

SIMULATION INFORMATIONSORIENTIERTER VERKEHRSSYSTEME

Implementation von Wissensmodellen mit MATSim

MASTER THESIS

zur Erlangung des Grades

Master of Science

Fachbereich Wirtschaftsinformatik
Hochschule Liechtenstein

Bearbeitungszeitraum: 04.08.2008 bis 01.02.2009

Eingereicht von:
Dipl.-Ing. (FH) Christoph Dobler, M.Sc.
Kirchstrasse 6
6822 Sateins
Österreich

Erstbetreuer:
Prof. Dr. Kay W. Axhausen

Zweitbetreuer:
Prof. Siegfried Weinmann

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Ziele und Abgrenzung	1
1.3	Aufbau	2
2	Grundlagen	2
2.1	Begriffe	2
2.1.1	Quelle-Ziel-Matrizen	2
2.1.2	Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage	3
2.1.3	Verkehrszellen und Verkehrsarten	3
2.1.4	Wegekette	4
2.2	Evolutionäre Algorithmen	5
2.2.1	Allgemeines	5
2.2.2	Ablauf von evolutionären Algorithmen	5
2.2.3	Genetische Algorithmen	9
2.2.4	Evolutionstrategien	9
2.2.5	Genetische Programmierung	10
2.3	Modellbildung und Simulation	11
2.3.1	Allgemeines	11
2.3.2	Modellbildung	13
2.3.3	Simulation	15
2.4	Agenten-Systeme	17
2.4.1	Agenten	17
2.4.2	Multi-Agenten-Systeme	18
2.4.3	Multi-Agenten-Simulation	19
2.5	Statistische Versuchsplanung	20
3	Verkehrsplanung	21
3.1	Aufgabe	21
3.2	Verkehrsmodelle	22
3.2.1	Einleitung	22
3.2.2	4-Stufen-Modell	22
3.2.3	Aktivitätenbasierte Nachfragegenerierung	25
3.2.4	Dynamische Verkehrsumlegung	25
3.2.5	Kombination von ADG und DTA	28

3.3	Simulationen in der Verkehrsplanung	31
3.3.1	Allgemeines	31
3.3.2	Makrosimulationen	32
3.3.3	Mesosimulationen	33
3.3.4	Mikrosimulationen	33
3.3.5	Submikrosimulationen	35
4	Wissensmodelle	35
4.1	Allgemeines	35
4.2	Streckenkenntnis	36
4.3	Routenwahl	37
4.4	Auswahl der Wissensmodelle	38
5	Implementierung	40
5.1	MATSim	40
5.1.1	Allgemeines	40
5.1.2	Überblick über die MATSim Module	43
5.1.3	Simulationsstruktur von MATSim-EA	44
5.2	Umsetzung	47
5.2.1	Allgemeines	47
5.2.2	Überblick über die Erweiterungen	48
5.2.3	Bewegungsräume	49
5.2.4	Routenplaner	52
6	Interpretation	53
6.1	Eingrenzung	53
6.2	Versuchsplan und Hypothese	53
6.3	Szenario	54
6.4	Testsystem und Rechenzeit	55
6.5	Auswertekriterien	56
6.5.1	Allgemeines	56
6.5.2	Wardrop Gleichgewicht	57
6.5.3	Ergebnisse des Testszenarios	58
6.6	Analysen	60
6.6.1	Random Router	60
6.6.2	Tabu Router	61
6.6.3	Compass Router	61
6.6.4	Random Compass Router	62
6.6.5	Gegenüberstellung	64

6.6.6	Least Cost Router	65
7	Fazit	71
8	Literatur	74
	Eidesstattliche Erklärung	79

Abbildungsverzeichnis

1	Verkehrszelle und Verkehrsarten	4
2	Ablaufdiagramm eines evolutionären Algorithmus	6
3	Beispieliteration eines genetischen Algorithmus	8
4	Individuum eines genetischen Algorithmus	9
5	Ablaufdiagramm der Evolutionsstrategien	10
6	Beziehung zwischen Realität, Modell und Simulation	12
7	4-Stufen-Modell	23
8	agentenbasierte Kopplung von ADG und DTA	30
12	Überblick über MATSim-T	41
13	Darstellung einer synthetischen Person im XML Format	42
14	Überblick über die MATSim Module	43
15	MATSim-EA im Detail	44
16	Ablauf des evolutionären Algorithmus von MATSim	46
17	Erweiterung der MATSim Queue Simulation	50
18	Ablauf MATSim einschliesslich Erweiterungen	51
19	Beispiel für die Zellengrösse beim Wardrop Gleichgewicht	59
20	Ergebnisse des Random Routers	60
21	Ergebnisse des Tabu Routers	61
22	Compass Router ohne Kenntnis des vorangegangenen Knotens	62
23	Compass Router mit Kenntnis des vorangegangenen Knotens	63
24	Ergebnisse des Random Compass Routers 2D	64
25	Ergebnisse des Random Compass Routers 3D	65
26	Gegenüberstellung der Router	66
27	Vergleich der Least Cost Router	67
28	Versuchsauswertung No Replanning	70
29	Versuchsauswertung Initial Replanning Dijkstra Router	71
30	Versuchsauswertung Activity End Replanning Dijkstra Router	72
31	Versuchsauswertung Leave Link Replanning Dijkstra Router	73
32	Einfluss des Nutzungsgrades des Initial Replanning Dijkstra Router	74
33	Auswirkung des Nutzungsgrades des Initial Replanning Dijkstra Router auf das Wardrop Gleichgewicht	75

Tabellenverzeichnis

1	Versuchsplan	68
2	Ergebnisse des Versuchsplans	69

Masterarbeit

Simulation informationsorientierter Verkehrssysteme

Implementation von Wissensmodellen mit MATSim

Februar 2009

Zusammenfassung

Die Aufgabe der Verkehrsplanung besteht darin, Verkehrssysteme optimal zu gestalten, insbesondere hinsichtlich ihrer Auslastung. Dies beinhaltet die Berücksichtigung und – wenn möglich – die Verknüpfung der individuellen Präferenzen der Verkehrsteilnehmer und der globalen Nutzenaspekte. Massgeblichen Einfluss auf die Entscheidungen einer Person hinsichtlich der Routenwahl haben ihre spezifischen Kenntnisse über den gegenwärtigen Zustand des Verkehrssystems. Die Auswirkungen unterschiedlicher Wissensstufen der Individuen auf das lokale und globale Verkehrsgeschehen zählen zu den Kernfragen der vorliegenden Studie. Um deren Einflüsse beurteilen zu können, werden Modelle für die Abbildung der unterschiedlichen Wissensstände von Individuen erstellt und unter Verwendung des Simulationswerkzeugs MATSim implementiert. Anhand der Auswertungen von auf Versuchsplänen basierenden Simulationsläufen werden die Auswirkungen unterschiedlicher Wissensstufen auf ein Verkehrssystem analysiert und bewertet. Neben der Beurteilung der Qualität der auf den Wissensmodellen basierenden Routen erfolgt ergänzend eine Betrachtung der Simulationsergebnisse aus verkehrsplanerischer Sicht.

Schlüsselwörter

Simulation, informationsorientierte Verkehrssysteme, MATSim

Bevorzugter Zitierstil

Dobler, C. (2009) Simulation informationsorientierter Verkehrssysteme, *Masterarbeit, Fachbereich Wirtschaftsinformatik*, Hochschule Liechtenstein, Vaduz.

Master thesis

Simulation informationsorientierter Verkehrssysteme

Implementation von Wissensmodellen mit MATSim

February 2009

Abstract

Traffic planning and management is used to optimise traffic systems, particularly in respect to their efficiency. The individual preferences of road users has to be considered and – if possible – linked with the traffic management system as well as the global aspects of usage. The individual cognition of the current traffic situation exerts an essential influence on the decision-making of road users. Therefore the key element of this study is to understand the impact of the different personal knowledge levels regarding the local and global state of road traffic. To consider these consequences, patterns of different levels of knowledge were constructed and implemented using the simulation tool MATSim. Using the evaluations of experimental map based simulation runs, the implications of different levels of knowledge are analysed and examined. Having evaluated the rating of quality of knowledge based routes an additional focus lays on the consideration of the simulation results from the viewpoint of traffic-planning.

Keywords

Simulation, information oriented traffic systems, MATSim

Preferred citation style

Dobler, C. (2009) Simulation informationsorientierter Verkehrssysteme, *Master thesis, Department of Business Information Systems*, Hochschule Liechtenstein, Vaduz.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Aufgabe der Verkehrsplanung besteht darin, Verkehrssysteme optimal zu gestalten, insbesondere hinsichtlich ihrer Auslastung. Dies bedeutet vor allem, die individuellen Präferenzen der Verkehrsteilnehmer den globalen Nutzenaspekten gegenüberzustellen oder – wenn möglich – miteinander zu verknüpfen. Informationsflüsse und das aktuelle Wissen der jeweiligen Verkehrsteilnehmer über das Verkehrssystem stehen im Mittelpunkt der Untersuchungen. Die Auswirkungen unterschiedlicher Wissensstufen der Individuen auf das lokale und globale Verkehrsgeschehen zählen zu den Kernfragen der vorliegenden Studie. Mit Hilfe von Verkehrssimulationen werden verschiedene Szenarien abgebildet und analysiert. Eine Untergruppe dieser Simulationen basiert auf Multi-Agenten-Systemen. Sie verfolgt den Ansatz, die Verkehrsteilnehmer als eigenständige Individuen zu betrachten. Dies beinhaltet beispielsweise das eigenständige Verhalten jedes Individuums, dem eine Entscheidungsfindung auf dem spezifischen Wissensstand zu Grunde liegt.

1.2 Ziele und Abgrenzung

Im Rahmen dieser Thesis werden Simulationsmodelle erstellt, die sich mit den Auswirkungen unterschiedlicher Wissensstufen der Individuen auf das Verkehrssystem auseinandersetzen. Die Modelle werden mit Hilfe des Simulationswerkzeugs MATSim-T (Multi-Agent Simulation Toolkit) implementiert und basieren auf verschiedenen Ansätzen zur Beschreibung der Informationsstände der Individuen. Dies soll die Voraussetzungen schaffen, um den Einfluss der Wissensstände der Individuen innerhalb eines Verkehrssystems auf das aktuelle Verkehrsgeschehen bestimmen zu können. Basierend auf Versuchsplänen werden hierzu Simulationen mit unterschiedlichen Wissensständen durchgeführt und ausgewertet. Auf Grundlage der Analysen dieser Ergebnisse werden die Einflüsse der Wissensmodelle und deren Wissensstufen auf die Qualität der von den Personen gewählten Routen bewertet. Als Referenz- und Vergleichswerte werden die Ergebnisse von Simulationen herangezogen, bei denen die Personen über vollkommenes Wissen verfügen.

Der Umfang der Arbeit erstreckt sich von der Erstellung von Wissenmodellen über deren Implementierung bis hin zur Verifikation der Modelle und Auswertung der Ergebnisse. Der Fokus liegt dabei auf der Implementierung der Modelle. Deren korrekte Umsetzung wird durch die Untersuchung und Auswertung der Simulationsergebnisse gewährleistet. Ergänzend wird

eine Betrachtung der Ergebnisse aus verkehrsplanerischer Sicht durchgeführt.

1.3 Aufbau

Die Beschreibung von allgemeinen Grundlagen aus den Bereichen der Verkehrsplanung, evolutionäre Algorithmen, Modellbildung und Simulation, Agenten-Systemen und statistischer Versuchsplanung bilden das theoretische Fundament dieser Arbeit. Als Einstiegspunkt in die eigentliche Thematik der Arbeit dient eine allgemeine Betrachtung der Verkehrsplanung. Neben ihrer Aufgabe werden insbesondere verschiedene Verkehrsmodelle beschrieben und die Rolle von Simulationen in diesem Zusammenhang erörtert. Eine Beschreibung von verschiedenen Wissensmodellen, welche auf unterschiedlichen Routenwahlverfahren und variablen Bewegungsräumen basieren, liefert Kapitel 4. Nachfolgend wird ein Überblick über das bestehende MATSim Toolkit gegeben, die Implementierung der Wissensmodelle beschrieben und die damit verbundenen Erweiterungen des Toolkits diskutiert. Die Auswirkungen von unterschiedlichen Wissensständen der Personen innerhalb eines Verkehrssystems auf das System werden anhand einer Reihe von Simulationsläufen untersucht und ausgewertet, welche in Kapitel 6 beschrieben werden. Dieses enthält überdies Informationen über das verwendete Testszenario, die Auswertekriterien, das genutzte Testsystem und Rechenzeiten auf diesem. Ein Resümee sowie ein Ausblick auf mögliche zukünftige Untersuchungsschwerpunkte runden die Arbeit im Rahmen des Fazits ab.

2 Grundlagen

2.1 Begriffe

2.1.1 Quelle-Ziel-Matrizen

Sogenannte Quelle-Ziel-Matrizen werden für die Beschreibung der Verkehrsverteilung verwendet. Häufig werden in diesem Zusammenhang auch die englische Bezeichnung Origin-Destination-Matrizen oder deren Abkürzung OD-Matrizen verwendet. Diese Matrizen geben Auskunft darüber, wieviel Verkehr innerhalb eines betrachteten Zeitraums von Start- zu Endpunkten fließt. Die von den einzelnen Verkehrsteilnehmern zurückgelegten Wege werden dabei aufsummiert. Als Folge daraus kann die Bewegung einzelner Individuen anhand einer gegebenen Quelle-Ziel-Matrix nicht mehr nachvollzogen werden. Traditionelle Verfahren zur Erstellung von Verkehrsmodellen verwenden statische OD-Matrizen, neue Methoden verwenden hingegen

häufig zeitabhängige Matrizen oder verzichten gänzlich auf deren Nutzung und betrachten stattdessen die Verkehrsteilnehmer innerhalb des gesamten Modells als Individuen.

2.1.2 Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage

Das Verkehrsangebot und die Verkehrsnachfrage sind zwei zentrale Begriffe aus dem Bereich der Verkehrsplanung. Das Angebot beschreibt dabei die vorhandene Infrastruktur, welche genutzt werden kann, um sich von einem Start- zu einem Zielpunkt zu bewegen. Das Angebot beinhaltet dabei das Strassen- und Schienennetz sowie Linienwege und Fahrpläne des öffentlichen Verkehrs. Lichtsignalanlagen und deren Steuerungsverfahren können ebenfalls Bestandteile des modellierten Verkehrsangebots sein.¹

Unter Verkehrsnachfrage versteht man den Bedarf der Ortsveränderung von Personen oder Gütern. Somit kann Verkehr als die Realisierung der Verkehrsnachfrage betrachtet werden. Daraus lässt sich ableiten, dass für die Entstehung von Verkehr geplante Aktivitäten, die damit verbundenen Notwendigkeiten für Ortsveränderungen und die Möglichkeiten zu deren Realisierung vorhanden sein müssen.²

2.1.3 Verkehrszellen und Verkehrsarten

In der Verkehrsplanung wird ein Gebiet mit fest definierten Grenzen als *Verkehrszelle*, *Verkehrsgebiet* oder *Verkehrsbezirk* bezeichnet.³ Für die Untersuchung des Verkehrs innerhalb eines gegebenen Bereichs, etwa einer Stadt oder einer Siedlung, wird dieser in einzelne Verkehrszellen unterteilt. Um diese Verkehrsgebiete einander gegenüberstellen zu können, sollten sie möglichst vergleichbare Grössen und Bevölkerungsdichten aufweisen. Weitere häufig genutzte Vergleichskriterien sind etwa die Zahl der Arbeitsplätze oder die Verkaufsraumflächen.⁴ Abbildung 1 zeigt eine Verkehrszelle und die verschiedenen Verkehrsarten, welche im Anschluss beschrieben werden.

- Durchgangsverkehr

Als Durchgangsverkehr wird jener Verkehr bezeichnet, der durch eine beobachtete Zelle hindurch fährt. Für die Verkehrsoptimierung ist es in der Regel sinnvoll, Wege durch einen Verkehrsbezirk zu führen.

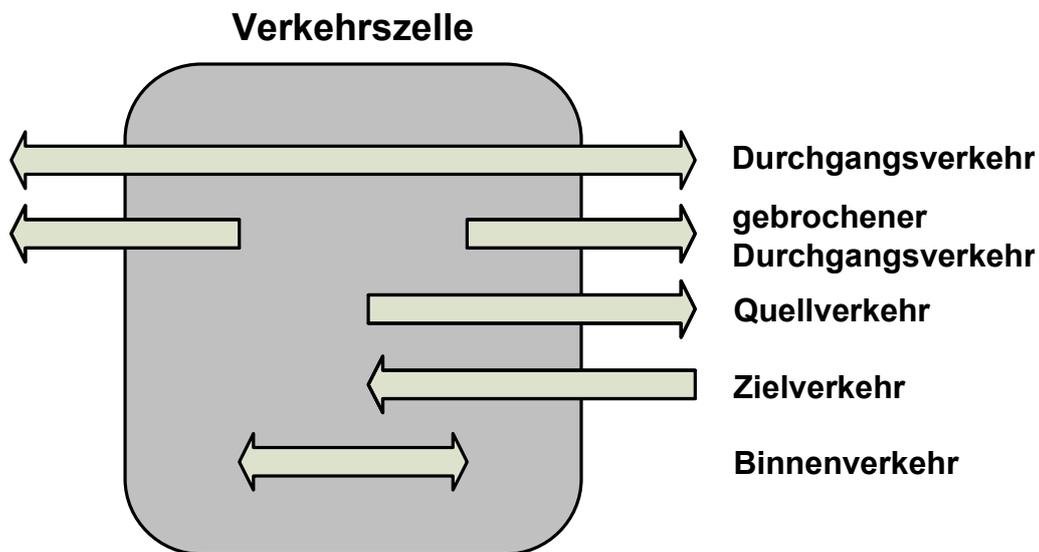
¹Vgl. Friedrich (2002, S. 15)

²Vgl. Scholz und Scholz (2004, S. 5)

³In der Regel werden diese Begriffe synonym verwendet.

⁴Vgl. Korda (2005, S. 246)

Abbildung 1: Verkehrszelle und Verkehrsarten



- **Gebrochener Durchgangsverkehr**
Wird die Durchfahrt durch eine Verkehrszelle kurzfristig unterbrochen, so spricht man von gebrochenem Durchgangsverkehr. Die Ziele solcher kurzen Zwischenstopps sollten wiederum möglichst gut an die Durchfahrtsrouten angebunden sein. Typische Beispiele solcher Unterbrechungen sind Einkäufe oder Tankstopps.
- **Quellverkehr**
Mit Quellverkehr ist jener Verkehr gemeint, der seinen Ursprung innerhalb einer Zelle hat, diese in der Folge jedoch verlässt.
- **Zielverkehr**
Dies ist jener Verkehr, der aus anderen Verkehrszellen stammt, dessen Ziel sich jedoch innerhalb der Zelle befindet.
- **Binnenverkehr**
Verkehr, welcher innerhalb einer Verkehrszelle beginnt und endet, wird als Binnenverkehr bezeichnet.

2.1.4 Wegeketten

Sogenannte Wegeketten entstehen, wenn die Wege, welche eine Person zwischen ihren einzelnen Aktivitäten zurücklegt, zusammengefasst werden.⁵ Als zeitlicher Betrachtungshorizont wird häufig ein Tag gewählt. Die zugrundeliegenden Aktivitäten lassen sich aus dem täglichen Lebensrhythmus der betreffenden Person ableiten. Eine typische Wegekette für eine berufstätige

⁵Vgl. Kirchhoff (2002, S. 73)

Person könnte beispielsweise folgendermassen aussehen: Morgens von der Wohnung zum Arbeitsplatz, mittags ins Restaurant und wieder retour, am Abend von der Arbeitsstelle mit Zwischenstopp im Supermarkt zurück zur Wohnung.

2.2 Evolutionäre Algorithmen

2.2.1 Allgemeines

Unter evolutionären Algorithmen versteht man eine Klasse von Optimierungsverfahren, deren Vorgehensweise an die biologische Evolution angelehnt ist. Im Gegensatz zu klassischen Optimierungsansätzen nutzen sie keine problemspezifischen Informationen wie etwa den Gradienten der Zielfunktion oder Expertenwissen über ein untersuchtes System. Dies hat zur Folge, dass evolutionäre Algorithmen auf Kosten eines höheren Berechnungsaufwandes sehr flexibel angewendet werden können. Aus diesem Grund kommen sie insbesondere dort zur Anwendung, wo klassische Verfahren, wie sie etwa von Papageorgiou beschrieben werden⁶, versagen. Als Beispiele hierfür seien an dieser Stelle Problemstellungen genannt, welche analytisch nicht gelöst werden können, und Optimierungsprobleme mit komplexen Lösungsräumen, die über eine Vielzahl an lokalen Optima verfügen.

Evolutionäre Algorithmen lassen sich im Wesentlichen in die Klassen genetische Algorithmen, Evolutionsstrategien und genetische Programmierung einteilen, welche sich hauptsächlich im Detaillierungsgrad der Abbildung der einzelnen Elemente einer natürlichen Evolution unterscheiden.⁷ In den folgenden Abschnitten wird erst die Vorgehensweise eines evolutionären Algorithmus im Allgemein dargestellt, bevor anschliessend die drei Klassen im Detail beschrieben und deren besondere Merkmale aufgeführt werden.

2.2.2 Ablauf von evolutionären Algorithmen

In Abbildung 2 wird beispielhaft die Vorgehensweise eines evolutionären Algorithmus dargestellt. Abhängig vom gewählten Ansatz werden jeweils einzelne Schritte weggelassen, angepasst oder zu einem anderen Zeitpunkt ausgeführt.

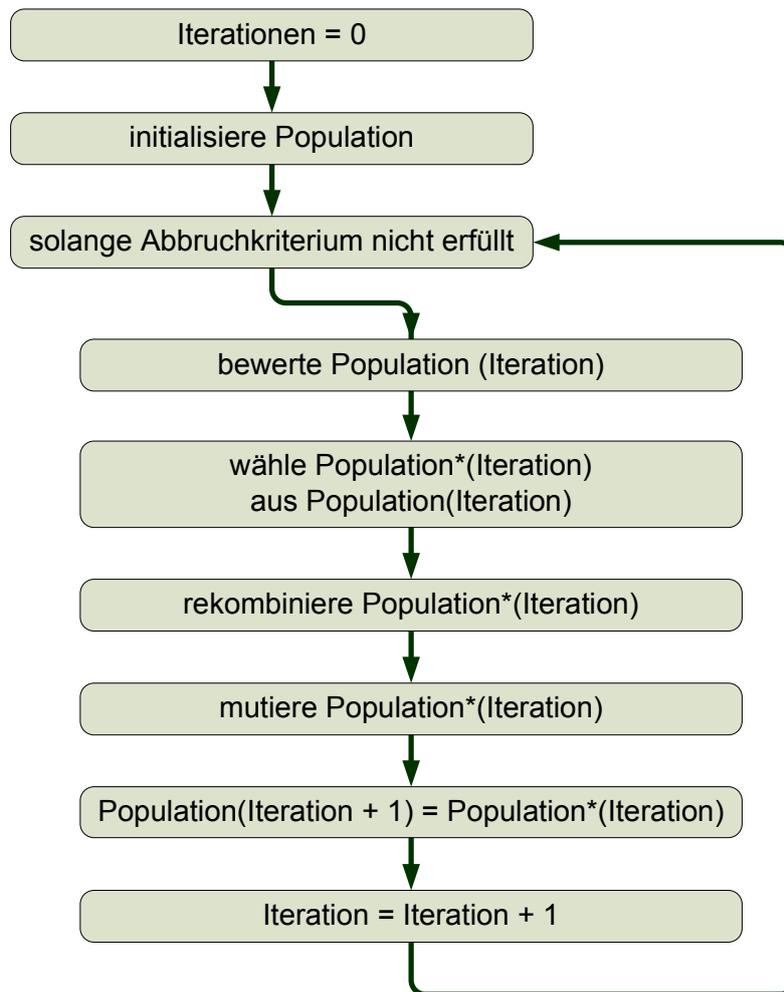
- Initialisierung der Population

Vor dem Beginn der iterativen Optimierung muss erst die Startpopulation initialisiert

⁶Vgl. Papageorgiou (1996)

⁷Vgl. Biethahn et al. (2004, S. 54)

Abbildung 2: Ablaufdiagramm eines evolutionären Algorithmus



werden. Diese setzt sich aus Individuen zusammen, welche in Anlehnung an das biologische Vorbild auch als Chromosomen bezeichnet werden. Jedes Element einer Population stellt dabei eine (mehr oder weniger gute) Lösung des untersuchten Problems dar. Die Darstellung eines Individuums hängt vom verwendeten Algorithmus ab. Üblicherweise handelt es sich dabei um eine Zeichen- oder Zahlenkette mit nicht zwingend definierter Länge. Die einzelnen Elemente dieser Kette werden als Gene bezeichnet, deren konkrete Ausprägung als Allel.⁸ Im Laufe der Ausführung eines evolutionären Algorithmus wird eine Vielzahl an Populationen erzeugt, welche auch als Generationen bezeichnet werden. Die Verteilung der Individuen über den Suchraum des zu lösenden Problems kann auf verschiedene Arten erfolgen. Sofern Vorwissen über das Problem bekannt ist, können sie im Bereich des vermuteten Optimums platziert werden. Eine ebenfalls häufig genutzte Strategie besteht darin, die Individuen möglichst gleichmässig über den gesamten Suchraum zu verteilen, um diesen vollumfänglich abzudecken.

⁸Vgl. Gerdes et al. (2004, S. 34)

- Bewertung

In diesem Abschnitt wird die Fitness jedes einzelnen Individuums der gegenwärtigen Population bestimmt. Diese bildet die Grundlage für die anschließende Selektion. Unter Fitness versteht man dabei die Güte einer durch ein Chromosom beschriebenen Lösung. Je höher die Fitness, desto besser ist die Lösung. Die Berechnung erfolgt mittels einer sogenannten Fitnessfunktion, was der Zielfunktion eines Optimierungsproblems entspricht.⁹

- Selektion

Im Rahmen der Selektion werden jene Individuen ausgewählt, welche für die Erstellung der nächsten Population genutzt werden. In diesem Zusammenhang wird oft auch der Ausdruck *Survival of the fittest* verwendet. Das Ziel besteht dabei darin, eine Population zu generieren, die besser ist als die bestehende. Einige der für die Auswahl zur Verfügung stehenden Modelle werden nachfolgend beschrieben:¹⁰

- Rangbasierte Selektion

Bei diesem Verfahren werden die Individuen einer Population nach ihrer Fitness gereiht. Diejenigen mit den höchsten Werten werden ausgewählt.

- Lineares Ranking

Wie bei der rangbasierten Selektion werden auch bei diesem Auswahlverfahren die Individuen nach ihrer Fitness gereiht. Anschliessend wird ihnen abhängig von ihrem Rang eine Auswahlwahrscheinlichkeit zugeteilt. Somit kann jedes Individuum ausgewählt werden, die Wahrscheinlichkeit nimmt jedoch ab, je weiter hinten es sich in der Rangliste befindet.

- Wettkampf-Selektion

Dabei handelt es sich um ein iteratives Auswahlverfahren. In jeder Iteration wird eine zufällige Gruppe von Individuen aus der Population gebildet. Das jeweils beste Individuum daraus wird selektiert. Dieses Vorgehen wird für jedes Individuum der neuen Population wiederholt.

- Boltzmann Selektion

Auch bei diesem Verfahren wird für jedes Individuum eine Auswahlwahrscheinlichkeit berechnet. Dabei werden einerseits die Fitness und andererseits das Alter eines Individuums berücksichtigt.

- Rekombination (Crossover)

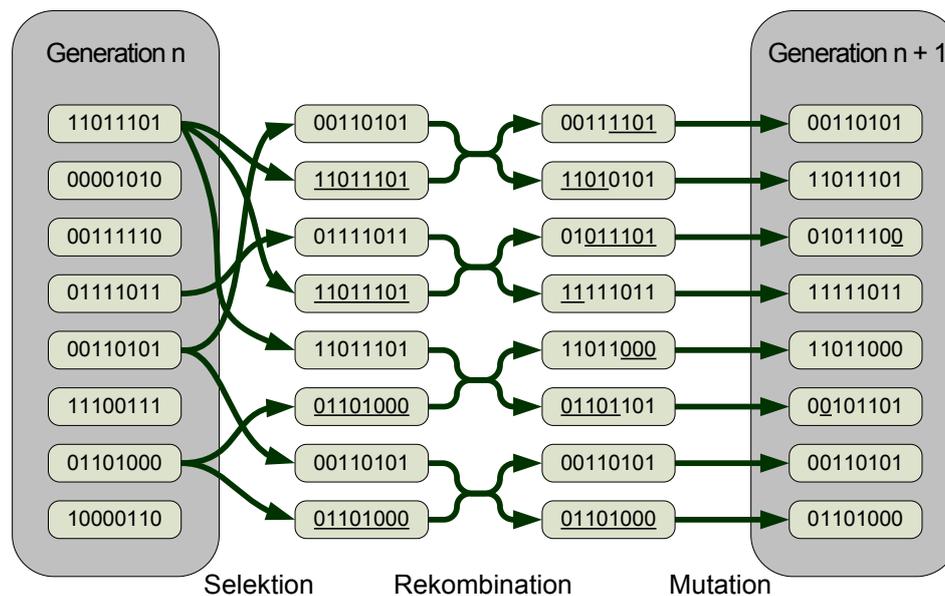
Durch einen Vorgang, der als Rekombination oder Crossover bezeichnet wird, wird ein neues Individuum aus zwei oder mehr Elternchromosomen gebildet. Das Ziel besteht dabei darin, bereits bei der Erzeugung eines Individuums auf eine möglichst breite Informationsbasis zuzugreifen, um so bessere Nachkommen zu erzeugen.¹¹ Durch die Rekombination werden Gene zwischen den Individuen vertauscht, jedoch nicht mit neuen Werten belegt.

⁹Vgl. Gerdes et al. (2004, S. 37)

¹⁰Vgl. Biethahn et al. (2004, S. 64ff), Gerdes et al. (2004, S. 79ff)

¹¹Vgl. Biethahn et al. (2004, S. 84)

Abbildung 3: Beispieliteration eines genetischen Algorithmus



Dies hat zur Folge, dass ein Gen, welches bei allen beteiligten Eltern dieselbe Ausprägung hat, auch bei den gezeugten Nachkommen denselben Wert besitzt.

