Erdmittelpunkt von 6.378,11 km, die auch für die Berechnungen verwendet wurden.

Die Datengrundlage für den Anwendungsfall Mogadischu konnte nicht wie in den übrigen Anwendungsfällen durch die Filterung einzelner Kategorien geschaffen werden, da die Eingrenzung nach Kategorien die Auswahl zu sehr beschränkte und jeweils nur vereinzelt Koordinaten lieferte. Dies ist höchstwahrscheinlich auf die unzureichende Datenpflege für Mogadischu in OpenStreetMap zurückzuführen. Im speziellen Fall von Mogadischu wurde die Datengrundlage unabhängig etwaiger Kategorien geschaffen und umfasst dennoch lediglich 80 Strecken. Diese sind allerdings sehr gleichmäßig über das gesamte Stadtgebiet verteilt. Die Ergebnisse der Distanzberechnungen für den Anwendungsfall Mogadischu sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Berechnungsergebnisse im Anwendungsfall Mogadischu (R = Spannweite; \bar{x} = arithmetisches Mittel; σ = Standardabweichung; gew. = gewichtet; L&M = Love und Morris)

Distanzmetriken	Min	Max	R	\bar{x}	σ	AD
Realdistanz	0,02	15,55	15,53	3,06	2,72	-
Euklidische Distanz	0,02	11,85	11,83	2,43	2,17	50,35
Manhattan-Distanz	0,03	16,57	16,54	3,17	2,93	29,88
Gew. euklidische Distanz ($k=1,235$)	0,02	14,63	14,61	3,00	2,68	19,63
Minkowski-Distanz ($p=1,139$)	0,02	15,25	15,22	2,95	2,71	22,99
Gew. Minkowski-Distanz ($k=1,235$; $p=1,363$)	0,03	17,08	17,05	3,36	3,06	20,85
Formel nach L&M ($k=1,232$; $p=1,369$; $s=1,366$)	0,03	17,08	17,06	3,36	3,06	20,85

Die eingangs beschriebene Sonderstellung Mogadischu ist auch und vor allem an den Auswertungen des Datensatzes gut erkennbar. Die Realdistanzen im Anwendungsfall Mogadischu decken zwischen der kürzesten abgefragten Strecke mit 0,02 km und der längsten abgefragten Strecke mit 15,55 km somit eine Spannweite von lediglich 15,53 km ab. Auch das arithmetische Mittel der Realdistanzen ist in Mogadischu mit 3,06 km deutlich geringer als die Zielvorgabe zum Anwendungsfallübergreifenden Vergleich. Aufgrund der ohnehin schon sehr eingeschränkten Datengrundlage war für den vorliegenden Anwendungsfall eine Einschränkung dieser auf bestimmte Streckenlängen jedoch nicht möglich. Für Mogadischu liefert die einfache euklidische Distanz die jeweils kleinsten Werte in den allen Kategorien außer der Summe absoluter Abweichungen, dem AD-Kriterium. In dieser Kategorie liegt der von der einfachen euklidischen Distanz produzierte Wert mit 50,35 km deutlich über den AD-Werten der übrigen im Anwendungsfall Mogadischu analysierten Distanzmetriken. Die gewichtete Minkowski-Distanz und die Formel nach Love und Morris produzieren im Anwendungsfall Mogadischu auffallen ähnliche Werte. Dies liegt an den jeweils optimalen Parametern dieser beiden Distanzfunktionen. Diese weisen im vorliegenden Anwendungsfall der Stadt Mogadischu deutliche Ähnlichkeiten auf, was somit letzten Endes wiederum in äußerst ähnlichen Berechnungsergebnissen resultiert. Die kleinste Summe absoluter Abweichungen wird im Anwendungsfall Mogadischu von der gewichteten euklidischen Distanz mit einer Gewichtung von $k=1,235$ produziert und beträgt insgesamt 19,63 km.

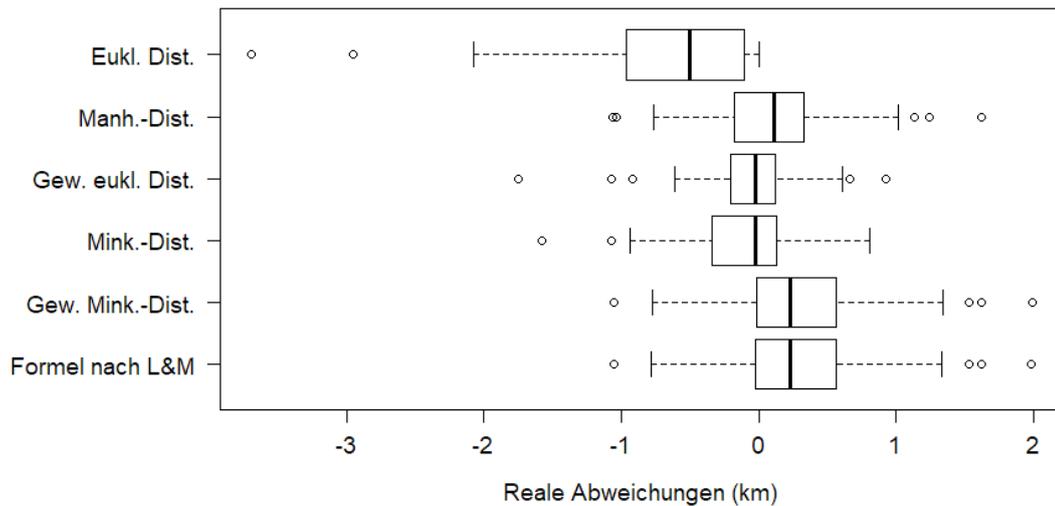


Abbildung 15: Boxplotdiagramm realer Abweichungen aller Distanzmetriken im Anwendungsfall Mogadischu (eukl. = euklidisch; Dist. = Distanz; Manh. = Manhattan; gew. = gewichtet; Mink. = Minkowski; L&M = Love und Morris)

Abbildung 15 zeigt das Boxplotdiagramm der realen Abweichungen aller im Anwendungsfall Mogadischu untersuchten Distanzmetriken. Wie schon in der Ergebnisbeschreibung in Tabelle 5 liefert die gewichtete euklidische Distanz auch am vorliegenden Boxplotdiagramm die exaktesten Approximationswerte bzw. die geringste Streuung hinsichtlich der sich ergebenden Abweichungen. Der zwischen dem oberen und dem unteren Whisker aufgespannte Bereich erstreckt sich von -0,61 km als Minimum bis 0,61 km als Maximalwert und ist somit deutlich schmaler als die Spannweite der übrigen Distanzmetriken. Auch die zwischen dem oberen und dem unteren Quartil dargestellte Box weist im Vergleich zu den restlichen Distanzfunktionen eine spitzere Kurtosis auf. Der Median, der für die gewichtete euklidische Distanz innerhalb der Box sehr mittig liegt, lässt auf eine symmetrische Verteilung der Werte schließen. Die wenigen Ausreißer, welche sich im Anwendungsfall Mogadischu ergeben, sind größtenteils auf überdurchschnittlich lange Strecken zurückzuführen. Dabei muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass der Diagrammbereich des Boxplotdiagramms für den vorliegenden Anwendungsfall wesentlich feingliedriger definiert ist als in den übrigen Anwendungsfällen. Über alle Distanzmetriken hinweg erstreckt sich der zwischen allen Ausreißern aufgespannte Bereich von -3,70 km bis 1,99 km. Somit liegen sämtliche Ausreißer im Anwendungsfall Mogadischu in einem Bereich von insgesamt lediglich 5,69 km. Dies ist jedoch auf die im aktuellen Anwendungsfall vorwiegend kurzen Routen zurückzuführen.

5.3. Städteübergreifende Betrachtung und Bewertung der Ergebnisse

Um die in den Anwendungsfällen vorgestellten Ergebnisse zusammenfassen, sollen deren wesentliche Resultate anschließend nochmals übersichtlich beschrieben und analysiert werden. Um die Ergebnisse der einzelnen Beispielstädte vergleichbar zu gestalten, wurde für die Distanzfunktionen aller Anwendungsfälle der Quotient aus dem entsprechenden AD-Wert und der Summe der Re-

aldistanzen der jeweiligen Anwendungsfälle gebildet. Somit wurde die Summe absoluter Abweichung ins Verhältnis zur tatsächlichen Wegstrecke je Anwendungsfall gesetzt, um die Ergebnisse auch übergreifend vergleichen zu können. Der berechnete Quotient beschreibt die prozentuale Abweichung, die eine Distanzmetrik im jeweiligen Anwendungsfall produzierte. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Prozentuale Abweichungen je Anwendungsfall (gew. = gewichtet; eukl. = euklidisch; Dist. = Distanz; Mink. = Minkowski; Manh. = Manhattan; Abw. = Abweichung)

Distanzmetrik	Gew. Eukl.		Gew. Mink.-		Formel L&M
	Eukl. Dist.	Manh.-Dist.	Dist.	Mink.-Dist	
Buenos Aires	20,85%	12,48%	7,52%	10,34%	8,90%
Tokio	22,12%	10,84%	7,64%	10,29%	9,19%
Berlin	20,27%	10,89%	6,63%	9,25%	7,66%
Los Angeles	20,82%	10,08%	8,28%	9,30%	8,57%
Mogadischu	20,59%	12,22%	8,03%	9,40%	8,53%
Durchschn. Abw.	20,93%	11,30%	7,62%	9,71%	8,57%

Wie schon in den Unterkapiteln zu Abschnitt 5.2 für die einzelnen Anwendungsfälle beschrieben, zeigt sich auch in Tabelle 6 die Überlegenheit der gewichteten euklidischen Distanz hinsichtlich der Approximationsqualität gegenüber den übrigen untersuchten Distanzmetriken. So produziert die gewichtete euklidische Distanz unter Verwendung optimaler Gewichtungsfaktoren für alle Beispielstädte jeweils sowohl verhältnismäßig als auch absolut die jeweils geringsten Abweichungen. Über alle Anwendungsfälle betrachtet, weichen die mit der gewichteten euklidischen Distanz approximierten Strecken im Mittel 7,62% von den tatsächlichen Realdistanzen ab.

Die jeweils größte Abweichung wird in allen Anwendungsfällen von der einfachen euklidischen Distanz geliefert. Wie schon in den jeweiligen Anwendungsfällen beschrieben, war dieses Ergebnis aufgrund der Einfachheit und der damit einhergehenden Beschränktheit dieser Distanzfunktion erwartbar. Dies liegt wie in Abschnitt 3.4 beschrieben daran, dass diese Metrik lediglich die jeweils kürzeste Entfernung zwischen zwei Punkten bestimmt. Somit werden Realdistanzen, die selten bis nie der Luftlinie entsprechen durchgehend zu kurz approximiert. Dieser Sachverhalt resultiert in hohen Fehlerwerten für diese Metrik.

Ähnliches gilt für die Manhattan-Distanz. Die Streckenlänge wird von dieser Distanzmetrik, wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, aus der Summe der Katheten eines rechtwinkligen Dreiecks gebildet und liefert nach der einfachen euklidischen Distanz über alle Anwendungsfälle hinweg die jeweils zweitgrößten Fehlerwerte. Dennoch sind die Abweichungen der Manhattan-Distanz mit insgesamt durchschnittlich 11,30% Abweichung vom AD-Wert deutlich niedriger als die der einfachen euklidischen Distanz mit insgesamt durchschnittlich 20,93% Abweichung vom AD-Wert. Einen Sonderfall hinsichtlich der Manhattan-Distanz stellt der Anwendungsfall Los Angeles dar. Wie bereits in Abschnitt 5.2.4 beschrieben, wird das Stadtbild der kalifornischen Metropole als Vertreter US-amerikanischer Großstädte von auffallend linear und rasterartig angeordneten mittelgroßen Blocks geprägt. Diese Feststellung legt die Vermutung nahe, dass sich die Manhattan-Distanz zur Wegstreckenapproximation der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Stadtformgruppe 3.2 gut eignet.