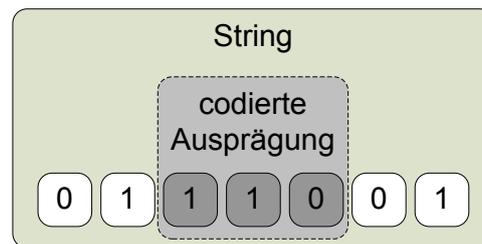
- Mutation

Bei der Mutation werden zufällig gewählte Gene eines Individuums wiederum zufällig verändert. Dadurch kann, im Gegensatz zur Rekombination, genetisches Material erzeugt werden, welches noch nicht in einer Population vorhanden ist. Ein zu hoher Mutationsfaktor birgt die Gefahr, dass vorhandene, gute Lösungen zu stark verfälscht werden. Ist der Faktor hingegen zu gering, kann sich ein Algorithmus in lokalen Optima verfangen.¹²

Die folgende Abbildung zeigt die beschriebenen Vorgänge der Selektion, Rekombination und Mutation anhand der Iteration eines genetischen Algorithmus. Grundlage bildet die Auswahl jener Individuen der aktuellen Generation, welche für die Bildung der nächsten genutzt werden sollen. Durch die Rekombination werden dann die Gene der neuen Individuen miteinander vermischt, was in der Abbildung durch die unterstrichenen Ziffern dargestellt wird. Im letzten Schritt werden einzelne Gene zufällig gewählter Individuen mutiert, welche wiederum entsprechend gekennzeichnet sind.

¹²Vgl. Gerdes et al. (2004, S. 42)

Abbildung 4: Individuum eines genetischen Algorithmus



2.2.3 Genetische Algorithmen

Genetische Algorithmen zählen zu den am häufigsten angewandten evolutionären Algorithmen und basieren auf Arbeiten von John Holland.¹³ Jedes Individuum der verwendeten Population wird als binärer String mit fixer Länge dargestellt. Kann ein Merkmal des untersuchten Systems nicht durch ein einzelnes Gen abgebildet werden, so wird es mittels einer Codierfunktion auf mehrere Gene aufgeteilt. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel eines solchen Individuums mit den einzelnen Genen und einer codierten Ausprägung. Der funktionale Aufbau und Ablauf genetischer Algorithmen stimmt mit der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Vorgehensweise evolutionärer Algorithmen überein.

2.2.4 Evolutionsstrategien

Die Evolutionsstrategien wurden von Rechenberg und Schwefel zur Lösung von Optimierungsproblemen aus den Ingenieurwissenschaften entwickelt.¹⁴ Im Gegensatz zu den genetischen Algorithmen werden die zu optimierenden Ausprägungen nicht codiert, sondern als jeweils eigenständiges Gen hinterlegt.¹⁵ Abbildung 5 zeigt vereinfacht den Ablauf der Evolutionsstrategien.

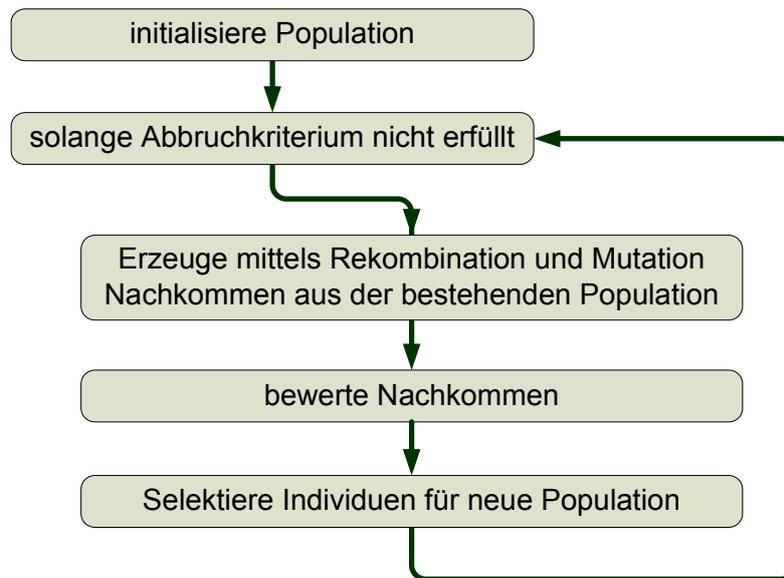
Innerhalb der iterativen Optimierung werden in einem ersten Schritt die Nachkommen der bestehenden Generation erstellt. Hierfür werden üblicherweise zwei Eltern zufällig ausgewählt, deren Werte rekombiniert und mutiert werden, um einen Nachkommen zu erzeugen. Im Gegensatz zu den genetischen Algorithmen wird an dieser Stelle keine Selektion durchgeführt, um eine Gruppe von Individuen auszuwählen, welche als Eltern für die nächste Generation dienen sollen. Im nächsten Schritt werden alle generierten Nachkommen bewertet und abschliessend anhand der Ergebnisse die Individuen für die nächste Elterngeneration ausgewählt. Dabei kann wahlweise nur aus den Nachkommen oder sowohl aus den Nachkommen als auch ihren Eltern

¹³Vgl. Holland (1992)

¹⁴Vgl. Biethahn et al. (2004, S. 75), Gerdes et al. (2004, S. 115)

¹⁵Vgl. Gerdes et al. (2004, S. 115)

Abbildung 5: Ablaufdiagramm der Evolutionsstrategien



gewählt werden. Letzteres ermöglicht es, gute Individuen über mehrere Generationen hinweg zu behalten, birgt aber gleichzeitig auch Gefahren, wie etwa das Hängenbleiben in lokalen Optima.¹⁶

Ein weiteres Merkmal der Evolutionsstrategien besteht darin, dass sie üblicherweise selbstadaptierende Mutationsraten verwenden. Um zu Beginn einer Optimierung den Suchraum möglichst effizient nach potentiellen Optima zu untersuchen, ist eine hohe Mutationsrate sinnvoll. Um die so identifizierten Stellen genauer untersuchen zu können, ist hingegen eine kleine Rate zweckmäßiger.¹⁷

2.2.5 Genetische Programmierung

Die bisher beschriebenen Konzepte haben das Finden von sehr guten Lösungen für formulierte Probleme zum Ziel. Die genetische Programmierung verfolgt eine andere Zielsetzung; sie versucht, Programme zum Lösen von Problemen automatisch zu generieren. Das Grundkonzept basiert dabei darauf, dass die Individuen einer Population anstelle von klar definierten Einheiten eigenständige Programme sind, auf die evolutionäre Operatoren angewendet werden können.¹⁸ Vertiefte Informationen zu genetischen Algorithmen sind beispielsweise in den Arbeiten von

¹⁶Vgl. Biethahn et al. (2004, S. 84)

¹⁷Vgl. Gerdes et al. (2004, S. 117f)

¹⁸Vgl. Biethahn et al. (2004, S. 84f)

Koza zu finden.¹⁹

2.3 Modellbildung und Simulation

2.3.1 Allgemeines

Eine Vielzahl von Problemstellungen wird heute mit Hilfe von Simulationen untersucht und anhand der generierten Ergebnisse gelöst. Dabei gibt es verschiedenste Definitionen des Begriffs *Simulation*, welche eine Folge der Anwendungsgebiete und -möglichkeiten sind. Eine allgemeine Begriffsbestimmung liefern etwa Bender und Schiller, die eine Simulation wie folgt beschreiben:

„Simulation umfasst die Implementierung und das Experimentieren mit Simulationsmodellen, um zu Erkenntnissen zugelingen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“²⁰

Im Gegensatz dazu steht beispielsweise die wesentlich spezifischere Beschreibung von Kramer und Neculau, welche unter einer Simulation im engeren Sinn die Nachahmung von realen Prozessen mittels Computern auf Grundlage von mathematischen Modellen verstehen.²¹ Sie beschränken sich mit dieser Definition auf computerbasierte Modelle, welche früher übliche Darstellungen, die beispielsweise auf hydraulischen, elektrischen oder mechanischen Analogien beruhen, heute zu einem überwiegenden Teil abgelöst haben.²²

Anhand einiger wichtiger Eigenschaften kann verdeutlicht werden, warum Simulationen heute insbesondere in technischen Bereichen praktisch unverzichtbar sind.²³

- Experimente mit Simulationsmodellen sind in der Regel beliebig wiederholbar, was bei realen Systemen oft nicht zutrifft oder mit enormem Aufwand verbunden ist.
- Simulierte Modelle sind im Allgemeinen vollständig beobachtbar; es besteht keine Beeinflussung durch Messaufbauten, wie sie in der Realität auftreten können.
- Der Zeit- und Kostenaufwand kann erheblich reduziert werden, da beispielsweise keine Teile für die Tests gefertigt werden müssen.
- Es sind Untersuchungen von Systemen möglich, mit denen in der Realität nicht experimentiert werden kann. Die Gründe dafür können mannigfaltig sein. Beispiele sind etwa

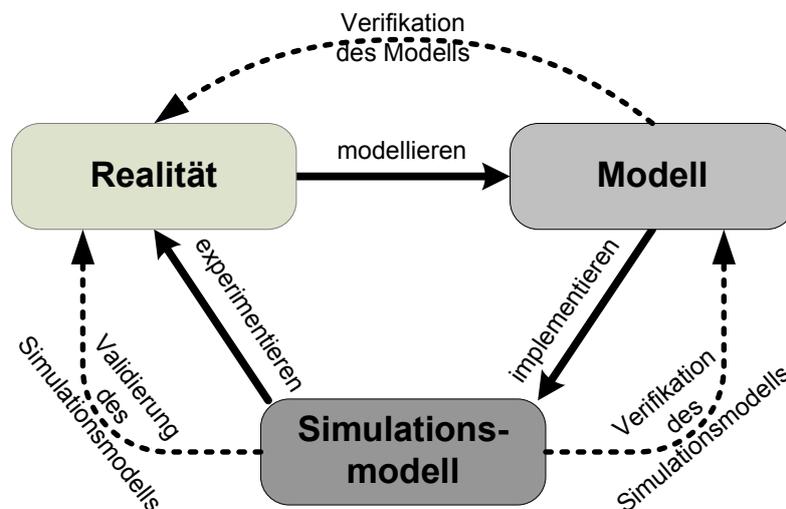
¹⁹Vgl. Koza (1992), Koza (1994)

²⁰Vgl. Bender und Schiller (2009, Folie 27)

²¹Vgl. Kramer und Neculau (1996, S. 14)

²²Vgl. Bossel (2004, S. 15)

²³Vgl. Bender und Schiller (2009, Folie 10), Brychta und Müller (2004, S. 9), Liebl (1995, S. 196)

Abbildung 6: Beziehung zwischen Realität, Modell und Simulation²⁵

Prozesse, die zu schnell (Kernreaktion) oder zu langsam (Kontinentaldrift) ablaufen, zu gross (Galaxien) oder zu klein (Atome) sind oder sich noch in Entwicklung befinden (Fusion). Bei weiteren Gruppen ist das Experimentieren mit realen Systemen schlichtweg zu gefährlich, zu teuer oder hätte zu starken Einfluss auf das System (Börse, Verkehr).

Wie bereits erwähnt, sind die Anwendungsgebiete von Simulationen vielfältig. Ein häufiges Problem in Fertigungsanlagen stellt beispielsweise die Feinterminierung von anstehenden Aufträgen dar. Simulationen werden dazu genutzt, die Reihenfolge der Abarbeitung zu optimieren. Hierbei sollen einerseits Standzeiten von Maschinen minimiert werden und andererseits soll die termingerechte Erledigung aller Aufträge gewährleistet werden. Als weiteres Beispiel seien an dieser Stelle Telekommunikationsnetze genannt, welche ein weiteres, grosses Anwendungsgebiet darstellen. Diese sind geradezu für Simulationen prädestiniert, da sie einerseits sehr gut modelliert werden können andererseits Versuche an realen Modellen oft mit immensen Kosten verbunden sind.²⁴

Trotz aller Vorteile, welche heutige Simulationstechniken mit sich bringen, muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass Simulationen auch Grenzen gesetzt sind. Das Ergebnis einer Simulation kann beispielsweise nur so gut sein, wie das verwendete Modell. Bildet dies das untersuchte System nur unzureichend ab, so werden auch die erzielten Resultate nur unzureichend sein. Als Folge daraus muss besonderes Augenmerk auf den Prozess der Modellbildung und der damit verbundenen Kontrolle der Modelle gelegt werden.

²⁴Vgl. Liebl (1995, S. 4)

²⁵Vgl. Bender und Schiller (2009, Folie 30, eigene Darstellung)

Abbildung 6 zeigt den Zyklus von einer gedachten oder existierenden Realität (dem betrachteten System) über ein (konzeptionelles) Modell bis hin zu einem Simulationsmodell, mit dem Experimente durchgeführt werden können. In den nächsten beiden Abschnitten werden die einzelnen Schritte, welche im Rahmen der Modellbildung, der Simulation und der Auswertung der Ergebnisse durchgeführt werden, erörtert.

2.3.2 Modellbildung

Die Aufgabe der Modellbildung besteht darin, basierend auf der Problemstellung und der damit verbundenen Fragestellungen, ein als abstraktes oder konzeptionelles Modell bezeichnetes Abbild des untersuchten Systems zu erstellen. In diesem Modell sind alle Elemente eines untersuchten Phänomens enthalten, welche für dessen adäquate Beschreibung von Bedeutung sind.²⁶ Die einzelnen Arbeitsschritte bei der Erstellung eines solchen Modells sind im Detail:

- **Modellzweck**

Eine der wichtigsten Tätigkeiten im Rahmen der Modellbildung stellt die Spezifizierung des Modellzwecks dar, weshalb diese zu Beginn der Modellentwicklung durchgeführt werden sollte. Er kann aus jenen Fragen abgeleitet werden, welche zur Beantwortung einer gegebenen Problemstellung benötigt werden. Je detaillierter die Beschreibung des Modellzwecks ist, desto präziser kann das auch Modell formuliert werden. Komplexe und kaum überschaubare Modelle sind häufig die Folge eines unscharf beschriebenen Modellzwecks.²⁷

Anhand des Modellzwecks können Modelle verschieden klassifiziert werden. Prognosemodelle werden etwa für Vorhersagen über das Verhalten von bereits existierenden Systemen unter bisher nicht untersuchten Bedingungen herangezogen. Mit Hilfe von Erklärungsmodellen wird versucht, die Verhaltensweisen von Systemen nachzuvollziehen und so deren Funktionsweise zu ergründen. Unter Verwendung von Optimierungsmodellen können Massnahmen gesucht werden, um Systeme zu optimieren.²⁸ Entscheidungsmodelle werden zur Bestimmung von optimalen Handlungsmöglichkeiten verwendet.²⁹

- **Systemanalyse**

Um den Modellzweck zu erfüllen, müssen manche Komponenten des betrachteten Systems berücksichtigt werden, andere hingegen haben keinen Einfluss auf die Untersuchungsziele und können deshalb vernachlässigt werden. Auch hierbei ist wieder zu beachten, dass das System nur so genau wie nötig abgebildet werden sollte. Um die Entscheidungen bezüg-

²⁶Vgl. Sonar (2001, S. 21)

²⁷Vgl. Bossel (2004, S. 51f)

²⁸Vgl. Bender und Schiller (2009, Folie 35)

²⁹Vgl. Wöhe (2002, S. 40)

lich der Relevanz der einzelnen Systemkomponenten treffen zu können, ist es notwendig, die Struktur des Systems zu analysieren. Der erste Schritt ist hierbei die Identifikation der Systemgrenzen. Basierend auf diesen lassen sich die Ein- und Ausgänge des Systems bestimmen. Zur Reduktion der Komplexität ist es in der Regel zweckmässig, die Systemgrenze so zu wählen, dass das System möglichst autonom arbeitet, d.h. möglichst wenige Ein- und Ausgänge vorhanden sind. Die Komponenten innerhalb der Systemgrenzen werden in Subsysteme und Elemente aufgeteilt, wobei erstere wiederum bis zu ihren elementaren Strukturen aufgelöst werden. Anschliessend werden die Interaktionen zwischen den Elementen des Systems untereinander und mit ihrer Umwelt bestimmt. Im letzten Schritt der Systemanalyse werden schliesslich die möglichen Zustände und das Verhalten des Systems untersucht.³⁰

- Konzeptionelles Modell

Der nächste Schritt besteht in der Erstellung des konzeptionellen Modells, welches die Erkenntnisse aus der Systemanalyse abbildet. Die Beschreibung des betrachteten Systems kann dabei auf verschiedene Arten erfolgen. Eine häufig genutzte Einteilung unterscheidet in Verhaltens-, Struktur- und Mischmodelle.³¹

Verhaltensmodelle verfolgen die Beschreibung des Systemverhaltens nach aussen hin. D.h., es sollen basierend auf Inputs in das System dessen Outputs generiert werden. Hierfür sind in der Regel Aufzeichnungen über das Systemverhalten notwendig, weitere Kenntnisse über das System und seine Komponenten sind jedoch an dieser Stelle nicht erforderlich. Das Modell kann dabei beliebig aufgebaut sein, es müssen keine weiteren Übereinstimmungen mit dem Originalsystem vorhanden sein. Da keine Kenntnisse über die Abläufe innerhalb des Systems notwendig sind, werden solche Modelle auch als *Black Box* Modelle bezeichnet. Die Nachteile von Verhaltensmodellen bestehen darin, dass insbesondere bei komplexen Modellen sehr viele Beobachtungen notwendig sind und dass Prognosen über zukünftiges Verhalten nur möglich sind, sofern Beobachtungen bei vergleichbaren Bedingungen durchgeführt wurden.

Das Gegenstück zu Verhaltensmodellen stellen Strukturmodelle dar, welche auch als *Glass Box* Modelle bezeichnet werden. Diese bilden ein System mitsamt jenen Komponenten ab, welche zur Erfüllung des Modellzwecks notwendig sind. Somit erlauben Strukturmodelle auch ohne umfangreiche Systembeobachtungen Vorhersagen über das Systemverhalten. Die Voraussetzung zur Erstellung solcher Modelle ist ein sehr hohes Verständnis des betrachteten Systems, dessen Komponenten und deren Wirkungsbeziehungen.

Als Kompromisslösung zwischen Verhaltens- und Strukturmodellen werden Mischformen verwendet. Ist die Funktionsweise einer Komponente bekannt, so wird diese üblicherweise als Strukturmodell implementiert, andernfalls als Verhaltensmodell.³²

³⁰Vgl. Bender und Schiller (2009, Folie 69ff)

³¹Vgl. Bender und Schiller (2009, Folie 51f)

³²Vgl. Bossel (2004, S. 52f)

- **Logisches Modell**
Als Zwischenstufe zwischen einem konzeptionellen Modell und einem Simulationsmodell wird häufig ein logisches Modell erstellt. Dieses bildet die Daten und Informationen des konzeptionellen Modells beispielsweise durch mathematische Gleichungen oder Flussdiagramme wie etwa Petri-Netze ab.³³
- **Verifikation**
Als abschliessender Schritt wird die Modellverifikation durchgeführt, wobei unter Verifikation dabei das Untersuchen der Richtigkeit eines Transformationsschrittes verstanden wird.³⁴ Im Kontext der Modellbildung soll dadurch sichergestellt werden, dass das erstellte Modell das reale System hinsichtlich der Erfüllung des Modellzwecks korrekt und fehlerfrei abbildet. Dabei wird auch Augenmerk auf die Abbildungstreue und den Detaillierungsgrad gelegt. Ein zu detailliertes Modell stellt zwar keinen Fehler im üblichen Sinne dar, führt jedoch zu einem Mehraufwand und erhöhter Komplexität bei den nachfolgenden Schritten der Simulation und Ergebnisauswertung.³⁵

2.3.3 Simulation

Die Simulation befasst sich mit der Erstellung eines Simulationsmodells, mit der Durchführung von Experimenten und mit der Auswertung der Ergebnisse.

- **Simulationsmodell**
Der erste Schritt besteht in der Implementierung des konzeptionellen bzw. logischen Modells in ein ablauffähiges Simulationsmodell, mit dem Experimente durchgeführt werden können. Da heute der überwiegende Teil an Simulationen mit Rechnern durchgeführt wird, spricht man im Zusammenhang mit Simulationsmodellen auch oft von Computermodellen.³⁶
- **Verifikation**
Auch für das Simulationsmodell muss wiederum sichergestellt werden, dass es sein zugrundeliegendes konzeptionelles Modell richtig und mit ausreichender Genauigkeit abbildet.
- **Validierung**
Die Aufgabe eines Simulationsmodells besteht darin, Antworten mit sinnvoller Genauigkeit auf die sich aus der Aufgabenstellung ergebenden Fragen zu liefern. Unter Validieren versteht man das Überprüfen, ob das Simulationsmodell das ihm zugrundeliegende System

³³Vgl. Liebl (1995, S. 200), Sonar (2001, S. 22)

³⁴Vgl. Liebl (1995, S. 200)

³⁵Vgl. Bender und Schiller (2009, Folie 94)

³⁶Vgl. Kramer und Neculau (1996, S. 45), Liebl (1995, S. 200, S. 220)

im Hinblick auf die Untersuchungsziele fehlerfrei und mit hinreichender Genauigkeit beschreibt. Die Frage nach der Validität eines Modells kann in der Regel nicht pauschal mit ja oder nein beantwortet werden, vielmehr ist die Abbildung der Realität durch ein Modell besser oder schlechter. Durch einen höheren Detailgrad kann die Validität eines Modells häufig gesteigert werden, was jedoch in der Regel mit zusätzlichem Aufwand und damit auch mit höheren Kosten verbunden ist. Dies hat zur Folge, dass in der Regel keine maximale sondern nur eine ausreichende Genauigkeit des Modells angestrebt wird.³⁷ In diesem Zusammenhang wird auch von der Gültigkeit für den Modellzweck gesprochen. Ist diese gegeben, so liefert das Modell im Hinblick auf den Modellzweck ausreichend genaue Ergebnisse.³⁸

Nach erfolgreicher Implementierung, Verifikation und Validierung des Modells können mit dem Simulationsmodell Experimente durchgeführt werden. Abhängig vom Modellzweck können dabei unterschiedliche Analysen durchgeführt werden.

Um etwa das Ausmass der Reaktionen eines Systems auf Variationen von Umweltparametern oder Systemabläufen zu untersuchen, werden Sensitivitätsanalysen verwendet. Das primäre Ziel dieser gemeinhin auch als *what-if-Analysen* bezeichneten Untersuchungen besteht darin, zu bestimmen, auf welche Faktoren das Modell empfindlich reagiert. Grundsätzlich sollten Faktoren mit hoher Sensitivität sehr detailliert im Modell abgebildet werden, für insensitive Faktoren ist hingegen eine grobe Implementierung in der Regel ausreichend.³⁹

Neben den Inputparametern kann natürlich auch die interne Struktur des Simulationsmodells verändert werden. Handelt es sich beispielsweise um eine Festigkeitsanalyse an einem mechanischen Bauteil, so kann dessen Querschnitt entsprechend angepasst werden, um die auftretenden Spannungen aufnehmen zu können.

Ein weiteres Beispiel, bei dem sowohl veränderte Inputfaktoren als auch veränderte Modellstrukturen untersucht werden, stellen Verkehrssimulationen dar. Hierbei kann einerseits der vorhandene Verkehr verändert und andererseits die Modellstruktur angepasst werden, die in diesem Falle dem vorhandenen Verkehrsnetz entspricht.

Sollen Prozesse optimiert werden, kommen üblicherweise Methoden der Versuchsplanung zum Einsatz. Anhand dieser werden spezielle Versuchspläne erstellt, welche die Parameter für die Simulationsexperimente festlegen. Basierend auf den Ergebnissen können Rückschlüsse darauf gezogen werden, mit welchen Inputparametern optimale Outputs zu erwarten sind.⁴⁰

³⁷Vgl. Liebl (1995, S. 203f)

³⁸Vgl. Bossel (2004, S. 61)

³⁹Vgl. Liebl (1995, S. 214ff)

⁴⁰Vgl. Abschnitt 2.5

2.4 Agenten-Systeme

2.4.1 Agenten

Der Begriff *Agent* leitet sich vom lateinischen Wort *Agens* ab, welches mit *das Tuende* übersetzt werden kann. Er wird heute vielfältig und häufig mit sich unterscheidenden Definitionen verwendet. Als Ursache hierfür lassen sich die verschiedenen Einsatz- und Forschungsgebiete identifizieren, welche sich von der Informatik bis hin zu Wirtschafts- und Sozialwissenschaften erstrecken. Abhängig von diesen ergeben sich verschiedene Anforderungen an die Agenten.⁴¹ Diese werden im Rahmen dieses Abschnitts in verschiedenen Kontexten beschrieben, wobei sich die Ausführungen jedoch auf übliche, häufig benötigte Eigenschaften beschränken.

Die Agenten eines Agenten-Systems verfügen über verschiedene Eigenschaften und müssen eine Reihe von Aufgaben erfüllen. Innerhalb gewisser Grenzen sind sie in der Lage, ihre Umwelt wahrzunehmen und innerhalb dieser autonom zu agieren.⁴² Dies bedingt wiederum, dass Agenten sowohl untereinander als auch mit anderen Partnern wie Menschen oder Datenbanksystemen kommunizieren können. Das primäre Ziel stellt dabei jedoch nicht der reine Informationsaustausch dar, vielmehr sollen durch Verhandlungen und Kooperationen gemeinsame Ziele erreicht werden.⁴³ Aus Performancegründen ebenso wie zur Beherrschung der Komplexität beschränkt sich die Wahrnehmung der Umgebung und die Interaktion mit dieser im Allgemeinen auf jene Bereiche, welche Einfluss auf die Agenten selbst und das System haben, in welchem sie sich bewegen. Dies steht im Einklang mit Ansätzen aus der Modellbildung. Diese besagen, dass das Ziel einer Modellierung darin bestehen muss, ein betrachtetes System soweit wie möglich zu vereinfachen, ohne dabei jedoch die relevanten Einflussgrößen zu verlieren.⁴⁴ Die Kenntnisse von Agenten über die Vorgänge innerhalb eines Systems werden häufig auf deren näheres Umfeld beschränkt. Dies lässt sich anhand von realen Projekten erklären. Projektmitarbeiter kennen in der Regel ihr Aufgabengebiet, ihr direktes Arbeitsumfeld und allenfalls die Vorgänge innerhalb ihrer Abteilung. Sie verfügen jedoch lediglich über beschränkte Informationen über die Ereignisse in anderen Abteilungen und darüber, welche Fortschritte in anderen Projektbereichen gemacht werden.

Als weiteres Merkmal verfügen die Agenten über Ressourcen, welche im Regelfall nicht unbeschränkt zur Verfügung stehen. Zu diesen zählen typischerweise Güter wie Zeit, Geld und verschiedenste Arten von Rohstoffen.⁴⁵ Übliche Beispiele solcher Ressourcen innerhalb von Ver-

⁴¹Vgl. Klügl (2000, S. 9)

⁴²Vgl. Ferber (2001, S. 29)

⁴³Vgl. Eymann (2003, S. 21)

⁴⁴Vgl. Abschnitt 2.3

⁴⁵Vgl. Ferber (2001, S. 29)

kehrsimulation sind etwa die verfügbaren Verkehrsmittel der Agenten wie Fahrräder und PKWs. Zusätzlich können Agenten über verschiedene spezifische Fähigkeiten verfügen, welche sie innerhalb eines Systems als Ressourcen anbieten können.⁴⁶ Dabei könnte es sich beispielsweise um Fach- und Sprachkenntnisse oder den Besitz einer Lenkererlaubnis handeln.

Jeder Agent verfügt über eigene Ziele, welche er, entsprechend seiner persönlichen Präferenzen und Strategien, durch selbstständiges und zielgerichtetes Handeln zu erreichen versucht.⁴⁷ Seine Aktionen sind nicht nur Reaktionen auf äussere Geschehnisse, sondern werden auch durch eigene Initiativen getrieben.⁴⁸ Die möglichen Ausprägungen der Ziele sind vielfältig, häufig soll ein optimaler Zustand erreicht werden, wobei die Definition von *optimal* in diesem Kontext verschiedenartig erfolgen kann. Typische Beispiele sind die Minimierung des eigenen Ressourcenverbrauchs oder die Maximierung der frei verfügbaren Zeit.

2.4.2 Multi-Agenten-Systeme

Systeme, in denen Agenten ohne äussere Einflüsse gezielt miteinander interagieren, werden als Multi-Agenten-Systeme bezeichnet. Die Agenten reagieren dabei in hohem Masse adaptiv, flexibel und intelligent. Als Folge daraus sind solche Systeme beispielsweise in der Lage, Aufgaben zu verteilen und komplexe Probleme zu lösen, welche von einzelnen Agenten nur mit hohem Aufwand oder durch steuernde Eingriffe von Menschen bewältigt werden können.⁴⁹

Beispiele für derartige Systeme trifft man sehr häufig in der Realität an. Man denke etwa an Transportnetzwerke oder an grosse Projekte, deren Teilaufgaben von vielen einzelnen Teams realisiert werden. Gleichermassen verhält es sich bei Verkehrssystemen, innerhalb derer jeder Verkehrsteilnehmer autonom handelt und versucht, die für sich bestmögliche Route zu wählen.⁵⁰ Ebenso wie bei Computernetzen besteht das Ziel eines Verkehrsnetzes darin, den vorhandenen Verkehr effizient zu verteilen und dadurch die Netzlast gering zu halten. Weitere Anwendungsfälle ergeben sich in Fertigung- und Produktionsprozessen, etwa zur optimalen Auslastung von Maschinen oder zur Minimierung von Materialverschnitt.⁵¹

Es gibt eine Reihe von Auslösern, wodurch der Einsatz von Multi-Agenten-Systemen sinnvoll wird. Dazu zählen beispielsweise Aufgaben, bei denen die Informationen verteilt vorliegen und Aktionen an verschiedenen Positionen ausgeführt werden müssen. Ebenso bietet sich deren Anwendung dort an, wo kein zentrales System eingesetzt werden kann oder soll, etwa aus

⁴⁶Vgl. Ferber (2001, S. 29)

⁴⁷Vgl. Eymann (2003, S. 22)

⁴⁸Vgl. Klügl (2000, S. 11)

⁴⁹Vgl. Eymann (2003, S. 9)

⁵⁰Vgl. Ferber (2001, S. 26)

⁵¹Vgl. Eymann (2003, S. 81)

Gründen der Ausfallsicherheit. Aufgrund ihrer hohen Flexibilität und Adaptierbarkeit ist deren Anwendung zudem bei sich häufig verändernden Systemen sinnvoll.⁵²

Üblicherweise verfügt jeder Agent nur über unvollständige Informationen über den Zustand des Gesamtsystems und ist auch nicht in der Lage, das Gesamtproblem alleine zu lösen. Die Lösung ergibt sich durch das Zusammenführen der Lösungen vieler, kleiner Probleme, welche jeweils von Agenten gelöst werden können (Bottom-Up-Ansatz). Anstelle von gemeinsamen, übergeordneten Zielen verfolgen die Agenten jeweils ihre eigenen Ziele. Typischerweise handelt es sich dabei um ihre eigenen Nutzenfunktionen - jeder Agent ist sich selbst der nächste.⁵³

Einher mit der beschränkten Sicht eines Agenten geht in der Regel auch dessen dezentrale Datenhaltung.⁵⁴ Könnte ein Agent auf einen zentralen Wissenspool zugreifen, so würde er dadurch auch über globales Wissen verfügen.

Die Interaktionen zwischen den Agenten ergeben sich aus der Tatsache, dass die Ressourcen innerhalb des Systems beschränkt sind und den Agenten nicht all jene Ressourcen frei zur Verfügung stehen, welche sie zur Erreichung ihrer Ziele benötigen. In einfachen Fällen besitzt ein Agent jene Ressourcen, die sein Gegenüber benötigt und umgekehrt. Hier führen simple Tauschgeschäfte zum Erfolg. In komplexeren Fällen hingegen wollen Agenten zeitgleich auf dieselbe, limitierte Ressource zugreifen, wodurch es zu einem Konflikt kommt. Als Beispiel sei an dieser Stelle eine Parklücke genannt.⁵⁵

2.4.3 Multi-Agenten-Simulation

Multi-Agenten-Simulationen, welche auch als agentenbasierte oder agentenorientierte Simulationen bezeichnet werden, stellen eine Untergruppe von Simulationen dar. Dabei enthält das Simulationsmodell die Agenten und die Umwelt, in der sie agieren, sowie die von den Agenten ausgeführten Aktionen und Interaktionen.⁵⁶ Im Rahmen der Simulation wird das zeitliche Verhalten der Agenten innerhalb ihrer Umwelt untersucht, wodurch deren Zustand zu jedem Zeitpunkt bekannt ist. Dies beinhaltet neben deren Position im System auch Informationen über deren Wissensstände und Interaktionen mit anderen Agenten. Als logische Konsequenz daraus ist auch der Zustand des Gesamtsystems zu jedem Zeitpunkt bekannt.

Verglichen mit traditionellen Simulationsmethoden wie etwa kontinuierlichen Simulationen,

⁵²Vgl. Ferber (2001, S. 28, 79)

⁵³Vgl. Ferber (2001, S. 49ff), Klügl (2000, S. 14)

⁵⁴Vgl. Klügl (2000, S. 13)

⁵⁵Vgl. Ferber (2001, S. 85ff)

⁵⁶Vgl. Raney (2005, S. 2)

Diskrete-Ereignis-Simulationen, zellulären Automaten oder der Spieltheorie weisen agentenbasierte Simulationen einen geringeren Abstraktionsgrad auf und sind realitätsnäher. Sie werden in verschiedensten Bereichen angewendet, etwa in der Biologie, der Bioinformatik, sowie in den Wirtschafts-, Sozial- und Ingenieurwissenschaften.⁵⁷

Analysen des Systems können auf vielfältige Art und Weise geschehen. So ist es beispielsweise möglich, ausgewählte Agenten und deren Aktionen zu beobachten. Ebenso kann gezielt das Verhalten spezifischer Agenten manipuliert werden, um die daraus resultierenden Auswirkungen auf das System zu beobachten. Eine weitere Möglichkeit besteht etwa darin, aufgestellte Hypothesen durch gezielte Experimente mit verschiedenen Inputparametern und Auswerten der Resultate zu überprüfen.⁵⁸

2.5 Statistische Versuchsplanung

Um mit möglichst wenigen Versuchen die Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Zielgrößen eines Systems untersuchen und bestimmen zu können, werden häufig Methoden der statistischen Versuchsplanung⁵⁹ genutzt. Ihr Ziel besteht darin, mit möglichst geringem Aufwand Antworten auf Fragen wie beispielsweise

- Welche Faktoren beeinflussen das Verhalten eines Systems maßgeblich?
- Wie reagiert ein System auf Veränderungen seiner Inputfaktoren?
- Mit welchen Inputfaktoren lassen sich die kleinsten bzw. grössten Outputs erzielen?

zu finden. Dies betrifft etwa Systeme, deren Verhalten nicht bekannt ist und die nicht mit einer Formel oder einem einfachen Modell beschrieben werden können. Die Kenntnis der maßgeblichen Inputgrößen eines Systems und deren Einflüsse auf dieses sind die Grundvoraussetzung, um dieses gezielt beeinflussen zu können.

Die Vorgehensweise der statistischen Versuchsplanung beinhaltet unter anderem die Festlegung der Untersuchungsziele, die Auswahl der Zielgrößen, die Erstellung von Versuchsplänen, die Interpretation der Versuchsergebnisse und resultierend daraus die Ableitung von Massnahmen.⁶⁰

Durch die Nutzung von speziellen Versuchsplänen und die gezielte Variation von Parametern kann der Versuchsaufwand im Vergleich zu anderen Verfahren, wie etwa der Variation von nur einem Parameter je Versuch, deutlich reduziert werden, ohne dabei an Aussagekraft zu verlieren.

⁵⁷Vgl. Raffel (2005, S. 16)

⁵⁸Vgl. Ferber (2001, S. 58)

⁵⁹Oftmals wird in diesem Zusammenhang auch die englische Bezeichnung *Design of Experiments* verwendet.

⁶⁰Vgl. Kleppmann (2008, S. 14ff)

Eine detaillierte Beschreibung der Methoden und Vorgehensweisen liefern etwa Klein (2007) und Kleppmann (2008).⁶¹

Je nach Aufgabenstellung stehen verschiedene Arten von Versuchsplänen zur Verfügung. Ist beispielsweise nur wenig über eine Problemstellung bekannt, so werden üblicherweise in einem ersten Schritt sogenannte Screening-Versuchspläne verwendet. Diese dienen dazu, festzustellen, welche vorhandenen Inputfaktoren relevant sind und in welche Richtung sie die Zielgrößen beeinflussen.⁶² Basierend auf den so identifizierten Haupteinflussfaktoren kann anschliessend ein vollständig faktorieller Versuchsplan erstellt werden, der alle möglichen Faktorkombinationen abdeckt.

3 Verkehrsplanung

3.1 Aufgabe

Die Verkehrsplanung stellt ein Teilgebiet des Verkehrswesens dar. Ihre Aufgabe besteht darin, Verkehrssysteme optimal zu gestalten. Dabei gilt es, verschiedenen Aspekten wie Wirtschaftlichkeit, Leistungsfähigkeit und Sicherheit gerecht zu werden. Das Bestreben ist es, einen Zustand zu erreichen, in dem alle Anforderungen an das Verkehrssystem möglichst optimal erfüllt werden. Viele der zu berücksichtigenden Faktoren beeinflussen sich gegenseitig negativ, weshalb es in der Regel nicht möglich ist, allen Ansprüchen gleichzeitig und vollumfänglich gerecht zu werden. Ein sehr anschauliches Beispiel hierfür lässt sich anhand der Wirtschaftlichkeit aufzeigen. Werden mehr finanzielle Mittel in die Sicherheit und Zukunftstauglichkeit einer verkehrsplanerischen Lösung investiert, so leidet darunter zwangsläufig die gegenwärtige Wirtschaftlichkeit.

Unter dem Vorgang der Planung versteht man die Entwicklung von Massnahmen, die einen vorhandenen, häufig mit Mängeln behafteten, Zustand in einen neuen Zustand überführen, welcher dem angestrebten optimalen Zustand möglichst nahe kommt.⁶³ Der dabei durchlaufene Prozess umfasst im Wesentlichen drei Abschnitte. Zu Beginn muss der Zustand des betrachteten Verkehrssystems untersucht werden. Dabei müssen insbesondere aktuelle und mögliche zukünftige Mängel erkannt werden. Anschliessend müssen Massnahmen für deren Beseitigung entwickelt und anhand von Prognosen deren Auswirkungen abgeschätzt werden. Schlussendlich müssen basierend auf den durchgeführten Untersuchungen und Analysen Massnahmen ausge-

⁶¹Vgl. Ferber (2001), Klügl (2000)

⁶²Vgl. Kleppmann (2008, S. 121)

⁶³Vgl. Kirchhoff (2002, S. 32)

wählt und umgesetzt werden, um die derzeitigen und zukünftigen Mängel zu beseitigen bzw. zu verhindern.⁶⁴

3.2 Verkehrsmodelle

3.2.1 Einleitung

Es gibt eine Reihe verschiedener Methoden, um der Aufgabe der Verkehrsplanung, der optimalen Gestaltung von Verkehrssystemen, gerecht zu werden. Verkehrsmodelle bilden die Wirkungszusammenhänge zwischen Verkehrsangebot und -nachfrage ab und stellen üblicherweise einen zentralen Bestandteil der Verkehrsplanung dar. Durch die Simulation des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer innerhalb eines untersuchten Systems mit vorgegebenem Verkehrsangebot werden verschiedene Kenngrößen wie Reisezeiten, Auslastung des Verkehrsnetzes oder erzeugte Schadstoffe berechnet. Anhand dieser Daten können die Auswirkungen von planerischen Massnahmen untersucht und beurteilt werden. Einen Nachteil stellt die Komplexität solcher Modelle dar, weshalb sie in der Regel nur von Experten konzipiert und ausgewertet werden können.⁶⁵

Heute genutzte Verkehrsmodelle basieren auf unterschiedlichen Ansätzen und Vorgehensweisen. In den folgenden Abschnitten werden neben dem traditionell genutzten 4-Stufen-Modell auch die Ansätze der aktivitätenbasierten Nachfragegenerierung und der dynamischen Verkehrsumlegung beschrieben, welche die Grundlagen vieler aktueller Verkehrsmodelle bilden.

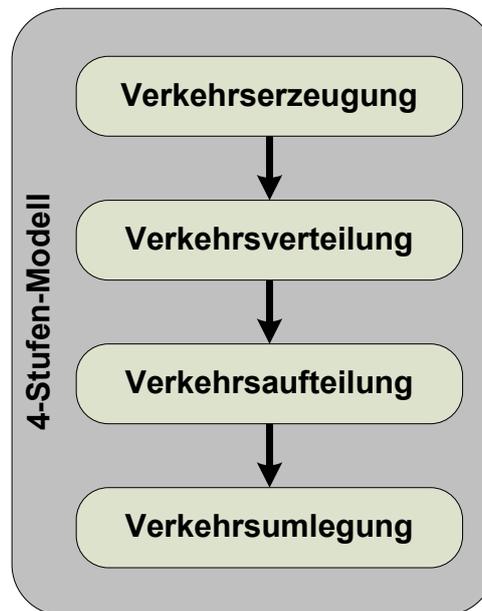
3.2.2 4-Stufen-Modell

Das 4-Stufen-Modell stellt die traditionelle Vorgehensweise bei der Erstellung eines Verkehrsmodells für die Verkehrsplanung dar. Das Verfahren besteht aus den vier sequenziell durchlaufenen Abschnitten der Verkehrserzeugung, -verteilung, -aufteilung und -umlegung. Ein weiteres Merkmal des Modells stellt die Beschränkung auf die Betrachtung von Verkehrsströmen innerhalb des Verkehrssystems dar. Die Ströme werden nicht auf Mikroebene bis hin zu den einzelnen Individuen aufgelöst, weshalb auch keine Rückschlüsse auf das Verhalten einzelner Personen gezogen werden können. Der sequentielle Ablauf des Modells führt einerseits zu verhältnismässig einfachen Modellen mit eindeutigen Lösungen, birgt jedoch als Folge der fehlenden Rückkopplungen

⁶⁴Vgl. Friedrich (2002, S. 99), Friedrich und Haupt (2002, S. 213)

⁶⁵Vgl. Friedrich und Haupt (2002, S. 213f)

Abbildung 7: 4-Stufen-Modell



eine Reihe von Nachteilen. Im Anschluss werden die einzelnen Stufen des Modells beschrieben sowie die daraus resultierenden Vorteile und Einschränkungen untersucht.

In Abbildung 7 werden die vier Prozessschritte und deren linearer Ablauf dargestellt. In weiterer Folge werden die Schritte im Detail erörtert.

- **Verkehrserzeugung**

In ersten Prozessschritt wird das Verkehrsaufkommen innerhalb der Verkehrszellen⁶⁶ des untersuchten Systems bestimmt. Die Daten werden basierend auf Strukturdaten und spezifischen Mobilitätskennzahlen für einen definierten Zeitraum, etwa zu Stosszeiten oder unter Berücksichtigung des gesamten Tagesverkehrs, ermittelt.⁶⁷

- **Verkehrsverteilung**

Der nächste Schritt stellt die Verteilung des zuvor bestimmten Verkehrsaufkommens zwischen den Verkehrsbezirken dar. Hierfür stehen verschiedene Modelle zur Verfügung, beispielsweise zufallsbasierte Verfahren oder Modelle, welche auf städteplanerischen Grundlagen beruhen. Die Letztgenannten ermöglichen es, die Infrastruktur des untersuchten Systems zu berücksichtigen. Ein Beispiel hierfür wäre etwa die Miteinbeziehung von Industriegebieten in die Verteilung, welche üblicherweise verstärkter Arbeiterverkehr aufweisen. Das Resultat dieses Abschnitts sind OD-Matrizen⁶⁸, welche Auskunft über die Verkehrsflüsse zwischen den einzelnen Knoten des Systems geben.

⁶⁶Vgl. Abschnitt 2.1.3

⁶⁷Vgl. Korda (2005, S. 246)

⁶⁸Vgl. Abschnitt 2.1.1

- **Verkehrsaufteilung**
Durch die Verkehrsaufteilung wird das ermittelte Verkehrsaufkommen auf die verfügbaren Verkehrsmittel verteilt. Hierbei können Parameter wie die zurückzulegende Entfernung oder die Qualität des öffentlichen Verkehrsnetzes berücksichtigt werden. Eine häufig genutzte Einteilung unterscheidet dabei die beiden Klassen Individualverkehr und öffentlicher Verkehr. Diese beruht darauf, dass die beiden Klassen unterschiedlich betrachtet und behandelt werden müssen. Bei öffentlichen Verkehrsmitteln sind beispielsweise die Routen und Abfahrtszeiten definiert, wohingegen diese beim Individualverkehr situationsbedingt angepasst werden können.
- **Verkehrsumlegung**
Die Verkehrsumlegung stellt den abschliessenden Prozessschritt dar. Ihre Aufgabe besteht darin, den Verkehrsablauf bei einem gegebenem Verkehrsangebot und einer gegebenen Verkehrsnachfrage auf ein bestehendes oder geplantes Verkehrsnetz (Strassen, U-Bahn, Radwege, usw.) umzulegen. Dabei werden Faktoren wie die Qualität, Ausbaustufe und voraussichtliche Belastung der einzelnen Wegabschnitte berücksichtigt.

Das 4-Stufen-Modell weist einige charakteristische Vor- und Nachteile auf. Im Gegensatz zu neueren Modellierungsansätzen, welche das Verkehrsaufkommen bis hin zu den einzelnen Individuen abbilden, werden nur Verkehrsströme betrachtet. Dies vereinfacht einerseits die Erstellung des Modells, bringt aber auch den Nachteil mit sich, dass keine Rückschlüsse über das Verhalten einzelner Personen gezogen werden können. Durch die statische Betrachtung der Verkehrsströme ist es nicht möglich, dynamische Phänomene wie beispielsweise Verkehrsspitzen zu Hauptverkehrszeiten zu untersuchen. Die vier Prozessschritte sind klar definiert, führen zu reproduzierbaren Ergebnissen und wurden vielfach beschrieben und implementiert. Diese Eigenschaften und der üblicherweise auch bei grossen Verkehrsnetzen verhältnismässig geringe Implementierungsaufwand führen dazu, dass 4-Stufen-Modelle oftmals für erste Betrachtungen von zu untersuchenden Gebieten genutzt werden. Die sequentielle Vorgehensweise bei der Modellierung verhindert, dass Erkenntnisse aus späteren Abschnitten bei vorangehenden Schritten berücksichtigt werden können. Ergibt sich etwa in der Umlegungsphase eine unerwartet lange Reisezeit für die Erreichung eines Ziels, kann sich dies auf dessen Attraktivität auswirken, was jedoch nicht mehr in der Verkehrsverteilung miteinbezogen werden kann.⁶⁹

Aus heutiger Sicht sind 4-Stufen-Modelle vielfach nicht mehr die optimale Wahl zur Lösung von Verkehrsplanungsproblemen, da sie den aktuellen Anforderungen an Verkehrsmodelle häufig nicht vollständig gerecht werden können. In den anschliessenden Abschnitten werden verschiedene Ansätze beschrieben, welche den geforderten Ansprüchen genügen.

⁶⁹Vgl. Cetin (2005, S. 3), Raney (2005, S. 6f)

3.2.3 Aktivitätenbasierte Nachfragegenerierung⁷⁰

Die aktivitätenbasierte Nachfragegenerierung beruht auf der Erstellung und Verwendung einer synthetischen Population, welche auf den demographischen Daten einer zu untersuchenden Region beruht. Ihr Ziel ist es, bei einer ausreichenden Anzahl künstlicher Personen die reale Population mit ausreichender Exaktheit abzubilden. Für jede dieser Personen wird basierend auf Inputdaten, wie etwa den Ergebnissen von Befragungen oder Volkszählungen, ein vollständiger Plan der täglichen Aktivitäten erstellt. Dieser beinhaltet unter anderem eine Auflistung aller geplanten Tätigkeiten und die Orte, an denen sie stattfinden sollen. Darüber hinaus sind Zusammenhänge zwischen den Aktivitäten sowie auch deren geplante Start- und Endzeiten enthalten. Im Anschluss an die Generierung der Population wird im letzten Schritt der Nachfragegenerierung für alle Personen bestimmt, mit welchen Verkehrsmitteln sie die Wege von und zu deren Aktivitäten zurücklegen.⁷¹

Die Vorgehensweise der ADG ist mit den bereits im Rahmen des 4-Stufen-Modells beschriebenen Schritten der Verkehrserzeugung, -verteilung und -aufteilung vergleichbar. Ebenso wie bei diesem werden die einzelnen Abschnitte auch hier sequentiell durchlaufen, was folglich ebenfalls die bereits zuvor dargelegten Nachteile mit sich bringt. Im Gegensatz zum 4-Stufen-Modell werden jedoch für jedes Individuum spezifische demographische Daten berücksichtigt. Dies ermöglicht detailliertere Aussagen auf Kosten eines erhöhten Aufwandes bei der Modellierung. Die erzeugte Verkehrsnachfrage ist im Gegensatz zur statischen Variante aus dem 4-Stufen-Modell nun dynamisch. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass das erzeugte Modell aufgrund der Tagespläne der Personen und der darin enthaltenen geplanten Start- und Endzeiten der Aktivitäten nun über eine zeitabhängige Komponente verfügt. Eine Implementierung der aktivitätenbasierten Nachfragegenerierung wird beispielsweise von Bowman et al.⁷² beschrieben.

3.2.4 Dynamische Verkehrsumlegung⁷³

3.2.4.1 Allgemeines

Die Aufgabe eines Umlegeverfahrens besteht darin, unter Berücksichtigung von gewissen Regeln den Verkehrsablauf basierend auf einem gegebenen Verkehrsangebot und einer gegebenen

⁷⁰Nachfolgend wird auch die Abkürzung der englischen Bezeichnung *activity-based demand generation* (ADG) verwendet.

⁷¹Vgl. Raney (2005, S. 7)

⁷²Vgl. Bowman et al. (1999)

⁷³Nachfolgend wird auch die Abkürzung der englischen Bezeichnung *dynamic traffic assignment* (DTA) verwendet.

Verkehrsnachfrage nachzubilden. Als Ergebnis lassen sich beispielsweise die Belastungen einzelner Streckenabschnitte und resultierend daraus die realen Fahrzeiten von einem Start- zu einem Zielpunkt bestimmen.⁷⁴

Die existierenden Verfahren lassen sich dabei anhand einer Reihe von Kriterien klassifizieren. Die gebräuchlichste Unterscheidung teilt die Verfahren in statische und dynamische Verfahren. Als Kriterien können dabei das Vorhandensein einer Zeitachse und Annahmen über den Systemzustand (dynamisch, wiederkehrend, usw.) verwendet werden.⁷⁵ Verfahren zur statischen Verkehrsumlegung, wie sie etwa im 4-Stufen-Modell angewendet werden, bringen verschiedene Einschränkungen mit sich, welche dynamische Verfahren aufgrund ihrer zeitabhängigen Komponenten nicht aufweisen.

3.2.4.2 Statische Verfahren

Aufgrund ihrer geringen Komplexität wurden bisher in der Regel statische Verfahren zur Verkehrsumlegung verwendet. Ihre Aufgabe besteht darin, aus einer gegebenen Verkehrsnachfrage die daraus resultierende Belastung der einzelnen Elemente eines Verkehrsnetzes zu bestimmen. Die Verfahren basieren grösstenteils auf Regeln zur Routenwahl und Funktionen, welche unter Berücksichtigung der Verkehrsbelastung die Fahrzeiten auf Streckenabschnitten berechnen.⁷⁶ Eine Grundannahme dieser Verfahren besteht darin, dass sich das Verkehrsangebot und die Verkehrsnachfrage über den betrachteten Zeitraum hinweg statisch verhalten, d.h. konstant sind. Als weitere Annahme wird davon ausgegangen, dass sich der Systemzustand innerhalb dieses Zeitraums nicht verändert, sich jedoch periodisch wiederholt. Basierend darauf wird unterstellt, dass die Verkehrsteilnehmer die Entscheidungen im Zusammenhang mit ihrer Routenwahl unter gleichbleibenden Voraussetzungen treffen.

Das Ziel einer statischen Umlegung besteht darin, einen Zustand zu bestimmen, der dem langfristigen Mittel des zu erwartenden Netzzustandes entspricht. Die Ergebnisse einer solchen Umlegung können beispielsweise dazu genutzt werden, um die Auswirkungen von langfristigen Änderungsmassnahmen an der Infrastruktur eines Verkehrssystems und die daraus resultierenden Nachfrageänderungen zu untersuchen.

⁷⁴Vgl. Friedrich und Vortisch (2005, S. 129)

⁷⁵Vgl. Friedrich und Vortisch (2005, S. 129f)

⁷⁶Vgl. Friedrich et al. (2000, S. 100f)

3.2.4.3 Dynamische Verfahren

Das Ziel dynamischer Umlegungsverfahren besteht darin, die Routen aller Individuen einer Population so zu wählen, dass ein angestrebtes Gleichgewicht erreicht wird. Üblicherweise handelt es sich dabei um ein sogenanntes Nash Gleichgewicht.⁷⁷

Neben den bereits aus den statischen Verfahren bekannten Komponenten beinhalten dynamische Umlegungsverfahren zusätzliche Regeln, die festlegen, wie sich die Verkehrsteilnehmer innerhalb des Verkehrsnetzes bewegen. Das Verkehrsangebot und die Verkehrsnachfrage sind zeitabhängig, d.h., sie können als Funktion der Zeit beschrieben werden. Resultierend daraus liefern diese Verfahren zeitabhängige Verkehrsbelastungen und Fahrzeiten. Nach Friedrich und Vortisch⁷⁸ lassen sich dynamische Umlegungsverfahren in die folgenden drei Typen aufteilen:

- **Dynamische Umlegung mit wiederkehrendem Systemzustand**
Hierbei verändert sich der Systemzustand zwar innerhalb des berücksichtigten Zeitraums, wiederholt sich jedoch in einem grösseren Zeitrahmen periodisch, z.B. täglich oder wöchentlich. Dieser Umstand wird von den Verkehrsteilnehmern bei ihrer Routenplanung berücksichtigt. Im Gegensatz zu statischen Analysen erlaubt diese Variante der dynamischen Analyse auch die Untersuchung des Verkehrsverhaltens in Abhängigkeit der Tageszeit.
- **Dynamische Umlegung mit veränderlichem Systemzustand**
Bei dieser Variante verändern sich das Verkehrsangebot und die -nachfrage dynamisch im Laufe der Zeit und beeinflussen sich dadurch auch gegenseitig. Die Verkehrsteilnehmer agieren dabei entsprechend ihrem Wissen, den Erfahrungen aus der Vergangenheit und dem aktuellen Systemzustand.
- **Spontanumlegung**
Kann ein Verkehrsmodell auch zufällige Ereignisse abbilden, so ist es sinnvoll, die Individuen innerhalb eines Systems darauf reagieren zu lassen. Entsteht etwa infolge eines Unfalls ein Stau, kann man die Verkehrsteilnehmer durch Verkehrsleitsysteme darüber informieren. Diese sind dadurch in der Lage zu entscheiden, ob die neue Situation eine Anpassung ihrer Fahrtstrategie erfordert. Anhand solcher Umlegeverfahren kann beispielsweise das Systemverhalten in Abhängigkeit des Informationsstandes der Verkehrsteilnehmer untersucht werden.

Neben vollständig dynamischen Implementierungen der Verkehrsumlegung gibt es auch Ansätze, welche dynamisches Verhalten durch eine Folge von statischen Umlegungen annähern. Diese unterliegen jedoch einer Reihe von Einschränkungen, wie beispielsweise Problemen

⁷⁷Vgl. Raney (2005, S. 8), siehe Abschnitt 6.5.2.1

⁷⁸Vgl. Friedrich und Vortisch (2005, S. 130)

bei der Modellierung von Verkehrsengepässen, die zu Stausituationen führen. Voll dynamische Verfahren verfügen über eine implementierte Zeitachse und sind dadurch in der Lage, solche Aufgabenstellungen lösen zu können.

Gegenüber statischen Umlegungsverfahren weisen dynamische Verfahren eine Reihe von Vorteilen auf. Sie erlauben es beispielsweise, den zeitlichen Verlauf der Belastung eines Verkehrssystems zu untersuchen, während statische Verfahren nur Mittelwerte bestimmen können. Eine weitere Möglichkeit stellt die variable Wahl der Abfahrtszeit auf der Zeitachse dar, wodurch sich ein zusätzlicher Freiheitsgrad bei der optimalen Routenwahl der Individuen ergibt.

Es existiert eine Reihe verschiedener Ansätze und Implementierungen dynamischer Umlegungsverfahren. Als Beispiele seien an dieser Stelle die Arbeiten von Friedrich⁷⁹ und de Romph⁸⁰ genannt. Peeta⁸¹ gibt einen umfangreichen Überblick über frühere, aktuelle und denkbare, zukünftige Ansätze. Die Ursachen für die grosse Anzahl an Lösungsvarianten sind vielfältig. So gibt es beispielsweise noch kein allgemeingültiges Verfahren, welches auf die verschiedenen Problemstellungen, die mittels dynamischer Verkehrsumlegung gelöst werden sollen, angewendet werden kann.⁸² Grundsätzlich lassen sich jedoch in den meisten Ansätzen Teilmodelle für die Routenwahl und den Verkehrsfluss erkennen. Dabei beschreibt das Routenwahlmodell die Verteilung der Verkehrsnachfrage auf die vorhandenen Verbindungen und das Verkehrsflussmodell die Fortbewegung der Verkehrsteilnehmer auf diesen Routen.

3.2.5 Kombination von ADG und DTA

3.2.5.1 Allgemeines

Eine weitere Gruppe von heute oftmals genutzten Verkehrsmodellen basiert auf einer Kombination von aktivitätenbasierter Nachfragegenerierung und dynamischer Verkehrsumlegung, wodurch sie alle Schritte des 4-Stufen-Modells abbilden. Diese Modelle lassen sich in zwei Gruppen unterteilen, welche sich speziell durch die Art der Kopplung der beiden Verfahren unterscheiden.

⁷⁹Vgl. Friedrich et al. (2000)

⁸⁰Vgl. de Romph (1994)

⁸¹Vgl. Peeta und Ziliaskopoulos (2001)

⁸²Vgl. Peeta und Ziliaskopoulos (2001, S. 233)

3.2.5.2 Kopplung mittels OD-Matrizen

Eine einfache Variante für die Realisierung der Kopplung basiert auf der Nutzung von OD-Matrizen, welche als In- und Outputparameter für die einzelnen Arbeitsschritte verwendet werden. Konzeptbedingt werden hierfür im Gegensatz zu den statischen Matrizen aus dem 4-Stufen-Modell in der Regel dynamische Matrizen genutzt. Trotz der Berücksichtigung dynamischer Vorgänge innerhalb des Systems weist diese Variante eine Reihe von Nachteilen auf:⁸³

- Die Matrizen enthalten keinerlei Informationen über die Zuordnung der hinterlegten Fahrtabschnitte zu den einzelnen Individuen; die Aufschlüsselung der Verkehrsdaten auf diese geht somit verloren. Dies beinhaltet auch die dynamischen Entscheidungen der Individuen innerhalb der Simulation.
- Das Feedback des Systems basiert auf den gemittelten Werten seiner Individuen. Die Individuen eines implementierten ADG Verfahren nutzen dieses Feedback, um ihre Entscheidungen treffen. Dies hat zur Folge, dass sie ihre Entscheidungen nicht aufgrund ihrer eigenen Situation, sondern aufgrund des Mittelwertes von mehreren Individuen treffen.
- Die durch ADG bestimmte Nachfrage der Individuen basiert auf der Verkettung von Bewegungen zwischen den Terminen des jeweiligen Zeitplanes. Entstehen Verzögerungen während der Bewegungen, so kann dies Auswirkungen auf diesen Plan und damit die Nachfrage des Individuums haben, welche nicht berücksichtigt werden können.