In Tabelle 6 ist zu erkennen, dass die Manhattan-Distanz wie vermutet im Anwendungsfall Los Angeles mit 10,08% für alle Anwendungsfälle der Manhattan-Distanz den niedrigsten Wert erreicht. Auch der Unterschied hinsichtlich der Approximationsqualität der Manhattan-Distanz zu den übrigen Distanzmetriken fällt mit Ausnahme der einfachen euklidischen Distanz im Anwendungsfall Los Angeles geringer aus als in den meisten übrigen Anwendungsfällen. Dabei produziert die Manhattan-Distanz wie beschrieben auch im Anwendungsfall Los Angeles schlechtere Werte als die übrigen Distanzfunktionen mit Ausnahme der einfachen euklidischen Distanz. Dennoch gleicht sich auch der optimale Parameter der einfachen Minkowski-Distanz wie in Abschnitt 5.2.4 bereits beschrieben mit einem Wert von $k=1,076$ stark an den Parameter $k=1$ an. Für diesen Parameter ergibt sich für die einfache Minkowski-Distanz wie in Abschnitt 3.4 beschrieben die Manhattan-Distanz. Gleiches gilt für die gewichtete Minkowski-Distanz. Diese gleicht sich im Anwendungsfall Los Angeles mit Parameterwerten von $k=1,076$ und $p=1,155$ näher an die Werte $k=p=1$ an, für die sich wie in Abschnitt 3.4 beschrieben die Manhattan-Distanz ergibt, als in sämtlichen übrigen Anwendungsfällen. Dies ist insbesondere damit zu erklären, dass reale Strecken selbst in scheinbar prädestinierten Umgebungen nur äußerst selten lediglich über zwei gerade Katheten im rechten Winkel dargestellt werden können und diese zudem nicht zwangsläufig auch die kürzeste Route darstellen. Zudem zeigt auch die in Abschnitt 4.1 vorgestellte ABCD-Typologie, dass Städte in der Regel nicht ausschließlich aus einer einzigen städtebaulichen Typologie bestehen. Vor dem Hintergrund verschiedener transporthistorischer Epochen bestehen vom Stadtzentrum bis in die Außenbezirke jeweils unterschiedliche Typologien. Stadtbilder bestehen daher also nicht ausschließlich aus einem Muster, sondern setzen sich üblicherweise aus mehreren unterschiedlichen Typologien zusammen. Durch entsprechend flexible Parametrierung approximieren somit sowohl die einfache Minkowski-Distanz als auch die gewichtete Minkowski-Distanz exakter als die Manhattan-Distanz. Dabei gleichen sich die Parameterwerte allerdings eindeutig an die zur Darstellung der Manhattan-Distanz benötigten Parameter an. Zusammenfassend ist der städtebauliche Effekt auf die in Stadtformgruppe 3.2 enthaltenen Städten angewendeten Distanzfunktionen somit eindeutig bemerkbar. Dennoch wirkt sich dieser Effekt aufgrund des beschriebenen Sachverhalts nicht derart gravierend auf die Approximationsqualität aus wie eingangs vermutet.

Hinsichtlich der untersuchten Minkowski-Distanzen ist die gewichtete Variante der Minkowski-Distanz der einfachen Minkowski-Distanz in allen Anwendungsfällen überlegen. Über alle Anwendungsfälle betrachtet ergibt sich für die einfache Minkowski-Distanz eine durchschnittliche Abweichung von 9,71%, während die gewichtete Minkowski-Distanz eine prozentuale Abweichung in Relation zur Realdistanz von durchschnittlich 8,98% erreicht. Dieses Ergebnis ist auf den in Abschnitt 3.4 beschriebenen Gewichtungsfaktor zurückzuführen, durch den sich die gewichtete Minkowski-Distanz flexibler anpassen lässt. Dennoch wirkt sich diese zusätzliche Flexibilität verglichen mit den Qualitätsunterschieden der euklidischen Distanzen (einfach und gewichtet) in wesentlich geringerem Maß aus. Abschließend ist festzustellen, dass sowohl die einfache als auch die gewichtete Minkowski-Distanz in sämtlichen Anwendungsfällen weder besonders gute noch besonders schlechte Approximationswerte liefern. Dabei ist die gewichtete Variante der Minkowski-Distanz der einfachen Minkowski-Distanz geringfügig aber kontinuierlich überlegen.

Nach der eingangs dieses Abschnitts als exaktesten Distanzmetrik beschriebenen gewichteten euklidischen Distanz liefert die Formel nach Love und Morris in allen Anwendungsfällen die jeweils zweitniedrigsten Abweichungswerte. Einzig im Anwendungsfall Mogadischu gleicht sich die prozentuale Abweichung der gewichteten Minkowski-Distanz an die der Formel nach Love und Morris an. Wie in Abschnitt 3.4 dargestellt, sind sich diese beiden Distanzfunktionen sehr ähnlich. Dabei ist die Überlegenheit der Formel nach Love und Morris wie in Abschnitt 3.4 beschrieben auf die Nutzung der dritten Variablen s zurückzuführen. Bei Anwendung der Formel nach Love und Morris ergibt sich für den Fall $s=p$ die gewichtete Minkowski-Distanz. Tabelle 7 zeigt, dass diese beiden Parameter für die Formel nach Love und Morris in allen Anwendungsfällen stark korrelieren. Dennoch führt die getrennte Nutzung beider Parameter wie bereits beschrieben generell zu besseren Ergebnissen als bei Anwendung der gewichteten Minkowski-Distanz.

Über alle Anwendungsfälle hinweg ergibt sich somit jeweils die gewichtete euklidische Distanz als beste Distanzmetrik, die Formel nach Love und Morris als zweitbeste Distanzmetrik und die gewichtete Minkowski-Distanz als drittbeste Distanzmetrik. Anschließend sollen diese Metriken und deren jeweils optimale Parameter nochmals eingehender betrachtet werden. Tabelle 7 zeigt die jeweils optimalen Parameter aller Anwendungsfälle für die gewichtete euklidische Distanz, die gewichtete Minkowski-Distanz und die Formel nach Love und Morris als anwendungsfallübergreifend beste Distanzmetriken auf.

Tabelle 7: Optimale Parameter der drei anwendungsfallübergreifend besten Distanzmetriken aller Anwendungsfälle (gew. = gewichtet; eukl. = euklidisch; Dist. = Distanz; Mink. = Minkowski)

Distanzmetrik Parameter	Gew. Eukl. Dist.	Gew. Mink.-Dist.		Formel nach L&M		
	k	k	p	k	p	s
Buenos Aires	1,231	1,215	1,380	1,084	1,772	1,682
Tokio	1,251	1,188	1,256	1,113	1,333	1,306
Berlin	1,228	1,211	1,350	1,065	1,678	1,590
Los Angeles	1,225	1,076	1,155	1,008	1,437	1,385
Mogadischu	1,235	1,235	1,363	1,232	1,369	1,366

Die optimalen Parameter der gewichteten Minkowski-Distanz k und p korrelieren wie bereits beschrieben deutlich. Für beide Datenreihen ergibt sich über alle Anwendungsfälle ein Korrelationskoeffizient nach Pearson von 0,94. In den Anwendungsfällen Buenos Aires, Berlin und Mogadischu sind beide Werte jeweils relativ hoch und fallen im Gegensatz dazu insbesondere im Anwendungsfall Los Angeles deutlich niedriger aus. Hinsichtlich der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Stadtformen ist bezüglich der in Tabelle 7 dargestellten optimalen Parameter dieser Distanzmetrik im Allgemeinen allerdings kein Zusammenhang festzustellen. Eine Ausnahme stellt wie bereits beschrieben der Anwendungsfall Los Angeles als Vertreter amerikanischer Stadtformen dar. Innerhalb dessen wirkt sich die Stadtform zwar eindeutig auf die bestmögliche Parametrisierung der Minkowski-Distanzen aus, beeinflusst die Approximationsqualität und die Wahl der optimalen Distanzfunktion allerdings kaum.

Zur Berechnung der Formel nach Love und Morris werden wie in Abschnitt 3.4 beschrieben die drei Variablen k , p und s verwendet. Während die Parameter p und s mit einem Korrelationskoeffizienten nach Pearson von 1 eindeutig miteinander korrelieren, weist die GewichtungsvARIABLE k sowohl für den Parameter p mit $-0,38$ als auch für den Parameter s mit $-0,29$ negative Korrelationskoeffizienten auf. Konkret bedeutet dies, dass die k -Gewichtung bei hohen Werten für p und s niedrig ausfällt und bei niedrigen Werten für diese Parameter entsprechend höhere Werte annimmt. Diese negativen Korrelationskoeffizienten lassen den Schluss zu, dass k mit p und s schwach gegenläufig korreliert. Allerdings befinden sich die Ausprägungen der entsprechenden Korrelationskoeffizienten jenseits statistisch relevanter Werte. Für die Anwendungsfälle Buenos Aires und Berlin erreichen die Parameter p und s die höchsten Werte, während sich für die Anwendungsfälle Tokio und Mogadischu vergleichsweise niedrige Werte als optimale Parameter ergeben. Der Gewichtungsfaktor k erreicht mit $1,232$ den deutlich höchsten Wert für den Anwendungsfall Mogadischu, während sich zur Approximation der Strecken im Anwendungsfall Los Angeles mit einem Wert von $1,008$ der niedrigste Wert ergibt. Allerdings ist auch im Fall der Formel nach Love und Morris kein Zusammenhang der jeweils optimalen Parameterwerte je Anwendungsfall und den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Stadtformgruppen festzustellen.

Die gewichtete euklidische Distanz stellt wie in Abschnitt 3.4 beschrieben eine der einfachsten der untersuchten Distanzmetriken dar. Zur Wegstreckenapproximation wird lediglich die einfache euklidische Distanz und damit die kürzeste mögliche Strecke zwischen zwei Koordinaten mit dem Gewichtungsfaktor k multipliziert. Eine Korrelationsanalyse wie in den Fällen der gewichteten Minkowski-Distanz und der Formel nach Love und Morris ist im Fall der gewichteten euklidischen Distanz also nicht möglich. Allerdings ist auffällig, dass die Gewichtungswerte lediglich in geringem Maße voneinander abweichen. Der Maximalwert der Anwendungsfälle beträgt für den Anwendungsfall Tokio $k=1,251$. Der Minimalwert wird mit $k=1,225$ im Anwendungsfall Los Angeles erreicht.

Aus der Städteübergreifenden Betrachtung zu Beginn dieses Abschnitts geht hervor, dass mit der gewichteten euklidischen Distanz in allen Anwendungsfällen die besten Approximationsergebnisse erreicht werden. Teilweise sind deren Approximationsergebnisse sogar deutlich besser als die der jeweils nächstbesten Metrik. Die zweitbeste Distanzmetrik ist für alle Anwendungsfälle die Formel nach Love und Morris. Insbesondere im Anwendungsfall Los Angeles wurde mit der Formel nach Love und Morris eine Approximationsqualität erreicht, die annähernd der der gewichteten euklidischen Distanz entspricht. Zudem fällt bei der Betrachtung des in Abschnitt 5.2.4 abgebildeten Boxplotdiagramms im Anwendungsfall Los Angeles wie bereits beschrieben auf, dass sich die Approximationsgenauigkeit der untersuchten Distanzmetriken hinsichtlich derer absoluten Abweichungen anzunähern scheint. Gleiches gilt, wenn auch nicht so ausgeprägt, für den Anwendungsfall Tokio und dessen in Abschnitt 5.2.2 dargestelltes Boxplotdiagramm. Bei der Betrachtung der Boxplotdiagramme dieser beiden Anwendungsfälle fällt zudem auf, dass sowohl für den Anwendungsfall Tokio als auch für den Anwendungsfall Los Angeles in deutlich größerem Umfang Ausreißer produziert wurden, als in den übrigen Anwendungsfällen. Wie in Abschnitt 5.1 für das AD-Kriterium beschrieben, produziert dieses Kriterium bei proportional gleich großen Abweichungen für lange Strecken insgesamt größere Fehler als bei der Approximation kurzer Routen. Bei der Anwendung dieses Kriteriums wird somit wie beschrieben vorausgesetzt, dass die

verwendete Funktion lange Strecken genauer approximiert als kurze. Die beschriebenen Beobachtungen der Boxplotdiagramme implizieren eine nähere Betrachtung angewendeten Distanzmetriken hinsichtlich deren Approximationsqualität auf kurzen und langen Strecken.

Die Untersuchung der Datensätze nach deren Anzahl von Strecken mit mehr als 20 km Realdistanz ergab das in Tabelle 8 dargestellte Ergebnis.

Tabelle 8: Anteil von Strecken mit mehr als 20 km Realdistanz je Anwendungsfall

	Strecken im Datensatz	Strecken über 20 km	Anteil (%)
Buenos Aires	870	88	10,11%
Tokio	655	111	16,95%
Berlin	674	55	8,16%
Los Angeles	454	111	24,45%
Mogadischu	80	0	0,00%

Anhand der Aufstellung in Tabelle 8 zeigt sich eindeutig, dass im Anwendungsfall Tokio und insbesondere auch im Anwendungsfall Los Angeles mehr lange Routen untersucht und approximiert wurden, als in den übrigen Anwendungsfällen. Zudem liegt auch die in den Anwendungsfällen Tokio in Abschnitt 5.2.2 und Los Angeles in Abschnitt 5.2.4 berechnete Standardabweichung der Realdistanzen mit Werten von 9,80 km für Tokio und 11,84 km für Los Angeles deutlich über den Standardabweichungen für die Realdistanzen der übrigen Beispielstädte. In Berlin wird für die Standardabweichung der Realdistanzen ein Wert von lediglich 6,96 km und in Buenos Aires ein Wert von 7,92 km erreicht. Für den Anwendungsfall Mogadischu ist der berechnete Wert der Standardabweichung der Realdistanzen aufgrund der in den Abschnitten 5.1 und 5.2.5 beschriebenen Problematik hinsichtlich des Datensatzes nicht mit den übrigen Anwendungsfällen vergleichbar. Der Vollständigkeit halber beträgt die Standardabweichung der Realdistanzen für Mogadischu 2,72 km bei einem arithmetischen Mittel der Realdistanzen von 3,06 km. Eine vergleichsweise hohe Standardabweichung bei einem einheitlichen arithmetischen Mittel lässt auf eine ungleiche Verteilung der Streckenlängen im Datensatz schließen. Konkret bedeutet dies, dass der Datensatz einerseits viele sehr lange und andererseits auch viele sehr kurze Strecken enthält. Insbesondere die Betrachtungen der in den jeweiligen Anwendungsfällen beschriebenen Boxplotdiagramme in Verbindung mit den Ergebnissen in Tabelle 8 führen zur Vermutung, dass sich die Approximationsqualität von Minkowski-Distanzen mit zunehmender Streckenlänge verbessert. Weiter wird diese Vermutung durch die in Abschnitt 3.4 von Love und Morris beschriebene Aussage gestützt, wonach deren Formel bei der Approximation längerer Distanzen zwischen verschiedenen Städten in den USA die besten Ergebnisse lieferte. Um diese Vermutung weiter zu untersuchen, wurden aus den Datensätzen der in Abschnitt 5.2 betrachteten Anwendungsfälle die jeweils kürzesten Routen entfernt, um eine gemittelte Streckenlänge von ca. 20 km zu erhalten.