3.2.5.3 Agentenbasierter Ansatz

Die erwähnten Mängel bei der Nutzung von OD-Matrizen können durch eine direkte Kopplung von ADG und DTA, d.h. ohne die Verwendung der Matrizen, eliminiert werden. Dadurch können die betrachteten Personen während des gesamten Prozesses als Individuen mit spezifischen Attributen und Tagesabläufen betrachtet werden, welche sich auch gegenseitig beeinflussen können. Ein System, welches diese Eigenschaften aufweist, kann auch als Multi-Agenten-System⁸⁴ bezeichnet werden, die Simulation eines solchen als Multi-Agenten-Simulation⁸⁵. Die Agenten innerhalb des Systems entsprechen dabei den Personen der untersuchten Region.

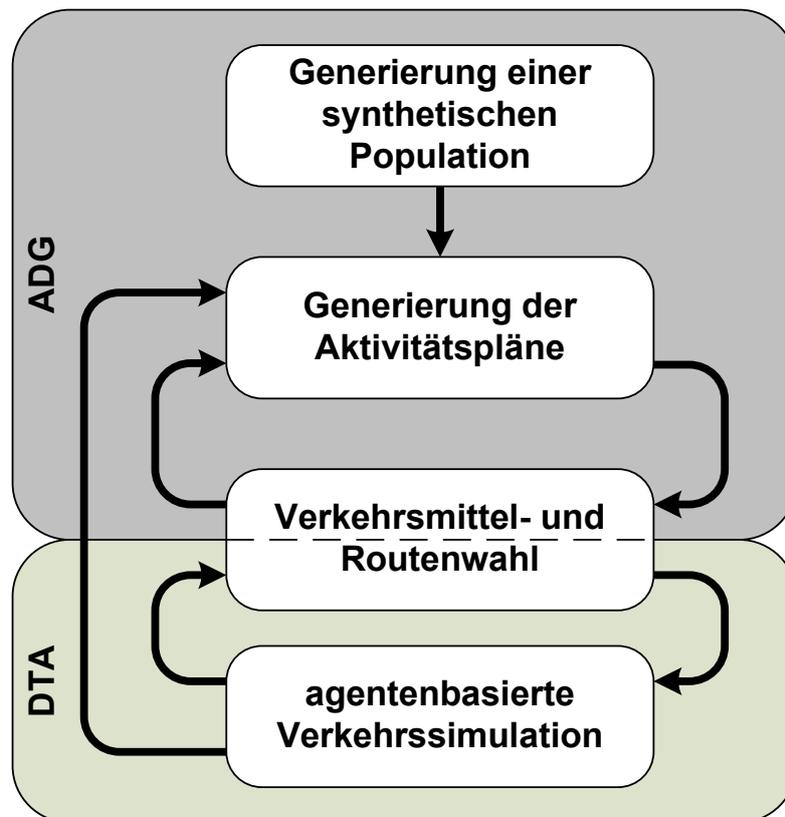
In Abbildung 8 werden beispielhaft die einzelnen Schritte einer agentenbasierten Kombination von ADG und DTA sowie die Kopplungen zwischen den einzelnen Abschnitten dargestellt. Die integrierten Rückkopplungen sollen dabei sicherstellen, dass die Agenten auf ihre aktuelle

⁸³Vgl. Raney (2005, S. 9)

⁸⁴Siehe Abschnitt 2.4.2

⁸⁵Siehe Abschnitt 2.4.3

Abbildung 8: agentenbasierte Kopplung von ADG und DTA



Situation reagieren können. Steht ein Agent etwa im Stau und verpasst deshalb eine seiner geplanten Aktivitäten, so kann er entsprechend darauf reagieren. Ein weiteres Merkmal, welches aus der individuellen Betrachtung der Agenten resultiert, ist die einfache Modellierbarkeit verschiedener Strategien für die Routenwahl. Hierbei können Faktoren wie die Ortskenntnis oder Verkehrsleitsysteme berücksichtigt werden.

Oft können die Berechnungen solcher Multi-Agenten-Systeme parallelisiert werden, was beispielsweise durch eine Unterteilung des modellierten Gebiets in Teilbereiche realisiert werden kann. Dadurch können auch grosse Modelle innerhalb kurzer Zeiträume berechnet werden. Als Beispiel sei an dieser Stelle die Anwendung eines agentenbasierten Modells der Verkehrsnachfrage auf die Schweiz genannt.⁸⁶

⁸⁶Vgl. Meister et al. (2008)

3.3 Simulationen in der Verkehrsplanung

3.3.1 Allgemeines

Heute genutzte Verkehrsmodelle weisen üblicherweise eine derart hohe Komplexität auf, dass sie mit analytischen, mathematischen Ansätzen nicht mehr beschrieben werden können. Diese Komplexität resultiert aus der beinahe beliebigen Anzahl an Faktoren, die ein Verkehrssystem beeinflussen. Typische Beispiele solcher Einflussfaktoren sind:

- **Tageszeit**
Üblicherweise variiert das Verkehrsaufkommen innerhalb eines Verkehrsnetzes im Laufe eines Tages. Typische Ursachen sind beispielsweise Verkehrsspitzen morgens und abends infolge des Arbeiterverkehrs.
- **Wochentag**
Steckenabschnitte, welche hauptsächlich von Pendlern genutzt werden, sind für gewöhnlich unter der Woche stärker frequentiert, Erholungsgebiete eher am Wochenende.
- **Strassensperren und Umleitungen**
Durch Baustellen, Unfälle und dergleichen kommt es häufig zu Strassensperren und Umleitungen. Dies führt einerseits zu Staus im Nahbereich und andererseits zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen auf den Umfahrungsstrecken.
- **Veranstaltungen**
Grossveranstaltungen wie etwa Konzerte oder Sportevents können bis zu einige Zehntausend Besucher aufweisen. Damit verbunden ist in der Regel ein enormer An- und Abreiseverkehr, welcher eine grosse Belastung für die umliegende Infrastruktur darstellt.

Einige dieser Faktoren treten periodisch auf. Dementsprechend kann darauf reagiert werden bzw. können entsprechende Gegenmassnahmen bereits im Vorfeld getroffen werden. Typische Beispiele für solche Massnahme sind etwa Verkehrsregelungen bei Veranstaltungen oder Informationen über bevorstehende Bauarbeiten und damit verbundene Umleitungen. Andere Einflussfaktoren sind hingegen nicht vorhersehbar und dementsprechend schwierig gestaltet sich auch deren Handling. Als sicherlich offensichtliche Ausprägungen seien an dieser Stelle Verkehrsunfälle genannt.

Um Verkehrsmodelle, welche solche Faktoren berücksichtigen und dementsprechend komplex aufgebaut sind, dennoch nutzen zu können, werden sie üblicherweise in auf Computern ausführbare Simulationsmodelle überführt. Dabei muss besonderes Augenmerk darauf gelegt werden, dass das implementierte Modell einerseits über den notwendigen Detaillierungsgrad verfügt und

andererseits korrekt implementiert wurde.⁸⁷

Allgemein werden anhand der Grösse des betrachteten Gebiets und den berücksichtigten Einflussfaktoren die drei Simulationstypen Mikro-, Meso- und Makrosimulationen unterschieden⁸⁸, welche auf verschiedenen Modellierungsansätzen beruhen und auch unterschiedliche Modellschwerpunkte aufweisen. Vor allem aufgrund der früher nur in begrenztem Masse verfügbaren Rechenleistung waren traditionell insbesondere die beiden letztgenannten Arten von Bedeutung.⁸⁹ Aufgrund der Möglichkeiten, welche sich aus den enormen Weiterentwicklungen auf dem Hardwaresektor ergeben, zeichnet sich heute ein Paradigmenwechsel hin zur vermehrten Nutzung von Mikrosimulationen ab.⁹⁰ Hierfür gibt es eine Reihe von Ursachen, etwa den verringerten Rechenaufwand und Speicherbedarf bei der Nutzung von grossen mehrdimensionalen Wahrscheinlichkeitsmatrizen oder das explizite Modellieren des Entscheidungsfindungsprozesses der einzelnen betrachteten Individuen.⁹¹ Submikrosimulationen stellen einen weiteren Simulationstyp dar, welcher sich derzeit noch in einer frühen Entwicklungsphase befindet und dementsprechend wenig verbreitet ist.

Die Wahl des Simulationstyps basiert in der Regel auf den Fragestellungen, welche mit Hilfe des Verkehrsmodells beantwortet werden sollen. So werden beispielsweise für die Untersuchung des dynamischen Verkehrsflusses andere Modelle verwendet als für die Beschreibung des Verhaltens einzelner Individuen. In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Simulationstypen erörtert. Aufgrund der weiten Verbreitung von mikroskopischen Simulationen werden ausserdem einige der dort verwendeten Modellierungsansätze erwähnt.

3.3.2 Makrosimulationen

Anhand makroskopischer Modelle werden Verkehrsabläufe innerhalb grosser Betrachtungsgebieten beschrieben und untersucht, wobei auch hohe Fahrzeugdichten unterstützt werden. Die Fahrzeuge innerhalb des betrachteten Systems werden dabei üblicherweise nicht individuell, sondern zu Verkehrsströmen zusammengefasst implementiert. Häufig werden Ansätze aus der Fluidodynamik oder Gaskinetik als Grundlage der Simulationsmodelle genutzt.⁹² Bei genauerer Betrachtung lassen sich leicht Analogien zwischen diesen Gebieten erkennen. So können etwa die Strassen als Strömungskanäle und die Geschwindigkeiten der Verkehrsströme als Strömungsgeschwindigkeiten betrachtet werden.

⁸⁷Siehe Abschnitt 2.3

⁸⁸Vgl. Zajicek (2001, S. 34f)

⁸⁹Vgl. Balmer et al. (2008, S. 2)

⁹⁰Vgl. Balmer et al. (2008, S. 3), Krajzewicz und Wagner (2004, S. 85)

⁹¹Vgl. Balmer et al. (2008, S. 3)

⁹²Vgl. Kemper (2006, S. 53ff)

3.3.3 Mesosimulationen

Mesosimulationen stellen ein Bindeglied zwischen Makro- und Mikrosimulationen dar. Die Modelle betrachten einen kleineren Bereich als jene von Makrosimulationen, im Gegenzug werden die Fahrzeuge wie bei Mikrosimulationen als individuelle Einheiten betrachtet, wenngleich diese in der Regel weniger detailliert implementiert werden. Solche Simulationsverfahren finden ihre Anwendung häufig im Bereich der Routenwahl oder der Verkehrslenkung.

3.3.4 Mikrosimulationen

Untersuchungen von örtlich sehr begrenzten Bereichen, wie etwa einzelnen Verkehrsknoten, werden üblicherweise mittels Mikrosimulationen durchgeführt, wobei auch Interaktionen zwischen einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten (FFE) berücksichtigt werden. Für gewöhnlich besteht ihr Ziel darin, physikalische Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern zu beschreiben und ein zeitliches und örtliches Abbild des realen Verkehrs zu schaffen. Einen massgeblichen Einflussfaktor auf die Qualität der Simulationsergebnisse stellen die Modelle dar, anhand derer die Interaktionen zwischen den FFE beschrieben werden.⁹³

Als eine weitere, in den Simulationen berücksichtigte Komponente kommt der Mensch als Lenker des Fahrzeugs hinzu. Die Route des Fahrzeugs kann beispielsweise auf dessen Ortskenntnissen beruhen. Der Fahrer könnte sich etwa ausschliesslich anhand von Verkehrsschildern orientieren oder ein Navigationsgerät nutzen. Ebenso könnte ein Einheimischer über Ortskenntnisse verfügen und somit auch Nebenstrassen und „Schleichwege“ kennen.

Um die Bewegung einzelner Fahrzeuge ausreichend detailliert beschreiben zu können, reicht es in der Regel nicht aus, eine Strasse als reine Verbindung von Verkehrsknotenpunkten zu modellieren. Vielmehr werden beispielsweise Informationen über die Anzahl der Fahrspuren oder die Formen von Haltestellen des öffentlichen Verkehrs benötigt. Sind Haltebuchten vorhanden, so kann der Verkehr während eines Haltevorganges eines Busses diesen problemlos überholen. Sind hingegen keine Buchten vorhanden, so bildet sich ein Stau hinter dem Bus oder dieser muss unter Miteinbeziehung der Gegenfahrbahn überholt werden.⁹⁴

Mikrosimulationsmodelle erlauben es, Situationen wie die Entstehung und Auflösung von Staus, Verkehrsregeln und Ampelanlagen zu simulieren. Dabei besteht üblicherweise ein direkter Zusammenhang zwischen der benötigten Rechenzeit und dem Detailgrad des verwendeten Modells. Je höher die Anzahl der berücksichtigten Parameter ist und je mehr Interaktionen zwischen

⁹³Vgl. Zajicek (2001, S. 35)

⁹⁴Vgl. Friedrich (2002, S. 5)

den Verkehrsteilnehmern implementiert werden, desto höher ist auch der daraus resultierende Berechnungsaufwand. Dank der enormen Steigerung an verfügbarer Rechenleistung in den letzten Jahren sind heute Modelle mit einer ebenfalls sehr hohen Komplexität simulierbar.

Unter dem Oberbegriff *Mikrosimulation* sind verschiedenste Simulationsansätze zusammengefasst. Abhängig vom jeweiligen Einsatzzweck verfügen sie jeweils über spezifische Vorteile.

- Zellulare Automaten (Cellular Automata Model, CA Model)

Das Nagel-Schreckenberg-Modell basiert auf der Idee der zellularen Automaten und wurde 1992 von Kai Nagel und Michael Schreckenberg eingeführt.⁹⁵ Es verwendet diskrete Zeitschritte (z.B. jeweils eine Sekunde) und einen in Zellen unterteilten Raum. Diese Zellen können jeweils nur einen der beiden Zustände *Zelle enthält Fahrzeug / Person* bzw. *Zelle enthält kein Fahrzeug / keine Person*. Häufig verwendete Zellenlängen betragen rund 7.5 m, was in einer Stausituation einer Wagenlänge plus dem Abstand zum Vordermann entspricht. Diese Modelle bieten verschiedene Erweiterungsmöglichkeiten, so dass beispielsweise auch mehrspurige Strassen mit Spurwechseln, Ampeln und verschiedene Verkehrsmittel implementiert werden können.

- Fahrzeug-Folge-Modell (Car Following Model)

Wiedemann hat 1974 ein Fahrzeug-Folge-Modell vorgestellt, anhand dessen Wechselwirkungen zwischen einzelnen Fahrzeugen beschrieben werden können.⁹⁶ Dabei unterscheidet er die beiden Fahrzustände *beeinflusstes (freies Verhalten)* und *unbeeinflusstes Fahren (Annäherungsbereich)*. Beim beeinflussten Fahren verringert der Fahrzeuglenker seine Geschwindigkeit, sobald der Abstand zum voran fahrenden Fahrzeug zu gering wird und / oder der Geschwindigkeitsunterschied zu hoch ist. Fährt ein Lenker unbeeinflusst, so versucht er, seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Fahrer innerhalb diesem Fahrbereich neigen dazu, den Abstand zum nächsten Fahrzeug variabel zu verändern, was sich entlang einer Kolonne fortsetzen und verstärken kann.⁹⁷ Ranjitkar et al. (2005) beschreiben verschiedene Implementierungen von Fahrzeug-Folge-Modellen und vergleichen deren Performance anhand eines Testfalls.

- Warteschlangen Modell (Queue Model)

Warteschlangenmodelle kommen häufig dann zur Anwendung, wenn es darum geht, die Rechenzeiten von Simulationen gering zu halten. Auch sie verwenden diskrete Zeitschritte sowie einen diskreten Raum. Um den Berechnungsaufwand gering zu halten, müssen beim Detailgrad der Modelle jedoch Einschränkungen wie eine fehlende Kreuzungsdynamik in Kauf genommen werden. Warteschlangenmodelle werden häufig für Anwendungsgebiete genutzt, bei denen eine realitätsgetreue Abbildung des dynamischen Verkehrsaufkommens

⁹⁵Vgl. Nagel und Schreckenberg (1992)

⁹⁶Vgl. Wiedemann (1974)

⁹⁷Vgl. Kemper (2006, S. 56ff)

gefordert wird, nicht aber detaillierte Aussagen über das Fahrverhalten von Individuen notwendig sind.⁹⁸

3.3.5 Submikrosimulationen

Submikrosimulationen beschreiben die Interaktionen innerhalb von **Fahrer-Fahrzeug-Kombinationen** noch detaillierter als andere Simulationstypen. Sie werden beispielsweise von Krajzewicz und Wagner⁹⁹ beschrieben und kommen hauptsächlich bei Problemstellungen zur Anwendung, welche sich mit den Interaktionen zwischen Fahrer und Fahrzeug befassen. Dies betrifft einerseits Systeme, mit denen der Fahrer interagiert, also etwa ein Fahrerassistenzsystem oder ein Navigationsgerät, andererseits aber auch Merkmale, die der Fahrer nicht bewusst wahrnimmt, etwa die Lesbarkeit der Bedienelemente. Eine Fragestellung könnte sich also beispielsweise damit befassen, wie sehr ein Fahrer durch die Bedienung der Fahrzeugsysteme beansprucht wird und inwiefern sich das Unfallrisiko dadurch verändert. Aufgrund der Komplexität von Submikrosimulationsmodellen werden derzeit üblicherweise nur die Beziehungen zwischen einem Fahrer und seinem Fahrzeug simuliert, nicht jedoch ein gesamtes Verkehrssystem mit all seinen Teilnehmern.

4 Wissensmodelle

4.1 Allgemeines

Das Verhalten von Personen innerhalb eines Verkehrssystems hängt massgeblich von deren Kenntnis über die Infrastruktur und den aktuellen Zustand des Systems ab. Die Quellen, welche Auskunft über den derzeitigen Systemzustand geben, sind dabei vielfältig. Als typische Beispiele seien an dieser Stelle Erfahrungswerte einer Person, Verkehrsleitsysteme und Staumeldungen aus den Medien genannt.

Anhand von Wissensmodellen wird versucht, die Kenntnisse von Personen über das Verkehrssystem, in welchem sie sich bewegen, nachzubilden. Basierend auf der Menge an Wissen, über das diese Personen verfügen, können sie in verschiedene Wissensstufen eingeteilt werden. Die Auswirkungen unterschiedlicher Wissensstände der Individuen auf das lokale und globale Verkehrsgeschehen zählen dabei zu den Kernfragen der vorliegenden Arbeit. In diesem

⁹⁸Vgl. Balmer et al. (2008, S. 8)

⁹⁹Vgl. Krajzewicz und Wagner (2004, S. 88)

Zusammenhang repräsentieren die Wissensstände die Kenntnisse der Individuen über das Verkehrssystem als solches und dessen Zustand. Dies beinhaltet sowohl das Verkehrsnetz als auch die Auslastung der einzelnen Streckenabschnitte.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Wissensmodelle geschaffen, welche auf sogenannten Bewegungsräumen basieren. Ein solcher beschreibt jenen Teil eines Verkehrssystems, den eine Person kennt und in dem sie somit agieren kann. Üblicherweise enthält ein solcher Bewegungsraum eine Reihe von Streckenstücken und Verkehrsknotenpunkten. Als Erweiterung können aber auch Lokalitäten berücksichtigt werden. Damit liesse sich beispielsweise festlegen, welche Geschäfte eine Person innerhalb ihres Bewegungsraumes kennt und somit nützen kann.

Die verschiedenen Wissensstufen der Personen werden durch mehrere Faktoren beschrieben. Zu diesen Einflüssen zählen einerseits die Reduzierung der Bewegungen auf vordefinierte Räume und andererseits die Art der Routenplanung. Als weiterer Einflussfaktor wird die Möglichkeit herangezogen, den Personen Zugriff auf die aktuellen Belastungsdaten des Verkehrsnetzes zu geben. Dies ermöglicht es ihnen beispielsweise, stark belastete Streckenabschnitte bewusst zu umfahren. Diese Wissensstufen reichen von der totalen Unwissenheit, d.h., einer vollkommen zufälligen Routenwahl im gesamten Verkehrsnetz, bis hin zum vollkommenen Wissen, bei dem ein Verkehrsteilnehmer jeweils die optimale Route wählt.

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Varianten beschrieben, anhand derer Routen geplant und Bewegungsräume generiert werden können. Diese Methoden dienen in weiterer Folge als Grundlage für die Erstellung der Wissensmodelle und den verschiedenen Wissensstufen. In einem weiteren Schritt werden diese Modelle in die Verkehrssimulationsumgebung MATSim implementiert, welche in Abschnitt 5.1 im Detail beschrieben wird. Nach ersten Versuchen mit den implementierten Modellen werden basierend auf den erzielten Ergebnissen jene Methoden selektiert, die zutreffendsten Resultate liefern. Abschliessend werden für die ausgewählten Modelle Parameter bestimmt, deren Einfluss auf ein Verkehrssystem durch die Auswertungen verschiedener Simulationsläufe untersucht wird.

4.2 Streckenkenntnis

Grundsätzlich kann zwischen der Kenntnis des vollständigen Strassennetzes und einem eingeschränkten Netz unterschieden werden. Soll die Kenntnis eingeschränkt werden, kann dies basierend auf unterschiedlichsten Ansätzen geschehen. Jenes Gebiet, innerhalb dem sich eine Person bewegen kann, wird als dessen Bewegungsraum bezeichnet. In dieser Thesis wurden zwei Ansätze erarbeitet und in MATSim implementiert. Abbildung ?? zeigt ein Beispiel eines Verkehrsnetzes mit einer darin eingezeichneten günstigsten Route. Anhand dieses Beispiels

werden die Funktionsweisen der beiden Auswahlverfahren illustriert.

Das erste Verfahren wählt all jene Knoten des Verkehrsnetzes aus, die auf Routen liegen, welche nicht teurer als ein vorgegebener Wert sind. Dieser Wert errechnet sich aus den Kosten für die günstigste Route multipliziert mit einem zulässigen Überschreitungsfaktor. Die so generierten bekannten Bereiche des Verkehrsnetzes können auf vielfältige Art und Weise beeinflusst werden. Abhängig vom Ansatz für die Berechnung der Kosten einzelner Streckenabschnitte können Parameter wie die Länge der Strecke, die typische Verkehrsbelastung oder die zulässige Höchstgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Abbildung ?? zeigt ein Beispiel eines auf diese Weise generierten Bewegungsraumes.

Dem zweiten Verfahren liegt eine vordefinierte Route zugrunde, welche mittels eines beliebigen Routenplaners erstellt werden kann. Das Auswahlverfahren selektiert anschliessend alle Verkehrsknoten, welche innerhalb eines vorgegebenen Radius zu den Knotenpunkten dieser Route befinden. Es ist überdies möglich, diesen Abstand abhängig von der Position auf der Route zu variieren. Somit kann beispielsweise abgebildet werden, dass eine Person die Umgebung um ihre Wohnung besser kennt als das Umfeld irgendwo mitten auf dem Arbeitsweg. Ein Beispiel eines auf diese Art erzeugten Bewegungsraumes wird in Abbildung ?? dargestellt. Die grau schattierten Kreise deuten dabei jenen Bereich an, innerhalb dem sich ein Knotenpunkt befinden muss, um der Person bekannt zu sein.

Als leicht zu implementierende Erweiterung könnten die beschriebenen Auswahlverfahren auch dahingehend erweitert werden, dass nur bestimmte Streckentypen zulässig sind. Verfügt beispielsweise das Fahrzeug einer Person über keine Autobahnvignette, so können die entsprechenden Streckenstücke bereits bei der Generierung des Wissens einer Person ignoriert werden. Ebenso könnten bestimmte Streckenstücke vernachlässigt werden, indem deren Kosten gezielt beeinflusst werden. Auf diese Weise könnte etwa das Verhalten eines ortskundigen Verkehrsteilnehmers simuliert werden. Dieser meidet bestimmte Streckenabschnitte, da er aus Erfahrung weiss, dass diese traditionell häufig überlastet sind.

4.3 Routenwahl

Um die zuvor beschriebenen Streckenkenntnisse auch bei der Routenwahl berücksichtigen zu können, wurden bestehende MATSim Routenplaner erweitert und eine Reihe neuer Planer implementiert. Die dabei verfolgten Ansätze lauten wie folgt:

- Random Router

Der Random Router wählt an jedem Kreuzungspunkt vollkommen zufällig das nächste

Streckenstück aus. Dies beinhaltet auch die Möglichkeit, am aktuellen Verkehrsknotenpunkt zu wenden und direkt zum vorangegangenen Knoten zurück zu kehren. Der Router besitzt kein Gedächtnis, so dass auch sehr lange Routen mit mehrfachen Schleifen entstehen können.

- **Tabu Router**

Hierbei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Random Routers, die nun über ein begrenztes Gedächtnis verfügt. Der Router kennt den vorangegangenen Knotenpunkt und wählt Streckenabschnitte die zu diesem zurückführen nur dann aus, wenn keine anderen Alternativen verfügbar sind.

- **Compass Router**

Dieser Router wählt an einem Knotenpunkt jeweils jenes Streckenstück aus, dessen Richtung am nächsten zum gewünschten Zielpunkt hin zeigt. Abhängig von Verkehrsnetz und dem Start- und Zielknoten einer Route kann nicht garantiert werden, dass eine Route gefunden wird.

- **Random Compass Router**

Bei dieser Variante wird ein Compass Router um eine zufällige Komponente ergänzt, um so Auswege aus Endlosschleifen zu finden, welche sich beim Compass Router ergeben können. Dabei wird an jedem Kreuzungspunkt das nächste Streckenstück mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit das nächste Streckenstück zufällig gewählt und nicht basierend darauf, welches dem gewünschten Ziel am nächsten ist.

- **Least Cost Router**

MATSim verfügt bereits über verschiedene Least Cost Router, welche die günstigsten Routen zwischen zwei Punkten finden. Als Beispiel für einen hierzu genutzten Algorithmus sei an dieser Stelle jener von Dijkstra¹⁰⁰ genannt. Für die Routensuche werden die Kosten für das Befahren der einzelnen Streckenstücke benötigt, welche von eigenständigen Modulen berechnet werden. Da diese Module alle von der Kenntnis des gesamten Verkehrsnetzes ausgehen, wurden zusätzliche Module implementiert, welche nur Routen innerhalb des Bewegungsraumes der jeweiligen Person erlauben.

4.4 Auswahl der Wissensmodelle

Erste Versuche mit den zuvor beschriebenen Routenplanern in Modellen eines realen Verkehrsnetzes zeigen, dass diese, mit Ausnahme der Least Cost Router, keine mit realen Messungen vergleichbaren Ergebnisse liefern. Typischerweise werden selbst Routen, die nur wenige Kilometer voneinander entfernte liegende Orte verbinden, derart lange, dass sie nicht innerhalb eines Tages abgefahren werden können. Ferner hat dies eine deutliche Erhöhung der Belastung der

¹⁰⁰Vgl. Heinrich und Grass (2006, S. 251ff)

gesamten Verkehrsinfrastruktur zur Folge, weshalb der Fokus der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit auf Simulationen mit Least Cost Router gelegt wird. Die übrigen Routenplaner werden in einer gesonderten Versuchsreihe untersucht, wobei die Grösse der Bewegungsräume variiert wird.

In Verkehrssimulationen, welche mit MATSim durchgeführt werden, verfügen die Verkehrsteilnehmer standardmässig über vollkommenes Wissen. Dies bedeutet, dass sie das gesamte Verkehrsnetz kennen und dank der iterativen Struktur der Simulation auch die Belastung des Netzes kennen. Durch die Nutzung der Wissensmodelle und der darin enthaltenen Bewegungsräume wird dieses vollkommene Wissen eingeschränkt. Als variable Parameter für die durchgeführte Versuchsreihe werden einerseits die Grösse der Bewegungsräume der Verkehrsteilnehmer und andererseits die Zeitpunkte, zu denen Routenwahlentscheidungen getroffen werden, herangezogen. Die erste Möglichkeit stellt dabei die einmalige Routenplanung jeweils zu Tagesbeginn dar. Die beiden anderen Varianten basieren auf einer dynamischen Routenplanung während des Tages. Einerseits kann die Route jeweils zu Beginn der Fahrt von einer Aktivität zur nächsten neu geplant werden und andererseits kann eine Person an jedem Knotenpunkt eine neue Routenwahl treffen.

Wird eine Routenwahl während des Tages durchgeführt, so werden die zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Belastungen des Verkehrsnetzes für die Berechnung der Kosten eines Wegstückes herangezogen. Dies hat zur Folge, dass überlastete Abschnitte höhere Fahrtkosten mit sich bringen und daher die Wahrscheinlichkeit steigt, dass diese nicht auf der gewählten Route liegen. Dadurch sind die Verkehrsteilnehmer in der Lage, ihre Routen adaptiv an den Zustand des Verkehrssystems anzupassen. Die Routenplaner verfügen für die Berechnung der günstigsten Route über vollkommenes Wissen über das Verkehrsnetz innerhalb des Bewegungsraumes derjenigen Person, für die eine Route berechnet wird. Dies liesse sich in der Realität beispielsweise durch ein Verkehrsleitsystem erreichen, welches den Zustand des Verkehrssystems kennt und diesen den Navigationsgeräten der Verkehrsteilnehmer laufend mitteilt. Eine denkbare Erweiterung wäre es an dieser Stelle, die Informationen über den Systemzustand mit einem zufälligen Fehler zu versehen, welcher mit zunehmender Entfernung zur aktuellen Position einer Person immer grösser werden kann. Diese würde den Umstand berücksichtigen, dass eine Person das Verkehrsaufkommen in ihrer unmittelbaren Umgebung kennt, über die Belastungen weiter entfernter Streckenabschnitte jedoch nur Vermutungen treffen kann. Ebenso könnten Prognosemodelle implementiert werden, welche die Belastung eines Streckenabschnittes zum Zeitpunkt abschätzen, zu welchem die Person diesen erreichen würde.

5 Implementierung

5.1 MATSim

5.1.1 Allgemeines

Das Open Source Forschungsprojekt MATSim-T¹⁰¹ ist ein Softwarepaket um Multi-Agenten-Mikrosimulationen von Verkehrssystemen durchzuführen, welches aktuell von Arbeitsgruppen der ETH Zürich und der TU Berlin weiterentwickelt wird. Das Paket ist aus einer Vielzahl an Modulen zusammengesetzt, welche sowohl als komplettes Framework als auch einzeln genutzt werden können. Entwickler können so beispielsweise einzelne Module ersetzen und verschiedene Modellansätze vergleichen. Eine umfassende Beschreibung des Pakets und seiner Möglichkeiten findet sich in den Arbeiten von Balmer (2007) und Balmer et al. (2008, S. 5). Abbildung 12 gibt einen Überblick über das gesamte Framework, die einzelnen Module und deren Zusammenwirken.