Da die Formel nach Love und Morris genauer approximiert als die übrigen Ausprägungen der Minkowski-Distanzen und die gewichtete euklidische Distanz deutlich bessere Ergebnisse liefert als die einfache euklidische Distanz, werden im Rahmen der weiteren Untersuchungen lediglich diese beiden Metriken jeweils als Vertreter der euklidischen Distanzen bzw. der Minkowski-Dis-

tanzen ausgewählt und eingehender untersucht. Neben der in den Anwendungsfällen verwendeten Datengrundlage von ca. 10 km wurden anschließend, basierend auf der beschriebenen Datengrundlage, die jeweils optimalen Parameter für die gewichtete euklidische Distanz und die Formel nach Love und Morris auch für eine mittlere Streckenlänge von ca. 20 km berechnet und angewendet.

Wie bereits in den Abschnitten zur Modellerstellung sowie bei der Anwendung der Distanzmetriken für die somalische Hauptstadt Mogadischu beschrieben, stellt der Anwendungsfall Mogadischu einen Sonderfall dar. In diesem Anwendungsfall beträgt das arithmetische Mittel der Realdistanzen lediglich 3,06 km. Zudem enthält der untersuchte Datensatz keine Strecke mit mehr als 20 km Länge. Um die geplante Analyse dennoch auch für den Anwendungsfall Mogadischu durchführen zu können, wurden auch aus diesem Datensatz die kürzesten Strecken entfernt, um eine Verdopplung des arithmetischen Mittels der Realdistanzen zu erreichen. Dieses beträgt somit ca. 6 km statt der in den übrigen Anwendungsfällen angestrebten ca. 20 km.

Die Ergebnisse der Berechnungen sowie die Gegenüberstellung der Ergebnisse für die ursprüngliche gemittelte Streckenlänge von 10 km, bzw. 3 km im Anwendungsfall Mogadischu und eine verdoppelte mittlere Streckenlänge von 20 km, bzw. 6 km im Anwendungsfall Mogadischu sind in Tabelle 9 abgebildet.

Tabelle 9: Approximationsqualität der gewichteten euklidischen Distanz und der Formel nach Love und Morris auf mittleren und langen Strecken (gew. = gewichtet; eukl. = euklidisch; Dist. = Distanz; Abw. = Abweichung; L&M = Love und Morris)

AD/Real (%)	Ursprüngliche mittlere Streckenlänge		Doppelte mittlere Streckenlänge	
	Gew. Eukl. Dist.	Formel nach L&M	Gew. Eukl. Dist.	Formel nach L&M
Buenos Aires	7,52%	8,90%	5,51%	5,86%
Tokio	7,64%	9,19%	6,92%	7,77%
Berlin	6,63%	7,66%	5,76%	6,08%
Los Angeles	8,28%	8,57%	7,60%	7,83%
Mogadischu	8,03%	8,53%	5,19%	5,50%
Durchschn. Abw.	7,62%	8,57%	6,20%	6,61%

Tabelle 9 zeigt Vergleichswerte für die Approximationsqualität der gewichteten euklidischen Distanz und der Formel nach Love und Morris jeweils für die mittlere Streckenlänge von ca. 10 km, bzw. ca. 3 km im Anwendungsfall Mogadischu sowie für die doppelte mittlere Streckenlänge von ca. 20 km, bzw. ca. 6 km im Anwendungsfall Mogadischu. Dabei fällt auf, dass sowohl die Approximationsqualität der Formel nach Love und Morris als auch die Approximationsqualität der gewichteten euklidischen Distanz in allen Anwendungsfällen für die verdoppelte mittlere Streckenlänge zunimmt. Die Approximationsqualität der gewichteten euklidischen Distanz verbessert sich von durchschnittlich 7,62% bei der ursprünglichen mittleren Streckenlänge auf durchschnittlich 6,20% bei einer verdoppelten mittleren Streckenlänge und damit um 1,42 Prozentpunkte. Dem gegenüber verbessert sich die Approximationsqualität der Formel nach Love und Morris mit Abweichungswerten von durchschnittlich 8,57% bei einer der ursprünglichen mittleren Streckenlänge sogar um 1,96 Prozentpunkte auf eine durchschnittliche Abweichung von 6,61% bei der

doppelten mittleren Streckenlänge. Somit verbessert sich die Approximationsqualität mit zunehmender Streckenlänge sowohl für die gewichtete euklidische Distanz als auch für die Formel nach Love und Morris. Allerdings fallen die Verbesserungen hinsichtlich der Approximationsqualität bei der Formel nach Love und Morris deutlicher aus, als bei der gewichteten euklidischen Distanz.

Diese Beobachtung belegt, dass sich die Approximationsqualität der Formel nach Love und Morris mit zunehmender Streckenlänge deutlicher verbessert als die der gewichteten euklidischen Distanz. Gleichzeitig approximiert die gewichtete euklidische Distanz auch bei der verdoppelten mittleren Streckenlänge die Realdistanzen noch immer exakter als die Formel nach Love und Morris. Urbane Versorgungsverkehre umfassen wie in Abschnitt 2.1 beschrieben in der Regel durchschnittliche Streckenlängen von lediglich ca. acht Kilometern. Somit können längere Strecken und damit auch die genauere Untersuchung der Formel nach Love und Morris von der Betrachtung ausgeschlossen werden. Um längere Distanzen gut zu approximieren, sind unter Umständen also andere Metriken als die gewichtete euklidische Distanz nötig. Gerade im Fall längerer Strecken kann allerdings auch ein Zusammenhang der entsprechend optimalen Distanzmetrik mit der jeweiligen Stadtform ausgeschlossen werden. Somit ist die gewichtete euklidische Distanz für sämtliche Simulationsszenarien zur urbanen Versorgung zur Wegstreckenapproximation am besten geeignet und soll aus diesem Grund nachfolgend nochmals genauer untersucht werden.

Die gewichtete euklidische Distanz hängt wie in Abschnitt 3.4 beschrieben lediglich von einem einzigen Parameter ab. Zur Berechnung wird die einfache euklidische Distanz mit dem Gewichtungsfaktor k multipliziert. Veranschaulicht werden zur weiteren Analyse zunächst die jeweils optimalen Gewichtungswerte der gewichteten euklidischen Distanz je Anwendungsfall in Abbildung 16 dargestellt.

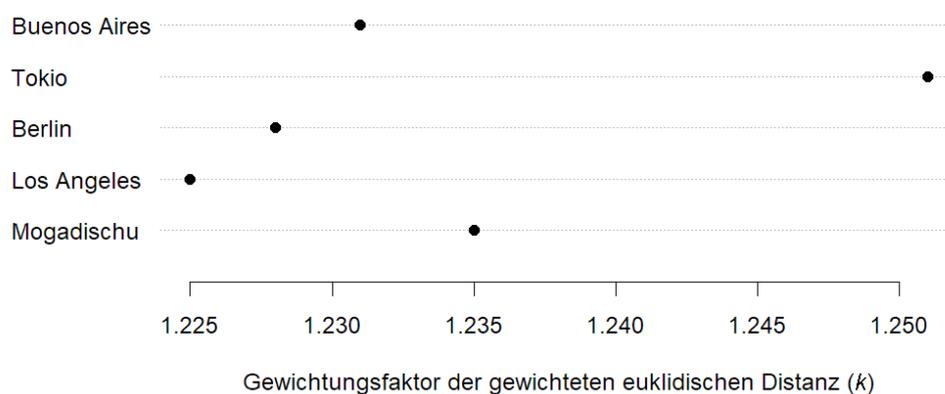


Abbildung 16: Optimale Gewichtungen der gewichteten euklidischen Distanz für minimale AD-Werte aller Anwendungsfälle

In Abbildung 16 sind die Schwankungen, die sich für den Faktor k der gewichteten euklidischen Distanz ergeben, gut zu erkennen. Aus den Anwendungsfällen Tokio und Mogadischu resultieren mit Faktoren von $k=1,251$, bzw. $k=1,235$ die jeweils größten Gewichtungswerte, während sich in den Anwendungsfällen Buenos Aires, Berlin und Los Angeles kleinere k -Werte als optimal erweisen. Auffällig erscheint, dass sich insbesondere in Anwendungsfällen denen kleine Blockgrößen

zugrunde liegen größere Gewichtungsfaktoren ergeben. Dem gegenüber werden in Anwendungsfällen deren Stadtbilder von Blöcken mittlerer oder großer Größen dominiert werden niedrigere Gewichtungsfaktoren verwendet. Um diesbezüglich jedoch verbindliche Aussagen treffen zu können, müssen die vorliegenden Daten genauer betrachtet werden. Tabelle 10 stellt die statistischen Merkmale der jeweils optimalen Gewichtungsfaktoren der gewichteten euklidischen Distanz für alle Anwendungsfälle übersichtlich dar.

Tabelle 10: Statistische Auswertung der jeweils optimalen Gewichtungswerte für die gewichtete euklidische Distanz in allen Anwendungsfällen (R = Spannweite; \bar{x} = arithmetisches Mittel; σ = Standardabweichung)

Gewichtete euklidische Distanz	Min	Max	R	\bar{x}	σ
Gewichtungen der Anwendungsfälle	1,225	1,251	0,026	1,234	0,009

Die optimalen Gewichtungsfaktoren aller Anwendungsfälle liegen für die gewichtete euklidische Distanz zwischen dem minimalen Faktor $k=1,225$, welcher im Anwendungsfall Los Angeles errechnet wurde sowie dem maximalen Gewichtungsfaktor $k=1,251$ im Anwendungsfall Tokio. Zwischen dem Minimalwert und dem Maximalwert beträgt die Spannweite somit lediglich 0,026. Für das arithmetische Mittel ergibt sich über alle fünf Anwendungsfälle hinweg ein Wert von $k=1,234$, die Standardabweichung beträgt 0,009. Entsprechend der in Tabelle 10 vorgestellten Werte muss die anfängliche Einschätzung hinsichtlich eines etwaigen Zusammenhangs zwischen der Stadtformgruppe und dem Gewichtungsfaktor revidiert oder zumindest kritisch hinterfragt werden. Um einen eindeutigen Zusammenhang feststellen zu können, sind die Abweichungen der einzelnen Gewichtungsfaktoren nicht auffällig genug. Dies wird insbesondere am Wert der Spannweite deutlich, die wie beschrieben lediglich einen Bereich von 0,026 aufspannt.

Vor dem Hintergrund der geringen Spannweite und insbesondere auch aufgrund der extrem niedrigen Standardabweichung wurde zunächst für sämtliche Anwendungsfälle das in Tabelle 10 dargestellte arithmetische Mittel aller Gewichtungen von $k=1,234$ auf die in Abschnitt 5.2 untersuchten Anwendungsfälle angewendet. Anschließend wurden die Abweichung der daraus resultierenden AD-Werte von den Minimalsummen dieses Kriteriums gemessen, die unter Zuhilfenahme optimaler Parameterwerte errechnet wurden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden in Tabelle 11 übersichtlich dargestellt.

Tabelle 11: Abgleich der mit standardisierter Gewichtung erzielten AD-Werte mit den jeweiligen Minimalsummen je Anwendungsfall (*opt.* = optimal)

Anwendungsfall	AD (opt. k)	AD ($k=1,234$)	Abweichungen	
			Absolut (km)	Prozentual (%)
Buenos Aires	558,10	558,37	0,27	0,05%
Tokio	501,64	508,83	7,19	1,43%
Berlin	418,00	419,46	1,45	0,35%
Los Angeles	388,93	390,77	1,84	0,47%
Mogadischu	19,63	19,63	0,00	0,01%

Tabelle 11 stellt für alle Anwendungsfälle die negative Veränderung des Approximationsergebnisses bei Verwendung eines gemittelten Gewichtungswertes ($k=1,234$) im Vergleich zum jeweils optimalen Gewichtungswert für die gewichtete euklidische Distanz je Anwendungsfall dar. Die Abweichungen sind für beide Fälle als absolute Abweichung in km sowie als prozentuale Abweichung angegeben. Dabei ist gut zu erkennen, dass die Abweichungen in allen Anwendungsfällen äußerst gering ausfallen. Dies gilt insbesondere für die Anwendungsfälle Mogadischu und Buenos Aires, für die die mit dem gemittelten Faktor gewichtete euklidische Distanz lediglich 0,01 % in Mogadischu, bzw. 0,05 % in Buenos Aires schlechter approximiert als die mit einem optimalen Faktor gewichtete euklidische Distanz. Aber auch in den Anwendungsfällen Berlin und Los Angeles liefert die mit $k=1,234$ gewichtete euklidische Distanz gute Ergebnisse. Im Anwendungsfall Berlin steigt die Summe absoluter Abweichungen um insgesamt 1,45 km an, was einer Verschlechterung von lediglich 0,35% entspricht. Im Anwendungsfall Los Angeles erhöht sich die absolute Fehlersumme um 1,84 km – und damit um 0,47%. Die höchste Abweichung ergibt sich im Anwendungsfall Tokio. In diesem Anwendungsfall fällt die Abweichung der mit dem gemittelten Faktor gewichteten euklidischen Distanz insbesondere im Vergleich zu den übrigen Anwendungsfällen deutlich höher aus. Insgesamt weicht die von der gewichteten euklidischen Distanz bei Verwendung des gemittelten Gewichtungsfaktors um 7,19 km vom Idealwert ab. Prozentual entspricht dies einer Verschlechterung der Approximationsqualität von 1,43%. Damit ist die AD-Summe für die gewichtete euklidische Distanz unter Verwendung eines gemittelten Gewichtungswertes allerdings immer noch 94,48 km niedriger als der zweitbeste im Anwendungsfall Tokio erreichte AD-Wert. Dieser beträgt insgesamt 603,31 km und wird von der Formel nach Love und Morris erreicht. Die beschriebenen Berechnungsergebnisse lassen den Schluss zu, dass wechselnde Stadtformen die Approximation urbaner Versorgungsrouten nur äußerst geringfügig beeinflussen und sich die gewichtete euklidische Distanz mit dem einheitlichen Gewichtungsfaktor $k=1,234$ zur Approximation aller urbanen Distributionsszenarien gut eignet.

6. Integration stadtformabhängiger Distanzmetriken in Simulationstools

Nachdem in Abschnitt 5.2 die in Abschnitt 3.4 beschriebenen Distanzmetriken zunächst auf die Anwendungsfälle der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Beispielstädte angewendet wurden, wurden diese Ergebnisse anschließend weiter spezifiziert und auf etwaige Zusammenhänge untersucht. Die in Kapitel 5 erarbeiteten Erkenntnisse sollen im Folgenden in Simulationstools genutzt werden. Um die erlangten Erkenntnisse in Simulationstools nutzen zu können, müssen diese zunächst auf konzeptioneller Ebene dargestellt und deren Umsetzung definiert werden. Hinsichtlich der Konzepterstellung soll daher zunächst beschrieben werden, wie wechselnde Stadtformen in Simulationstools umgesetzt werden können und welche Möglichkeiten sich durch die Nutzung von Informationstechnologien hinsichtlich der quantitativen Unterscheidbarkeit wechselnder Stadtformen bieten. Anschließend wird dargestellt, wie Distanzmetriken zur Abschätzung von Realdistanzen entsprechend der jeweils vorliegenden Stadtformgruppe in Simulationsexperimente eingebunden werden können. Dies geschieht mit besonderem Bezug auf die in Kapitel 5 erarbeiteten Erkenntnisse. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird ein Konzept zur Verwendung der erlangten Erkenntnisse in Simulationstools erarbeitet. In einem nachfolgenden Schritt wird die Validierung des erstellten Konzeptes durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde analog zu den in den in Kapitel 5 genutzten Datensätzen ein Datensatz für die griechische Hauptstadt Athen erstellt. Zunächst wird das beschriebene Konzept auf diesen Datensatz angewandt. Anschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der mit dem Konzeptmodell erlangten Ergebnisse mit den Resultaten aller in Kapitel 5 verwendeten Distanzmetriken, um die Validität und damit die Gültigkeit des erarbeiteten Konzeptes zu prüfen. Zusammenfassend fokussiert sich Kapitel 6 auf die Möglichkeiten, die sich durch die Nutzung von Distanzmetriken in Simulationsexperimenten ergeben. Dazu wird auf konzeptioneller Ebene beschrieben, wie die Umsetzung der erlangten Erkenntnisse in Simulationstools erfolgen könnte. Abschließend wird das vorgestellte Konzept validiert.

6.1. Wechselnde Stadtformen und Distanzmetriken in Simulationstools

Urbane Strukturen können wie in Abschnitt 4.1 beschrieben auf Mikro-, Meso- und Makroebene betrachtet werden, wobei urbane Distributionsverkehre vorrangig auf Meso- und Makroebene dargestellt werden. Mögliche urbane Strukturmodelle auf Makroebene sind wie beschrieben beispielsweise konzentrische, lineare oder flächenhafte Modelle. Zur näheren Klassifizierung urbaner Strukturmodelle existieren in der Literatur wie in Abschnitt 4.1 dargestellt unterschiedlichste Ansätze und Typologien. Häufig genutzte Ausdrücke zur Klassifizierung von Stadtstrukturtypen sind „radial“, „rechteckig“ oder „linear“. Problematisch sind bei den beschriebenen herkömmlichen Ansätzen zur Bestimmung urbaner Strukturen insbesondere die Vielzahl an unterschiedlichen und

zudem stark variierenden Ansätzen, die zudem sehr subjektiv sind. Wie in Abschnitt 4.1 dargestellt, besteht hinsichtlich der Ansätze zur Bestimmung von Stadtstrukturtypen einerseits ein Überangebot. Andererseits scheint dieses umfangreiche Angebot an Typologien jedoch nicht in der Lage zu sein, die in urbanen Räumen vorherrschende Strukturkomplexität umfassend abzudecken und zu beschreiben. Zudem fehlen in diesem Bereich Standards zur eindeutigen Klassifizierung urbaner Strukturen. Vor dem Hintergrund der beschriebenen Komplexität urbaner Strukturtypen und insbesondere auch der damit zusammenhängenden Subjektivität solcher Klassifizierungen würde sich die Umsetzung eines Standards in diesem Bereich äußerst komplex gestalten. Um Stadtformen in Simulationstools umzusetzen, sind somit quantitative Methoden notwendig.

Die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Typologien zur Klassifizierung urbaner Straßenstrukturtypen basieren vorrangig auf Straßennetzwerken. Dies ist allerdings aus unterschiedlichen Gründen problematisch. Die Gründe dafür liegen insbesondere in der fehlenden rein geometrischen Definition des Straßenbegriffes. Weiterhin bezieht sich die Wahrnehmung des menschlichen Auges eher auf die Anordnung und Verteilung von Blocks als auf die vorherrschenden Straßenstrukturen. Stadtkarten weisen, wie in Abschnitt 4.2 vorgestellt, zweierlei geometrische Informationen auf. Neben Informationen zur Straßenstruktur enthalten solche Karten auch Informationen zur Verteilung von Blocks in urbanen Räumen, da diese Verteilung dem Negativ der jeweiligen Straßenkarten entspricht. Blocks können somit ohne Mehrdeutigkeit als kleinste von Straßen begrenzte Fläche beschrieben werden. Diese Definition von Blocks als urbane Struktureinheiten stellt auch die Basis der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Methode zur quantitativen Klassifizierung urbaner Strukturen dar. Die von Louf und Barthelemy (2014) entwickelte Methode zur quantitativen Unterscheidbarkeit urbaner Strukturen nutzt anschließend einerseits den Quotienten aus Blockfläche und vom Block eingegrenzter Kreisfläche und andererseits die Verteilung der wie beschrieben erstellten Blockgrößenbereiche. Der somit generierte und in Abschnitt 4.2 näher beschriebene „Fingerabdruck“ von Städten stellt bereits eine exakte und quantitative Methode zur Unterscheidung urbaner Strukturtypen dar. Weiter ist die vorgestellte Methode nach Louf und Barthelemy (2014) nicht ausschließlich auf die Anwendung auf der Makroebene und damit zur Untersuchung kompletter Städte begrenzt, sondern kann wie beschrieben auch auf einzelne Bezirke angewendet werden. Dadurch wird die Klassifizierung einzelner Distrikte oder Bezirke in entsprechend definierte Stadtformgruppen ermöglicht. Dies eröffnet in letzter Konsequenz die Möglichkeit zur quantitativen Klassifizierung und daraus folgend zur Anwendung der jeweils optimal geeigneten Distanzmetrik für den stadtmorphologischen Strukturtypen im jeweiligen Anwendungsfall eines Simulationsexperiments zur urbanen Versorgung.

Diese Überlegung war Gegenstand der Untersuchungen in Kapitel 5. Durch die dargestellte Möglichkeit zur quantitativen Klassifizierung von Stadtformen sollte geprüft werden, wie sich die in Abschnitt 3.4 beschriebenen Distanzmetriken bei der Anwendung auf die in Abschnitt 4.2 aufgezeigten Stadtformgruppen verhalten. Wie in Abschnitt 4.2 dargestellt, bildeten Louf und Barthelemy (2014) mit der entwickelten Methode vier stadtmorphologische Hauptgruppen. Im Rahmen der in Kapitel 5 durchgeführten Anwendungsfälle wurden diese vier Hauptgruppen untersucht. Dabei wurde Stadtformgruppe 3 wie beschrieben nochmals in zwei Subgruppen unterteilt, da diese Stadtformgruppe die mit Abstand umfangreichste darstellte. Zudem scheint auch die daraus resultierende Untergliederung in europäische und amerikanische Stadtformtypen sinnvoll.

Nach der beschriebenen Anwendung der Distanzmetriken auf die vorgestellten Anwendungsfälle sollte in der anschließenden stadtformübergreifenden Betrachtung in Abschnitt 5.3 geprüft werden, ob hinsichtlich der jeweils optimalen Distanzmetriken je Anwendungsfall ein Zusammenhang besteht. Weiter stand im Fokus der zusammenfassenden Untersuchungen die Überlegung, für etwaige Zusammenhänge ein Konzept zur quantitativen Nutzung solcher Zusammenhänge in Simulationstools zu erarbeiten.

Im Rahmen der Untersuchungen in Kapitel 5 und insbesondere in der städteübergreifenden Betrachtung und der Bewertung der Ergebnisse die in Abschnitt 5.3 durchgeführt wurde ergab sich jedoch keinerlei Zusammenhang zwischen der stadtmorphologischen Struktur und der jeweils besten Distanzmetrik je Anwendungsfall. Zwar war der stadtmorphologische Einfluss auf die Wahl der optimalen Parameter der untersuchten Distanzmetriken wie beschrieben insbesondere im Anwendungsfall Los Angeles deutlich erkennbar, beeinflusst die Wahl der zur Approximation am besten geeigneten Distanzmetrik allerdings nicht. Wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, stellte die gewichtete euklidische Distanz anwendungsfallübergreifend die jeweils beste Distanzmetrik dar. Dabei fiel die Spannweite zwischen dem größten und dem kleinsten optimalen Parameterwert für die gewichtete euklidische Distanz pro Anwendungsfall lediglich sehr klein aus. Dies lässt den Schluss zu, dass die Abweichung aller jeweils optimalen Gewichtungswerte für die gewichtete euklidische Distanz nur sehr geringfügig ist. Um diese These zu stützen, wurde das arithmetische Mittel der Gewichtungswerte aller Anwendungsfälle gebildet, was eine anwendungsfallübergreifend mittlere Gewichtung von $k=1,234$ für die gewichtete euklidische Distanz ergab. Anschließend wurde die Standardabweichung der jeweils optimalen Gewichte aller Anwendungsfälle berechnet. Die berechnete Standardabweichung betrug 0,009 und fiel damit äußerst gering aus. Dies stützt die beschriebene Vermutung, dass sich das in den Anwendungsfällen gebildete arithmetische Mittel auch für weitere Anwendungsfälle am besten eignet.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass sich für die Formel nach Love und Morris in sämtlichen Anwendungsfällen die jeweils zweitbesten Approximationsergebnisse ergeben. Bei der Untersuchung der Approximationsqualität auf langen Strecken verbesserte sich die Approximationsqualität der Formel nach Love und Morris gegenüber der gewichteten euklidischen Distanz deutlich. Aus dieser Untersuchung lässt sich die Vermutung ableiten, dass die Formel nach Love und Morris mit zunehmender Streckenlänge auch zunehmend bessere Approximationsergebnisse liefert. Gleichzeitig approximiert die gewichtete euklidische Distanz auch bei verdoppelten gemittelten Streckenlängen von ca. 20 km, bzw. ca. 6 km im Anwendungsfall Mogadischu noch genauer als die Formel nach Love und Morris. Da Wegstrecken in urbanen Versorgungsszenarien solche Werte, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, in der Regel nicht übersteigen, wurde die genauere Untersuchung des Approximationsverhaltens der Formel nach Love und Morris von den weiterführenden Betrachtungen ausgeschlossen.

Die in Kapitel 5 beschriebenen Erkenntnisse kommen somit zu dem Schluss, dass die Wahl einer optimalen Distanzmetrik zu Wegstreckenapproximation in Simulationstools nicht von stadtmorphologischen Aspekten, sondern höchstwahrscheinlich von der Distanz der zu approximierenden Wegstrecke abhängt. Aus dieser Feststellung lässt sich die Hypothese ableiten, dass für sämtliche Simulationsexperimente vor dem Hintergrund urbaner Versorgungsszenarien immer die gewichtete euklidische Distanz mit einem Gewichtungsfaktor von $k=1,234$ verwendet werden kann. Mit

dieser Methode werden beständig Ergebnisse erzielt, welche die Approximationsqualität unter Verwendung optimaler Gewichtungswerte je Anwendungsfall nahezu erreichen.

Die Verwendung der gewichteten euklidischen Distanz mit einem kontinuierlich gleichen Gewichtungswert für sämtliche Simulationsexperimente zur urbanen Versorgung macht die eingangs dieses Abschnitts beschriebene Klassifikation des zu untersuchenden Stadtgebietes somit überflüssig, da diese nur zusätzlichen Implementierungs- und Berechnungsaufwand bedeuten würde, dabei aber keinen Mehrwert liefert.