Der Kern des Frameworks besteht aus den beiden Teilen der initialen individuellen Nachfrage-Modellierung und der iterativen Nachfrage-Optimierung.¹⁰³ Dabei werden im Rahmen der Modellierung jene Bereiche der Tagespläne der Agenten modelliert, welche in der nachfolgenden Optimierung nicht verändert werden. Die Grundlage für die Nachfragemodellierung bilden unterschiedliche Quellen, beispielsweise Umfragen und soziodemographische Daten der untersuchten Region. MATSim ist in der Lage, verschiedene Inputdaten, etwa bezüglich deren Qualität und Detailgrad, zu verarbeiten und zu kombinieren.¹⁰⁴ Ciari et al. (2007) und Meister et al. (2008) beschreiben die Modellierung der initialen Nachfrage anhand eines Anwendungsfalls. Das Ergebnis der Nachfrage-Modellierung ist eine synthetische Population der zu untersuchenden Region, welche aus Agenten mit individuellen Tagesplänen besteht. Diese Pläne stellen den Ausgangszustand für die anschließende Nachfrage-Optimierung dar.

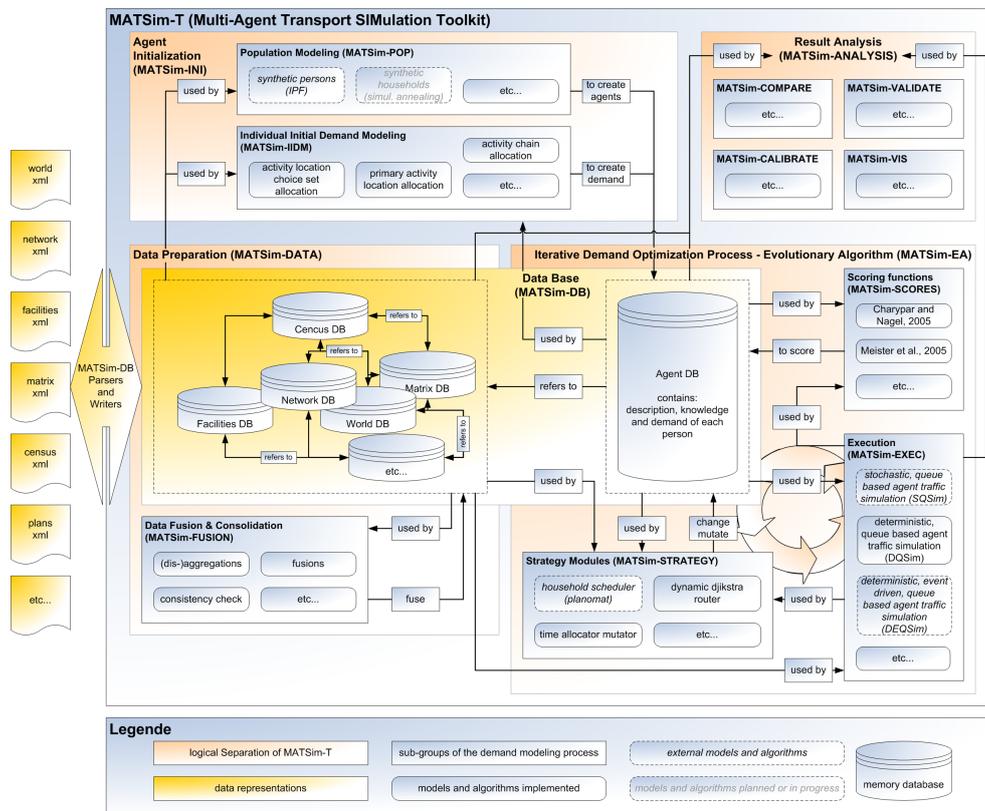
In MATSim wird ein vollständig agentenbasierter Ansatz verfolgt, d.h., jeder Agent der erstellten und genutzten Population stellt einen statistischen Repräsentanten eines Einwohners der modellierten Region dar. Das bedeutet im Besonderen, dass die simulierten Agenten durchgängig individuell behandelt werden und somit beispielsweise auch deren Nachfrage jeweils individuell modelliert und optimiert wird.

¹⁰¹Multi-Agent Transport Simulation Toolkit (<http://www.matsim.org>), in dieser Arbeit auch synonym als MATSim bezeichnet

¹⁰²Quelle: <http://www.matsim.org/node/15> (eigene Darstellung), Stand: Januar 2009

¹⁰³Vgl. Balmer et al. (2008, S. 5)

¹⁰⁴Vgl. Balmer et al. (2008, S. 21f)

Abbildung 12: Überblick über MATSim-T¹⁰²

Der verwendete Modellansatz enthält dabei drei Hauptbestandteile:¹⁰⁵

- Jeder Agent hat einen Aktivitätsplan, welcher seine geplanten Tätigkeiten innerhalb einer betrachteten Zeitspanne enthält. Ein üblicherweise gewählter Wert für diese Zeitspanne ist ein Tag. Ein Plan enthält dabei unter anderem Informationen über die einzelnen vorgesehenen Aktivitäten, deren Reihenfolge und die Art und Weise, wie sich die Person von einer Aktivität zur nächsten bewegt.
- Die Pläne aller Agenten werden gleichzeitig innerhalb eines Modells ihrer Umwelt simuliert.
- Die Agenten sind in gewisser Weise lernfähig. Sie verfügen über verschiedene Aktivitätspläne und deren Bewertungen, welche aus vorangegangenen Iterationen der Verkehrssimulation stammen. Anhand der Bewertungen sind sie in der Lage, schlechte Pläne zu verwerfen und gute Pläne weiter zu verfolgen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass ein Plan nicht grundsätzlich gut oder schlecht sein kann, vielmehr hängt dies vom Verhalten der restlichen Agenten ab. Wählen diese etwa plötzlich alle jene Route, welche ein Agent als gut eingestuft hat, so wird sich diese Einstufung mit hoher Wahrscheinlichkeit ins Gegenteil wandeln.

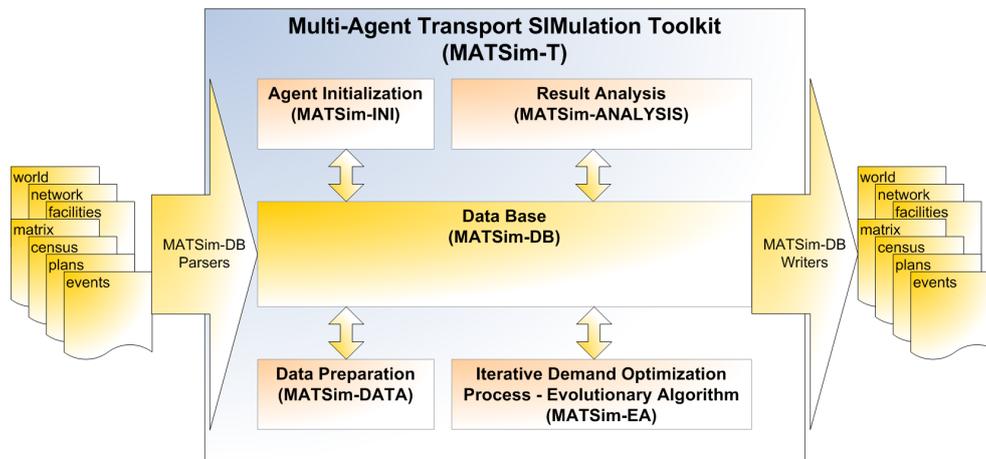
¹⁰⁵Vgl. Balmer (2007, S. 25), Meister et al. (2008, S. 2f)

Abbildung 13: Darstellung einer synthetischen Person im XML Format

```
<person id="0815" sex="m" age="26" income="32000">
  <knowledge>
    ...
  </knowledge>
  <plan>
    <act type="home" link="12" start_time="00:00" dur="06:30" end_time="06:30" />
    <leg mode="car" dept_time="06:30" trav_time="0:45" arr_time="07:15">
      <route>1442 1623 3553 1321</route>
    </leg>
    <act type="work" link="4521" start_time="07:15" dur="09:00" end_time="16:15" />
    <leg mode="car" dept_time="16:15" trav_time="0:35" arr_time="16:50">
      <route>4313 3213 4211</route>
    </leg>
    <act type="home" link="12" start_time="16:50" dur="07:10" end_time="24:00" />
  </plan>
</person>
```

Abbildung 13 zeigt die Umsetzung des beschriebenen Modellierungsansatzes anhand der Darstellung eines synthetisch erzeugten Agenten. Ein auf diese Weise generierter Agent hat persönliche Daten wie eine eindeutige Identifikationsnummer, Alter und Geschlecht. Ausserdem verfügt jeder Agent über Wissen (*knowledge*), welches verschiedenartige Daten enthalten kann. Diese Daten reichen von den Öffnungszeiten derjenigen Orte, die er besuchen will, bis hin zu persönlichen Präferenzen bei der Routenwahl. Als letzter Punkt verfügt jeder Agent über einen oder mehrere Aktivitätspläne. Grundsätzlich ist es vorteilhaft, wenn ein Agent mehrere Pläne verwaltet und sie miteinander vergleichen kann. Während eines Simulationslaufes befinden sich alle Agenten (und damit alle Pläne) im Arbeitsspeicher. Als Kompromiss zwischen Stabilität und Speicherbedarf werden deshalb üblicherweise maximal drei bis sechs Pläne je Agent gespeichert. Wird ein neuer, zusätzlicher Plan generiert und damit die maximal zulässige Anzahl überschritten, wird im Gegenzug ein bestehender verworfen, wobei es sich dabei typischerweise um jenen mit der geringsten Punktezah handelt.

Der eigentliche Aktivitätsplan im vorliegenden Beispiel zeigt, dass die Person sich um 06:30 auf den Weg zur Arbeit macht und dort um 07:15 ankommt. Die gewählte Route führt dabei über die Nodes (Knoten) 1442, 1623, 3553 und 1321. Nach neun Stunden am Arbeitsplatz macht sie sich um 16:15 wieder auf den Heimweg, wo sie schliesslich um 16:50 ankommt.

Abbildung 14: Überblick über die MATSim Module¹⁰⁷

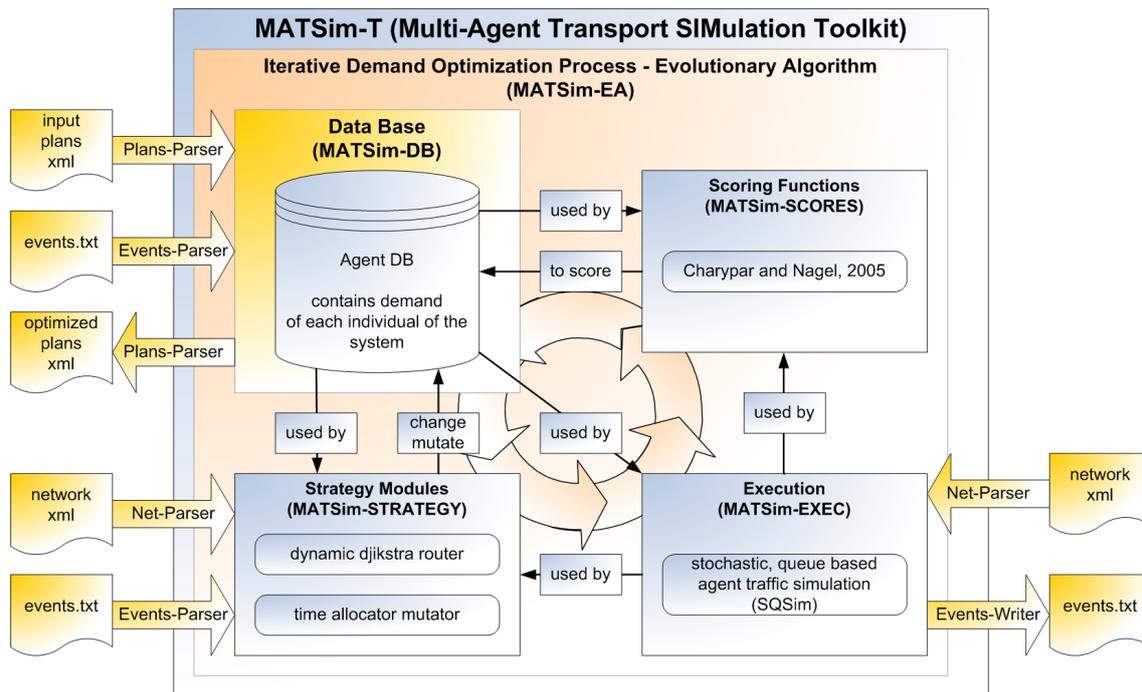
5.1.2 Überblick über die MATSim Module

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Kernmodule des MATSim Frameworks, welche in Abbildung 14 schematisch dargestellt werden.¹⁰⁶ Der auf einer iterativen Vorgehensweise beruhende Optimierungsprozess innerhalb von MATSim-EA wird detailliert in Abschnitt 5.1.3 beschrieben.

- Das MATSim-DATA Modul ist zuständig für das Prüfen und Zusammenführen der verschiedenen Inputdaten.
- Für die Generierung der Agenten und deren Eigenschaften ist das Modul MATSim-INIT verantwortlich. Im Rahmen der Erstellung der Agenten kann diesen auch spezifisches Wissen mitgegeben werden, etwa welche Routen sie bevorzugt wählen sollen. Das Ergebnis ist eine initiale Population, mit welcher die iterative Optimierung gestartet wird.
- MATSim-EA enthält die Kernalgorithmen von MATSim. In einem iterativen Prozess werden die Pläne der Agenten optimiert. Eine ausführlichere Beschreibung der Abläufe und der daran beteiligten Komponenten folgt im nächsten Abschnitt.
- Die Datenbank MATSim-DB bildet den zentralen Knotenpunkt des Toolkits. Sie liefert die von den anderen Modulen benötigten Daten und übernimmt das Datenhandling zwischen Arbeitsspeicherung, In- und Outputdateien.
- MATSim-ANALYSIS führt Analysen der Berechnungsergebnisse durch und erstellt Vergleiche mit den Inputdaten des untersuchten Szenarien.

¹⁰⁶Vgl. Balmer (2007, S. 20ff)

¹⁰⁷Vgl. Balmer (2007, S. 19)

Abbildung 15: MATSim-EA im Detail¹⁰⁸

5.1.3 Simulationsstruktur von MATSim-EA

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Simulationsstruktur von MATSim-EA und beschreibt deren wichtigsten Komponenten. Entsprechend dem agentenbasierten Ansatz des Frameworks beruht MATSim-EA auf der Verwendung von individuellen Agenten. Abbildung 15 gibt einen anfänglichen Überblick über den ausgeführten Optimierungsprozess, die dazu verwendeten Komponenten und deren Zusammenspiel. Die Namen der In- und Outputdateien wurden stellvertretend gewählt und spiegeln die Aufgaben der Dateien wider. Im Anschluss an die Beschreibung wird der zeitliche Ablauf des Optimierungsprozesses beschrieben.

- In der Datei *network.xml* wird das Verkehrsnetz des untersuchten Szenarios beschrieben. Enthalten sind Knotenpunkte, welche durch sogenannte Links miteinander verbunden sind. Diese repräsentieren beispielsweise Strassen oder Gehwege. Zusätzliche sind weitere Informationen wie die maximalen Geschwindigkeiten auf den Links und die Anzahl der Fahrspuren enthalten.
- Die Datei *plans.xml* enthält die Daten aller Agenten eines Szenarios.
- Die eigentliche agentenbasierte (Mikro-)Simulation des Verkehrs wird im MATSim-EXEC Modul durchgeführt. Ihre Aufgabe besteht darin, die Pläne der Agenten innerhalb ihrer künstlichen Umwelt umzusetzen. Derzeit stehen die beiden Module *Queue Simulation* und

¹⁰⁸Vgl. Balmer (2007, S. 22)

DEQSim zur Auswahl. Bei der Queue Simulation handelt es sich um eine deterministische, javabasierte Re-Implementierung der *SQSim* von Cetin.¹⁰⁹ Aufgrund der Verwendung von Java als Programmiersprache ist die Simulation voll in MATSim integrierbar. Dies erlaubt es, direkt auf die notwendigen Daten zugreifen zu können, ohne die Verwendung von zeitaufwändigen In- und Output Methoden. Die Simulation basiert auf einem Warteschlangenmodell und arbeitet auf Sekundenbasis, d.h. der Systemzustand wird für jede Sekunde des untersuchten Zeitraums berechnet. Betrachtet werden jeweils die Zustände der Warteschlangen, weshalb die Dauer eines Simulationslaufes proportional zur Anzahl der Strassenstücke des Verkehrsnetzes und unabhängig von der Anzahl der Agenten ist.¹¹⁰ *DEQSim* stellt eine alternative Implementierung einer Verkehrssimulation dar, welche eine erweiterte Form eines Warteschlangen-Modells nutzt und von Charypar et al. detailliert beschrieben wird.¹¹¹ Zusätzlich zum FIFO¹¹² Verhalten wird eine sich rückwärts bewegende Lücke simuliert, wodurch das Rückstauverhalten realistischer dargestellt werden kann. Anders als bei Queue Simulation ist die Simulation eventbasiert, d.h. es werden nur dann Berechnungen ausgeführt, wenn ein Agent einen Event¹¹³ produziert. Dies hat zur Folge, dass die Rechenzeit stark von der Anzahl der simulierten Agenten abhängt. Die Simulation ist in C++ implementiert, der Datenaustausch mit den restlichen MATSim-T Modulen erfolgt über In- und Outputdateien.¹¹⁴

- Die Ausgaben des MATSim-EXEC Moduls werden in der Datei *events.txt* gespeichert. Sie enthalten detaillierte Informationen darüber, wo die Agenten sich zu jedem Zeitpunkt der Simulation aufhalten und womit sie sich beschäftigen. Diese Daten könnten beispielsweise für anschließende Auswertungen genutzt werden.
- Mittels des Moduls MATSim-SCORES werden nach jeder Iteration der Simulation die ausgeführten Pläne unter Verwendung einer Scoring Funktion bewertet. Das Ergebnis dient als Massstab dafür, wie gut der ausgeführte Plan ist.
- MATSim-STRATEGY kann beliebig viele Replanning Module beinhalten, welche genutzt werden, um die Pläne der Agenten zu modifizieren. Dabei sind verschiedenste Arten von Planänderungen realisierbar. Zeitliche Verschiebungen von Aktivitäten können beispielsweise mit dem *Time Allocator Mutator* realisiert werden.¹¹⁵ Eine Routenwahl kann etwa mit dem *Dynamic Dijkstra Router* durchgeführt werden, welcher, wie der Name schon sagt, auf einem Dijkstra Algorithmus¹¹⁶ basiert.¹¹⁷ Die einzelnen Replanning Module können auch kombiniert werden, sodass beispielsweise erst die Start- und Endzeiten der

¹⁰⁹Vgl. Cetin (2005), Balmer (2007, S. 28)

¹¹⁰Vgl. Balmer et al. (2008, S. 9)

¹¹¹Vgl. Charypar et al. (2007)

¹¹²First-In, First-Out

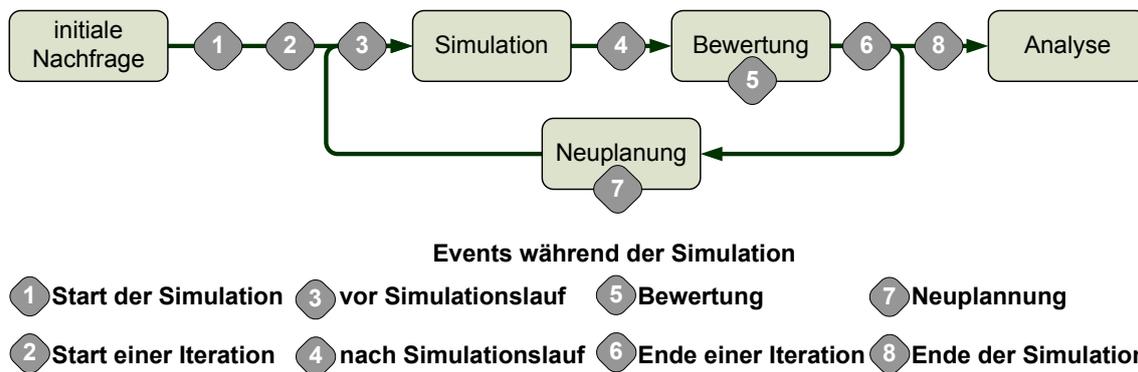
¹¹³Events werden beispielsweise beim Starten und Beenden von Aktivitäten generiert.

¹¹⁴Vgl. Balmer et al. (2008, S. 10)

¹¹⁵Vgl. Balmer (2007, S. 27)

¹¹⁶Vgl. Heinrich und Grass (2006, S. 251ff)

¹¹⁷Vgl. Balmer (2007, S. 27f)

Abbildung 16: Ablauf des evolutionären Algorithmus von MATSim¹¹⁹

Aktivitäten variiert und anschliessend neue Routen gesucht werden.

Die Abkürzung EA in MATSim-EA steht für *Evolutionary Algorithm*. Sie soll verdeutlichen, dass das Modul Ideen und Konzepte von evolutionären Algorithmen¹¹⁸ aufgreift und, entsprechend an die Aufgabenstellung angepasst, nutzt. Evolutionäre Algorithmen verwenden etwa eine Fitnessfunktion, um die besten Exemplare einer Population auszuwählen. Dieselbe Funktionalität lässt sich in MATSim im Bewerten der ausgeführten Pläne erkennen. Anhand der Ergebnisse wird entschieden, welche Pläne schlecht sind und demzufolge verworfen werden. Ein ausgewählter Plan für eine Iteration wird durch das STRATEGY Modul verändert, was wiederum Parallelen zu den Crossover- und Mutationsoperationen in evolutionären Algorithmen aufweist.

Abbildung 16 zeigt schematisch den zeitlichen Ablauf des Optimierungsalgorithmus von MATSim. Die modulare Struktur des Frameworks erlaubt es einerseits, die Module der Funktionsblöcke individuell zu wählen, und andererseits, zwischen diesen Blöcken zusätzliche Funktionen einzufügen. Dadurch wird es beispielsweise möglich, zwischen dem Ende der Simulation und vor dem Bewerten der ausgeführten Pläne (Position 4) weitere Schritte einzufügen.

Der Ablauf einer Iteration des Optimierungsprozesses sieht wie folgt aus:¹²⁰

- Für jeden Agenten wird ein Plan ausgewählt, der in der aktuellen Iteration ausgeführt werden soll. Handelt es sich um die erste Iteration, so werden erst die Agenten generiert und anschliessend deren initiale Pläne erstellt.
- Die Simulation wird basierend auf den gewählten Plänen ausgeführt und die für die anschliessende Auswertung notwendigen Events werden generiert. Dabei handelt es sich beispielsweise um Informationen über die Start- und Endzeiten von Aktivitäten oder das

¹¹⁸Siehe Abschnitt 2.2

¹¹⁹Quelle: <http://www.matsim.org/docs/controler>, Stand: Januar 2009

¹²⁰Vgl. Balmer (2007, S. 29f)

Betreten und Verlassen von Links des Netzwerks.

- Die Events werden vom Datenbankmodul zu den jeweiligen Agenten weitergeleitet. Diese nutzen die Daten, um den ausgeführten Plan anhand einer Scoringfunktion zu bewerten. Wird der Plan bereits zuvor verwendet und besitzt demnach bereits eine Bewertung, so kann diese wahlweise für die neue Bewertung berücksichtigt werden, was wiederum mit einem Gedächtnis vergleichbar ist.
- Im nächsten Schritt prüfen die Agenten, ob die zulässige Anzahl an hinterlegten Plänen überschritten wird. Trifft dies zu, wird derjenige mit der schlechtesten Bewertung entfernt.
- Abschliessend wird für jeden Agenten ein Plan für die nächste Iteration ausgewählt. Dabei kann es sich um einen bestehenden oder neu generierten Plan handeln. Hierfür stehen verschiedene Module zur Auswahl, welche mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten angewendet werden:
 - Erstellen eines neuen Planes, der jedoch auf einem existierenden beruht und lediglich die Routen basierend auf den Ergebnissen der aktuellen Simulation neu generiert.
 - Erstellen eines neuen Planes, der auf einem bestehenden Plan basiert. Allerdings werden die Start- und Endzeiten der Aktivitäten verändert und anschliessend wiederum neue Routen erstellt, wobei die aktuellen Simulationsergebnisse berücksichtigt werden.
 - Zufällige Auswahl eines schon vorhandenen Plans.
 - Auswahl eines existierenden Plans, wobei die Wahlwahrscheinlichkeit mit steigender Bewertung zunimmt, d.h. gute Pläne werden mit einer höheren Wahrscheinlichkeit gewählt als schlechte.

5.2 Umsetzung

5.2.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt befasst sich mit der technischen Realisierung der Implementierung der zuvor beschriebenen Wissensmodelle in MATSim. Als Programmiersprache wird Java gewählt, womit auch der grösste Teil des bestehenden MATSim Toolkits programmiert wurde. Ein zentraler Punkt bei der Umsetzung ist es, die erstellten Klassen so modular zu gestalten, dass diese später einerseits für andere Aufgaben und Untersuchungen genutzt werden können und andererseits ein Hinzufügen zu den MATSim Kernmodulen problemlos möglich ist. In den folgenden Abschnitten wird besonderes Augenmerk auf jene Klassen gelegt, welche zentrale Bausteine an den implementierten Erweiterungen am MATSim Paket darstellen. Denkbare Erweiterungen werden an entsprechender Stelle beschrieben.

Auf den Code der implementierten Klassen wird an dieser Stelle nicht explizit eingegangen. Dieser wird, wie das gesamte MATSim Toolkit, laufend überarbeitet und erweitert, weshalb von einer gedruckten Dokumentation abgesehen wird. Stattdessen basieren die Beschreibungen der Klassen und deren Methoden auf Javadoc¹²¹, welches von den MATSim Entwicklern empfohlen und genutzt wird. Die auf diese Weise erstellten Dokumentationen sind online auf der MATSim Entwickler Homepage frei verfügbar.¹²² Im Gegensatz zu anderen gängigen Dokumentationsarten, wie beispielsweise UML Diagrammen, bietet diese Variante die Vorteile, laufend und insbesondere automatisch aktualisiert werden zu können und jederzeit für alle am Projekt beteiligten Personen verfügbar zu sein.

5.2.2 Überblick über die Erweiterungen

Dieser Abschnitt befasst sich mit den in die MATSim Struktur eingefügten Methoden. Der erste Teil behandelt dabei die zusätzlichen Methoden in der Queue Simulation von MATSim. Diese erlauben es den Personen während der laufenden Simulation ihre Pläne entsprechend der aktuellen Verkehrssituation anzupassen. Im anschließenden zweiten Teil wird ein Überblick über den Ablauf eines gesamten Simulationslaufes gegeben.

Das Konzept der MATSim Queue Simulation basiert darauf, durch eine Reihe von Simulationsläufen einen relaxierten Systemzustand zu erreichen. Veränderungen an den Routen der Agenten können nur vor einem Simulationslauf durchgeführt, nicht aber während dessen Laufzeit. Die entwickelten Wissensmodelle basieren jedoch darauf, dass eine Person zu jedem Zeitpunkt eine Routenwahl treffen kann, was mit der bestehenden Queue Simulation nicht möglich ist. Üblicherweise werden für die Routenplanung Informationen über den aktuellen Verkehrszustand genutzt, welche zu Tagesbeginn noch nicht verfügbar sind.

Diese Problematik wird durch eine Erweiterung der Queue Simulation gelöst. Diese unterteilt den untersuchten Zeitraum in einzelne Zeitschritte, für die jeweils der Systemzustand berechnet wird. Die Erweiterung besteht darin, dass die Simulation zu Beginn jedes Zeitschrittes angehalten wird und die gegebenenfalls notwendigen Routenplanungen durchgeführt werden. Das Anhalten der Simulation erlaubt es, alle jene Personen zu identifizieren, welche im aktuellen Simulationsschritt ihre Route neu planen müssen. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass die notwendigen Routenplanungen gesammelt werden können, um anschließend parallel auf mehrere Prozesse verteilt durchgeführt werden zu können. Dies ist möglich, da sich die Routenplaner gegenseitig nicht beeinflussen, da deren Routingentscheidungen erst bei der nachfolgend durchgeführten Simulation des aktuellen Zeitschrittes zur Geltung kommen.

¹²¹<http://www.matsim.org/javadoc>

¹²²<http://www.matsim.org/developer>

Benötigen die Routenplaner Informationen über den Zustand des Verkehrssystems, wie etwa die Belastungen von Verkehrsverbindungen, so erhalten sie diese aus dem Resultat des direkt vorangegangenen Simulationsschritts.

Um die existierenden MATSim Routenplaner weiterhin nutzen zu können, wurde die Aufteilung auf parallel laufende Prozesse so implementiert, dass eine Routenplanungsoperation jeweils nur von einem Prozess durchgeführt wird. D.h. die Planung einer einzelnen Route wird nicht in einzelne Teilschritte unterteilt, welche von verschiedenen Prozessen erledigt werden. Stattdessen wird die Menge aller in einem Zeitschritt durchzuführenden Routenplanungen gleichmässig auf die zur Verfügung stehenden Prozesse verteilt. Dies führt dazu, dass die parallele Routenberechnung umso effizienter wird, je mehr Routen innerhalb eines Zeitschritts berechnet werden müssen.