6.2. Validierung des erarbeiteten Konzeptes

Nachdem in den Abschnitten 5.3 und 6.1 die Hypothese aufgestellt wurde, dass sich die gewichtete euklidische Distanz mit dem Gewichtungswert $k=1,234$ stadtformunabhängig und für alle Anwendungsfälle gut eignet, soll diese These im aktuellen Abschnitt validiert werden. Zur Validierung wird ein Datensatz der griechischen Hauptstadt Athen verwendet. Athen liegt im Süden Griechenlands an der Küste des Saronischen Golfs. Athen ist zudem die Hauptstadt der als Attika bezeichneten Agglomeration. Das Attika beheimatete Schätzungen der Vereinten Nationen (2014a) zufolge im Jahr 2015 ca. 3,05 Millionen Menschen. Die Stadt liegt auf dem 37. Breitengrad südlicher Richtung sowie auf dem 23. Längengrad östlicher Richtung. Aus dieser Lage auf dem Erdellipsoid resultiert eine Entfernung zum Erdmittelpunkt von 6.367,44 km, die zur Berechnung verwendet wurde.

Zur Erstellung des Datensatzes wurde das in Abschnitt 5.1 vorgestellten Tool Overpass turbo genutzt. Als Einrichtung wurden wie schon zur Erstellung der Datensätze für die Anwendungsfälle Berlin und Buenos Aires Apotheken verwendet. Insgesamt ergab diese Abfrage eine Datengrundlage von 835 Strecken, deren Quellen und Senken über das gesamte Athener Stadtgebiet verteilt sind. Dabei ist die Konzentration der Koordinatenpunkte insbesondere in innerstädtischen Bereichen deutlich erkennbar. Zusätzlich zu den Anwendungsfällen in Kapitel 5 wurde im Validierungsfall Athen eine weitere Metrik berechnet. Neben der gewichteten euklidischen Distanz mit dem entsprechend optimalen Gewichtungswert wurden zur Validierung der in Abschnitt 5.3 aufgestellten Hypothese sämtliche Berechnungen auch für die mit $k=1,234$ gewichtete Variante der gewichteten euklidischen Distanz durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse aller in Abschnitt 3.4 vorgestellten Distanzmetriken sowie der mit $k=1,234$ gewichteten euklidischen Distanz sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Berechnungsergebnisse im Validierungsfall Athen (R = Spannweite; \bar{x} = arithmetisches Mittel; σ = Standardabweichung; gew. = gewichtet; L&M = Love und Morris)

Distanzmetriken	Min	Max	R	\bar{x}	σ	AD
Realdistanz	0,00	42,38	42,38	5,44	6,42	-
Euklidische Distanz	0,01	34,01	34,00	4,19	5,21	1.039,65
Manhattan-Distanz	0,02	42,40	42,38	5,39	6,80	565,43
Optimale gew. euklidische Distanz ($k=1,257$)	0,02	42,75	42,74	5,27	6,55	407,61
Gemittelte gew. euklidische Distanz ($k=1,234$)	0,02	41,97	41,96	5,17	6,43	413,61
Minkowski-Distanz ($p=1,110$)	0,02	39,59	39,57	5,10	6,41	522,75
Gew. Minkowski-Distanz ($k=1,228$; $p=1,291$)	0,02	44,57	44,55	5,86	7,33	505,45
Formel nach L&M ($k=1,311$; $p=1,797$; $s=1,718$)	0,01	52,70	52,69	6,22	7,99	486,41

Hinsichtlich der untersuchten Realdistanzen im Validierungsfall Athen ergibt sich eine Maximaldistanz von 42,38 km sowie eine Spannweite von insgesamt 42,38 km. Die kürzeste Realdistanz fällt im Validierungsfall Athen äußerst gering aus und liegt jenseits rundungsrelevanter Werte. Das arithmetische Mittel der Realdistanzen beträgt 5,44 km, während sich für die Standardabweichung ein Wert von 6,42 km ergibt. Auffällig sind insbesondere die sehr niedrigen Werte, die sich für die kürzeste Strecke sowie für die Standardabweichung der Realdistanzen im Validierungsfall Athen ergeben. Dies ist damit zu erklären, dass der Datensatz zur Validierung im Gegensatz zu den Datensätzen der Anwendungsfälle nicht angepasst wurde. Während bei den Datensätzen der Anwendungsfälle Tokio und Los Angeles zunächst extrem kurze Werte gestrichen wurden, wurden weiterhin auch die jeweils längsten Routen von der Betrachtung ausgeschlossen. Hinsichtlich der betrachteten Realdistanzen wurde ein arithmetisches Mittel von ca. 10 km angestrebt. Somit sollte, wie in Kapitel 5 in den jeweils betroffenen Anwendungsfällen beschrieben, die Vergleichbarkeit der untersuchten Beispielstädte gewährleistet und die Korrektheit der zu treffenden Aussagen sichergestellt werden. Im vorliegenden Validierungsfall für Athen war eine Kürzung der Datengrundlage aus den aufgezeigten Gründen nicht nötig, da die in Abschnitt 6.1 getroffene Hypothese allgemeingültig validiert werden soll.

In den Kategorien „Maximaldistanz“, „Spannweite“ und „arithmetisches Mittel“ ergeben sich im Validierungsfall Athen für die einfache euklidische Distanz die jeweils niedrigsten Werte, während deren Summe absoluter Abweichungen von insgesamt 1.039,65 km mit deutlichem Abstand am größten ausfällt. Die jeweils optimalen Parameter der Formel nach Love und Morris betragen im Validierungsfall Athen $k=1,311$, $p=1,797$ und $s=1,718$. Die in Abschnitt 5.3 festgestellte Korrelation der Parameter p und s ist somit auch im Validierungsfall Athen erkennbar. Allerdings fallen die vorliegenden Werte im Vergleich zu den optimalen Parameterwerten für die Formel nach Love und Morris in den Anwendungsfällen extrem hoch aus. Unter Verwendung der beschriebenen optimalen Parameterwerte liefert die Formel nach Love und Morris in den Kategorien „Maximaldistanz“, „Spannweite“, „arithmetisches Mittel“ und „Standardabweichung“ die jeweils größten Werte im Validierungsfall Athen.

Zur genaueren Analyse zeigt das in Abbildung 17 dargestellte Boxplotdiagramm Lage und Streuung der Realabweichungen (in km) aller im Validierungsfall Athen angewendeten Distanzmetriken.

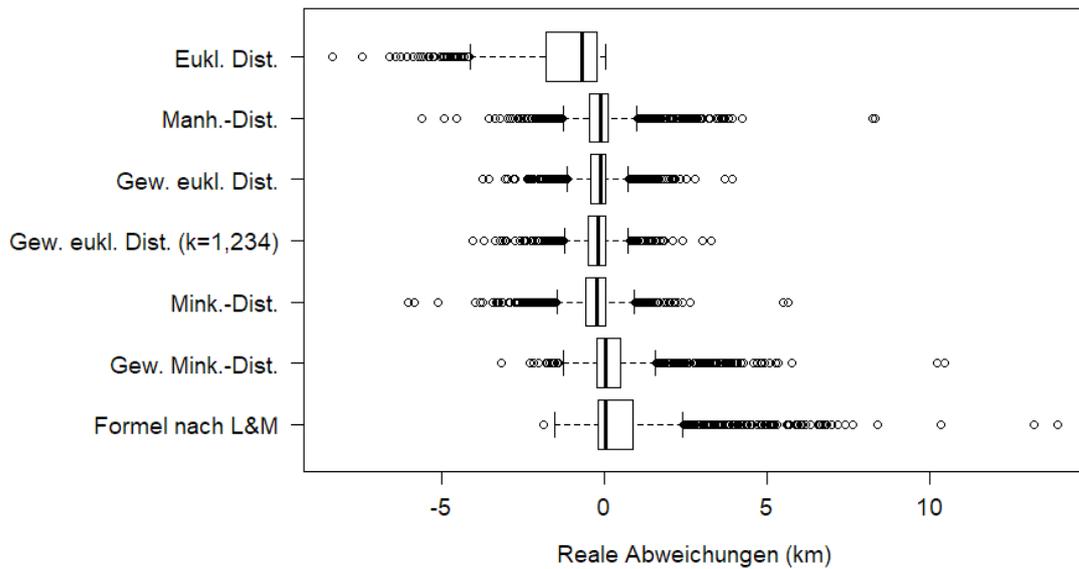


Abbildung 17: Boxplotdiagramm realer Abweichungen aller Distanzmetriken im Validierungsfall Athen (eukl. = euklidisch; Dist. = Distanz; Manh. = Manhattan; gew. = gewichtet; Mink. = Minkowski; L&M = Love und Morris)

Das in Abbildung 17 dargestellte Boxplotdiagramm zeigt die Approximationsgenauigkeit der im Validierungsfall Athen untersuchten Distanzmetriken. Am genauesten approximiert demnach die gewichtete euklidische Distanz unter Verwendung eines optimalen Gewichtungsfaktors. Bei dieser Metrik beträgt der Abstand zwischen dem oberen und dem unteren Whisker lediglich 1,87 km. Die Box spannt einen Bereich von insgesamt 0,47 km auf. Die zweitbesten Werte werden von der gewichteten euklidischen Distanz unter Verwendung des einheitlichen Gewichtungsfaktors $k=1,234$ erzielt. Die mit dieser Distanzfunktion erreichte Approximationsgenauigkeit entspricht mit Abständen von 1,97 km zwischen den Whiskern und einer Boxspannweite von 0,51 km beinahe der unter Verwendung einer optimalen Gewichtung erreichten Approximationsgenauigkeit. Die übrigen Distanzmetriken weichen hinsichtlich der Approximationsgenauigkeit deutlicher vom optimalen Ergebnis ab. Dennoch erzielen insbesondere die Manhattan-Distanz und auch die Minkowski-Distanz gute Werte hinsichtlich der Approximationsgenauigkeit im Validierungsfall Athen. Gleichzeitig ergeben sich für die Boxplotdiagramme aller Distanzmetriken im Validierungsfall Athen auch auffällig viele Ausreißer. Gerade für die gewichtete Minkowski-Distanz und insbesondere auch für die Formel nach Love und Morris häufen sich die Ausreißer im oberen Bereich. Dies lässt den Schluss zu, dass diese beiden Distanzfunktionen die Routen des Validierungsdatensatzes kontinuierlich zu lang approximieren. Gleichzeitig produziert die Formel nach Love und Morris mit einer absoluten Abweichung von insgesamt 486,41 km nach der mit dem optimalen Faktor gewichteten euklidischen Distanz und der mit dem gemittelten Faktor $k=1,234$ gewichteten euklidischen Distanz die insgesamt drittniedrigste AD-Summe im Validierungsfall Athen.

Wie in Tabelle 12 dargestellt, ergibt sich die niedrigste Summe absoluter Abweichungen im Validierungsfall Athen wie bereits in allen Anwendungsfällen aus Kapitel 5 für die gewichtete euklidische Distanz. Im Gegensatz zu den Anwendungsfällen ist diese Distanzmetrik im Validierungsfall wie eingangs beschrieben in zweifacher Ausprägung enthalten. Dabei ergeben sich für beide Ausprägungen wie in Tabelle 12 abgebildet die jeweils niedrigsten Werte absoluter Abweichungen im

vorliegenden Validierungsfall. Der niedrigste und damit optimale AD-Wert wird von der gewichteten euklidischen Distanz unter optimaler Gewichtung erreicht und beträgt 407,61 km bei einem verwendeten Gewichtungsfaktor von $k=1,257$. Dem gegenüber steht die gewichtete euklidische Distanz mit dem gemittelten Gewichtungsfaktor von $k=1,234$, mit dem eine Summe absoluter Abweichungen von insgesamt 413,61 km erreicht wird. Der gemittelte Gewichtungsfaktor weicht somit um 0,023 vom optimalen Gewichtungsfaktor ab, während die Summe absoluter Abweichungen für die gemittelte Gewichtung um 6,00 km höher ausfällt. Bezogen auf die Gesamtsumme der Realdistanzen, die im Validierungsfall Athen 4.539,59 km beträgt, entspricht dies einer Verschlechterung von lediglich 0,13%. Abbildung 18 stellt die Summen aller absoluten Abweichungen für die im Validierungsfall Athen untersuchten Distanzmetriken dar.