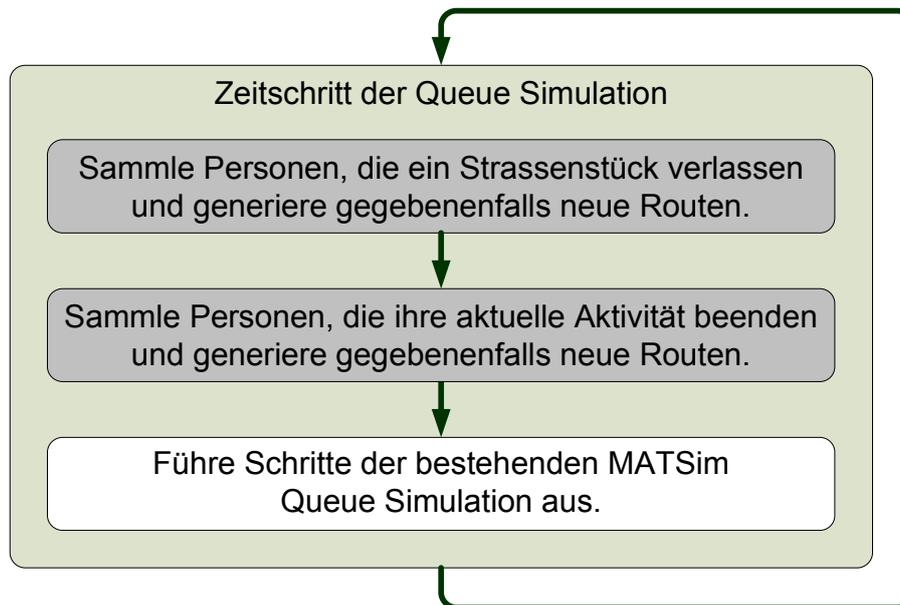
Abbildung 17 zeigt schematisch, wie die bestehende Queue Simulation erweitert wird. Wie dort ersichtlich ist, werden zwei verschiedene Auslöser für eine Neuplanung der Route einer Person erwähnt. Eine Ursache hierfür ist die Tatsache, dass für jede Person getrennt festgelegt werden kann, ob und wann sie ihre gewählte Route während einer laufenden Simulation überarbeitet. Dies kann einerseits nach dem Beenden einer Aktivität und andererseits beim Verlassen eines Streckenstücks vorgegeben werden. Ein weiterer Grund stellt die Programmstruktur der Queue Simulation dar. Ob eine Person ihre derzeitige Aktivität im aktuellen Zeitschritt beenden wird, lässt sich anhand eines Vergleiches der gegenwärtigen Zeit mit der geplanten Endzeit der Aktivität prüfen. Ob eine Person hingegen bereits das Ende eines Streckenstücks erreicht hat, hängt sowohl von deren Verweildauer auf dem Wegabschnitt als auch von dessen Verkehrsbelastung ab.

Personen, die ihre Route neu planen sollen und die auch die entsprechenden Kriterien erfüllen, d.h., sie beenden gerade ihre derzeitige Aktivität oder haben das Ende eines Streckenstücks erreicht, werden jeweils in einer Liste gesammelt. Nach der Durchführung dieser Überprüfung für alle Personen der Simulation, wird die Liste an gesammelten Personen an die Routenplaner übergeben, welche in der Folge die neuen Routen berechnen.

5.2.3 Bewegungsräume

Einen integralen Bestandteil der in dieser Arbeit genutzten Wissensmodelle stellen die Bewegungsräume der Personen dar. Dabei handelt es sich um jene Bereiche des Verkehrssystems, innerhalb derer die Personen agieren. Diese Räume werden in MATSim durch eine Sammlung von Verkehrsknotenpunkten dargestellt, welche im *Knowledge* jeder einzelnen Person hinterlegt werden. Bei der Routenplanung werden in der Folge nur noch Wegstücke berücksichtigt, deren

Abbildung 17: Erweiterung der MATSim Queue Simulation



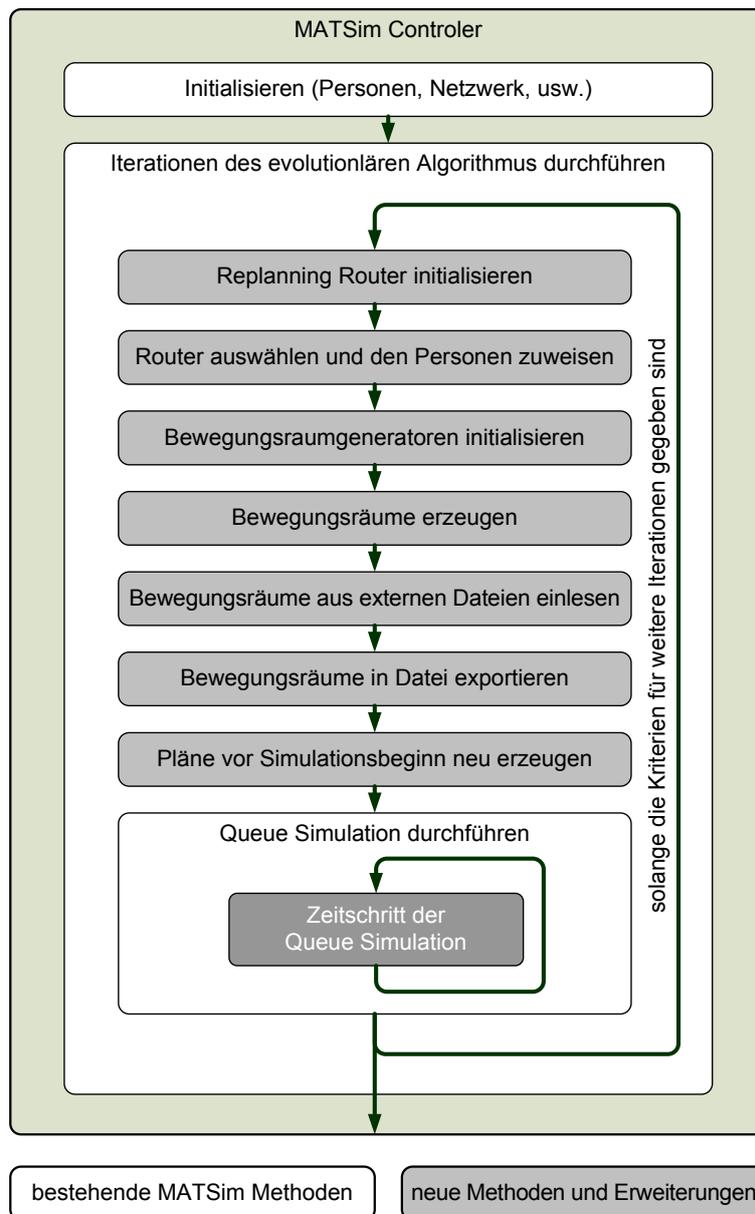
Start- und Endknotenpunkte bekannt sind.

Klassen, welche zur Sammlung von Knotenpunkten zur Beschreibung von Bewegungsräumen genutzt werden, müssen das Interface *SelectNodes* implementieren. Die beiden in Abschnitt 4.2 beschriebenen Verfahren wurden dementsprechend umgesetzt und können als Vorlage für weitere Auswahlverfahren herangezogen werden. Entsprechend ihrer Funktionsweisen werden sie als *SelectNodesCircular* und *SelectNodesDijkstra* benannt. Letzteres basiert auf der Implementierung eines Dijkstra Algorithmus, welcher zur Berechnung der Kosten eines Streckenabschnittes beliebige, in MATSim vorhandene, Wegkostenrechner nutzen kann. Diese verwenden verschiedene Parameter wie die effektive Weglänge und die Fahrdauer für ihre Berechnungen. Die Wahl des Rechners hat direkte Auswirkungen auf die generierten Bewegungsräume.

Die beiden Verfahren wurden so implementiert, dass sie auch kombiniert werden können, um Bewegungsräume zu erzeugen. Besitzt eine Person bereits einen solchen, ergänzen die Verfahren diesen nur mehr um jene Knotenpunkte, welche dort noch nicht enthalten sind.

Als weitere Funktion wurde die Möglichkeit implementiert, die Bewegungsräume aller Personen einer Simulation in eine XML Datei zu exportieren oder sie aus einer solchen zu importieren. Diese Daten werden beispielsweise benötigt, wenn nachträglich Auswertungen über die Bewegungsräume erstellt werden sollen. Durch die Möglichkeit, bereits zuvor generierte Daten zu importieren, können überdies die Berechnungszeiten von Simulationsläufen signifikant reduziert werden.

Abbildung 18: Ablauf MATSim einschliesslich Erweiterungen



Der gesamte Ablauf einer MATSim Simulation einschliesslich der zusätzlichen Funktionen wird in Abbildung 18 dargestellt, wobei die neuen Module die folgenden Aufgaben erfüllen:

- **Replanning Router initialisieren**
Diese Methode dient dazu, jene Router zu initialisieren, welche für die Routenplanung genutzt werden sollen. Parameter sind beispielsweise die zu verwendenden Kostenfunktion, anhand derer eine Route bewertet wird.
- **Router auswählen und Personen zuweisen**
In diesem Schritt werden den Personen die zu verwendenden Router zugewiesen. Dies

kann beispielsweise durch fixe Zuteilung oder basierend auf einer Zufallsverteilung erfolgen.

- Bewegungsraumgeneratoren initialisieren

Diese Methode wird dazu genutzt, um die Generatoren der Bewegungsräume zu initialisieren. Die Parameter hängen dabei vom jeweiligen Generator ab. Beispiele sind etwa Entfernungen und zulässige Kosten.

- Bewegungsräume aus externen Dateien einlesen

Anstatt die Bewegungsräume für jeden Simulationslauf neu zu erstellen, können diese auch aus Dateien importiert werden. Auch diese Methode muss nicht zwingend durchlaufen werden. Verfügen die Personen bereits über Bewegungsräume, so werden diese durch die zusätzlichen Daten ergänzt. Ebenso können mehrere Dateien eingelesen werden.

- Bewegungsräume in Datei exportieren

Die erzeugten Bewegungsräume können in eine XML Datei exportiert werden und von dort in späteren Simulationen wieder importiert werden. Dies ermöglicht es einerseits, die Räume zu analysieren und spart andererseits Zeit, wenn mehrfach identische Bewegungsräume genutzt werden.

- Pläne vor Simulationsbeginn neu erzeugen

Auch hierbei handelt es sich um eine Funktion, die nicht zwingend benötigt wird. Planen etwa alle Personen ihre Routen adaptiv während des Tagesverlaufs, so kann die Methode übersprungen werden.

- Queue Simulation durchführen

Die Erweiterungen in der Queue Simulation wurden bereits im ersten Teil dieses Abschnittes beschrieben.

5.2.4 Routenplaner

Die Grundgedanken hinter den in MATSim neu implementierten Routenplanern wurden vorangehend in Abschnitt 4.3 angesprochen. Besonderes Augenmerk wird an dieser Stelle auf die Implementierung der *DijkstraWrapper* genannten Klasse gelegt. Diese erlaubt es, in MATSim vorhandene Routenplaner, die auf den Algorithmus von Dijkstra beruhen, in Kombination mit den zuvor beschriebenen Bewegungsräumen zu nutzen. Voraussetzung hierfür ist die Verwendung von erweiterten Kostenrechnern, welche ebenfalls implementiert werden und die es erlauben, das Wissen von Personen für ihre Berechnungen zu berücksichtigen. Die Implementierung der Kostenrechner basiert darauf, dass Streckenteile, die eine Person nicht kennt, die grösstmöglichen Kosten verursachen und dementsprechend nicht gewählt werden. An dieser Stelle ist auch eine Reihe von anderen Kriterien denkbar, welche berücksichtigt werden könnten. So könnte etwa eine Person ausgewählte Streckenabschnitte bewusst nur zu bestimmten Zeiten

befahren, da diese sonst erfahrungsgemäss überlastet sind.

6 Interpretation

6.1 Eingrenzung

Das Ziel dieses Kapitels besteht primär darin, einerseits die Wissensmodelle auf ihre korrekte Implementierung hin zu prüfen und andererseits, die Tauglichkeit der Modelle für Routenplanungsaufgaben zu bestimmen und deren Einfluss auf ein Verkehrssystem zu untersuchen. Hierfür werden Versuchspläne erstellt, anhand derer verschiedene Hypothesen geprüft werden. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung der Modelle und deren Verhalten, die Betrachtung der Ergebnisse aus verkehrsplanerischer Sicht erfolgt ergänzend.

Aufgrund der zeitlichen Limitierung und dem hohen Berechnungsaufwand, der mit den durchzuführenden Simulationen einher geht, sollen erst grobe Analysen durchgeführt werden. Basierend auf diesen sollen jene Wissensmodelle identifiziert werden, für die ausführlichere Untersuchungen bezüglich deren Einflüssen und Interaktionen mit einem Verkehrssystem gerechtfertigt sind. An entsprechender Stelle sollen überdies weiterführende Untersuchungen genannt werden, welche die Gewinnung weiterer Erkenntnisse vermuten lassen, jedoch den Umfang dieser Arbeit übersteigen.

6.2 Versuchsplan und Hypothese

Basierend auf der in Abschnitt 4.4 getroffenen Auswahl der Wissensmodelle werden zwei getrennte Versuchsreihen durchgeführt, welche verschiedene Aspekte untersuchen.

Die erste Reihe befasst sich damit, welche Einflüsse unterschiedliche grosse Bewegungsräume auf ein Verkehrssystem haben. Es soll insbesondere untersucht werden, inwiefern sich diese auf die Qualität der generierten Routen auswirkt. Die Untersuchungen werden dabei für jeden Routertypen getrennt durchgeführt, d.h., innerhalb eines Simulationslaufes verwenden jeweils alle Personen denselben Router. Für diese Versuchsreihe werden alle im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen und implementierten Routenplaner herangezogen und deren Ergebnisse einander gegenübergestellt. Hierzu wird für jeden Router eine Reihe von Simulationen durchgeführt, wobei lediglich die Grösse des Bewegungsraumes variiert wird.

Die zweite Versuchsreihe befasst sich ausschliesslich mit Least Cost Routern, wobei diese verschiedene Strategien zur Routenplanung nutzen. Hierbei soll das Verhalten des Verkehrssystems untersucht werden, wenn die Personen beim Planen ihrer Routen die aktuelle Belastung des Systems berücksichtigen können. Variiert werden dabei sowohl die Zeitpunkte, an denen die Personen ihre Routen neu planen können, als auch die Bewegungsräume, innerhalb derer sie agieren. Anhand der durchgeführten Versuche sollen zwei zentrale Themen untersucht werden. Einerseits stellt sich die Frage, ob sich die gewählten Routen signifikant verändern, wenn die Personen die Möglichkeit haben, diese an jedem Verkehrsknotenpunkt neu zu planen. Andererseits soll untersucht werden, inwiefern ein Zusammenhang zwischen der Grösse der Bewegungsräume und der Qualität der gewählten Routen besteht.

Im Rahmen dieser Versuchsreihe werden die beschriebenen Einflussgrössen innerhalb definierter Grenzen variiert. Jeder Person wird eine von vier Varianten für ihre Routenwahl zugeteilt.

- bestehende Route
- Neuplanung zu Tagesbeginn
- Neuplanung bei Beendigung einer Aktivität
- Neuplanung an jedem Verkehrsknotenpunkt

Die prozentuale Verteilung der Varianten über alle Personen wird vom Versuchsplan für jeden Simulationslauf vorgegeben, wobei die minimale Schrittweite 10% beträgt.

Als weiterer Parameter wird jeder Person ein Faktor für die Grösse ihres Bewegungsraumes zugeteilt. Dieser bestimmt, um welchen Faktor eine Route teurer sein darf als die günstigste Route innerhalb des leeren Verkehrsnetzes, um dennoch Teil des Bewegungsraumes zu sein. Mögliche Faktoren sind 1.0, 1.5 und 2.0. Als weitere Alternative kann einer Person auch die Kenntnis des gesamten Verkehrsnetzes zugeteilt werden. Die prozentuale Verteilung der Variante wird wiederum durch den Versuchsplan vorgegeben. Als Mindestschrittweite werden wiederum 10% gewählt.

6.3 Szenario

Als Szenario für die Versuche wird ein quadratischer Ausschnitt mit einer Seitenlänge von 100 km gewählt, welcher Zürich und Umgebung beinhaltet. Berücksichtigt werden all jene Personen, deren Aktivitäten vollständig innerhalb dieses Bereiches stattfinden. Durchfahrtsverkehr und Tagespendler finden hingegen keine Beachtung. Die Betrachtung beschränkt sich überdies auf Individualverkehr, öffentliche Verkehrsmittel werden nicht modelliert und simuliert. Diese

Kriterien werden von rund 876.000 Personen erfüllt.¹²³ Innerhalb des betrachteten Bereichs befinden sich etwa 643.800 Aktivitätenstandorte. Das zugrundeliegende Verkehrsnetz basiert auf dem nationalen Schweizer Verkehrsnetz.¹²⁴

Die Wahl dieses Szenarios für die durchgeführten Simulationen und Analysen beruht auf verschiedenen damit verbundenen Vorteilen. Da es sich um das Abbild einer realen Umwelt handelt, basiert das Modell auf ebenso realen Daten und verfügt damit über einen hohen Bezug zur Realität. Da auf Grundlage dieses Szenarios bereits im Zuge anderer Untersuchungen eine Reihe verschiedener Simulationen und Analysen durchgeführt worden sind, ist dessen Verhalten bekannt und sind Ergebnisse vorhanden, die gegebenenfalls als Vergleichswerte herangezogen werden können. Für die Simulationen wird das Szenario auf 10% seiner Grösse verkleinert, um den Berechnungsaufwand zu verringern. Somit werden 87.600 Personen simuliert, deren Aktivitäten auf 64.380 Standorte verteilt sind.

6.4 Testsystem und Rechenzeit

Für alle Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit wird ein Dual Core Rechner mit 2.67 GHz herangezogen. Abhängig von den genutzten Routenwahlverfahren und der Grösse der Bewegungsräume der Personen, werden für einen Simulationslauf zwischen vier und acht GB Arbeitsspeicher benötigt.

Die Rechenzeit einer Simulation lässt sich im Wesentlichen in zwei Bereiche unterteilen. Vor der eigentlichen Simulation des Verkehrssystems müssen erst die Bewegungsräume der Personen vorhanden sein. Diese können einerseits aus einer zuvor erstellen XML Datei importiert werden oder vollkommen neu erstellt werden. Der zweite Schritt besteht aus der eigentlichen Simulation des Verkehrsgeschehens. Deren Rechenzeit wird massgeblich von der Anzahl neu zu berechnender Routen beeinflusst. Sind üblicherweise mehrere solcher Berechnungen je Simulationsschritt durchzuführen, lässt sich durch die Nutzung mehrerer parallel laufender Prozesse eine signifikante Reduzierung der Laufzeit der Simulation erzielen.

Die Generierung der Bewegungsräume für die gesamte Population des Testszenarios dauert rund eine Stunde. Aufgrund der Art der Implementierung der Algorithmen zur Erzeugung der Räume ist die Dauer unabhängig von deren Grösse. Werden die Bewegungsräume hingegen aus einer Datei importiert, beträgt die Dauer zwischen einer und fünf Minuten. Hierbei nimmt die Dauer linear mit der Grösse der zu importierenden Räume zu.

¹²³Vgl. Meister et al. (2008)

¹²⁴Vgl. Vrtic et al. (2003)

Um den Speicherbedarf eines Simulationslaufes zu beschränken, wird die maximale Anzahl an Streckenstücken einer Route auf 50.000 begrenzt. Da dieser Wert ein Vielfaches über der durchschnittlichen Länge der Routen des relaxierten Zustandes liegt, sind keine relevanten Auswirkungen auf die Simulationen zu erwarten. Ein Abfahren einer Route der maximal zulässigen Länge würde selbst in einem vollkommen leeren Verkehrsnetz Tage oder gar Wochen dauern.

6.5 Auswertekriterien

6.5.1 Allgemeines

Die gewählten Auswertekriterien basieren auf einem relaxierten Zustand des Testszenarios, welcher nach 150 Simulationsiterationen mit dem unveränderten MATSim Toolkit erreicht wird. Als zu optimierende Kostenfunktion wird jene von Charypar und Nagel gewählt, welche derzeit üblicherweise in MATSim genutzt wird. Sie berücksichtigt sowohl die zurückgelegte Strecke und die dafür benötigte Zeit als auch die durchgeführten Aktivitäten.¹²⁵ Dies garantiert eine sinnvolle Verteilung der Abfahrtszeiten der Agenten über den Tag unter Berücksichtigung der geplanten Aktivitäten.

Für die weiteren Schritte werden die auf diese Weise bestimmten Abfahrtszeiten konstant gehalten, verändert werden ausschliesslich die gewählten Routen. Um die Qualität dieser Routen unabhängig von den durchgeführten Aktivitäten beurteilen zu können, wird als Vergleichswert die Fahrdauer herangezogen. Ebenfalls denkbar wäre an dieser Stelle die Wahl einer Kombination aus Fahrdauer und zurückgelegter Strecke als Beurteilungskriterium. Welche Auswirkungen dies auf die erzeugten Routen haben würde, kann im Rahmen an diese Arbeit anschliessender, weiterführender Analysen untersucht werden.

Unter diesen Voraussetzungen wird abermals ein Simulationslauf gestartet, wobei die Routen jedoch dahingehend optimiert werden, dass sie in möglichst geringer Zeit zurückgelegt werden können. Als Vergleichs- und Referenzwerte für die durchgeführten Versuche und deren Auswertungen dienen die Fahrzeiten des auf diese Weise bestimmten relaxierten Zustandes.

¹²⁵Vgl. Charypar und Nagel (2005)

6.5.2 Wardrop Gleichgewicht

6.5.2.1 Nash Gleichgewicht

Unter dem Nash Gleichgewicht versteht man ein zentrales Element der Spieltheorie, welche sich mit Konflikt- und Wettbewerbssituationen beschäftigt. Dabei treffen die einzelnen Spieler Entscheidungen, ohne das Verhalten der Gegenspieler zu kennen.¹²⁶ Das erstmals vom Mathematiker John Nash beschriebene und nach ihm benannte Nash Gleichgewicht beschreibt eine solche Situation, in der jeder einzelne Spieler eine optimale Strategie gewählt hat. Eine Grundannahme besteht dabei darin, dass alle anderen Mitspieler ebenfalls optimale Strategien gewählt haben. Somit besteht für keinen Spieler ein Anreiz, seine eigene Strategie zu verändern, da bereits eine optimale Strategie gewählt wurde.¹²⁷

6.5.2.2 Wardrop'sche Prinzipien

Die beiden von John Wardrop beschriebenen Prinzipien sind in ihren Ansätzen mit dem Nash Gleichgewicht vergleichbar, befassen sich jedoch anstelle der Spieltheorie mit Verkehrssystemen.¹²⁸

Das erste Wardrop'sche Prinzip befasst sich mit dem Nutzeroptimum. Analog zum Nash Gleichgewicht besagt es, dass sich in verkehrsreichen Netzen der Verkehr so aufteilt, dass kein Verkehrsteilnehmer durch eine andere Routenwahl seine Kosten senken kann. Dies bedeutet mit anderen Worten, dass die gewählte Route optimal ist. Auf ein Verkehrsnetz angewandt besagt dieses Prinzip, dass alle genutzten Routen von einem Start- zu einem Endpunkt dieselben Kosten aufweisen. Dies wiederum bedeutet, dass alle nicht genutzten Routen dieselben oder höhere Kosten verursachen.

Das zweite von Wardrop beschriebene Prinzip beschreibt ein Systemoptimum. Hierbei sind die Verkehrsströme derart organisiert, dass die Summe der Kosten aller Verkehrsteilnehmer minimal ist. In einem derartigen Zustand ist jedoch Optimalität der Routen einzelner Teilnehmer nicht mehr gewährleistet. Vielmehr bedeutet dies, dass einzelne Individuen Nachteile akzeptieren, damit die restliche Mehrheit profitieren kann.

¹²⁶Vgl. Heinrich und Grass (2006, S. 129)

¹²⁷Vgl. Holler und Illing (2005, S. 57f)

¹²⁸Vgl. Wardrop (1952)

6.5.2.3 Bestimmung des Wardrop Gleichgewichts

Im Rahmen der zweiten Versuchsreihe werden die Ergebnisse zusätzlich dahingehend untersucht, inwiefern sich das Verkehrssystem in einem Wardrop Gleichgewicht befindet. Für die hierfür notwendigen Untersuchungen wird das betrachtete Gebiet in einzelne Bereiche unterteilt, welche mit Verkehrszellen¹²⁹ vergleichbar sind. Die optimale Grösse dieser Bereiche wird hauptsächlich durch zwei Parameter bestimmt, welche widersprüchliche Forderungen bezüglich der gewählten Abmessungen der Zellen haben. Einerseits sollten die Bereiche möglichst gross gewählt werden, damit genügend Personen und - mit ihnen verbunden - gefahrene Routen vorhanden sind, um statistisch aussagekräftige Auswertungen durchführen zu können. Um systematische Fehler zu vermeiden, sollten die Gebiete jedoch möglichst klein gewählt werden. Die Ursache hierfür lässt sich leicht anhand eines Beispiels erklären. Abbildung 19 zeigt einen Ausschnitt aus einem Verkehrsnetz, in dem exemplarisch zwei Verkehrszellen grau hinterlegt eingezeichnet sind. Aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Verkehrszellen variiert der Abstand zwischen den Start- und Endpunkten von Verbindungen zwischen den Zellen, was durch zwei ebenfalls eingezeichnete Routen illustriert wird. Durch die dadurch entstehenden unterschiedlichen Weglängen ergeben sich in der Regel auch abweichende Kosten für die Routen, was im Widerspruch zu einem Wardrop Gleichgewicht steht. Je weiter die betrachteten Verkehrszellen voneinander entfernt liegen, desto geringer wird üblicherweise der Einfluss der Start- und Endposition innerhalb der Zellen.

Die Dauer der betrachteten Zeitfenster stellt den dritten und letzten massgeblichen Parameter bei der Berechnung des Wardrop Gleichgewichts dar. Je länger dieses Zeitfenster gewählt wird, desto mehr Fahrten stehen für die statistischen Auswertungen zur Verfügung. Gleichzeitig kann sich jedoch in diesem Zeitraum auch der Zustand des Verkehrssystems verändern, wodurch die Resultate der Auswertungen verfälscht werden können.

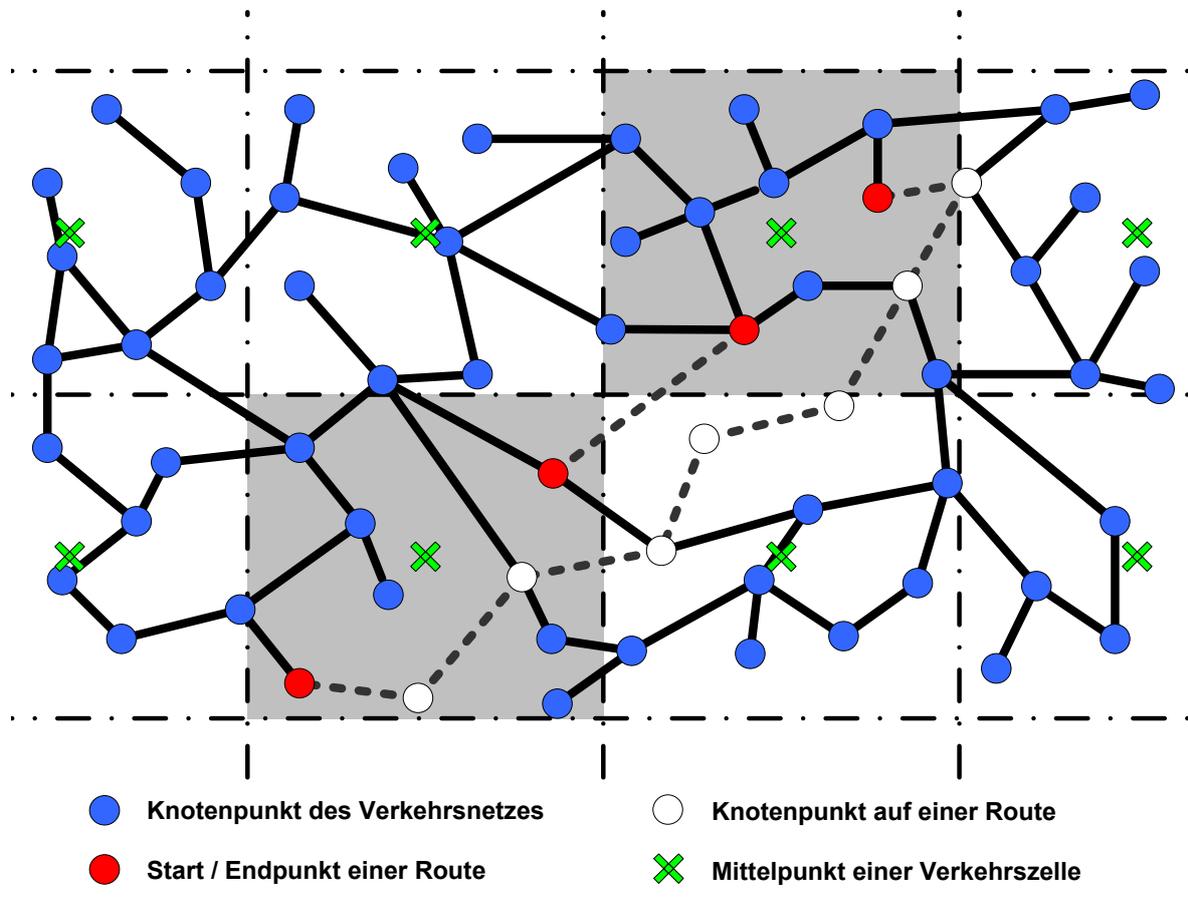
Die Einstellungen der einzelnen Parameter hängen stark vom untersuchten Szenario ab und müssen deshalb jeweils an dieses angepasst werden, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

6.5.3 Ergebnisse des Testszenarios

Werden die gewählten Auswertekriterien auf das Testszenario angewandt, so liefert dies die folgenden Ergebnisse. Eine Person verbringt durchschnittlich 28:50 Minuten am Tag damit, sich innerhalb des Verkehrsnetzes zu bewegen. In dieser Zeit legt sie eine Distanz von 26.6 km zurück, welche auf 29.3 Abschnitte des Verkehrsnetzes verteilt sind. Die mittlere Dauer

¹²⁹Siehe Abschnitt 2.1.3

Abbildung 19: Beispiel für die Zellengröße beim Wardrop Gleichgewicht

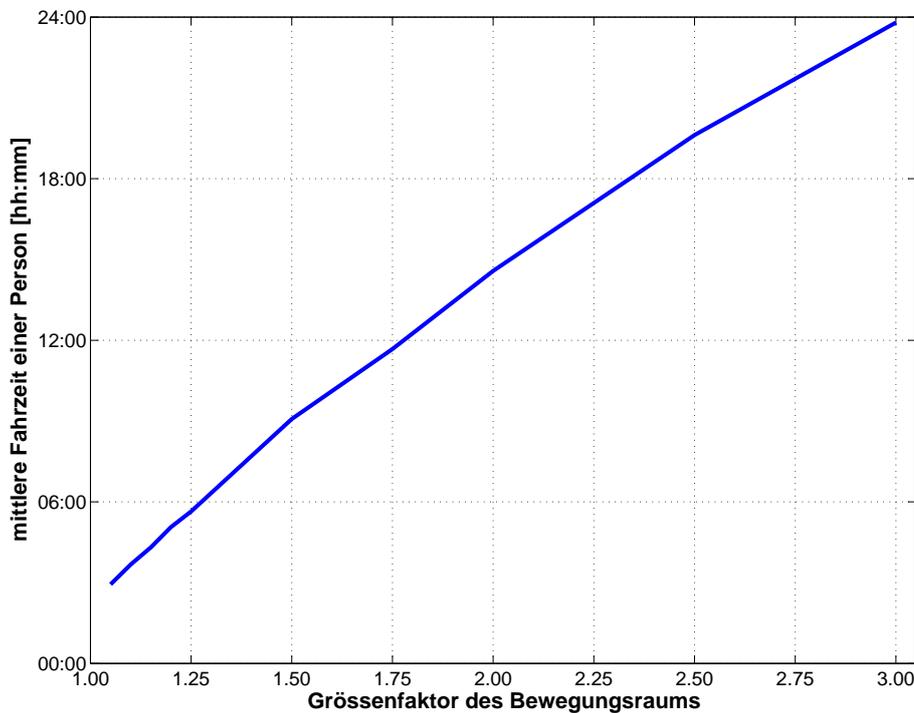


eines Trips, d.h. die Bewegung von einer Aktivität zur nächsten, beträgt 8:40 Minuten, der dabei zurückgelegte Weg 8.0 km, was wiederum 8.8 Strassenstücken entspricht.