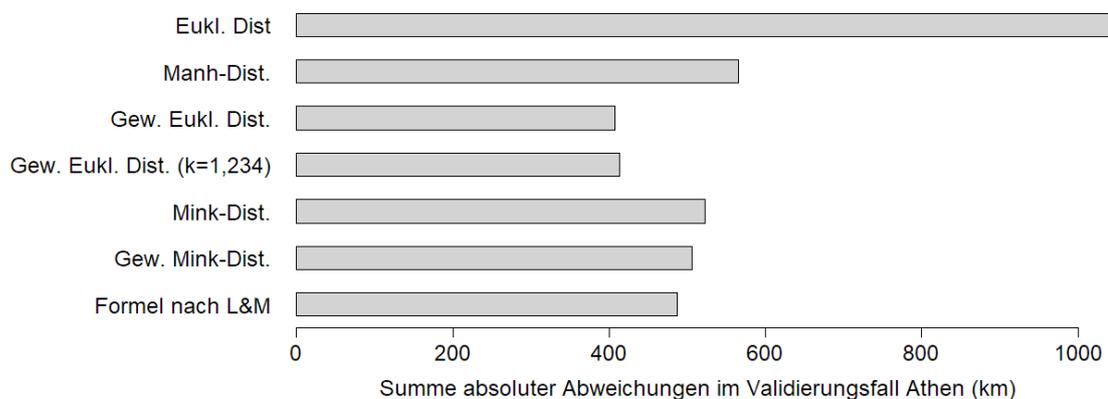


Abbildung 18: Summen der AD-Werte aller untersuchten Distanzmetriken im Validierungsfall Athen (eukl. = euklidisch; Dist. = Distanz; Manh. = Manhattan; gew. = gewichtet; Mink. = Minkowski; L&M = Love und Morris)

An Abbildung 18 ist gut zu erkennen, dass die einfache euklidische Distanz den mit Abstand größten AD-Wert liefert. Dieser beträgt insgesamt 1.039,65 km. Die gewichtete euklidische Distanz mit dem gemittelten Gewichtungsfaktor $k=1,234$ schneidet als zweitbeste Distanzfunktion im Validierungsfall Athen wie bereits beschrieben nur 6,00 km schlechter ab als die mit dem optimalen Faktor gewichtete euklidische Distanz. Dies entspricht einer Verschlechterung von lediglich 0,13%. Im Gegensatz dazu sind die Unterschiede zu den AD-Summen der übrigen Distanzmetriken deutlicher. So liegen zwischen der mit $k=1,234$ gewichteten euklidischen Distanz als zweitbeste Distanzfunktion und der Formel nach Love und Morris als drittbeste Distanzfunktion bereits 72,80 km, was einer Verschlechterung der Approximationsqualität von 1,60% entspricht.

Die Auswertung des Validierungsfalles Athen bestätigt und validiert die in Abschnitt 6.1 aufgestellte Hypothese, die somit als wahr angesehen werden kann. Für die Wegstreckenapproximation urbaner Versorgungsverkehre ist die gewichtete euklidische Distanz mit einem festen Gewichtungsfaktor von $k=1,234$ stadtformunabhängig gut geeignet und liefert wie beschrieben Approximationswerte, die nah am jeweiligen Optimum liegen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die globale Urbanisierung stellt einen der Megatrends unserer Zeit dar. Um die daraus resultierenden Herausforderungen meistern zu können, sind im Bereich der urbanen Versorgungslogistik neue Ansätze und Konzepte notwendig. Simulationsstudien stellen diesbezüglich ein mächtiges Werkzeug zur Entscheidungsfindung dar. Um alternative Belieferungskonzepte in urbanen Räumen beispielsweise hinsichtlich deren Umsetzbarkeit untersuchen zu können, können Simulationsexperimente vor diesem Hintergrund durchgeführt werden. Innerhalb dieser Simulationsstudien ist die Verwendung exakter Realdistanzen nicht zwingend nötig. Die zurückgelegten Distanzen zwischen zwei Koordinatenpunkten können auch mit Distanzmetriken abgeschätzt werden. Zur beschriebenen Wegstreckenapproximation existieren unterschiedliche mathematische Ansätze. Gleichzeitig weisen verschiedene Städte auch wechselnde stadtmorphologische Formen auf. Das Ziel dieser Arbeit bestand in Anwendung und Vergleich unterschiedlicher Distanzmetriken vor dem Hintergrund wechselnder Stadtformen.

Zu diesem Zweck wurde nach der Vorstellung von Grundlagen bezüglich logistischer Distributionsnetzwerke sowie Modellierung und Simulation eine Methode zur quantitativen Unterscheidbarkeit stadtmorphologischer Strukturen beschrieben. Im Gegensatz zu herkömmlichen Ansätzen, welche häufig stark subjektiv sind, erlaubt die vorgestellte Methode die rein quantitative Unterscheidung von Stadtformen anhand deren Straßenmuster. Um die vorgestellten Distanzmetriken auf die quantitativ ermittelten Beispielstädte anwenden zu können, wurde zunächst eine umfassende Datengrundlage geschaffen. Anschließend wurden die vorgestellten Distanzmetriken auf die Datensätze aller Beispielstädte angewendet. Die die Auswertung der erzielten Ergebnisse erfolgte dabei jeweils mittels Ergebnisdarstellung in Tabellenform sowie per Boxplotdiagramm der Realabweichungen aller Distanzmetriken.

Resultierend eignete sich die gewichtete euklidische Distanz zur Wegstreckenapproximation in allen Anwendungsfällen am besten und produzierte jeweils die geringste Summe absoluter Abweichungen. Auch in den Boxplotdiagrammen, welche die Lageparameter der Realabweichungen aller Distanzmetriken darstellen und die somit Auskunft über die Approximationsgenauigkeit der verwendeten Distanzfunktionen, lieferte die gewichtete euklidische Distanz in allen Anwendungsfällen durchgehend gute Ergebnisse. Zwar konnten in einzelnen Anwendungsfällen Auswirkungen der vorliegenden Straßenstruktur auf die angewendeten Distanzmetriken festgestellt werden, dennoch schätzte auch in solchen Fällen die gewichtete euklidische Distanz die Realdistanzen exakter ab als alle übrigen Distanzmetriken. Eine eingehendere Untersuchung der Ergebnisse der gewichteten euklidischen Distanz in allen Anwendungsfällen ergab, dass die optimalen Gewichtungsfaktoren jeweils nur geringfügig voneinander abwichen. Alle Multiplikatoren der gewichteten euklidischen Distanz lagen somit in einem äußerst kleinen Bereich. Aufgrund dieser Beobachtungen und den in diesem Zusammenhang durchgeführten Berechnungen resultierte die Hypothese, dass sich der aus den Gewichtungsfaktoren aller Anwendungsfälle berechnete gemittelte Gewichtungsfaktor $k=1,234$ anwendungsfall- und stadtfornunabhängig zur Wegstreckenapproximation mit der gewichteten euklidischen Distanz gut eignet. Die Validierung der aufgestellten

Hypothese wurde mittels eines unabhängigen und ungekürzten Datensatzes durchgeführt und bestätigte die aufgestellte Hypothese. So erzielte die gewichtete euklidische Distanz unter Verwendung eines gemittelten Gewichtungsfaktors Ergebnisse, die lediglich geringfügig vom Optimum abwichen. Das beste Ergebnis wurde wie zu erwarten von der mit einem optimalen Faktor gewichtete euklidischen Distanz erreicht. Gleichzeitig approximierte die gewichtete euklidische Distanz mit dem gemittelten Gewichtungsfaktor deutlich besser als die übrigen Distanzfunktionen. Somit konnte die aufgestellte These als valide erklärt werden. Die mit einem gemittelten Gewichtungsfaktor $k=1,234$ gewichtete euklidische Distanz eignet sich somit unabhängig von der vorherrschenden Stadtform gut zur Wegstreckenapproximation in Simulationsexperimenten zur urbanen Distribution.

Dennoch besitzen die beschriebenen Untersuchungen und Erkenntnisse auch Einschränkungen. So wurden lediglich Datensätze mit einer durchschnittlichen Streckenlänge bis maximal 10 km betrachtet. Diese Streckenlänge entspricht wie beschrieben den Distanzen, die üblicherweise bei der Durchführung urbaner Versorgungsverkehre zurückgelegt werden. Transporte über längere Distanzen, wie beispielsweise zwischen Städten, wurden aus den Untersuchungen ausgeschlossen. Insbesondere bei langen Transporten kann allerdings auch ein Zusammenhang der Distanzmetrik mit der Stadtform ausgeschlossen werden. Gleiches gilt bei Simulationsexperimenten vor dem Hintergrund ländlicher Versorgungskonzepte. Wie beschrieben müssen auch diese im Zuge der globalen Urbanisierung angepasst werden. Neben neuen Konzepten zur Versorgung der wachsenden Ballungszentren sind somit auch neue Konzepte zur Versorgung zunehmend entvölkerter ländlicher Gebiete notwendig. Da die Straßenstrukturen in ländlichen Regionen jedoch häufig weitläufiger und nicht mit urbanen Straßenmustern vergleichbar sind, können die erlangten Erkenntnisse auf Simulationsstudien mit dem Hintergrund ländlicher Versorgungskonzepte folglich nicht übertragen werden. Weiterhin wurden ausschließlich Aspekte bezüglich der Approximation von Wegstrecken betrachtet. Die zeitliche Komponente und damit die Abschätzung der Fahrzeit wurde im Rahmen der Untersuchungen nicht betrachtet. Gerade die Fahrzeit stellt in stark bevölkerten Ballungsräumen oder Metropolregionen jedoch einen kritischen Gesichtspunkt bei der Simulation von Versorgungsverkehren dar. Ob bezüglich der Approximation der Fahrzeit Differenzen zwischen verschiedenen Städten bestehen und woraus sich diese ergeben, ist an getrennter Stelle zu untersuchen. Zusammenfassend liegen Forschungsbedarfe neben der zeitlichen Approximation urbaner Versorgungsverkehre auch und insbesondere in der Untersuchung der Wegstreckenapproximation längerer Distanzen. Dies gilt vor allem für die Abschätzung von Transportdistanzen in ländlichen Räumen oder auch für Transporte zwischen Städten.

Abschließend muss zudem erwähnt werden, dass die beispielhaft beschriebenen neuen und innovativen Konzepte zur urbanen Versorgung nicht nur innerstädtische Distributionsverkehre an sich verändern werden. Um diese Transporte in Simulationsstudien realitätsnah untersuchen zu können, müssen auch die in Simulationsexperimenten verwendeten Modelle zur urbanen Versorgung angepasst und erweitert werden. Beispielsweise sind Drohnen nicht an stadtmorphologische Einschränkungen gebunden. Auch Lastenfahrräder oder Kleinstfahrzeuge sind womöglich hinsichtlich der vorherrschenden Stadtform weniger eingeschränkt als herkömmliche Zustellfahrzeuge. Gegebenenfalls existieren für solche Fluggeräte oder Transportmittel jedoch andere räumliche oder technologische Restriktionen, die dementsprechend beachtet werden müssen.

Literaturverzeichnis

- Alanis, Ramon: Efficient storage of transport network routes for simulation models. In: Tolk, A.; Diallo, S. Y.; Ryzhov, I. O.; Yilmaz, L.; Buckley, S.; Miller, J. A. (Hrsg.): Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. 2014, S. 1931-1942.
- Alicke, Knut: Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken: Unternehmensübergreifendes Supply Chain Management. Berlin [u.a.]: Springer, 2005.
- Apparicio, P.; Abdelmajid, M.; Riva, M.; Shearmur, R.: Comparing alternative approaches to measuring the geographical accessibility of urban health services: Distance types and aggregation-error issues. International Journal of Health Geographics (Hg.). 2008. URL: <https://ij-healthgeographics.biomedcentral.com/articles/10.1186/1476-072X-7-7> (zuletzt geprüft am 08.10.2017).
- Apparicio, P.; Shearmur, R.; Brochu, M.; Dussault, G.: The Measure of Distance in a Social Science Policy Context: Advantages and Costs of using Network Distances in Eight Canadian Metropolitan Areas. Journal of Geographic Information and Decision Analysis 7 (2003) 2, S. 105-131.
- Auswärtiges Amt: Länderinformation Japan. 2016. URL: http://www.auswaertiges-amt.de/DE/Aussenpolitik/Laender/Laenderinfos/01-Nodes_Uebersichtsseiten/Japan_node.html (zuletzt geprüft am 08.10.2017).
- Auswärtiges Amt: Länderinformation Somalia. 2017. URL: http://www.auswaertiges-amt.de/DE/Aussenpolitik/Laender/Laenderinfos/01-Nodes_Uebersichtsseiten/Somalia_node.html (zuletzt geprüft am 08.10.2017).
- Becker, J; Vering, O.; Probandt, W.: Grundsätze ordnungsgemäßer Modellierung: Konzeption und Praxisbeispiel für ein effizientes Prozessmanagement. Berlin [u.a.]: Springer Gabler, 2012.
- Bennühr, S.: City ist sexy: Logistikanlagen für die City. DVZ Verkehrs-Zeitung 22/2017 (2017) 1, S. 10.
- Berens, W.; Körling, F.-J.: Das Schätzen von realen Entfernungen bei der Warenverteilungsplanung mit gebietspaarspezifischen Umwegfaktoren. OR Spektrum 5 (1983) 2, S. 67-75.
- Berlin.de: Zahlen und Fakten: Berlin im Überblick. 2017. URL: <https://www.berlin.de/berlin-im-ueberblick/zahlen-und-fakten/> (zuletzt geprüft am 08.10.2017).
- Berlin-Brandenburg.de: Daten und Fakten zur Hauptstadtregion. 2017. URL: <https://www.berlin-brandenburg.de/metropolregion/daten-und-fakten/> (zuletzt geprüft am 08.10.2017).
- Bretzke, W.-R.: Global urbanization: a major challenge for logistics. Logistics Research 6 (2013) 2-3. S. 57-62.
- Bretzke, W.-R.: Logistische Netzwerke. Berlin [u.a.]: Springer Vieweg, 2015.
- Bretzke, W.-R.: Nachhaltige Logistik. Berlin [u.a.]: Springer Vieweg, 2014.

- Bungartz, H.-J.; Zimmer, S.; Buchholz, M.; Pflüger, D.: Modellbildung und Simulation: Eine anwenderorientierte Einführung. Berlin [u.a.]: Springer, 2009.
- Chorianopoulos, I.; Pagonis, T.; Koukoulas, S.; Drymoniti, S.: Planning competitiveness and sprawl in the Mediterranean city: The case of Athens. *Cities* 27 (2010) 4, S. 249-259.
- Cleophas, C.; Ehmke, F.: Wann sind Lieferaufträge profitabel? *Wirtschaftsinformatik* 3 (2014), S. 173-184.
- Discoverlosangeles.com: Facts About Los Angeles. 2017. URL: <https://www.discoverlosangeles.com/press-releases/facts-about-los-angeles> (zuletzt geprüft am 08.10.2017).
- Deutsche Post DHL: Pressemitteilungen: Deutsche Post DHL macht Bonn zur Musterstadt für CO2-freie Zustellfahrzeuge. 2013. URL: <http://www.dpdhl.com/de/presse/pressemitteilungen/2013/co2-freie-zustellung-bonn.html> (zuletzt geprüft am 08.10.2017).
- EffizienzCluster LogistikRuhr: Urban Retail Logistics - Gemeinsam in die Stadt. 2017. URL: http://www.effizienzcluster.de/de/spitzencluster_wettbewerb/projekt.php?proPid=28 (zuletzt geprüft am 08.10.2017).
- Eley, M.: Simulation in der Logistik: Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeugs „Plant Simulation“. Berlin [u.a.]: Springer Gabler, 2012.
- Finke, B.: Mehr Staus denn je - London befindet sich im Kriechgang. *Süddeutsche Zeitung* (Hg.). 2017. URL: <http://www.sueddeutsche.de/auto/mehr-staus-denn-je-london-befindet-sich-im-kriechgang-1.3400406> (zuletzt geprüft am 08.10.2017).
- Fleischmann, B.: Systeme der Transportlogistik. In: Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Berlin [u.a.]: Springer, 2008, S. 12-18.
- Goedicke, I.: Simulation logistischer Systeme. In: Clausen, U.; Geiger, C. (Hrsg.): *Verkehrs- und Transportlogistik*. Berlin [u.a.]: Springer Vieweg, 2013, S. 370-381.
- Goodman, R. W.: Whatever You Call It, Just Don't Think of Last-Mile Logistics, Last. *Supply-ChainBrain* (Hg.). 2015. URL: [http://www.supplychainbrain.com/content/index.php?id=5032&cHash=081010&tx_ttnews\[tt_news\]=626](http://www.supplychainbrain.com/content/index.php?id=5032&cHash=081010&tx_ttnews[tt_news]=626) (zuletzt geprüft am 11.10.2017).
- Gross, W.; Wolff, S.: Welche Technologien und Innovationen die Logistik in naher Zukunft prägen werden. *4flow AG* (Hg.). 2017. URL: <http://www.4flow.de/newsletter/alle-newsletter/newsletter-ausgabe-2-2017/welche-technologien-und-innovationen-die-logistik-in-naher-zukunft-praegen-werden.html> (zuletzt geprüft am 08.10.2017).
- Gudehus, T.: *Logistik 2: Netzwerke, Systeme und Lieferketten*. Berlin [u.a.]: Springer, 2012.
- Handfield, R.; Straube, F.; Pfohl, H.-C.; Wieland, A.: *Trends and Strategies in Logistics and Supply Chain Management: Embracing Global Logistics Complexity to Drive Market Advantage*. DVV Media Group GmbH (Hg.). BVL International: Bremen, 2013.
- Hedtstück, U.: *Simulation diskreter Prozesse*. Berlin [u.a.]: Springer Vieweg, 2013.
- Kuhn, A.; Wenzel, S.: Simulation logistischer Systeme. In: Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Berlin [u.a.]: Springer, 2008, S. 73-95.

- Lehmacher, W.: Logistik im Zeichen der Urbanisierung. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015.
- Louf, R.; Barthelemy, M.: A typology of street patterns. *Journal of The Royal Society Interface* (Hg.). 2014. URL: <http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/11/101/20140924> (zuletzt geprüft am 11.10.2017).
- Love, R. F.; Morris, J. G.: Modelling Inter-city Road Distances by Mathematical Functions. *Operational Research Quarterly* 23 (1972) 1, S. 61-71.
- Love, R. F.; Morris, J. G.: Mathematical Models of Road Travel Distances. *Management Science* 25 (1979) 2, S. 130-139.
- Marshall, S.: *Streets & Patterns*. London [u.a.]: Spon, 2005.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin [u.a.]: Springer, 2008.
- Reicher, C.: *Städtebauliches Entwerfen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- Rodenhäuser, B.; Rauch, C.: *Supply Chain 2025: Eine Studie des Zukunftsinstituts für den Verband der Wellpappen-Industrie*. Zukunftsinstitut GmbH (Hg.). Frankfurt, 2015.
- Sanchez, P. J.: Fundamentals of simulation modeling. In: Henderson, S. G.; Biller, B.; Hsieh, M.-H.; Shortle, J.; Tew, J. D.; Barton, R. R. (Hrsg.): *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. 2007, S. 54-62.
- statista.com.: Europäische Städte mit der niedrigsten Durchschnittsgeschwindigkeit im Straßenverkehr (Stand: 2008; in Kilometer pro Stunde). 2017. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37200/umfrage/durchschnittsgeschwindigkeit-in-den-15-groessten-staedten-der-welt-2009/> (zuletzt geprüft am 08.10.2017).
- Stefanovic, D.; Stefanovic, N.; Radenkovic, B.: Supply network modelling and simulation methodology. *Simulation Modelling Practice and Theory* 17 (2009) 4, S.743-766.
- U-Turn: Objectives - U-Turn. 2017. URL: <http://www.u-turn-project.eu/objectives.html> (zuletzt geprüft am 08.10.2017).
- Vastag, A.: Strukturparameter der Distribution. In: Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Berlin [u.a.]: Springer, 2008, S. 419-423.
- Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure 3633 Blatt 1: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen (Grundlagen)*. Berlin: Beuth, 2014.
- Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure 4465 Blatt 1: *Modellierung und Simulation (Modellbildungsprozess)*. Berlin: Beuth, 2016.
- Vereinte Nationen: *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, CD-ROM Edition - File 12: Population of Urban Agglomerations with 300,000 Inhabitants or More in 2014, by Country, 1950-2030 (thousands)*. New York: United Nations, 2014a.
- Vereinte Nationen: *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352)*. New York: United Nations, 2014b.

-
- Weiland, U.: Stadtökologie - zum Verhältnis von Stadt und Umwelt. In: Flade, A. (Hrsg.): Stadt und Gesellschaft im Fokus aktueller Stadtforschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 177-210.
- Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin [u.a.]: Springer, 2008.
- Wiki.openstreetmap.org: DE:Key:amenity. 2016. URL: <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Key:amenity> (zuletzt geprüft am 08.10.2017).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Stufen eines Distributionsnetzes nach Vastag (2008) und Fleischmann (2008)	7
Abb. 2:	Zentrales und Dezentrales Transportnetz nach Gudehus (2012).....	8
Abb. 3:	Unterschiedliche Systemtypen nach Hedtstück (2013).....	15
Abb. 4:	Vorgehensmodell bei Simulationsstudien nach Rabe et al. (2008).....	16
Abb. 5:	Projektphasen zur Modellbildung nach Rabe et al. (2008).....	19
Abb. 6:	Modellbildungszyklus nach der Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure 4465 Blatt 1 (2016).....	21
Abb. 7:	Mögliche urbane Strukturmodelle nach Reicher (2014).....	28
Abb. 8:	Beispielhafter Transekt der ABCD-Typologie nach Marshall (2005).....	29
Abb. 9:	Extrahierung unterschiedlicher Informationen aus einem Muster nach Marshall (2005).....	30
Abb. 10:	Quantitative Unterscheidung der Straßenmuster von Tokio und New York nach Louf und Barthelemy (2014).....	32
Abb. 11:	Boxplotdiagramm realer Abweichungen aller Distanzmetriken im Anwen- dungsfall Buenos Aires.....	41
Abb. 12:	Boxplotdiagramm realer Abweichungen aller Distanzmetriken im Anwen- dungsfall Tokio.....	43
Abb. 13:	Boxplotdiagramm realer Abweichungen aller Distanzmetriken im Anwen- dungsfall Berlin.....	45
Abb. 14:	Boxplotdiagramm realer Abweichungen aller Distanzmetriken im Anwen- dungsfall Los Angeles.....	48
Abb. 15:	Boxplotdiagramm realer Abweichungen aller Distanzmetriken im Anwen- dungsfall Mogadischu.....	51
Abb. 16:	Optimale Gewichtungen der gewichteten euklidischen Distanz für minimale AD-Werte aller Anwendungsfälle.....	58
Abb. 17:	Boxplotdiagramm realer Abweichungen aller Distanzmetriken im Validie- rungsfall Athen.....	66
Abb. 18:	Summen der AD-Werte aller untersuchten Distanzmetriken im Validie- rungsfall Athen.....	67
Abb. 19:	Datenabfrage in Overpass turbo.....	79
Abb. 20:	Manuelle Begrenzung der abgefragten Region in Overpass turbo (www.overpass-turbo.eu).....	82

Abb. 21: Python-Code zur Abfrage der Realdistanzen.....	84
---	----

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Berechnungsergebnisse im Anwendungsfall Buenos Aires.....	40
Tab. 2:	Berechnungsergebnisse im Anwendungsfall Tokio.....	42
Tab. 3:	Berechnungsergebnisse im Anwendungsfall Berlin.....	45
Tab. 4:	Berechnungsergebnisse im Anwendungsfall Los Angeles.....	47
Tab. 5:	Berechnungsergebnisse im Anwendungsfall Mogadischu.....	50
Tab. 6:	Prozentuale Abweichungen je Anwendungsfall.....	52
Tab. 7:	Optimale Parameter der drei anwendungsfallübergreifend besten Distanzmetriken aller Anwendungsfälle.....	54
Tab. 8:	Anteil von Strecken mit mehr als 20 km Realdistanz je Anwendungsfall.....	56
Tab. 9:	Approximationsqualität der gewichteten euklidischen Distanz und der Formel nach Love und Morris auf mittleren und langen Strecken.....	57
Tab. 10:	Statistische Auswertung der jeweils optimalen Gewichtungswerte für die gewichtete euklidische Distanz in allen Anwendungsfällen.....	59
Tab. 11:	Ableich der mit standardisierter Gewichtung erzielten AD-Werte mit den jeweiligen Minimalsummen je Anwendungsfall.....	59
Tab. 12:	Berechnungsergebnisse im Validierungsfall Athen.....	65
Tab. 13:	Mögliche Einrichtungen zur Filterung in Overpass turbo nach Wiki.openstreetmap.org (2016).....	79
Tab. 14:	Beispielhafte Ausgabe der abgefragten Datenpunkte als CSV-Datei im Tabellenformat.....	83
Tab. 15:	Beispielhafte Eingabe der abzufragenden Realdistanzen als CSV-Datei in Tabellenform.....	85
Tab. 16:	Beispielhafte Ausgabe der abgefragten Realdistanzen als CSV-Datei in Tabellenform.....	86

Formelverzeichnis

(1): Euklidische Distanz.....	24
(2): Manhattan-Distanz.....	24
(3): Gewichtete euklidische Distanz.....	24
(4): Minkowski-Distanz.....	24
(5): Gewichtete Minkowski-Distanz.....	25
(6): Formel nach Love und Morris.....	25
(7): Verhältnis der Blockfläche zur eingegrenzten Kreisfläche.....	31
(8): Formel zur Berechnung des AD-Kriteriums.....	36
(9): Formel zur Berechnung des SD-Kriteriums.....	36

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface
CSV	Comma-Separated Values
ERM	Entity-Relationship-Modell
LKW	Lastkraftwagen
OPP	Order Penetration Point
UCC	Urban Consolidation Center
UML	Unified Modeling Language
URL	Uniform Resource Locator
US	United States
USA	United States of America
V&V	Verifikation und Validierung

Anhang 1: Schaffung der Datengrundlage

Abfrage in Overpass turbo

Zur Datenabfrage wurde wie im Text beschrieben das Online-API Overpass turbo (www.overpass-turbo.eu) verwendet. Eine beispielhafte Datenabfrage nach Apotheken in einem manuell festgelegten Bereich ist in Abbildung 19 dargestellt.

```

1 //manuell im Programm einen Rahmen um die gewünschte Region ziehen
2
3 [out:csv(;;id,;;lat,;;lon)] //CSV-Ausgabe definieren
4
5 node
6     [amenity=pharmacy] //Abfrage nach Apotheken
7     ({{bbox}}); //Abfrage innerhalb des manuell gezogenen Rahmens
8 out skel; //Ausgabe der Basisinformationen (Skeleton)

```

Abbildung 19: Datenabfrage in Overpass turbo

Auswählbare Einrichtungen (*amenities*) in Overpass turbo

Um die Datenabfragen in den Anwendungsfällen in Kapitel 5 und im Validierungsfall in 6.2 spezifizieren zu können, wurde jeweils nach bestimmten Einrichtungen (*amenities*) gesucht. Die in den entsprechenden Anwendungsfällen verwendete Einrichtung wurde bereits im jeweiligen Abschnitt beschrieben. Mögliche Einrichtungen zur Filterung in Overpass turbo werden in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Mögliche Einrichtungen zur Filterung in Overpass turbo nach Wiki.openstreetmap.org (2016)

Wert	Kommentar
bar	Bar, Nachtlokal
bbq	Grillplatz
biergarten	Biergarten
cafe	Café, Eiscafé, Bistro, Teeladen, Kaffeeladen
drinking_water	Eine öffentlich zugängliche Trinkwasserstelle
fast_food	Schnellrestaurant, Imbiss
food_court	Zone, in der es Verkaufsstellen verschiedener Restaurants und Imbisse gibt
ice_cream	Eisdiele, Eistrese
pub	Kneipe
restaurant	Restaurant (ohne Fast-Food)
college	Hochschule
kindergarten	Kindergarten
library	Bibliothek, Bücherei

public_bookcase	Öffentlich zugänglicher Bücherschrank
school	Schule
music_school	Musikschule
driving_school	Fahrschule
language_school	Sprachschule
university	Universität
bicycle_parking	Fahrradparkplatz
bicycle_repar_station	Fahrrad-Reparaturbereich
bicycle_rental	Fahrradverleihstation
boat_rental	Bootsverleih
boat_sharing	Bootsharing
bus_station	Busbahnhof
car_rental	Autoverleih
car_sharing	Carsharing-Station
car_wash	Autowaschanlage
charging_station	Ladestation
ferry_terminal	Fährterminal
fuel	Tankstelle
grit_bin	Streugutcontainer
motorcycle_parking	Motorradparkplatz
parking	Parkplatz
parking_entrance	Ein- und Ausfahrten in Tiefgaragen oder Parkhäuser
parking_space	einzelne Parkplatzstellflächen
taxi	Taxistand
atm	Geldautomat / Bankomat
bank	Bank, Geldinstitut
bureau_de_change	Geldwechselbüro
baby_hatch	Babyklappe
clinic	Klinik
dentist	Zahnarztpraxis
doctors	Arztpraxis, Ärztehaus
hospital	Krankenhaus
nursing_home	Pflegeheim
pharmacy	Apotheke
social_facility	Soziale Einrichtung
veterinary	Tierarztpraxis, Tierklinik
arts_centre	Kulturzentrum
brothel	Bordell, Freudenhaus
casino	Spielbank oder Spielcasino
cinema	Kino
community_centre	Gemeinschaftszentrum

fountain	Springbrunnen
gambling	Ort zum Spielen (z.B. Bingo oder Pachinko)
nightclub	Nachtclub, Disco
planetarium	Planetarium
social_centre	Autonomes / soziales Zentrum
stripclub	Stripclub
studio	TV, Radio oder Musik Studio
swingerclub	Swingerclub
theatre	Theater, Oper, Schauspielhaus
animal_boarding	Tierpension
animal_shelter	Tierheim, Tierasyl
baking_oven	Öffentlicher Freiluftbackofen
bench	Parkbank
clock	öffentlich sichtbare Uhr
courthouse	Gericht
coworking_space	Co-Working-Büroplätze
crematorium	Krematorium
crypt	Krypta
dive_centre	Tauchbasis
dojo	Übungshalle japanischer Kampfkünste
embassy	Botschaft, Botschaftsgebäude
fire_station	Feuerwache
game_feeding	Wildtierfütterung
grave_yard	Kleines Gräberfeld
hunting_stand	Hochsitz
internet_cafe	Internetcafé
kneipp_water_cure	Fußbad im Außenbereich
marketplace	Markt, Wochenmarkt
photo_booth	Fotoautomat
place_of_worship	Anbetungsort (Kirche, Synagoge, Moschee, ...)
police	Polizeistation
post_box	Briefkasten
post_office	Postamt
prison	Gefängnis
ranger_station	Nationalpark-Besucherzentrale
recycling	Recycling-Einrichtungen
rescue_station	Rettungsstation
sanitary_dump_station	Sanitärmüllstation
shelter	Unterstand
shower	Öffentliche Duschen oder Bad
table	Öffentlicher Tisch

telephone	Telefonzelle
toilets	Öffentliche Toilette
townhall	Rathaus
vending_machine	Verkaufsautomat
waste_basket	Mülleimer
waste_disposal	Stelle zur Müllentsorgung für Bootsfahrer, Camper oder Leute im Allgemeinen
waste_transfer_station	Müllumladestation
watering_place	Wasserstelle, Wassertrog
water_point	Ort, an dem große Mengen an Trinkwasser verfügbar sind

Abgefragte Region

Wie beschrieben wurde die abzufragende Region zur Schaffung der Datengrundlage manuell festgelegt. Abbildung 20 zeigt beispielhaft die abgefragte Region zur Schaffung der Datengrundlage im Anwendungsfall der argentinischen Hauptstadt Buenos Aires sowie die visualisierte Datenausgabe innerhalb des abgefragten Bereichs.

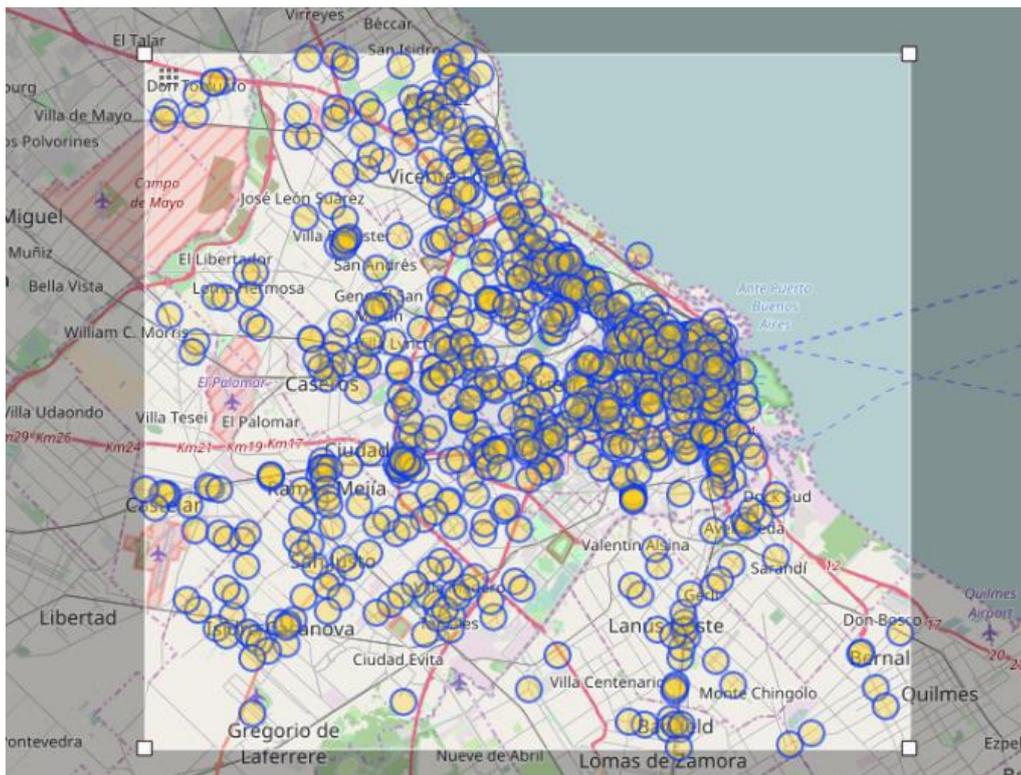


Abbildung 20: Manuelle Begrenzung der abgefragten Region in Overpass turbo (www.overpass-turbo.eu)

Unformatierte Ausgabe der abgefragten Datenpunkte

Wie in Abbildung 19 dargestellt, werden von der dort gezeigten Abfrage jeweils nur die Basisinformationen ausgegeben. Zudem wird zu Beginn der Abfrage die Datenausgabe im CSV-Format definiert. Tabelle 14 zeigt beispielhaft die Abgefragten Datenpunkte als CSV-Datei im Tabellenformat.

Tabelle 14: Beispielhafte Ausgabe der abgefragten Datenpunkte als CSV-Datei im Tabellenformat

@id	@lat	@lon
440909040	-346.329.730	-585.219.466
474553860	-346.050.040	-583.795.090
475028786	-346.010.131	-583.768.231
475032869	-346.023.329	-583.797.789
...

Anhang 2: Abfrage der Realdistanzen

Python-Code zur Abfrage der Realdistanzen

Wie beschrieben wurde zur Abfrage der Realdistanzen aus den einzelnen Datenpunkten generierten Routen ein Python-Skript verwendet. Abbildung 21 stellt das verwendete Python-Skript dar.

```
1 import sys
2 import csv
3 import time
4
5 import urllib
6 import json
7 from pprint import pprint
8
9 print(sys.argv)
10
11 def parseCSV(dateiPfad):
12
13     templateurl = 'https://api.openrouteservice.org/directions?coordinates=
14                   COORDINATE1,COORDINATE2%7CCOORDINATE3,COORDINATE4&profile=
15                   PROFILE&preference=fastest&units=km&language=de&geometry=
16                   false&geometry_format=encodedpolyline&geometry_simplify=
17                   false&instructions=false&instructions_format=text&elevation=
18                   false&options=%7B%7D&api_key=%APIKEY'
19
20     templateurl = templateurl.replace("APIKEY",
21                                     2058d904a497c67e00015b45fc38f03fec84c049ee5e1671d719bbac79)
22
23     templateurl = templateurl.replace("PROFILE", "driving-car")
24
25     with open(dateiPfad, 'r') as csvfile:
26         with open(dateiPfad+'out.CSV', 'w') as csvoutput:
27
28             csvreader = csv.reader(csvfile, delimiter=';', quotechar='')
29             writer = csv.writer(csvoutput, delimiter=';', lineterminator='\n')
30
31             next(csvreader)
32             next(csvreader)
33
34             for row in csvreader:
35
36                 print row
37
38                 start = row[0].split(',')
39                 ziel = row[1].split(',')
40
41                 url = templateurl.replace("COORDINATE1", start[1])
42                 url = url.replace("COORDINATE2", start[0])
43                 url = url.replace("COORDINATE3", ziel[1])
44                 url = url.replace("COORDINATE4", ziel[0])
45
46                 while True:
47                     time.sleep(1.4)
48                     response = urllib.urlopen(url)
49                     error = response.getcode()
50                     print error
```

```
46
47
48         if error == 200:
49             break
50         else:
51             print response.read()
52
53         if error == 500:
54             break
55
56
57         if error == 500:
58             writer.writerow(row + ["falsche Anfrage"])
59             continue
60
61         data = json.load(response)
62
63         pprint(data)
64
65         distance = data["routes"][0]["summary"]["distance"]
66
67         row = row + [distance]
68
69         print row
70
71         writer.writerow(row)
72
73 if __name__ == "__main__":
74     parseCSV(sys.argv[1])
```

Abbildung 21: Python-Code zur Abfrage der Realdistanzen

CSV-File zur Dateneingabe

Wie beschrieben wurden mit dem in Abbildung 21 dargestellten Python-Skript die aus den einzelnen Datenpunkten generierten Routen abgefragt. Die Eingabe der Routen erfolgte dabei per CSV-Datei. Diese enthält dabei pro Zeile jeweils den Start- und Endpunkt der abzufragenden Routen in Koordinatenform. Tabelle 15 stellt beispielhaft eine CSV-Datei zur Abfrage der Realdistanzen in Tabellenform dar.

Tabelle 15: Beispielhafte Eingabe der abzufragenden Realdistanzen als CSV-Datei in Tabellenform

-34.6329730,-58.5219466	-34.6050040,-58.3795090
-34.6050040,-58.3795090	-34.6010131,-58.3768231
-34.6010131,-58.3768231	-34.6023329,-58.3797789
-34.6023329,-58.3797789	-34.6288467,-58.5253772
...	...

Generiertes CSV-File zur Datenausgabe

Nachdem in Tabelle 15 bereits beispielsweise die Dateneingabe zur Abfrage der Realdistanzen dargestellt wurde, wird in Tabelle 16 beispielhaft die Ausgabe der abgefragten Routen abgebildet. Zur einfachen Überprüfbarkeit der abgefragten Routen enthält das CSV-File zur Datenausgabe sowohl die Start- und Endpunkte der jeweils abgefragten Routen als auch die Resultate der Abfrage in km.

Tabelle 16: Beispielhafte Ausgabe der abgefragten Realdistanzen als CSV-Datei in Tabellenform

-34.6010131,-58.3768231	-34.6023329,-58.3797789	1.119
-34.6023329,-58.3797789	-34.6288467,-58.5253772	18.31
-34.6288467,-58.5253772	-34.5994398,-58.3711166	17.205
-34.5994398,-58.3711166	-34.6041720,-58.4106241	4.617
...

Eidesstattliche Versicherung

Name, Vorname

Matr.-Nr.

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel:

" Bewertung von Distanzmetriken für ein Supply-Chain-Simulationsmodell"

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift

Belehrung

Wer vorsätzlich gegen eine die Täuschung über Prüfungsleistungen betreffende Regelung einer Hochschulprüfungsordnung verstößt, handelt ordnungswidrig. Die Ordnungswidrigkeit kann mit einer Geldbuße von bis zu 50.000,00 € geahndet werden. Zuständige Verwaltungsbehörde für die Verfolgung und Ahndung von Ordnungswidrigkeiten ist der Kanzler/die Kanzlerin der Technischen Universität Dortmund. Im Falle eines mehrfachen oder sonstigen schwerwiegenden Täuschungsversuches kann der Prüfling zudem exmatrikuliert werden. (§ 63 Abs. 5 Hochschulgesetz - HG -)

Die Abgabe einer falschen Versicherung an Eides statt wird mit Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft. Die Technische Universität Dortmund wird gfls. elektronische Vergleichswerkzeuge (wie z.B. die Software „turnitin“) zur Überprüfung von Ordnungswidrigkeiten in Prüfungsverfahren nutzen.

Die oben stehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Ort, Datum

Unterschrift