Basierend auf der Auswertung einer Parameterstudie haben sich quadratische Verkehrszellen mit einer Seitenlänge von 6 km als optimal für die Berechnung des Wardrop Gleichgewichts herausgestellt. Die Länge der betrachteten Zeitfenster beträgt dabei eine Stunde. Um der zuvor beschriebenen Problematik der unterschiedlichen Weglängen zwischen Verkehrszellen entgegen zu wirken, wird der Gleichgewichtszustand nur für Zellenpaare berechnet, deren Mittelpunkte mehr als 30 km voneinander entfernt liegen. Als weitere Voraussetzung müssen innerhalb eines Zeitfensters mindestens fünf Trips von der Start- zur Endzelle vorhanden sein.

Im Zuge der Auswertung wurden 28 passende Zellenpaare gefunden, welche im Schnitt 7.5 Trips für die Berechnung der Standardabweichungen der Fahrzeiten bereitstellen. Um diese besser vergleichen zu können, werden sie jeweils in Prozent vom Mittelwert angegeben. Für das Testszenario ergibt sich dabei eine Standardabweichung von 10.0%, was darauf hindeutet, dass das System sich in einem dem Wardrop Gleichgewicht ähnlichen Zustand befindet.

Abbildung 20: Ergebnisse des Random Routers



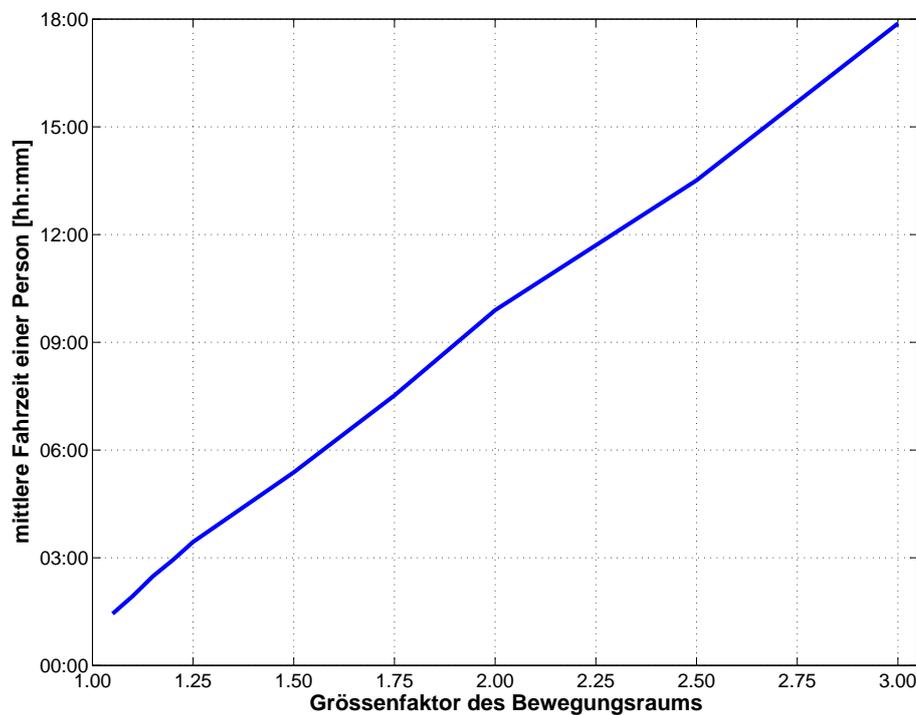
Bei der Betrachtung der Resultate muss jedoch berücksichtigt werden, dass die ihnen zugrundeliegende Stichprobengrösse keinesfalls gross genug ist, um statistisch fundierte Ergebnisse zu liefern. Basierend auf erkennbaren Tendenzen können jedoch Thesen und Theorien aufgestellt werden, welche in weiterführenden Untersuchungen geprüft werden.

6.6 Analysen

6.6.1 Random Router

Erwartungsgemäss sind die mittels eines Zufallsverfahrens erzeugten Routen um ein Vielfaches länger als jene, die mit einem gezielten Routenwahlalgorithmus erzeugt werden. Mit zunehmender Grösse der Bewegungsräume zeichnet sich eine nahezu lineare Zunahme der mittleren Fahrzeit einer Person ab.

Abbildung 21: Ergebnisse des Tabu Routers



6.6.2 Tabu Router

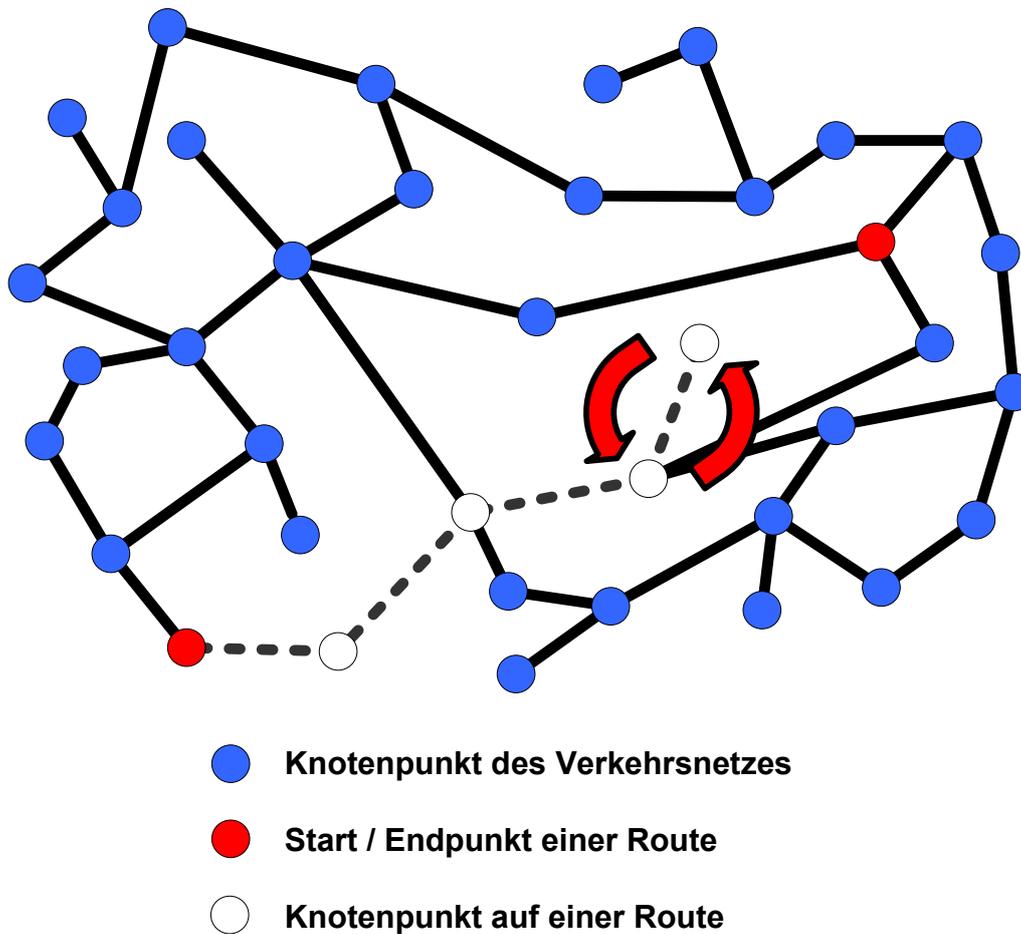
Im Vergleich mit dem Random Router liefert der Tabu Router deutlich bessere Routen, welche jedoch mit zunehmender Grösse der Bewegungsräume eine vergleichbare Zunahme der Fahrzeiten aufweisen.

6.6.3 Compass Router

Die Erkenntnisse mehrerer Simulationsläufe zeigen, dass ein reiner Compass Router in realen Verkehrsnetzen für die Routenplanung ungeeignet ist. Die Ursache dafür ist jene, dass sich der Suchalgorithmus in bestimmten Bereichen eines Verkehrsnetzes festfahren kann und nicht in der Lage ist, diese, unter Berücksichtigung der Regeln für die Routenwahl, wieder zu verlassen. Die folgenden Abbildungen zeigen entsprechende Beispiele:

Verfügt der Router über keine Informationen, so können sich Situationen ergeben, in denen eine Person ständig in eine Sackgasse hinein und wieder ausfährt.

Abbildung 22: Compass Router ohne Kenntnis des vorangegangenen Knotens



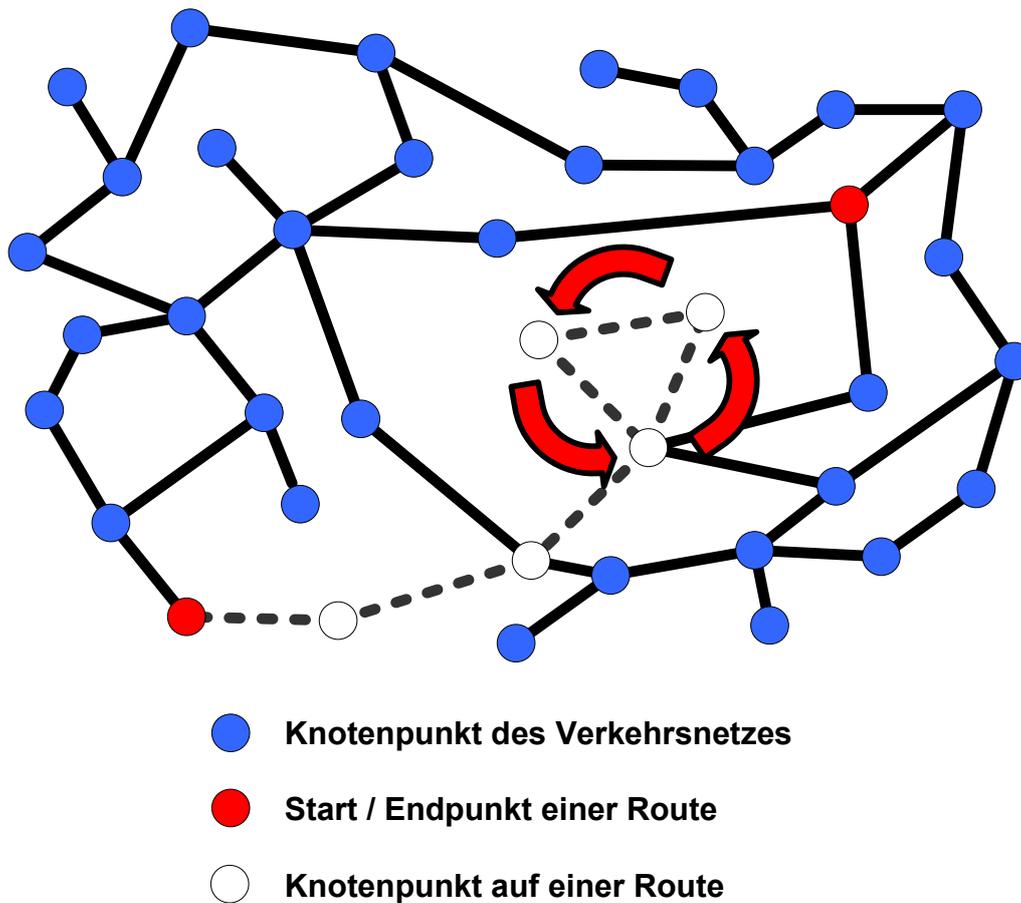
Besitzt der Router hingegen Kenntnis darüber, auf welchem Weg er zu einem Knotenpunkt gelangt ist, können sich dennoch Szenarien ergeben, in denen er sich endlos im Kreis bewegt.

Aufgrund dieser Problematik ist ein überwiegender Teil der Agenten selbst bei sehr kleinen Bewegungsräumen nicht in der Lage, vollständige Routen zwischen ihren Aktivitäten zu erstellen. Aufgrund dieser Tatsache wird an dieser Stelle auf eine weitere Auswertung der Ergebnisse verzichtet, da die Simulationen keine Resultate liefern, welche mit jenen der anderen Router vergleichbar wären.

6.6.4 Random Compass Router

Anhand der durchgeführten Versuche wird deutlich, dass der Random Compass Router in typischen Verkehrsnetzen eine deutliche Verbesserung zum reinen Compass Router darstellt. Die Wahrscheinlichkeit, eine gültige Route zu generieren, wird durch die Einführung einer zufälligen

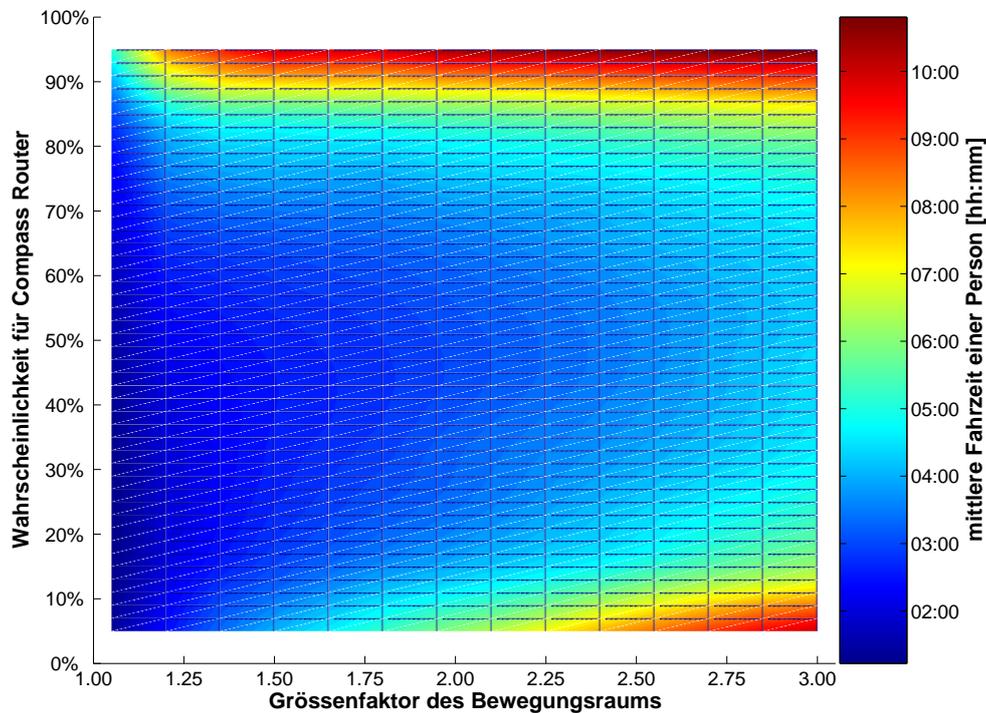
Abbildung 23: Compass Router mit Kenntnis des vorangegangenen Knotens



Komponente im Suchalgorithmus signifikant erhöht. Ebenso liefert er bei günstig gewähltem Zufallsfaktor deutlich bessere Ergebnisse als ein Random Router. Im Rahmen der durchgeführten Versuche wird dabei jener Faktor variiert, welcher bestimmt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Person das nächste Streckenstück zufällig oder entsprechend dessen Orientierung zum Ziel auswählt. Zusätzlich wird auch die Größe der Bewegungsräume der Personen variiert. Ziel der Versuche ist es, die Zusammenhänge zwischen beiden Faktoren zu bestimmen. Grafische Auswertungen der durchgeführten Simulationen werden in den Abbildungen 24 und 25 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass nur ein geringer Zusammenhang zwischen der Größe der Bewegungsräume und dem idealen Wahrscheinlichkeitsfaktor besteht. Im dargestellten Bereich bewegt sich dieser zwischen 40% und 50%. Kennen die Agenten das gesamte Verkehrsnetz, d.h. dieses entspricht den Bewegungsräumen, so beträgt der Faktor 80%. Eine weitere Erkenntnis besteht darin, dass das System mit zunehmender Größe der Bewegungsräume sensibler auf Änderungen des Wahrscheinlichkeitsfaktors reagiert, was beispielsweise an der mittleren Tripdauer ersichtlich wird. Die Differenz zwischen dem kürzesten und dem längsten Trip steigt

Abbildung 24: Ergebnisse des Random Compass Routers 2D



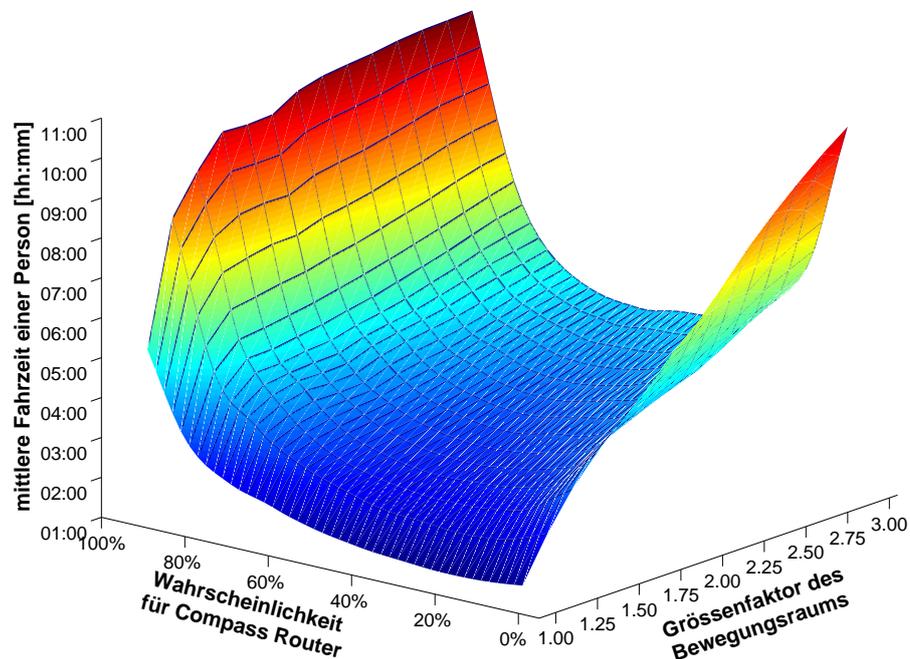
mit der Grösse der Bewegungsräume an, weshalb gleichzeitig auch die Wahl des optimalen Wahrscheinlichkeitsfaktors an Bedeutung gewinnt.

Als Erweiterung könnte der Router so ergänzt werden, dass die zufällige Wegewahl gezielt nur dann genutzt wird, wenn eine Person erkennt, dass sie sich in einer Endlosschleife bewegt. Dieses Verhalten lässt sich leicht nachvollziehen. Eine Person wählt eine Abzweigung üblicherweise kein zweites Mal, sofern sie erkannt hat, dass diese sie nicht zum gewünschten Ziel geführt hat.

6.6.5 Gegenüberstellung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Versuche mit dem Random Router, dem Tabu Router und dem Random Compass Router zusammengefasst dargestellt, um die deutlichen Unterschiede in der Qualität der erzeugten Routen aufzuzeigen. Für den Random Compass Router wurde stellvertretend ein Wahrscheinlichkeitsfaktor von 55% gewählt, welcher im betrachteten Wertebereich die kürzesten Routen produziert. Als Vergleichs- und Referenzwert wird zusätzlich das Resultat des relaxierten Zustandes des Testszenarios eingezeichnet. Da die

Abbildung 25: Ergebnisse des Random Compass Routers 3D



Least Cost Router signifikant bessere Resultate liefern, werden diese anschliessend getrennt ausgewertet.

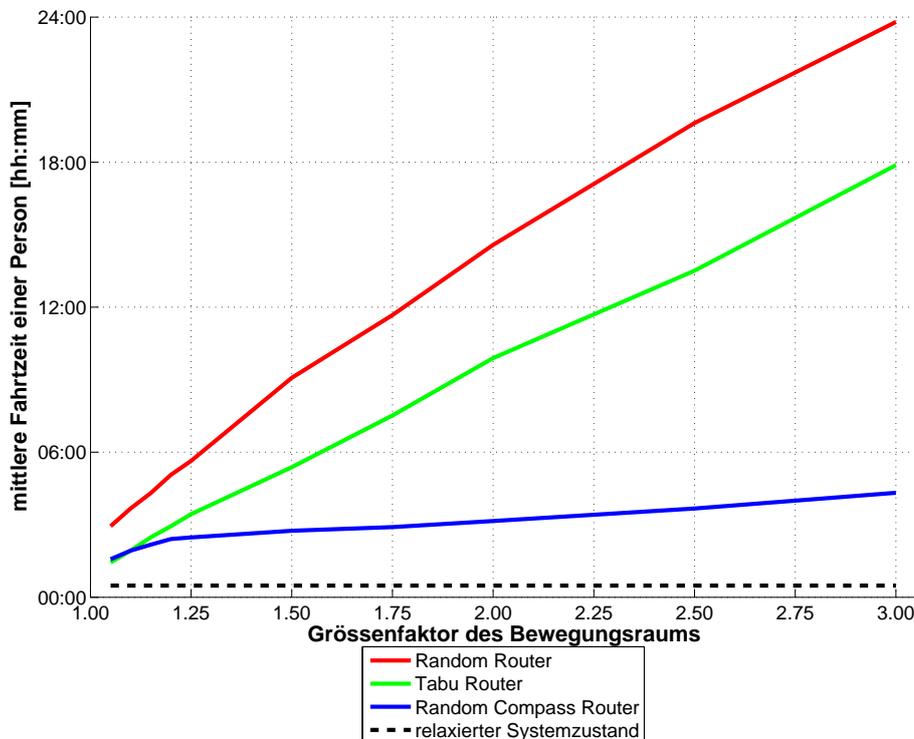
Wie in der Abbildung ersichtlich, liefern alle drei Router bereits bei sehr kleinen Bewegungsräumen deutlich schlechtere Ergebnisse als der Referenzwert.

6.6.6 Least Cost Router

Least Cost Router werden in beiden durchgeführten Versuchsreihen genutzt. Sie werden dabei in drei unterschiedlichen Varianten eingesetzt, welche sich in der Einstellung für die Zeitpunkte der Routenplanung unterscheiden. Je nach Variante plant eine Person ihre Route einmalig zu Tagesbeginn, am Ende einer Aktivität oder an jedem Verkehrsknotenpunkt neu.

In der ersten Versuchsreihe wird insbesondere das Verhalten der beiden während des Tages genutzten Least Cost Router untersucht. Der dritte Typ wird als Referenzwert herangezogen. Er ist in dieser Versuchsanordnung unabhängig von der Grösse der Bewegungsräume und liefert Routen, welche auf einem vollkommen unbelasteten Verkehrsnetz beruhen. Das Ergebnis eines Simulationslaufes mit diesem Router stellt eine Messlatte dar, mit der sich die beiden

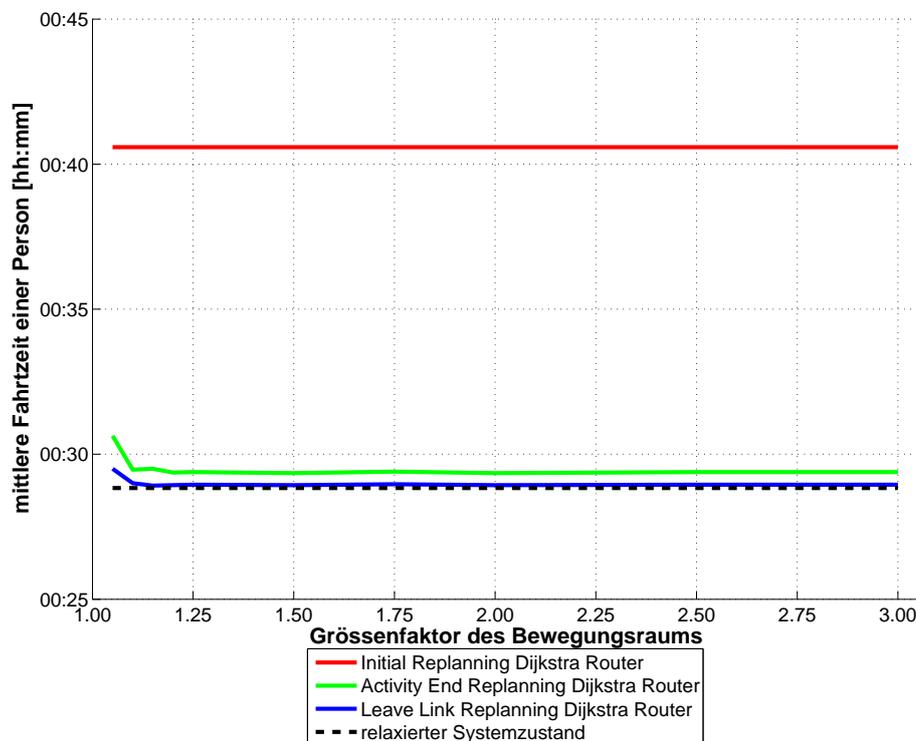
Abbildung 26: Gegenüberstellung der Router



anderen Varianten messen müssen. Liefern diese Ergebnisse, die schlechter sind, so ist dies gleichbedeutend damit, dass auch die gewählten Routen durch das Umplanen während des Tages negativ beeinflusst wurden. Sind die Resultate hingegen sehr ähnlich, so ist dies ein Indiz dafür, dass die Belastung des Verkehrsnetzes nur sehr gering ist. Trifft dies zu, so sind die einzelnen Streckenabschnitte zwar befahren, die Auslastung ist jedoch so gering, dass sich die Durchfahrtszeit im Vergleich zu vollkommen leeren Strassen nicht merklich erhöht hat. Somit würden die Personen nicht dazu veranlasst werden, alternative Routen zu wählen. Dies wiederum hätte zur Folge, dass sich die Routen trotz der Planungsoperationen während des Tages nicht verändern würden.

Die Ergebnisse der Least Cost Router aus der ersten Versuchsreihe werden in Abbildung 27 dargestellt. Gut ersichtlich ist der deutliche Abstand zwischen den beiden während des Tages planenden Routern und dem als Referenz fungierenden zu Tagesbeginn planenden Router. Das Ergebnis zeigt deutlich, dass durch die Nutzung der Routenplaner die mittlere Fahrdauer deutlich verringert werden kann. Der nur geringe Abstand zwischen den beiden Routern lässt sich dadurch erklären, dass im genutzten Testszenario die mittlere Distanz zwischen zwei Aktivitäten sehr kurz ist. Diese Strecke kann üblicherweise innerhalb von kurzer Zeit zurückgelegt werden. Da sich der Zustand des Verkehrssystems in einem solchen Zeitraum in der Regel nur sehr

Abbildung 27: Vergleich der Least Cost Router



geringfügig verändert, basieren die Planungsoperationen der Router auf nahezu identischen Daten. Als Folge daraus, erzeugen sie häufig dieselben oder zumindest sehr ähnliche Routen.

Ebenfalls gut zu erkennen ist die Tatsache, dass die beiden Router nahezu ebenso kurze Fahrzeiten erzeugen, wie die Simulation in einem relaxierten Systemzustand generiert. Daraus resultiert die Fragestellung, inwiefern sich dieses Verhalten auch in hoch belasteten Verkehrsnetzen beobachten bzw. reproduzieren lässt. Da für deren Beantwortung eine Vielzahl an Simulationsläufen mit unterschiedlichen Szenarien notwendig ist, kann diese im Rahmen dieser Arbeit nur als mögliches, zukünftiges Forschungsgebiet aufgezeigt werden.

Wie ferner in der Abbildung ersichtlich, besteht praktisch keine Abhängigkeit zwischen der Qualität der erstellten Routen und der Grösse der Bewegungsräume. Diese Beobachtung lässt sich dadurch erklären, dass das Verkehrsnetz durch die gleichmässige Verteilung des Verkehrs auf Haupt- und Nebenstrasse bereits genügend entlastet wird. Als Folge daraus enthält das Verkehrssystem keine überlasteten Abschnitte, die ein grossräumiges Umfahren erfordern würden. Eine detaillierte Analyse dieses Sachverhalts und seiner Ursachen ist jedoch mit weiteren, umfangreichen Untersuchungen und Simulationsläufen verbunden, welche den Umfang dieser Arbeit übersteigen würden.

Tabelle 1: Versuchsplan

Replanning Router Versuch	No Replanning	Initial Replanning Dijkstra Router	Activity End Replanning Dijkstra Router	Leave Link Replanning Dijkstra Router
1	40%	20%	30%	10%
2	20%	30%	40%	10%
3	10%	30%	50%	10%
4	50%	10%	10%	30%
5	40%	20%	20%	20%
6	40%	40%	20%	0%
7	30%	0%	10%	60%
8	30%	20%	30%	20%
9	10%	20%	40%	30%
10	30%	40%	20%	10%
11	20%	50%	20%	10%
12	10%	40%	10%	40%
13	40%	10%	30%	20%
14	30%	30%	10%	30%
15	0%	60%	20%	20%
16	60%	10%	10%	20%
17	20%	20%	30%	30%
18	20%	10%	40%	30%
19	0%	10%	40%	50%
20	30%	40%	0%	30%
21	40%	0%	40%	20%
22	20%	20%	20%	40%
23	20%	30%	20%	30%
24	30%	30%	40%	0%
25	0%	60%	30%	10%

Aufgrund dieser Erkenntnis über den vernachlässigbaren Einfluss der Bewegungsräume, werden diese für die zweite Versuchsreihe der Least Cost Router nicht mehr berücksichtigt. Stattdessen verfügen alle Agenten über vollkommene Kenntnis des Verkehrsnetzes. Die zentrale Frage der Untersuchungen besteht nun also darin, welchen Einfluss die Kombination unterschiedlicher Routingstrategien auf das Verkehrssystem hat und ob sich ein Wardrop Gleichgewicht einstellt.

Für die Untersuchung wird ein Versuchsplan mit 25 Versuchen herangezogen, welcher bei überschaubarem Berechnungsaufwand Rückschlüsse auf das Systemverhalten erlaubt. Anhand der Ergebnisse kann beurteilt werden, ob einzelne Bereiche bzw. Parameterkonstellationen weiterer Untersuchungen bedürfen. Die Beurteilung des Wardrop Gleichgewichts basiert dabei auf denselben Kriterien wie bei der Analyse der Ergebnisse des Referenzszenarios.

In den Abbildungen 28 bis 31 wird jeweils eine Routingstrategie den anderen gegenübergestellt. Ziel dabei ist es, festzustellen, ob sich Tendenzen erkennen lassen, anhand derer Theorien über das Systemverhalten aufgestellt werden können. Ein Beispiel wäre etwa eine signifikante

Tabelle 2: Ergebnisse des Versuchsplans

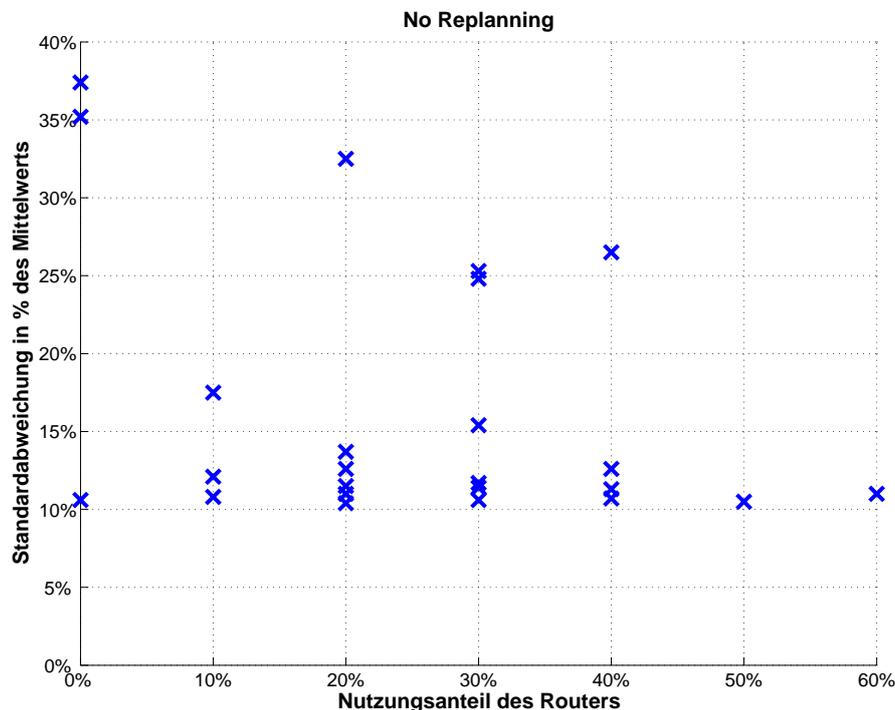
Ergebnisse			
Versuch	mittlere tägliche Fahrzeit einer Person [mm:ss]	gefundene Trips für die Auswertung des Wardrop Gleichgewichts	Standardabweichung der ausgewerteten Trips bezogen auf den Mittelwert in %
1	29:16	31	12,6
2	29:23	30	13,7
3	29:21	29	12,1
4	28:58	30	10,5
5	29:09	29	11,3
6	31:53	29	26,5
7	28:55	32	10,6
8	29:10	29	11,4
9	29:07	32	10,8
10	30:34	29	24,8
11	31:51	28	32,5
12	29:35	32	17,5
13	29:03	30	10,7
14	29:17	31	11,7
15	32:07	27	37,4
16	29:01	30	11,0
17	29:06	30	11,5
18	29:04	32	11,0
19	29:04	31	10,6
20	30:31	32	25,3
21	29:02	32	11,3
22	29:03	30	10,4
23	29:16	31	12,6
24	29:38	30	15,4
25	32:04	25	35,2

Veränderung des Wardrop Gleichgewichts bei besonders häufiger oder seltener Nutzung einer bestimmten Planungsstrategie.

Bei der Betrachtung der Diagramme zeigt sich ein konträres Bild. Jene Strategie, bei der einmalig zu Tagesbeginn die Fahrtroute festgelegt wird, zeigt ein gänzlich anderes Verhalten als die anderen drei Verfahren und lässt ein Verhaltensmuster erkennen. Je mehr Personen diese Strategie anwenden, desto grösser sind die Schwankungen der Fahrzeiten zwischen zwei Lokalitäten und desto weiter entfernt ist der Systemzustand von einem Wardrop Gleichgewicht.

Im Gegensatz dazu zeigt sich, dass die anderen drei Routenwahlverfahren bei hohem Nutzungsgrad in der Bevölkerung jeweils ähnlich gute Ergebnisse erzielen. Dies korreliert mit der Tatsache, dass mit diesen Verfahren auch ähnlich kurze mittlere Fahrzeiten erreicht werden.

Abbildung 28: Versuchsauswertung No Replanning

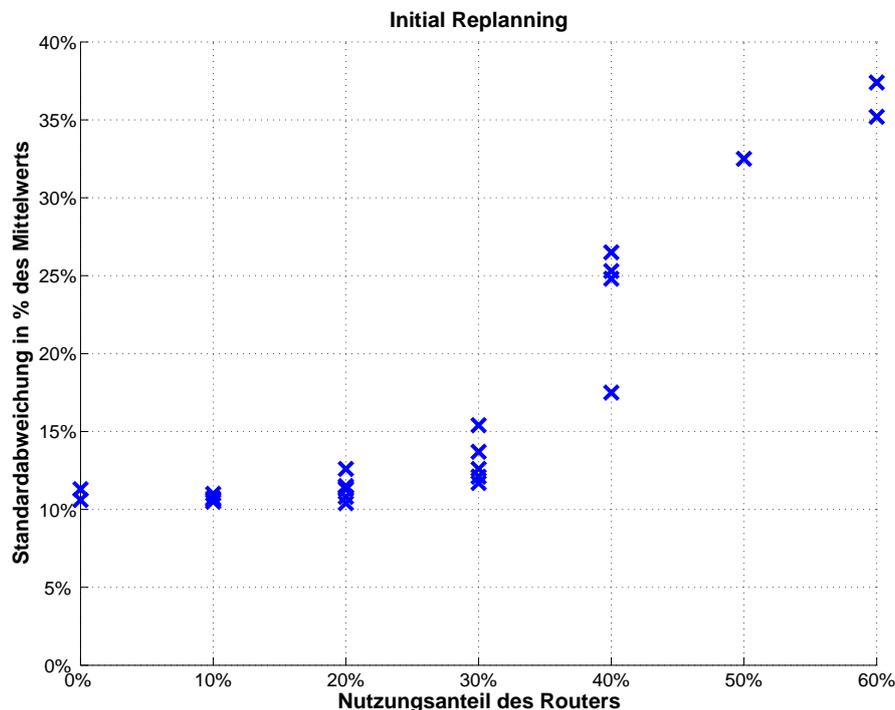


Um diese These zu prüfen, wird im nächsten Schritt jede dieser Strategien einzeln mit dem täglich nur einmalig genutzten Routenwahlverfahren verglichen. Daraus ergeben sich drei weitere Testreihen, deren Ergebnisse in Abbildung 32 dargestellt werden.

Werden die Pläne des relaxierten Systemzustandes mit jenen des Initial Replanning Routers vermischt, so steigen die mittleren Fahrzeiten der Personen annähernd linear mit dem Anteil des Routers.

Die beiden während des Tages genutzten Routenwahlverfahren zeigen ein deutlich abweichendes Verhalten, weisen jedoch untereinander wiederum kaum Unterschiede auf. Bis zu einer 40%igen Nutzung des Initial Replanning Routers bleiben die mittleren Fahrzeiten nahezu konstant. Nimmt dessen Nutzung noch weiter zu, so zeichnet sich eine nahezu lineare Zunahme der gemittelten Fahrzeiten ab. Dieses Verhalten könnte dadurch hervorgerufen werden, dass die während des Tages genutzten Router in begrenztem Masse in der Lage sind, Schwankungen in der Auslastung des Verkehrsnetzes auszugleichen. Ist beispielsweise ein Streckenabschnitt bereits aufgrund jener Personen überlastet, welche einen Initial Replanning Router verwenden, so werden die restlichen Personen diesen Umstand erkennen und das betreffende Strassenstück umfahren. Eine Auswertung des Wardrop Gleichgewichts für diese beiden Routenwahlverfahren zeigt, dass dieses für kleine Anteile des Initial Replanning Routers ebenfalls nahezu unverändert bleibt.

Abbildung 29: Versuchsauswertung Initial Replanning Dijkstra Router



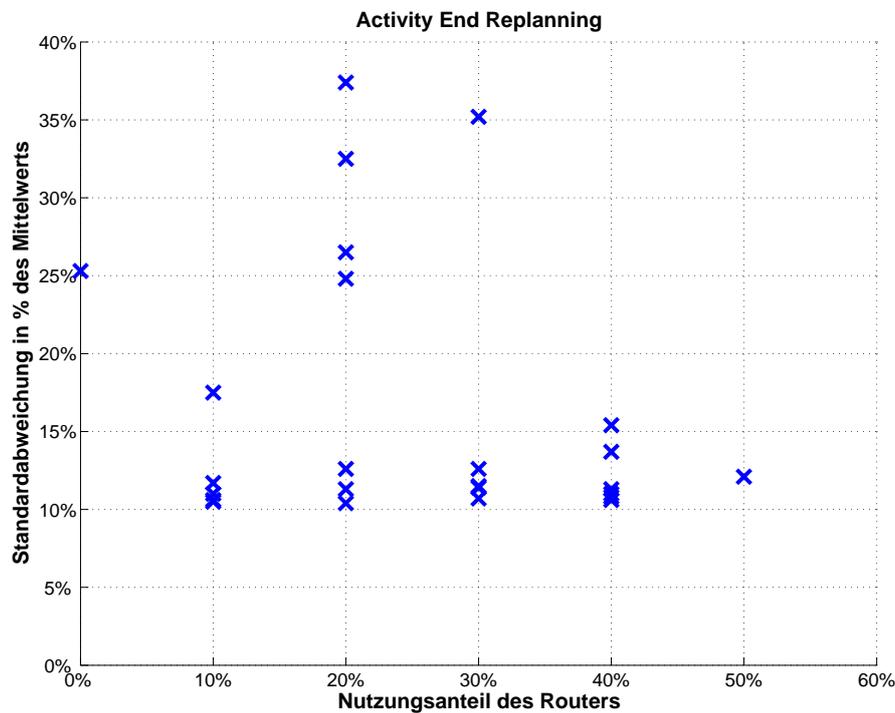
Basierend auf diesen beiden Ergebnissen kann die These aufgestellt werden, dass das Verkehrssystem in eingeschränktem Umfang in der Lage ist, trotz in begrenzter Menge vorhandener Störfaktoren einen nahezu optimalen Zustand zu erreichen. In diesem Zusammenhang können beispielsweise jene Personen als Störquellen betrachtet werden, die ihre Routen unabhängig vom gegenwärtigen Verkehrsgeschehen festlegen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass eine ausreichende Zahl an Personen Routenwahlverfahren nutzt, welche den aktuellen Zustand des Systems berücksichtigen.

Inwiefern diese Theorie auf andere Szenarien übertragbar ist, dieses Verhalten mit der Auslastung des Systems zusammenhängt und auch bei anderen Versuchsszenarien beobachtet werden kann, stellt eine interessante Fragestellung für zukünftige Untersuchungen dar.

7 Fazit

Aufgabenstellungen aus dem Bereich der Verkehrsplanung sind häufig sehr komplex und beschäftigen sich unter anderem mit der optimalen Gestaltung von Verkehrssystemen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss von unterschiedlichen Wissensständen von Personen in einem

Abbildung 30: Versuchsauswertung Activity End Replanning Dijkstra Router

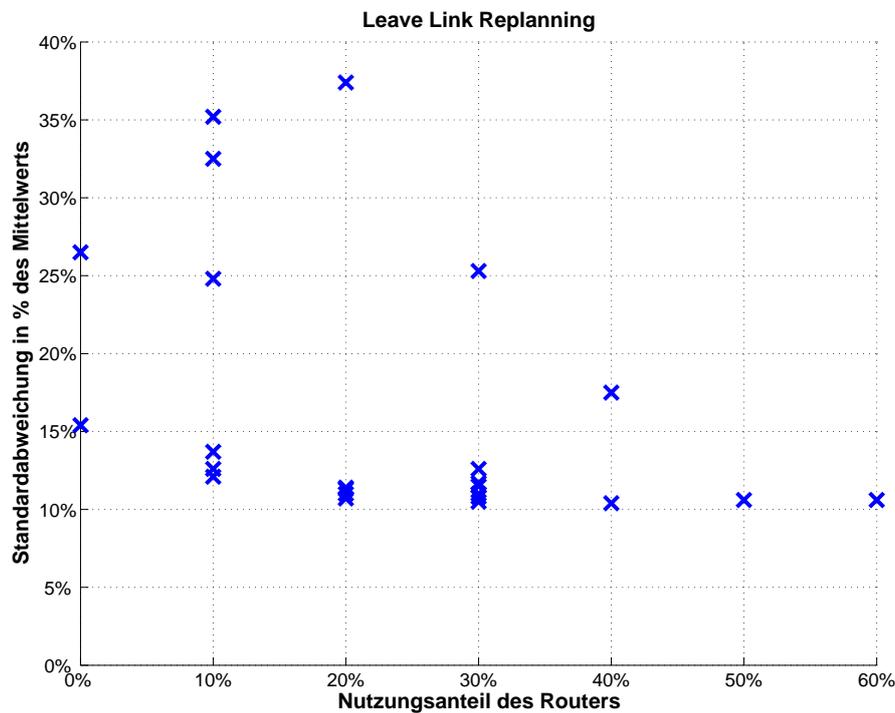


Verkehrssystem auf dessen Systemzustand untersucht. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Wissensmodelle entworfen, implementiert und im Zuge von Versuchen verifiziert. Aus verkehrplanerischer Sicht wurden die Wissensmodelle dahingehend beurteilt, inwiefern sie sich dafür eignen, ein Verkehrssystem in einen möglichst optimalen Zustand zu versetzen und stabil zu erhalten.

Als Besonderheit wurden die Modelle so umgesetzt, dass die Routenwahl interaktiv im Tagesverlauf erstellt und angepasst werden kann. Im Gegensatz zum üblicherweise iterativen Vorgehen von Simulationen mit dem MATSim Toolkit ergeben sich so verschiedene zusätzliche Möglichkeiten. Der zentrale Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass sich die simulierten Agenten direkt beeinflussen können und somit ihre Entscheidungen vom Verhalten der anderen abhängig machen können. Dies erlaubt es, zukünftig auch interessante Fragestellungen zu untersuchen, welche sich etwa mit den Reaktionen eines Systems auf plötzliche Störeinflüsse beschäftigen.

Anhand der Resultate der durchgeführten Simulationen konnten erste Aussagen über das Verhalten der Wissensmodelle sowie deren Tauglichkeit für die Routenplanung getätigt werden. Eine wesentliche Erkenntnis besteht darin, dass die interaktiv während des Tages agierenden Routenwahlverfahren dank ihrer Kenntnis über den Zustand des Verkehrssystems in der Lage

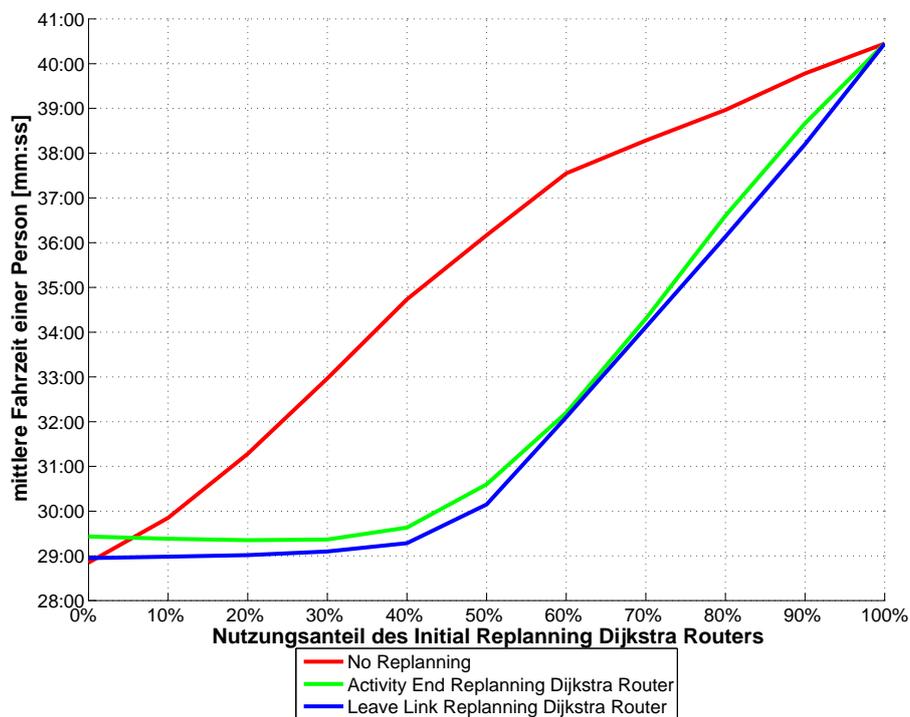
Abbildung 31: Versuchsauswertung Leave Link Replanning Dijkstra Router



sind, sehr gute Routen erzeugen zu können. Durch Auswertungen der Fahrzeiten zwischen Lokalitäten entsprechend den Anforderungen eines Wardrop Gleichgewichts konnte überdies gezeigt werden, dass deren Schwankungsbreite verglichen mit anderen Routenwahlverfahren sehr gering ist. Weiterführende Versuche haben gezeigt, dass sich das genutzte Testscenario bei Vorhandensein eines hohen Anteils solcher interaktiven Router positiv auf die Systemstabilität auswirken kann.

Basierend auf den durchgeführten Analysen der Simulationsergebnisse wurde überdies eine Reihe von denkbaren, weiterführenden Untersuchungen identifiziert und beschrieben, welche weitere interessante Erkenntnisse erhoffen lassen. Unter Verwendung der Ergebnisse dieser Arbeit, den entwickelten Wissensmodelle und den damit verbundenen Erweiterungen am MAT-Sim Toolkit können diese Untersuchungen problemlos zu einem späteren Zeitpunkt mit neu gesetztem Forschungsfokus durchgeführt werden.

Abbildung 32: Einfluss des Nutzungsgrades des Initial Replanning Dijkstra Router



8 Literatur

Balmer, M. (2007) Travel demand modeling for multi-agent traffic simulations: Algorithms and systems, Dissertation, ETH Zürich, Zürich, Mai 2007.

Balmer, M., M. Rieser, K. Meister, D. Charypar, N. Lefebvre, K. Nagel und K. W. Axhausen (2008) MATSim-T: Architektur und Rechenzeiten, Vortrag: *Heureka '08*, Stuttgart, März 2008.

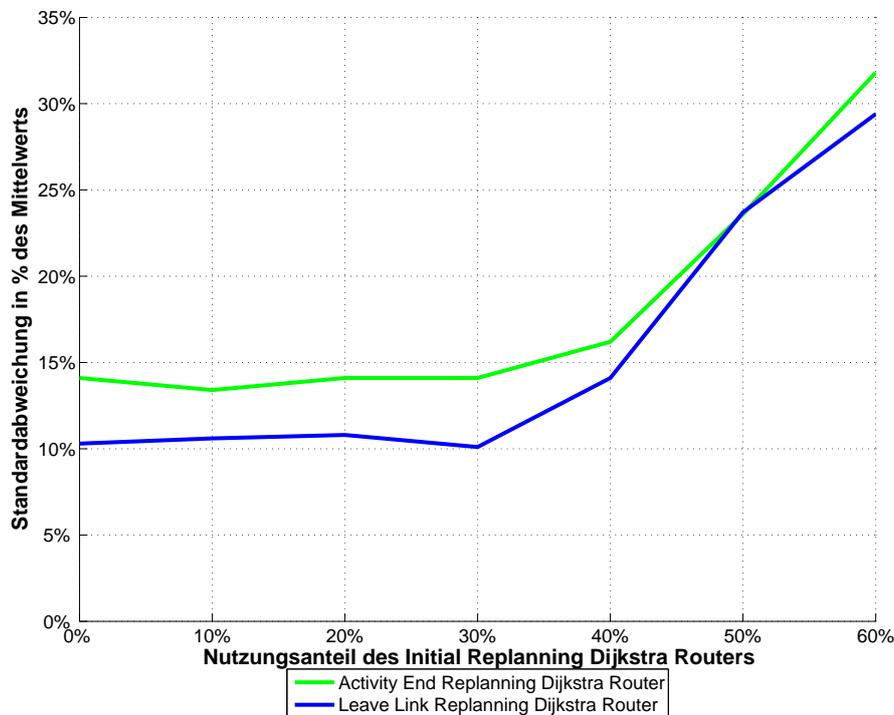
Bender, K. und F. Schiller (2009) Vorlesungsskript Modellbildung und Simulation - Teil 1: Grundlagen, Januar 2009, http://www.itm.tum.de/downloads/27_MouSi_Skript_Kapitel1_080429_komplett.pdf.

Biethahn, J., A. Lackner und M. Range (2004) *Optimierung und Simulation*, Oldenbourg, München.

Bossel, H. (2004) *Systeme, Dynamik, Simulation: Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*, Books on Demand, Norderstedt.

Bowman, J. L., M. A. Bradley, Y. Shiftan, T. K. Lawton und M. E. Ben-Akiva (1999) Demon-

Abbildung 33: Auswirkung des Nutzungsgrades des Initial Replanning Dijkstra Router auf das Wardrop Gleichgewicht



stration of an activity based model system for portland, in H. Meersman, E. van de Voorde und W. Winkelmanns (Hg.) *World Transport Research*, Bd. 3, 171–184, Pergamon.

Brychta, P. und K. Müller (2004) *Technische Simulation*, Vogel Buchverlag, Wuerzburg.

Cetin, N. (2005) Large-scale parallel graph-based simulations, Dissertation, ETH Zürich, Zürich.

Charypar, D., K. W. Axhausen und K. Nagel (2007) Event-driven queue-based traffic flow microsimulation, *Transportation Research Record*, **2003**, 35–40.

Charypar, D. und K. Nagel (2005) Generating complete all-day activity plans with genetic algorithms, *Transportation*, **32** (4) 369–397.

Ciari, F., M. Balmer und K. W. Axhausen (2007) Mobility tool ownership and mode choice decision processes in multi-agent transportation simulation, Vortrag: *7th Swiss Transport Research Conference*, Ascona, September 2007.

de Romph, E. (1994) A dynamic traffic assignment model - theory and application, Dissertation, Technische Universität Delft, Delft.

Eymann, T. (2003) *Digitale Geschäftsagenten - Softwareagenten im Einsatz*, Springer, Berlin.

- Ferber, J. (2001) *Multiagentensysteme: Eine Einführung in die Verteilte Künstliche Intelligenz*, Addison-Wesley, München.
- Friedrich, M. (2002) Analyse und Optimierung von Verkehrsnetzen im IV und ÖV, *Schriftenreihe*, **14**, Lehrstuhl für Verkehrs- und Stadtplanung, Technische Universität München, München.
- Friedrich, M. und T. Haupt (2002) Verkehrsplanung im Internet, Tagungsband der Jahrestagung 2002 des Arbeitskreises Verkehr der Deutschen Gesellschaft für Geographie, in A. Kagermeier, T. J. Mager und T. W. Zängler (Hg.) *Mobilitätskonzepte in Ballungsräumen*, Bd. 2 von *Studien zur Mobilitäts- und Verkehrsforschung*, 213–226, Verlag MetaGIS Infosysteme, Mannheim.
- Friedrich, M., I. Hofsäss, K. Nökel und P. Vortisch (2000) Umlegung zeitlich differenzierter Nachfragematrizen: ein dynamisches Verfahren für Verkehrsplanung und Telematik, in K. J. Beckmann (Hg.) *Tagungsband zum 1. Aachener Kolloquium Mobilität und Stadt*, Bd. 69 von *Schriftenreihe Stadt Region Land*, 99–109, Institut für Stadtbauwesen und Strassenverkehr (ISB), RWTH Aachen, Aachen.
- Friedrich, M. und P. Vortisch (2005) Verfahren zur dynamischen Verkehrsumlegung - Ein methodischer Überblick, *Straßenverkehrstechnik*, **03** (03) 128–144.
- Gerdes, I., F. Klawonn und R. Kruse (2004) *Evolutionäre Algorithmen - Genetische Algorithmen, Strategien und Optimierungsverfahren, Beispielanwendungen*, Vieweg, Wiesbaden.
- Heinrich, G. und J. Grass (2006) *Operations Research in der Praxis: Anwendungen, Modelle, Algorithmen und JAVA-Programme*, Oldenbourg, München.
- Holland, J. H. (1992) *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*, MIT Press, Cambridge.
- Holler, M. und G. Illing (2005) *Einführung in die Spieltheorie*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Kemper, C. (2006) Dynamische Simulation des Verkehrsablaufs unter Verwendung statistischer Verflechtungsmatrizen, Dissertation, Leibnitz Universität Hannover, Hannover.
- Kirchhoff, P. (2002) *Städtische Verkehrsplanung - Konzepte, Verfahren, Massnahmen*, B. G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden.
- Klein, H.-J. (2007) *Versuchsplanung DoE - Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik*, Oldenbourg, München.
- Kleppmann, W. (2008) *Taschenbuch Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren*, Carl Hanser Verlag, München, Wien.

- Klügl, F. (2000) Aktivitätsbasierte Verhaltensmodellierung und ihre Unterstützung bei Multi-agentensimulationen, Dissertation, University of Wuerzburg, Wuerzburg.
- Korda, M. (2005) *Städtebau - Technische Grundlagen*, B. G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden.
- Koza, J. R. (1992) *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press, Cambridge.
- Koza, J. R. (1994) *Genetic Programming II: Automatic Discovery of Reusable Programs*, MIT Press, Cambridge.
- Krajzewicz, D. und P. Wagner (2004) Ansätze zur kognitiven Simulation eines Autofahrers, *MMI Interaktiv*, **07**, 84–97, Juni 2004.
- Kramer, U. und M. Neculau (1996) *Simulationstechnik*, Carl Hanser Verlag, München, Wien.
- Liebl, F. (1995) *Simulation - Problemorientierte Einführung*, Oldenbourg, München, Wien.
- Meister, K., M. Rieser, F. Ciari, A. Horni, M. Balmer und K. W. Axhausen (2008) Anwendung eines agentenbasierten Modells der Verkehrsnachfrage auf die Schweiz, Vortrag: *Heureka '08*, Stuttgart, März 2008.
- Nagel, K. und M. Schreckenberg (1992) A cellular automaton for freeway traffic, *Journal de Physique I*, **2** (1992) 2221–2229.
- Papageorgiou, M. (1996) *Optimierung - Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*, Oldenbourg, München, Wien.
- Peeta, S. und A. K. Ziliaskopoulos (2001) Foundations of dynamic traffic assignment: The past, the present and the future, *Networks and Spatial Economics*, **1**, 233–265.
- Raffel, W.-U. (2005) Agentenbasierte Simulation als Verfeinerung der Diskreten-Ereignis-Simulation unter besonderer Berücksichtigung des Beispiels fahrerloser Transportsysteme, Dissertation, Free University of Berlin, Berlin.
- Raney, B. (2005) Learning framework for large-scale multi-agent simulations, Dissertation, ETH Zürich, Zürich.
- Ranjitkar, P., T. Nakatsuji und A. Kawamura (2005) Car-following models: An experiment based benchmarking, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, **6**, 1582–1596.
- Scholz, G. und J. Scholz (2004) *Die Verkehrsnachfrage - Ein multistabiles System*, Books on Demand, Norderstedt.

- Sonar, T. (2001) *Angewandte Mathematik, Modellbildung und Informatik: Eine Einführung für Lehramtsstudenten, Lehrer und Schüler*, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden.
- Vrtic, M., P. Fröhlich und K. W. Axhausen (2003) Schweizerische Netzmodelle für Strassen- und Schienenverkehr, in T. Bieger, C. Lässer und R. Maggi (Hg.) *Jahrbuch 2002/2003 Schweizerische Verkehrswirtschaft*, 119–140, Schweizerische Verkehrswissenschaftliche Gesellschaft (SVWG), St. Gallen.
- Wardrop, J. G. (1952) Some theoretical aspects of road traffic research, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, **1** (3) 325–362.
- Wöhe, G. (2002) *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, Verlag Vahlen, München.
- Wiedemann, R. (1974) Simulation des Verkehrsflusses, Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Zajicek, J. (2001) Online-Simulation: Eine Chance für den innerstädtischen Verkehr, *It's T.I.M.E. Technology. Innovation. Management. Engineering. - Ein fachübergreifendes Journal für die angewandte Wissenschaft*, **1**, 33–36.

Eidesstattliche Erklärung

Simulation informationsorientierter Verkehrssysteme

Implementation von Wissensmodellen mit MATSim

Ich versichere, dass die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe von mir angefertigt wurde, und ich bis auf die in der Arbeit angegebenen Hilfsmittel keine anderen verwendet habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäss anderen Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Satteins, den 25. Januar 2009

Unterschrift: