

N. Knaak, R. Meyer, B. Page, H. Deecke

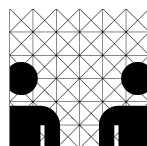
Agentenbasierte Simulation nachhaltiger Logistikkonzepte für Stadtkurierdienste

Methoden, Werkzeuge und Anwendung

Bericht des Forschungsprojekts
Nachhaltige Logistikkonzepte für Stadtkurierdienste

Projektlaufzeit: 1.4.2000 – 30.9.2003

Gefördert durch die Behörde für Wissenschaft und Forschung der
Freien und Hansestadt Hamburg im Rahmen des Forschungsfonds
„Ökologie und Nachhaltige Entwicklung“



Dieser Bericht basiert auf den folgenden Dokumenten und Veröffentlichungen:

- Antrag für das Projekt „Nachhaltige Logistikkonzepte für Stadtkurierdienste (Page/Reick 1999)
- Erster Projekt-Zwischenbericht (Deecke/Meyer/Page 2000)
- Zweiter Projekt-Zwischenbericht (Knaak/Meyer/Page 2002a)
- Projekt-Endbericht (Knaak/Meyer/Page/Deecke 2004)
- Diplomarbeit „Konzepte der agentenbasierten Simulation und ihre Umsetzung im Rahmen des Simulationsframeworks DESMO-J“ von Nicolas Knaak (Knaak 2002)
- Beitrag „Agentenbasierte Simulation mit einem objektorientierten Framework in Java“ zur Tagung ASIM 2002 (Knaak/Meyer/Page 2002)
- Beitrag „Werkzeuggestützte Kalibrierung agentenbasierter Simulationsmodelle“ zur Tagung „Simulation und Visualisierung 2004“ (Bachmann/Gehlsen/Knaak 2004)

Zusammenfassung

Dieser Bericht faßt die Ergebnisse des Projektes „Nachhaltige Logistikkonzepte für Stadtkurierdienste“ zusammen. Ziel des Projekts war es, mit Hilfe von Simulationen neue Kurierdienst-Organisationsformen auf ihre ökologische Effizienz bei gleichzeitiger Wettbewerbsfähigkeit und sozialer Verträglichkeit hin zu evaluieren. Als Methode wurde hierfür die agentenbasierte Simulation gewählt, die sich durch eine mikroskopische Modellierungsperspektive auszeichnet, wobei neben explizitem Raumbezug die Verhaltensbeschreibung autonomer und zielgerichtet handelnder Akteure (Agenten) im Vordergrund steht. Aufbauend auf dem ereignisdiskreten Simulator DESMO-J wurde in der Projektlaufzeit ein Framework für agentenbasierte Modellierung und Simulation (FAMOS) entwickelt, das die Grundlage der implementierten Modelle bildet.

Abstract

This report summarizes the results of the project „Sustainable logistics concepts for city courier services“. The goal of this project was to simulate new forms of organisations for courier services and evaluate them with regard to ecological efficiency, economical competitiveness, and social acceptance. For this purpose, the approach of agent-based simulation was applied. Agent-based simulation adopts a microscopic view of the system under consideration, focussing on describing the behaviour of autonomous goal-oriented actors (agents) in an explicitly represented spatial environment. During the project, a framework for agent-based modelling and simulation (FAMOS) was developed based on the discrete-event simulator DESMO-J. This framework was then used to implement the simulation models.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Aspekte der Entwicklung von Stadtkuriermärkten	8
3	Organisationsstrukturen von Stadtkurierdiensten	10
3.1	Die Vermittlung von Aufträgen	11
3.2	Freigestellte Kurierfahrer	13
4	Alternative Logistikkonzepte	13
4.1	„Hub and Shuttle“-Systeme	14
4.1.1	Modellspezifikationen und -anforderungen	14
4.2	Die „Innen/Außen“-Strategie	15
4.3	Fixierte Austauschpunkte	17
4.3.1	Modellspezifikationen und -anforderungen	17
4.4	Varianten der Organisationsmodelle	19
4.4.1	Verhältnis von motorisierten Kurieren und Bikern	19
4.4.2	Operative Verzögerung	19
4.4.3	Vermittlung versus Disposition bei der Auftragsvergabe	19
4.4.4	Erhöhung des vermittelten Sendungsaufkommens	20
5	Datensammlung und Aufbereitung	21
5.1	Befragte Kurierdienste und Kooperationsbereitschaft	21
5.2	Aufbereitung der empirischen Daten	22
6	Agentenbasierte Simulation mit FAMOS	24
6.1	Konzepte der agentenbasierten Simulation	24
6.2	Der diskrete Simulator DESMO-J als Grundlage von FAMOS	26
6.3	Das Simulationsframework FAMOS	26
6.3.1	Agenten in FAMOS	27
6.3.2	Modellierung von Organisation und Kommunikation	30
6.3.3	Ein allgemeines Rahmenwerk zur Raummodellierung	32

7	Agentenbasierte Modellierung und Simulation von Stadtkurierdiensten	36
7.1	Festlegung relevanter Ein- und Ausgangsgrößen	36
7.2	Modellierung des Status Quo.....	37
7.2.1	Umweltmodellierung.....	38
7.2.2	Organisation und Kommunikation	38
7.2.3	Modellierung der Kuriere.....	41
7.2.4	Modellierung der Zentrale	45
7.3	Modellierung alternativer Logistikkonzepte	47
7.3.1	Hub and Shuttle.....	47
7.3.2	Innen/Außen.....	48
7.4	Implementation im Simulationsframework FAMOS / DESMO-J	49
8	Durchführung und Auswertung der Simulationsexperimente	53
8.1	Modellvalidierung und –kalibrierung.....	53
8.2	Vergleich einer Vermittlungs- und Dispositionsstrategie	56
8.3	Vergleich alternativer Logistikkonzepte.....	58
8.4	Umsetzungspotenzial	62
9	Fazit und Ausblick	63
10	Literatur	66
11	Anhang: Simulationsreports.....	68
11.1	Kurierbezogene Daten.....	68
11.2	Auftragsbezogene Daten	71

1 Einleitung

Stadtkurierdienste haben in den vergangenen Jahren eine Phase stürmischer Expansion durchlebt. Sie sind in vielen Großstädten wichtiger Bestandteil des Güter- und Wirtschaftsverkehrs. Beispielsweise arbeiteten Ende der 90er Jahre in Hamburg mehr als 100 Kurier-, Express- und Paketdienste mit insgesamt ca. 3500 Kurieren. Die tägliche Kilometerleistung hat konjunkturabhängig allein im Hamburger Stadtgebiet eine sechsstellige Größenordnung, womit entsprechende Emissionen einhergehen.

Kurierdienste unterscheiden sich von Expressdiensten in der durchgehenden Begleitung der Sendung durch eine einzelne Person, den Kurier. Die Folge ist ein hoher Verkehrsaufwand pro Sendung, der organisatorisch prinzipiell durch Sendungsbündelung reduziert werden könnte. Mit der Einführung entsprechender Logistikkonzepte würde sich die organisatorische Struktur der Kurierdienste derjenigen der Expressdienste annähern. Eine solche Optimierung der Tourenplanung wäre unter Umweltgesichtspunkten grundsätzlich zu befürworten, weil dadurch Verkehr reduziert würde. Jedoch sind bei der Reorganisation von Stadtkurierdiensten einige Besonderheiten zu beachten:

- Neben motorisierten Kurieren gibt es Fahrradkuriere, die keine Schadstoffemissionen und praktisch keinen Energieverbrauch verursachen. Sie beanspruchen außerdem weniger Straßenfläche zum Fahren und Parken und kommen näher an die Abhol- und Lieferpunkte heran. Aus ökologischer Sicht sollte der Anteil von Fahrradkurieren ausgeweitet werden. Logistikkonzepte, die auf Sendungsbündelung beruhen, könnten jedoch den PKW-Anteil tendenziell erhöhen, da beim Fahrrad das Bündelungspotenzial aufgrund von Gewicht und Volumen der Sendungen begrenzt ist.
- Kuriere sind in der Regel selbständige Unternehmer, die eine Monatspauschale an ihre Zentrale für die Vermittlung von Aufträgen entrichten. Die Vermittlung und Vergabe von Aufträgen ist daher ein sensibler Vorgang, der jahrelang bewährten Regeln folgt, an die sich die Zentrale und alle Kuriere halten. Die Regeln sorgen dafür, dass kein Kurier bevorzugt oder benachteiligt wird, und stellen gleichzeitig die Servicequalität für den Kunden sicher. Jedes alternative Logistikkonzept muss daher ebenfalls eine gerechte Auftragsverteilung garantieren.
- Eine Besonderheit der Kurierdienstleistung ist die Tatsache, dass die Sendung auf dem schnellsten Wege befördert wird. Das bedeutet in der Praxis, dass der Kurier, der den Auftrag übernommen hat, z.B. innerhalb von 30 Minuten beim Versender eintrifft und von dort ohne wesentliche Umwege zum Empfänger fährt. Sendungsbündelung, die ja normalerweise mit Zeitverzögerungen einhergeht, darf diese Besonderheit der Kurierdienstleistung nicht wesentlich gefährden.
- Die Servicequalität besteht für den Kunden nicht immer nur in der Schnelligkeit oder Pünktlichkeit, sondern in einigen Fällen auch im eigentlichen „Kurierprin-

zip“, also der persönlichen Begleitung der Sendung vom Abhol- zum Lieferpunkt. Hier spielen Zuverlässigkeitsfragen eine Rolle. Es kommt sogar vor, dass Kunden einen bestimmten Kurier wünschen, etwa weil sich der Kurier auf dem Gelände des Absenders oder Empfängers schon auskennt oder weil sie eine besonders wichtige Sendung nur einer bewährten Person anvertrauen wollen. Alternative Logistikkonzepte dürfen diese Art der Servicequalität nicht ausschließen.

Seit einiger Zeit deuten sich Sättigungstendenzen der Stadtkuriermärkte an, die einen Druck in Richtung Rationalisierung und Erschließung weiterer Marktsegmente ausüben.

Ziel des im Folgenden beschriebenen Projektes ist es, bereits im Vorfeld dieser Entwicklung mit Hilfe von Simulationen mögliche neue Organisationsformen auf ihre ökologische Effizienz bei gleichzeitiger Wettbewerbsfähigkeit und sozialer Verträglichkeit hin zu evaluieren. Als Methode kommt hier die so genannte agentenbasierte Simulation zum Einsatz. Diese zeichnet sich durch ihre mikroskopische Modellierungsperspektive aus, wobei neben explizitem Raumbezug die Verhaltensbeschreibung autonomer und zielgerichtet handelnder Akteure (Agenten) im Vordergrund steht. Dieser Ansatz erscheint zur Modellierung von Stadtkurierdienste besonders angemessen, da deren Arbeitsabläufe durch geringe zentrale Kontrolle und hohe Autonomie und Eigenverantwortlichkeit der beteiligten Akteure (Kuriere und Funker) geprägt sind.

Im folgenden Bericht wird in Kapitel 2 zunächst auf Aspekte der Entwicklung von Stadtkuriermärkten als Motivation zur Untersuchung neuartiger Logistikkonzepte eingegangen. Anschließend wird in Kapitel 3 die – zumindest für Hamburg typische – Organisationsform von Stadtkurierdiensten als Vermittlungsagentur erläutert, der in Kapitel 4 die alternativen Logistikkonzepte „Hub and Shuttle“ und „Innen/Außen“ gegenüber stehen. Nach Betrachtungen zur Datensammlung und Aufbereitung in Kapitel 5 folgt in Kapitel 6 ein Exkurs zur Methode der agentenbasierten Simulation. In diesem Rahmen wird auch das in der Projektlaufzeit entwickelte Framework für agentenbasierte Modellierung und Simulation (FAMOS) vorgestellt, welches zusammen mit dem ereignisdiskreten Simulator DESMO-J die Grundlage zur Implementation der Kurierdienst-Modelle bildet.

In Kapitel 7 wird die konzeptuelle Modellierung und Implementation der Simulationsmodelle zur Untersuchung alternativer Logistikkonzepte beschrieben. Kapitel 8 thematisiert sowohl die Modellvalidierung und Kalibrierung als auch die Analyse der Simulationsergebnisse. Dabei steht einerseits die Untersuchung unterschiedlicher Strategien der Auftragsvergabe und andererseits ein Vergleich der derzeitigen Organisationsform mit den alternativen Logistikkonzepten im Vordergrund. Kapitel 9 schließt den Bericht mit Zusammenfassung und Ausblick ab.

2 Aspekte der Entwicklung von Stadtkuriermärkten

Bereits seit einigen Jahren ist das Wachstum der Stadtkuriermärkte in Hamburg merklich abgeflaut. Bei den Kurierdiensten entsteht ein Druck in Richtung Kosten senkender

Rationalisierung und der Erschließung neuer Marktsegmente. Die Situation wird dadurch verschärft, dass in näherer Zukunft ein Kernbereich des Stadtkuriergeschäfts in Hamburg, Beförderungsaufträge aus und für Medienbetriebe, durch die weiter fortschreitende Digitalisierung von Medienprodukten und die Verbesserung elektronischer Übertragungsmedien in größeren Teilen wegfallen wird.

Eine immer wichtiger werdende Restriktion stellt sich für Stadtkurierdienste durch die schlechter werdende städtische Verkehrssituation. Längere Fahrzeiten durch höhere Verkehrsdichten und längere Suchzeiten und -fahrten für das Abstellen der Fahrzeuge bei Abhol- und Zustellvorgängen beeinträchtigen die operative Funktionalität und betriebswirtschaftliche Effizienz von Stadtkurierdiensten. Kuriere werden in der Regel neben einer Anfahrtspauschale ausschließlich für die zurückgelegten Distanzen bezahlt und nicht wie bei den Taxis in einer Kombination aus Pauschale, strecken- und zeitbezogenen Preisbestandteilen. Hieraus erklärt sich zu einem großen Teil die besondere Betroffenheit von Stadtkurieren durch die Verkehrssituation.

Parallel bekommen benachbarte oder vergleichbare Märkte, die für Stadtkuriere ebenfalls interessant sind, wachsende Bedeutung. Zu nennen sind vor allem Beförderungs- und Logistikleistungen die durch den eCommerce ausgelöst werden: hier ist ein wachsender Anteil an Zustellungen von Gütern in Unternehmen und Privathaushalte zu beobachten. Auch die Auslieferung von fertig zubereiteten Essensgerichten, sog. „Pizza-Dienste“, ist für Stadtkuriere potentiell ein interessanter Markt.

Die weitere Liberalisierung der Briefpost wird die Stadtkuriermärkte nachhaltig verändern. Bereits in den siebziger Jahren hat die Entlassung der Paketbeförderung aus dem Postmonopol zu einem enormen Wachstum privater Paketdienste geführt. Eine ähnliche Entwicklung ist auch auf den Briefpostmärkten zu erwarten. Bisher ist lediglich die Beförderung von Briefsendungen ab 100g aufwärts vom Beförderungsmonopol der Post ausgenommen. Die Post hat die Briefpostzustellung für einige Bezirke in einem Modellversuch an private Unternehmen vergeben. In Hamburg ist dabei u.a. ein Stadtkurierunternehmen aktiv. Bereits jetzt können lizenzierte private Anbieter in der Briefbeförderung tätig werden, auch in Märkten, in denen die Briefpost nicht aktiv ist. So haben sich beispielsweise in etlichen Städten private Briefzusteller etabliert, die Briefe abholen und am gleichen Tag ausliefern, eigentlich ein klassisches Kuriergeschäft. Die Stadtkuriere konnten hier jedoch bisher kaum Fuß fassen. Alle Bemühungen, ähnliche Produkte zu geringeren Preisen anzubieten (z.B. Abholung am Vormittag – Zustellung am Nachmittag bzw. im Laufe des Tages), sind entweder aufgrund der geringen Resonanz eingestellt worden oder spielen eine absolut marginale Rolle bei den Stadtkurierdiensten.

Obwohl bei weitem noch nicht von einer Krise der Stadtkuriere gesprochen werden kann, deuten sich doch Probleme, Grenzen und Umwandlungsprozesse auf den städtischen Transportmärkten an, die mittelfristig die bisher erfolgreichen Kurierdienste in ihrer Ertragskraft oder sogar ihrer Existenz bedrohen können.

Eine der Hauptursachen dafür liegt in der bisherigen Produktionsform der Stadtkuriere mit ihren vergleichsweise hohen Kostenstrukturen, die die Stadtkuriere auf bestimmte

Marktsegmente des städtischen Eiltransports beschränkt und bis auf wenige Ausnahmen verhindern, dass Stadtkurierdienste an neuen Wachstumsmärkten partizipieren können.

Nicht zuletzt spielt auch die mangelnde wirtschaftliche Innovationsfähigkeit eine Rolle. Die geringe Kapitalkraft beschränkt die meisten Stadtkurierdienste auf Verbesserungen, die entweder keine zusätzlichen Kosten verursachen, oder bei denen höhere Kosten sich schnell durch höhere Erträge amortisieren. Ebenfalls aus diesem Grund sind kleinbetriebliche und mittelständische Stadtkurierdienste oftmals nicht in der Lage, höherwertige logistische Dienstleistungen zu entwickeln und anzubieten. Interessant sind in dieser Hinsicht Stadtkurierdienste, die durch Verkauf in andere Unternehmensgruppen integriert sind oder durch eigenes Wachstum eine entsprechende Größe erreicht haben.

3 Organisationsstrukturen von Stadtkurierdiensten

Die meisten Stadtkurierdienste sind als Vermittlungsagenturen ausgelegt. Die Fahrer arbeiten in der Regel als selbstständige Unternehmer. Nur bei wenigen, oftmals kleinen Kurierdienstunternehmen kommt es vor, dass Fahrer bei den Kurierdiensten angestellt sind. Die Vermittlungszentralen übernehmen gegen Entgelt das Marketing, die Auftragsannahme und -vermittlung sowie die kaufmännische Auftragsabwicklung, einschließlich des Inkasso für die Kurierfahrer. Einzelne Stadtkurierdienste übernehmen auch die Schulung von Kurierfahrern, da sie besonderen Wert auf ein bestimmtes Auftreten gegenüber den Kunden sowie ein gepflegtes äußeres Erscheinungsbild legen (Gewünschtes Auftreten und Erscheinungsbild differieren jedoch stark nach dem jeweiligen Kundentypus).

Der rechtliche Status der Fahrer als selbstständige Unternehmer hat zum Teil erhebliche Konsequenzen für die operativen Abläufe der Vermittlungszentralen. Probleme ergeben sich einmal in Bezug auf den sozialversicherungsrechtlichen Status der Kurierfahrer. Um Scheinselbstständigkeit zu vermeiden, muss der Vermittlungsprozess z.B. die Entscheidungsfreiheit der Unternehmer prinzipiell gewährleisten. D.h. Kurierfahrer dürfen nicht gezwungen werden, angebotene Aufträge anzunehmen. Dies ergibt insofern ein Problem für die Kurierdienste, da sie gegenüber den Kunden ein bestimmtes Serviceniveau, d.h. in der Regel die schnelle Abholung und Zustellung der zu befördernden Sendungen sicherstellen wollen.

Weiterhin ergibt sich eine wettbewerbsrechtliche Problematik. Die Kurierfahrer bieten Leistungen am Markt zu abgesprochenen Preisen und Transportbedingungen an. Rechtlich bilden sie damit ein Kartell. Mittlerweile sind Fahrervereinigungen offiziell als gesetzlich erlaubte Mittelstandskartelle anerkannt, jedoch gibt es nicht bei allen Stadtkurierdiensten derartige Fahrervereinigungen.

Fahrervereinigungen können für die operativen Abläufe der Kurierdienste eine wichtige Rolle spielen. Sie können beispielsweise durch intern verabredete Regeln Einfluss auf das Serviceniveau des Kurierdienstes nehmen (Höchstgrenzen für die Anzahl gleichzeitig übernommener Aufträge etc.) und bei Nichteinhaltung dieser Regeln Sanktionen

vereinbaren.

Auch üben sie eine wichtige Funktion aus, da sie den Marktzugang für Kurierfahrer für den jeweiligen Kurierdienst regulieren, indem sie die Anzahl der bei einer Kurierzentrale beschäftigten Fahrer festlegen. Die Anzahl der Fahrer entscheidet zusammen mit der Auftragsmenge maßgeblich über die Umsatz- und Ertragsmöglichkeiten der Fahrer Tätigkeit. Als Indikator für ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Aufträgen und Fahrern wird die durchschnittliche Vermittlungszeit, d.h. die Zeit zwischen Auftragseingang und der Vermittlung des Auftrags an einen Kurierfahrer, verwendet (Bei einem Kurierdienst wird eine Vermittlungszeit zwischen 6½ und 7 Minuten als gutes Verhältnis angesehen).

3.1 Die Vermittlung von Aufträgen

Der klassische Ablauf der Bearbeitung eines Auftrages beginnt damit, dass ein Auftraggeber in der Regel telefonisch einen Transportauftrag abgibt. Dieser wird so schnell wie möglich an einen Kurierfahrer vermittelt, der den Auftrag dann ausführt. Zu Stadtkuriertätigkeiten zählen aber auch regelmäßig anfallende Touren für einen oder mehrere Kunden oder Sendungen, die für einen bestimmten Zeitpunkt vorbestellt werden. Auch kommt es vor, dass einzelne Kurierfahrer für eine zunächst unbestimmte Anzahl von Aufträgen und Zeit von einem Kunden in Anspruch genommen wird.

Als Kurierfahrzeuge werden PKW, Kombis und LKW bis 3t, sowie Fahrräder (Biker) eingesetzt. Zur Kategorie der Biker werden auch Fahrer mit Motorrad oder Motorroller gezählt. Die Fahrzeugtypen bieten verschiedene Möglichkeiten, eine unterschiedliche Anzahl nach Volumen und Masse unterschiedlich großer Sendungsstücke zu befördern.

In den Kurierzentralen werden die eingehenden Aufträge in der überwiegenden Zahl an die Kuriere vermittelt. Eine Disposition, d.h. eine Zuordnung und Zuweisung von einzelnen Aufträgen an bestimmte Fahrer, findet dabei in der Regel nicht statt. Die gewöhnlich per Telefon eingehenden Aufträge werden elektronisch gespeichert. Bei einem Kurierdienst ist geplant, dass Kunden ihre Kurieraufträge per Internet in die Kurierzentrale übermitteln. Für einzelne Großkunden existiert bereits die Möglichkeit, ihre Aufträge per Internet direkt in die Vermittlung des Kurierdienstes einzugeben.

Nachdem der Auftrag erfasst ist, wird er zur Vermittlung freigegeben. Die Vermittler rufen die eingegangenen Aufträge über Sprechfunk aus. Darauf können sich die Kurierfahrer um diese Aufträge bewerben. Der erste Fahrer, der sich für einen Auftrag meldet, bekommt die Tour in der Regel zugesprochen.

Bei großen Kurierdiensten in Hamburg werden normalerweise zwei Vermittler und Vermittlungsbereiche (Bereich Ost und Bereich West) für die motorisierten Kuriere eingerichtet, da ansonsten der Vermittlungsprozess zu schwierig und der Sprechfunkverkehr zu umfangreich wird. Außerdem gibt es separate Fahrradvermittlungen, falls bei einem Kurierdienst viele Biker fahren. Wenn die Aufträge, für die von den Auftraggebern explizit Biker angefordert wurden, nach einer gewissen festgelegten Zeit nicht an einen Biker vermittelt wurden, dann werden sie automatisch auch den motorisierten

Kurierfahrern angeboten.

Die Kurierdienste unterscheiden sich danach, ob die Kurierfahrer im Normalfall mehrere Aufträge gleichzeitig bearbeiten dürfen. Bei Kurierdiensten, die besonderen Wert auf eine kurze Reaktionszeit legen, werden Touren nur dann zusammengelegt, wenn Engpässe auftreten, d.h. falls aufgrund ungewöhnlich hoher Auftragseingänge nicht genügend Fahrer zur Verfügung stehen, oder falls die Bearbeitungszeiten aufgrund der schlechten Verkehrssituation stark ansteigen.

Für die einzelnen Kurierfahrer ist die gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Aufträge ein probates Mittel, um die Ertragssituation zu verbessern. Als grober Richtwert gilt, dass ein motorisierter Kurierfahrer pro gefahrenem Kilometer einen Umsatz von € 1,00 bis € 1,05 erzielen muss, um ausreichende Erträge zu erwirtschaften. Die Tarifstrukturen zeigen, dass die Bündelung von Aufträgen unter diesen Umständen für eine ausreichende Ertragssituation eine wichtige Rolle spielt, zumal zu den abrechenbaren Fahrdistanzen noch Leerfahrten für die Anfahrt sowie eventuelle Fahrten in Freistellungsgebiete (vgl. unten) hinzukommen, die nicht abrechenbar sind.

Der Kuriertarif setzt sich aus einer Anfahrtspauschale und entfernungsbezogenen Tarifbestandteilen zusammen. In Hamburg hat sich in der Regel eine Anfahrtspauschale von € 2,50 sowie € 0,85 pro gefahrenem Kilometer durchgesetzt. (Vereinzelt gibt es noch Kurierzentralen, die günstigere Tarife anbieten; die dort beschäftigten Kurierfahrer können mit diesen Tarifen auf Dauer keine ausreichenden Umsätze erzielen, so dass sie in der Regel nach einer gewissen Zeit aus dem Markt ausscheiden.) Für einen Kurierauftrag wird die Anfahrtspauschale sowie 3 Kilometer, mindestens also € 5,05 berechnet. Bei einem Kurierdienst werden die Preise nach einem differenzierteren Tarifmuster berechnet (z.B. günstigere Tarife für lange Distanzen oder Aufträge, bei denen mehrere Stationen angefahren werden).

Falls regelmäßig Touren von den Kurierfahrern gebündelt werden, achten die Vermittler darauf, dass die einzelnen Fahrer nicht so viele Aufträge übernehmen, dass die zeitgerechte Auslieferung der Sendungen gefährdet ist. Sie können ggf. die Zuweisung eines Auftrags an einen Kurierfahrer ablehnen.

Bei einem im Rahmen des Projektes befragten Kurierdienst werden weitere Aufträge für Kurierfahrer disponiert. Die Vermittler bieten anhand ihrer Kenntnis der ungefähren aktuellen Position und der ungefähren Fahrtrichtung bzw. des Fahrkorridors einzelnen Kurierfahrern geeignete zusätzliche Aufträge an. Sie werden dabei durch die eingesetzte Software unterstützt, die ihnen anzeigt, welche Aufträge ein Kurierfahrer aktuell bearbeitet.

Bei einem weiteren befragten Kurierdienst ist die Vermittlung grundsätzlich anders organisiert. Der jeweilige aktuelle Standort der einzelnen Fahrzeuge ist für die Vermittlungssoftware über GPS verfügbar. Für die Vermittlung ermittelt die Software den Kurierfahrer, dessen Standort dem Quellpunkt des Auftrags am nächsten liegt und bietet diesem Fahrer die Tour an.

3.2 Freigestellte Kurierfahrer

Der Vermittlungsprozess verläuft dann etwas anders, wenn es Kurierfahrer gibt, die aktuell keinen Auftrag übernommen haben. Diese Kurierfahrer melden sich, nachdem sie die letzte Sendung ausgeliefert haben, bei der Kurierzentrale „frei“. Der Stadtraum ist dafür in sog. Freistellungsbereiche eingeteilt. Diese Freistellungsbereiche haben bei den verschiedenen Kurierdiensten unterschiedliche Größen und Zuschnitte. Postleitzahlbereiche sind die kleinsten ermittelten Freistellungsbereiche bei den befragten Kurierdiensten. Liegt der Quellpunkt eines Auftrages in einem Freistellungsbereich, in dem ein oder mehrere Kurierfahrer frei gemeldet sind, dann bekommt der erste frei gemeldete Kurierfahrer diesen Auftrag exklusiv angeboten, dann der zweite usw. Die Vermittler werden bei einigen Kurierdiensten dadurch unterstützt, dass die frei gemeldeten Fahrer durch die Software am Bildschirm angezeigt werden. Kurierfahrer können sich in einem beliebigen Freistellungsbereich frei melden. Sie fahren u. U. in Freistellungsbereiche, in denen sie sich eine höhere Wahrscheinlichkeit für die Vermittlung eines Auftrages ausrechnen.

4 Alternative Logistikkonzepte

Im Kurierprojekt liegt die generelle Zielsetzung der Simulation unterschiedlicher Modelle darin, ökologische Belastungen durch Kurierfahrten zu verringern. Bei der Beförderung von Kuriersendungen sollen gleichzeitig der betriebswirtschaftliche Aufwand und die ökologischen Belastungen sinken.

Zu diesem Zweck wurden drei unterschiedliche *Organisationsformen* von Stadtkurierdiensten vorgeschlagen, von denen zwei in Simulationsexperimenten untersucht wurden. Es handelt sich dabei um Konzepte zur zweistufig gestalteten Beförderung von Kuriersendungen (Hubsystem), die teilweise den Organisationsformen von Integrators (UPS, FedEx, DHL) oder flächendeckend arbeitenden Speditionen bzw. Speditionsoperationen entlehnt sind („Hub and Shuttle“ sowie „Innen-Außen“). Eine weitere Organisationsform, die relativ nahe an der gegenwärtigen Praxis von Stadtkurierdiensten liegt („Fixierte Austauschpunkte“), wurde nur konzeptuell ausgearbeitet.

Alle alternativen Organisationsformen können unterschiedliche *Formen der Ausgestaltung* aufweisen und in verschiedenen *Varianten* simuliert werden. Bewertet werden für die jeweiligen Simulationsergebnisse ökologische, ökonomische und soziale Qualitäten der Modelle.

4.1 „Hub and Shuttle“-Systeme

Bei dieser Strategie werden im Stadtbereich Schwerpunktgebiete, die sich durch ein hohes Auftragsaufkommen auszeichnen, festgelegt (Abbildung 1). In diesen Gebieten wird jeweils ein Sammelzentrum (Umschlagspunkt, „Hub“) eingerichtet. Zwischen den Hubs werden die Sendungen durch größere Fahrzeuge gebündelt transportiert, die z.B. im Linienverkehr nacheinander alle Sammelzentren anfahren oder zwischen je 2 Hubs pendeln („Shuttle“). Innerhalb eines Schwerpunktgebiets holen Kuriere die Sendungen wie üblich beim Absender ab und bringen sie zum Sammelzentrum bzw. liefern Sendungen vom Sammelzentrum zum Empfänger aus. Sie können mehrere Aufträge parallel bearbeiten und bleiben auch in der Tourenplanung autonom. In der Regel ordnen sie sich jedoch einem Schwerpunktgebiet zu.

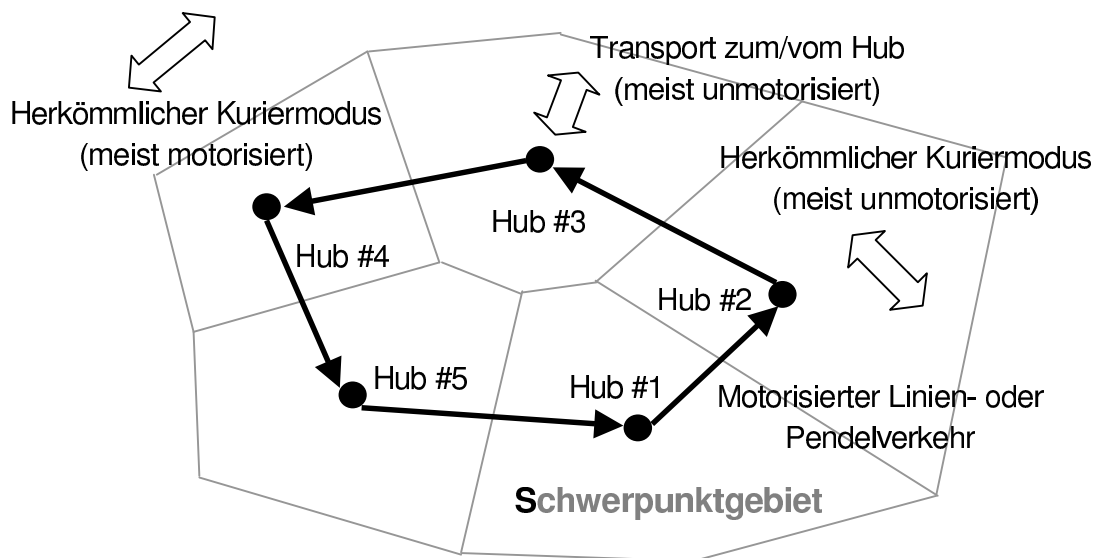


Abbildung 1: Prinzip des alternativen Logistikkonzepts „Hub and Shuttle“.

Ausgenommen von diesem Prinzip sind Aufträge, bei denen Quellpunkt (der Sitz des Absenders) und Zielpunkt (der Sitz des Empfängers) innerhalb desselben Schwerpunktgebiets liegen, bei denen mindestens einer der beiden Punkte außerhalb der definierten Schwerpunktgebiete liegt, die Sendungen eilbedürftig sind oder eine Mindestdistanz zwischen Quell- und Zielpunkt unterschritten wird. Diese Sendungen werden weiterhin von einem Kurier direkt zwischen Absender und Empfänger befördert.

4.1.1 Modellspezifikationen und -anforderungen

Folgende Möglichkeiten der Ausgestaltung können im „Hub and Shuttle“-Modell vorgesehen werden:

- In den Schwerpunktgebieten können verstärkt Radkuriere zum Einsatz kommen.
- Anzahl, Lage und Größe der Schwerpunktgebiete können unterschiedlich ausgestaltet werden (Vorschläge lassen sich anhand einer Analyse der räumlichen Ver-

teilung der Aufträge bestimmen).

- Festzulegen sind Lage und Anzahl der Hubs.
- Unterschiedliche Organisation der Verkehre zwischen den Hubs.
- Vermittlungsmodi der im Hub eingelieferten Sendungen.
- Verrechnungsmodus und Regeln für gesicherte, zeitgerechte Auslieferung.

4.2 Die „Innen/Außen“-Strategie

Eine wohl nicht nur für Hamburg typische Verteilung des Auftragsaufkommens besteht darin, dass in der Innenstadt eine deutlich größere Anzahl an Aufträgen anfällt als in den äußeren Bereichen oder im Umland. Der Kilometer-Aufwand ist daher für Sendungen in oder aus dem Umland wesentlich höher als für innerstädtische Sendungen. Mit dem Logistikkonzept „Innen-Außen“ sollen auch für das Umland Optimierungspotenziale erschlossen werden. Gleichzeitig weist dieses Konzept auch einen Weg zur Erschließung neuer Kunden im Umland, die derzeit mittels des traditionellen Kurierprinzips aus Kostengründen nicht bedient werden.

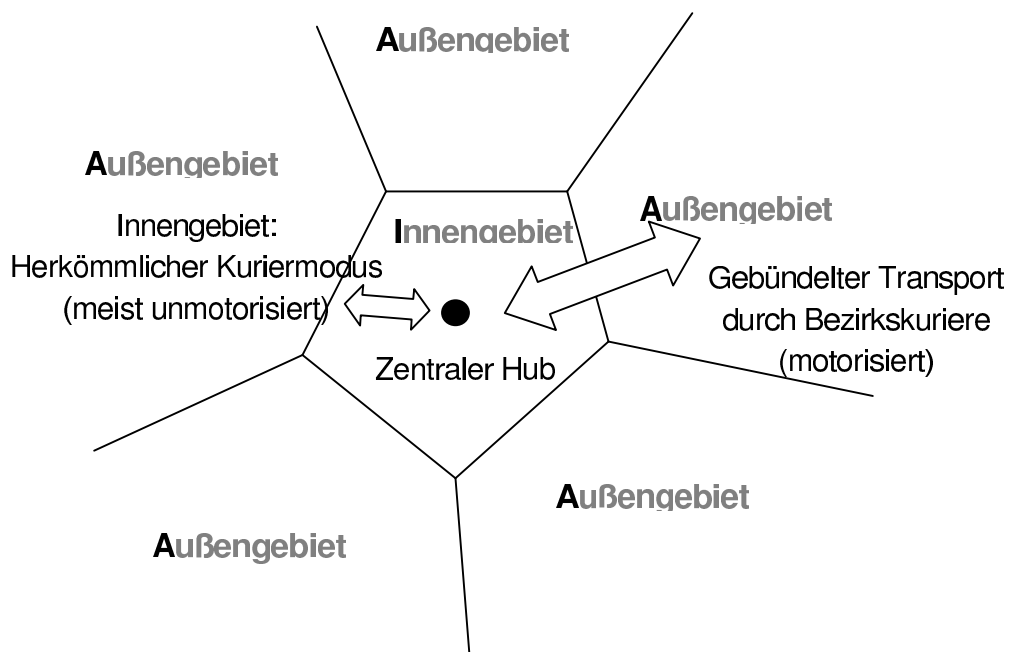


Abbildung 2: Prinzip des alternativen Logistikkonzepts „Innen/Außen“.

Kern des Logistikkonzepts „Innen/Außen“ ist eine Unterteilung des Stadtgebiets in einen Innen- und einen Außenbereich (Abbildung 2). Der Außenbereich wird weiter in wenige einzelne Bezirke aufgeteilt, für die ein Sammel- und Verteildienst eingeführt wird. Dazu wird ein (zentraler) innenstadtnaher Umschlagspunkt eingerichtet, an dem Sendungen, die von außen nach innen bzw. von innen nach außen oder von einem Außenbezirk in einen anderen Außenbezirk zuzustellen sind, umgeschlagen werden.

Pro Außenbezirk gibt es einen oder mehrere Kuriere, die ausschließlich für diesen Bezirk zuständig sind. Sie sammeln alle Sendungen, die in ihrem Bezirk anfallen, ein, bringen sie zum Umschlagspunkt, holen dort die aus den anderen Bereichen für ihren Bezirk bestimmten Sendungen ab und verteilen sie an die jeweiligen Empfänger. Aufträge, deren Quell- und Zielpunkte innerhalb eines Außenbezirks liegen, werden selbstverständlich ohne Umweg über den Umschlagspunkt direkt vom „Bezirkskurier“ ausgeführt.

Im Innenbereich, der sich durch ein hohes internes Auftragsaufkommen auszeichnet, werden die Sendungen wie bisher nach dem klassischen Kurierprinzip durch einzelne Kuriere (Fahrrad/Auto) transportiert. Diese Kuriere bringen außerdem Sendungen, die aus dem Innenbereich in einen der Außenbezirke gehen, zum Umschlagspunkt und übernehmen die Auslieferung der dort für den Innenbereich eingegangenen Sendungen.

Jeder Kurier des Kurierdienstes kann entscheiden, ob er als konventioneller Kurier im Innenbereich oder als Bereichskurier in einem bestimmten Außenbezirk arbeiten möchte. Er kann auch während eines Tages – je nach Auftragslage – zwischen den Bereichen wechseln und zeitweilig als konventioneller oder als Bezirkskurier tätig sein. Fahrradkuriere werden allerdings als Bezirkskurier nicht in Frage kommen, da die zurückzulegenden Distanzen in den Außenbereichen im Durchschnitt größer als im Innenbereich sind und auf dem Fahrrad nur eine begrenzte Anzahl von Sendungen gleichzeitig befördert werden kann.

Im Zusammenhang mit diesem Logistikkonzept ist es sinnvoll, zumindest für Aufträge aus dem bzw. in den Außenbereich von der klassischen Kurierdienstleistung abzuweichen und eine Auslieferung innerhalb eines bestimmten Zeitraums (Zeitfenster) anzubieten, entweder in Form von individuellen Laufzeitgarantien (z.B. Zustellung innerhalb von 4 Stunden) oder indem der Tag in feste Intervalle eingeteilt wird (z.B. 6-9, 9-12, 12-15 Uhr usw.). Auf diese Weise können die Bezirkskurier ihre Touren besser planen und müssen den Umschlagspunkt nur zu bestimmten Zeitpunkten anfahren.

Dem Konzept „Innen/Außen“ liegt die Annahme zugrunde, dass die Auftragsströme weitgehend radial gerichtet sind, so dass mit Einführung eines zentralen Umschlagspunktes erhebliche Kosten und Kilometer eingespart werden können. Zusammen mit den Bündelungspotenzialen, die sich aus der zeitlichen und räumlichen Entzerrung bei der Bedienung der Außenbezirke ergeben, kann auch von diesem Logistikkonzept eine Reduzierung der motorisierten Fahrleistung erwartet werden.

Entscheidende Einflussfaktoren für dieses Logistikkonzept sind Größe und Zuschnitt der Außenbezirke, die Lage des Umschlagspunktes und die Ausgestaltung der Zeitfenster. Die Simulation kann auch hier bei der Optimierung der Faktoren helfen.

Die beiden bisher vorgestellten Logistikkonzepte ergänzen sich gegenseitig: Während mit „Hub and Shuttle“ Optimierungspotenziale in Bereichen hohen Sendungsaufkommens genutzt werden, geht es beim Konzept „Innen/Außen“ um die optimierte Bedienung des sendungsschwachen Umlandes.

4.3 Fixierte Austauschpunkte

Das letzte betrachtete Modell beruht auf einer häufig praktizierten Strategie von Kurierfahrern bei der Routenplanung. Hierbei versuchen diese, Aufträge auf einer bestimmten imaginierten „Idealroute“ zu aquirieren. Beispiele sind die Strecke Blankenese – Wandsbek oder das „Bermuda-Dreieck“ City – Eimsbüttel – Altona. Die Idee zur Optimierung beruht auf der Einrichtung von Austauschstellen an Kreuzungspunkten von häufig befahrenen Routen. Die Austauschpunkte können, müssen aber nicht an derartigen „Idealrouten“ von Kurierfahrern liegen. Durch die Austauschpunkte wird es möglich, dass Kurierfahrer, die auf diesen Routen verkehren, auch Sendungen mitnehmen können, deren Quellpunkt, nicht aber deren Zielpunkt auf ihrer Idealroute liegt oder umgekehrt. Ein Kurierfahrer übernimmt eine derartige Sendung auf seiner Fahrt und gibt sie am Austauschpunkt ab. Dort nimmt sie ein anderer Fahrer auf, in dessen idealer bzw. aktueller Fahrtrichtung der Zielpunkt der Sendung liegt. Unabhängig davon, ob ein Fahrer eine Strategie der Idealrouten verfolgt oder nicht, ergibt sich für einen Fahrer aufgrund der aktuell übernommenen Aufträge eine mehr oder weniger stark festgelegt (ideale) Route für deren Abarbeitung.

Fahrer können mehr Aufträge gleichzeitig abwickeln, ohne dass die Auftragsabwicklung aufgrund von „Umwegen“ zu lange dauert. Diese Strategie hat Produktivitätseffekte für den einzelnen Kurier, da er bei vergleichsweise geringen zusätzlich zurückzulegenden Distanzen zusätzliche Aufträge übernehmen kann. Die (zu überprüfende) Annahme ist, dass damit für die Beförderung der Kuriersendungen Bündelungseffekte erreicht werden können (ein Kurierfahrer kann zusätzliche Aufträge übernehmen) und für die Bearbeitung der Sendungen des Kurierdienstes insgesamt ein geringerer Fahraufwand erforderlich ist.

Der Vorteil dieses Modells besteht darin, dass der etablierte Kuriermodus nicht zugunsten anderer Sammel- und Verteilmodelle aufgegeben werden muss. Das Modell ist besonders „Kurier-like“. Da die Modellierung der Strategie aufgrund der dezentralen Organisation und der erforderlichen Eigenintelligenz der simulierten Kurierfahrer besonders anspruchsvoll erscheint, wurde von ihrer Realisierung aus Aufwandsgründen zunächst abgesehen. Die interessanten Bezüge zum Gebiet der Multiagentensysteme lassen eine zukünftige Umsetzung im Rahmen studentischer Arbeiten jedoch wünschenswert erscheinen.

4.3.1 Modellspezifikationen und -anforderungen

Es werden einige neue betriebswirtschaftliche, technische und organisatorische Anforderungen gestellt:

- Es müssen Austauschpunkte eingerichtet werden, was in unterschiedlicher Form geschehen kann. Zum einen könnten verschließbare, technisch nur von autorisierten Personen (Kurierfahrern) zu öffnende Container aufgestellt werden. Damit wäre eine vergleichsweise kostengünstige Lösung realisiert. Zum anderen sind personell besetzte Austauschpunkte vorstellbar, z.B. durch die Anmietung kleiner Läden. Vorstellbar ist auch, dass die Austauschpunkte nicht nur der Warenübergabe die-

nen, sondern auch andere Leistungen erbringen. Insgesamt müssten die betriebswirtschaftlichen Konsequenzen für die Einrichtung von Austauschpunkten geprüft werden.

- Operativ würde dies bedeuten, dass eine Sendung, die über einen Austauschpunkt befördert wird, (mindestens) zweimal vermittelt wird, einmal bei der Erstvermittlung vom Auftraggeber (Versender oder Empfänger), zum zweiten mal dann, wenn die Sendung im Austauschpunkt abgegeben wurde. Zwar ist theoretisch vorstellbar, dass eine an einem Austauschpunkt abgelieferte Sendung ohne formale Vermittlung durch die Kurierzentrale von einem anderen Fahrer, der am Austauschpunkt vorbeikommt, aufgenommen und ausgeliefert wird. Dann gibt es jedoch keine organisatorische Garantie dafür, dass die Sendung in einem überschaubaren Zeitraum ausgeliefert wird.
- Weiterhin muss durch entsprechende Verfahrensregeln eine gesicherte Auslieferung der Sendungen in überschaubaren Zeiträumen sichergestellt werden, da die einzelne Sendung mehrere Hände durchläuft. Hier liegt eine der logistisch anspruchsvollsten Herausforderungen alternativer Organisationsformen von Stadtkurierdiensten. Praktisch alle anderen Dienste von Speditionen, Paket- und Expressdiensten in der Transportlogistik arbeiten auf der Basis einer Auslieferung über Nacht (Next Day, E+1). Die ad hoc-Verkehre der Stadtkurierdienste werden dagegen in wesentlich kürzeren Zeiträumen (Same Day) abgewickelt. In der Regel vergehen, je nach Distanz und Verkehrssituation, nicht mehr als 2-3 Stunden von der Auftragsannahme in der Kurierzentrale bis zur Auslieferung einer Sendung beim Empfänger.
- Zur technischen Unterstützung hat es in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte gegeben, die kostengünstige Identifikationsmöglichkeiten für die einzelnen Sendungen bzw. Packstücke erlauben. Neben der etablierten Barcode-Technik könnten auch an den Sendungsstücken angebrachte Transponder zur Identifikation und Bestimmung des Aufenthaltsorts einzelner Sendungen dienen. Beide Technologien erfordern einen erheblichen Kapitalaufwand und höhere Betriebskosten.
- Schließlich muss ein Modus der Verrechnung gefunden werden, da die Sendungen nicht mehr nur von einem, sondern von zwei Fahrern befördert werden und der Austauschpunkt auch Kosten verursacht.
- Neben diesen Parametern sind für die Ausgestaltung die Anzahl und die Lage der Austauschpunkte von Interesse.

Bei zwei der befragten Stadtkurierdienste sind bereits Austauschpunkte bei großen städtischen Events versuchsweise eingeführt worden. Ausgangspunkt war dabei der Umstand, dass die Innenstadt (innerhalb des Rings 1) für motorisierte Kuriere praktisch nicht befahrbar war, und aufgrund von Straßensperrungen etc. Beförderungszeiten zu stark anwuchsen. Besonders betroffen waren dadurch Fotografen. Ein Kurierdienst richtete eine feste Station bei einer zentral gelegenen Material- und Dienstleistungsfirma für Medienbetriebe am Bunker in der Feldstraße ein.

4.4 Varianten der Organisationsmodelle

Für sämtliche beschriebene Organisationsmodelle können mehrere Varianten simuliert werden:

- Veränderung des Verhältnis von motorisierten Kurieren und Bikern
- Operative Verzögerung von Sendungen
- Disposition oder Vermittlung von Sendungen
- Die Erhöhung des Sendungsaufkommens, beispielsweise durch Kooperation von Stadtkurierdiensten

4.4.1 Verhältnis von motorisierten Kurieren und Bikern

Die Einführung bzw. Erhöhung des Anteils von Fahrradkurieren bei Stadtkurierdiensten, bei denen diese bisher nur eine marginale Rolle spielten, kann einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung von Stadtkurierdiensten leisten. Zu berücksichtigen ist dabei, dass aufgrund von physischen Charakteristika der Sendungsstücke nicht alle Aufträge von Fahrradkurieren befördert werden können, und dies auch wenn es möglich wäre, von Kunden oftmals nicht gewünscht wird. Auch ist wahrscheinlich, dass sich bei Neueinführung eines Bikerdienstes bei Kurierdiensten mit bislang ausschließlich motorisierten Flotten eine veränderte Auftragsstruktur einstellen wird. Dies ist ggf. bei der Überprüfung der Modelle zu berücksichtigen.

4.4.2 Operative Verzögerung

Bei der Variante der operativen Verzögerung wird die Bearbeitung einzelner Sendungen zeitlich verzögert, so dass sich erhöhte Bündelungschancen dadurch ergeben, dass im Verzögerungszeitraum weitere Beförderungsaufträge eingehen, die annähernd gleiche oder ähnliche Laufrichtungen im Stadtraum bzw. dem Sammel- und Verteilgebiet aufweisen. Diese Sendungen können dann von einem Kurierfahrer gebündelt befördert werden. Beim Hub-System werden die Sendungen im Ziel-Hub vor der Auslieferung an den Empfänger verzögert.

4.4.3 Vermittlung versus Disposition bei der Auftragsvergabe

Aufträge bei Stadtkurierdiensten werden teils vermittelt und teils zentral disponiert. Eine interessante Fragestellung ist, welche dieser beiden Formen der Verteilung der Aufträge auf die Kurierfahrer unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten effizienter ist und geringere ökologische Belastungen hervorruft.

Da unterschiedlich operierende Kurierdienste mit dem Projekt kooperieren, ist es möglich Vermittlungssystem und Dispositionssysteme miteinander hinsichtlich ihrer ökologischen, ökonomischen und soziale Effizienz zu vergleichen. Auch besteht die Möglichkeit, die verschiedenen Auftragsprofile (Kundenstruktur, Anzahl der Sendungen, Zeitpunkte der Auftragsannahme, Quell- und Zielorte der Sendungen) der einzelnen Kurierdienste im Hinblick auf ihre Eignung für Vermittlungs- und Dispositionssysteme zu überprüfen.

Einer der befragten Kurierdienste setzt ein Vermittlungssystem ein, das einer faktischen Disposition recht nahe kommt: Das System schlägt für einen zu vermittelnden Auftrag jeweils den Kurierfahrer vor, der zur Zeit der Vermittlung die günstigste (kürzeste) Position zum Abholort hat. Vorstellbar ist aber auch die Implementation anderer Dispositionsstrategien.

In einem Gespräch, das H. Deecke vor einigen Jahren mit einem Entwickler von Van-Carrier-Steuerungssystemen auf Containerterminals führte, tauchte das Problem auf, dass bei einer Strategie, immer dem nächstentfernten Van-Carrier einen Auftrag zuzuweisen, die Van-Carrier keine Aufträge mehr zugewiesen bekamen, die am Rand der Container-Stacks frei standen. Es gab immer andere freie Van-Carrier mit einer günstigeren Position. Dies ist aber nur solange ein Problem, wie der disponierende Akteur – zum Beispiel ein Containerterminalbetreiber – ein betriebswirtschaftliches Interesse an einem möglichst hohen Beschäftigungsgrad der Fahrzeuge hat. Im Falle der Auftragsvermittlung in Kurierdiensten ist dies nicht der Fall. Hier kann der einzelne Kurierfahrer entscheiden, an welchem Standort er sich freimeldet. Er wird mehr oder weniger lange Leerfahrten zurücklegen, um sich an einem Standort freizumelden, an dem die Wahrscheinlichkeit für die Vermittlung eines neuen Auftrages nach seiner Erfahrung höher ist als am Standort der Auslieferung der vorigen Sendung. Diese Leerfahrten können jedoch ein Problem darstellen, das durch eine andere geeignete Dispositionsstrategie aufgefangen werden kann.

Bei der Frage nach der Effizienz von Vermittlungs- und Dispositionssystemen könnte eine Kombination von Vermittlung und Disposition von Interesse sein. Ein derartiges System wird vom Profi-Kurier angewandt. Die Basis des Systems stellt ein Vermittlungssystem dar. Zusätzliche Aufträge werden dann von den Vermittlern (Funkern) in der Zentrale einzelnen Fahrern „zudisponiert“, wenn sie nach deren Auffassung in die Tour des jeweiligen Fahrers passen. Diese Disposition wird gegenwärtig von den Vermittlern vorgenommen. Der Vermittler muss eine ungefähre Kenntnis der Auftragslage der einzelnen Fahrer sowie des gegenwärtigen Standortes haben. Er wird dabei durch die eingesetzte DV mittels separat abzurufender Informationen über die aktuelle Auftragslage einzelner Kurierfahrer unterstützt.

Eine mögliche Aufgabenstellung für die Simulation bestünde in der Simulation einer systematischen, computergestützten Disposition. Liegt ein Auftrag vor, dann wird dieser nicht sofort vom Vermittler ausgerufen, sondern es wird zuerst nach Möglichkeiten gesucht, diesen Auftrag einem dafür geeigneten Fahrer zusätzlich zu übergeben. (Betrachtet werden müsste darin auch eine Entscheidung darüber, unter welchen Umständen der Auftrag disponiert oder ausgerufen wird, etwa wenn mehrere Fahrer frei gemeldet sind etc.)

4.4.4 Erhöhung des vermittelten Sendungsaufkommens

Bisher wurden Optimierungsmöglichkeiten für einzelne bestehende Kurierdienste vorgestellt. Die Erhöhung des Sendungsaufkommens, das über einen Kurierdienst abgewickelt wird, hat theoretisch einige interessante Konsequenzen. Die Quell- und Zielpunkte liegen im Durchschnitt räumlich und zeitlich dichter beieinander. Damit können

sich im Durchschnitt für die einzelnen Kurierfahrer Leerfahrtdistanzen und –zeiten verringern und die Chancen gleichzeitig mehrere Aufträge zu bearbeiten (Bündelungsmöglichkeiten) wachsen.

Interessant können diese Varianten vor allem dafür sein, Minimal- und Maximalvolumina oder Schwellenwerte für das Sendungsaufkommen bei verschiedenen Organisationsformen zu ermitteln. Es ist zu vermuten, dass insbesondere komplexere Organisationsformen von Kurierdiensten (etwa das skizzierte Hub-System) aufgrund der höheren fixen Kosten erst ab einem bestimmten Auftragsvolumen betriebswirtschaftlich rentabel sind oder den selbstständigen Kurierfahrern ein ausreichendes Auskommen bieten. Auch sind betriebswirtschaftliche Schwellenwerte interessant, bei denen deutliche Senkungen der Produktionskosten eintreten, die es den Kurierdiensten ermöglichen, in andere gegenwärtig stark wachsende Marktsegmente – etwa die Zustellung von Konsumgütern in Privathaushalte – einzudringen. Schließlich können die Organisationsformen der Kurierdienste auch im Hinblick auf ökologische Parameter bei unterschiedlich hohem Sendungsaufkommen durchaus verschieden reagieren.

5 Datensammlung und Aufbereitung

Grundlage der Modellierung bilden Auftrags- und Flottenprofile verschiedener Hamburger Kurierdienstunternehmen. In der ersten Projektphase wurden Unternehmensgespräche mit insgesamt 5 Stadtkurierdiensten geführt, von denen zwei zur Bereitstellung von Daten bereit waren. Ein konzeptuelles Modell der idealisierten Arbeitsabläufe in Kurierdiensten lag bereits aus einer Fallstudie im Rahmen des Projekts MOBILE¹ (Hilty et al. 1998) vor und wurde im Rahmen der Gespräche ergänzt und aktualisiert.

5.1 Befragte Kurierdienste und Kooperationsbereitschaft

Befragt wurden nur Stadtkurierunternehmen, die aufgrund ihrer Größe bzw. des Auftrags- und Sendungsvolumens für verkehrssparende Simulationsstudien geeignet sind. Die befragten Kurierdienste haben im Standardkuriergeschäft zwischen 600 und 2.300 Aufträge pro Tag. Sie beschäftigen jeweils zwischen 130 und 250 Kurierfahrer, die je nach Kurierdienst in unterschiedlichen Anteilen auf die Fahrzeugklassen Pkw/Kombi, Bus, Lkw und Fahrrad verteilt sind. Fahrradkuriere (Biker) sind bei fast allen Kurierdiensten zu finden. Bei einigen spielen diese aber quantitativ bisher nur eine marginale Rolle. Sie werden überwiegend dann eingesetzt, wenn die Beschäftigung anderer Fahrzeuge aufgrund der Verkehrssituation nicht möglich ist, oder wenn Kunden ausdrücklich einen Biker für die Beförderung anfordern.

Es wurden Gespräche mit Vertretern von 5 Stadtkurierunternehmen, sowie einem Verbandsvertreter geführt², von denen 2 schließlich zur Kooperation und der Bereitstellung

¹ Die Abkürzung steht für „Model Base for an Integrative View of Logistics and Environment“

² Wir danken in diesem Zusammenhang Herrn Gold (Profi-Kurier), Herrn Meyer (City-Express), Herrn Marx (Die Funkpiloten), Herrn Wermke (Inline), Herrn Frommelt und Herrn Semling (Der Stadtbote) sowie Herrn Rudolf Pfeiffer (Geschäftsführer des BdKEP) für ihre Mitarbeit.

von Daten bereit waren. Diese werden im folgenden Bericht aus Gründen der Anonymisierung als „Kurierdienst A“ und „Kurierdienst B“ bezeichnet.

5.2 Aufbereitung der empirischen Daten

Zwei der befragten fünf Stadtkurierunternehmen haben Daten in Form von Auszügen der von ihnen verwendeten Datenbanksysteme bereitgestellt. Kurierdienst A stellte Auftragsdaten der Kalenderwoche 37 aus dem Jahr 2001 zur Verfügung, Kurierdienst B aus dem selbem Zeitraum auftrags- und kurierbezogene Daten von zwei Tagen. Die unterschiedliche Größe der beiden Unternehmen spiegelt sich im Umfang des täglichen Auftragsaufkommens wider: Kurierdienst B bearbeitet etwa 300 Aufträge pro Tag, A dagegen knapp 2000 Aufträge.

Für die Modellierung der Aufträge werden neben Angaben zu den Zeitpunkten der Auftragsannahme und -vermittlung, der Art der Sendung sowie dem gewünschten Transportmittel hauptsächlich der jeweilige Abhol- und Bestimmungsort in Form von Geokoordinaten benötigt. Diese sind allerdings nicht vorhanden; die Ortsangaben liegen ausschließlich in Form von Adressen (Straße und ggf. Hausnummer) vor. Die Qualität der Adressen ist im Vergleich mit der Situation im MOBILE-Projekt 1996 (Hilty et al. 1998) deutlich besser, da zumindest die Kundendaten mittlerweile in den Softwaresystemen hausnummerngenau hinterlegt sind. Der größte Teil der Lieferadressen wird aber während der telefonischen Auftragsannahme weiterhin manuell erfasst, so dass hier eine Aufbereitung der Straßennamen nötig war (u.a. Bereinigung von Tippfehlern, Ergänzung von abgekürzten Bezeichnungen).

Die durch Straßennamen und Hausnummern spezifizierten Auftragsorte wurden anschließend mit Rechnerunterstützung geocodiert, d.h. auf die nächstgelegenen Knoten des verwendeten Verkehrsnetzes abgebildet. Aufträge außerhalb des abgedeckten Bereichs (z.B. aus dem Hamburger Umland) blieben unberücksichtigt. Zuzüglich weiterer aufgrund fehlender Angaben uncodierbarer Aufträge war die Vorverarbeitung mit einem „Schwund“ von im Mittel 15 Prozent des ursprünglichen Aufkommens verbunden.

Einen Eindruck von der räumlichen Verteilung der Aufträge gibt Abbildung 3. Hier wurden die Auftragsdaten beider Kurierdienste für einen beispielhaften Tag der 37. KW auf die Stadtteile Hamburgs bezogen. Jeder Auftrag ist zweimal vertreten, da sowohl Abhol- als auch Lieferort berücksichtigt sind. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Schwerpunkt des Auftragsaufkommens in der Innenstadt liegt, während die Randbereiche wenig beitragen. Knapp 60% aller Aufträge beginnen oder enden in den neun aufkommensstärksten Stadtteilen Neustadt, Hamburg-Altstadt, St. Pauli, Rotherbaum, Bahrenfeld, Eimsbüttel, Ottensen, Winterhude und Altona-Altstadt.

Da sich für die anderen Tage die gleiche Situation ergibt, liegt der Schluss nahe, dass alternative Logistikkonzepte, die diese räumliche Struktur ausnutzen, besonders Erfolg versprechend sind.

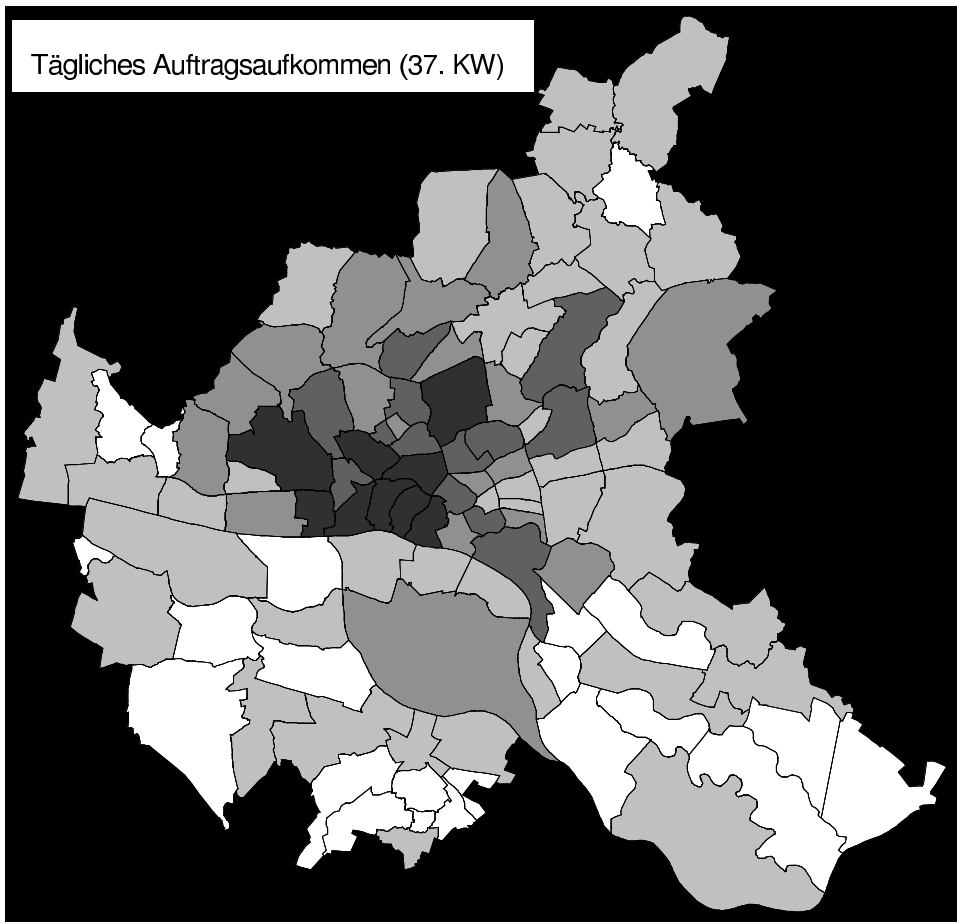


Abbildung 3: Die Verteilung des Auftragsaufkommens auf die einzelnen Stadtteile.

Für die Modellierung der Kuriere werden Angaben zu Verkehrsmittel, Arbeitsbeginn und -ende sowie Standort zu Arbeitsbeginn (Heimatort) benötigt. Da entsprechende Datensätze nur von Kurierdienst B vorliegen, wurden die restlichen aus den Auftragsdaten ermittelt. Dabei wurde der Heimatort jedes Kuriers vereinfachend mit dem Abholort seines ersten Auftrags des Tages identifiziert. Der Arbeitsbeginn wurde 5 Minuten vor Annahme des ersten, das (beabsichtigte) Arbeitsende 30 Minuten nach Annahme des letzten Auftrags gelegt. Da Kuriere auch Aufträge ausführen, deren Verkehrsmittelwunsch nicht mit ihrem Fahrzeug übereinstimmt, wurde dieses folgendermaßen ermittelt: Unter der vereinfachenden Annahme, dass Kuriere nur Aufträge für ein identisches oder „kleineres“ Fahrzeug ausführen (z.B. kann ein Autofahrer auch Fahrradaufträge bewältigen, jedoch nicht umgekehrt), wurde jedem Kurier der „größte“ Verkehrsmittelwunsch aller bearbeiteten Aufträge (z.B. ein Transporter) zugeordnet. Die Ermittlung der Kurierdaten ergab für den Kurierdienst A eine tägliche Flottengröße von ca. 160 Fahrern, darunter 20 Prozent Biker, während beim Kurierdienst B lediglich ca. 50 Autokuriere beschäftigt sind.

6 Agentenbasierte Simulation mit FAMOS

Aufbauend auf der oben beschriebenen Systemanalyse wurde das Basismodell eines Stadtkurierdienstes sowie Modelle der alternativen Logistikstrategien „Hub and Shuttle“ sowie „Innen/Außen“ erstellt. Diese wurden mit Hilfe des ebenfalls im Rahmen des Projektes entwickelten Frameworks für agentenbasierte Modellierung und Simulation (FAMOS) auf Basis des diskreten Simulators DESMO-J implementiert. Zum besseren Verständnis der Modellierung und Implementation sollen in diesem Kapitel einige Grundlagen der agentenbasierten Simulation und des Frameworks FAMOS vermittelt werden.

6.1 Konzepte der agentenbasierten Simulation

Generell werden in der Simulation Experimente an Modellen, d. h. abstrahierten Abbildern der zu untersuchenden Systeme durchgeführt. In den Grenzen der Modellvalidität erlauben die in der Simulation beobachteten Ergebnisse Rückschlüsse auf das unter vergleichbaren Bedingungen zu erwartende Systemverhalten (Page 1991, S. 7). Es existiert heute eine große Anzahl verschiedener Modellierungsstile, deren Anwendbarkeit u.a. durch die untersuchte Fragestellung und die Eigenschaften des abzubildenden Realsystems bestimmt wird. Traditionell werden in der Simulation oft Makromodelle betrachtet, welche auf diskretisierten Differentialgleichungssystemen basieren und Beziehungen zwischen Größen auf der Ebene des Gesamtsystems (z.B. Verkehrsdichte und -fluss) beschreiben. Deutlich flexibler und detailgetreuer sind mikroskopische Modelle, bei denen die im Realsystem vorgefundenen Entitäten getrennt mit ihren individuellen Eigenschaften und Verhaltensweisen abgebildet werden.³

Zur mikroskopischen Modellierung von Systemen, deren Verhalten durch das gemeinsame Handeln autonom entscheidender (oft menschlicher) Akteure gekennzeichnet ist, werden seit einigen Jahren zunehmend so genannte agentenbasierte Simulationsmodelle (auch: Multiagentenmodelle, vgl. (Klügl 2001, S. 68)) eingesetzt. Charakteristisch für die agentenbasierte Simulation ist ihre mikroskopische, meist individuenbasierte Perspektive, wobei das untersuchte System aus Sicht der beteiligten Akteure modelliert wird. Daraus resultiert eine große konzeptuelle Nähe zwischen Modell und Realsystem, da Zustand und Verhalten vorhandener Akteure unmittelbar auf Agenten im Modell abgebildet werden.

Gegenüber der älteren individuenbasierten Simulation legt die agentenbasierte Simulation zusätzliches Gewicht auf Methoden der (verteilten) künstlichen Intelligenz wie zielorientierte Planung, Maschinenlernen und Verhandlungsprotokolle, die besonders für die Modellierung sozialer Systeme von Bedeutung sind. Ähnlich individuenbasierten Modellen beinhalten agentenbasierte Simulationen zudem oft eine explizit modellierte räumliche Umwelt, in der sich die Agenten bewegen.

³ Für eine ausführlichere Darstellung des Vergleichs zwischen makroskopischer und mikroskopischer Modellierung sowie weitere Klassifikationskriterien für Modelle vgl. z.B. (Klügl 2001, S. 49ff).

Ein wichtiges Merkmal der agentenbasierten Modellierung ist zudem die große methodische Vielfalt und hohe Abstraktionsebene der Verhaltensbeschreibung, die Eigenschaften wie Autonomie, Reaktivität, Kommunikation oder Zielorientierung genügen muss. Das Konzept des Agenten ist allgemeiner als das des Individuums, Objekts oder Simulationsprozesses (vgl. Klügl 2001, S. 70). Während individuenbasierte Modelle meist aus atomaren Einheiten mit einfachem, gleichartigen Verhaltensrepertoire bestehen, können verschiedene Agenten eines Modells heterogene Formen der Verhaltensbeschreibung erfordern. Etablierte Ansätze wie Prozessorientierung eignen sich zur Darstellung von Agenten nur bedingt: Kommunikation beschränkt sich hier auf direkte Synchronisation durch gegenseitige Reaktivierung oder indirekte Synchronisation bei der Bewerbung um Ressourcen. Meist wird von linearen Abläufen ausgegangen, wobei Reaktionen auf asynchron auftretende Ereignisse die Ausnahme bilden.

Die methodische Vielfalt der agentenbasierten Verhaltensmodellierung spiegeln aktuelle Unterstützungssysteme wider, deren Spektrum von geringfügig erweiterten objektorientierten Ansätzen über grafische Automaten- oder Petrinetz-basierte Entwicklungsumgebungen bis zu deklarativen Modellierungssprachen reicht. Während zahlreiche Systeme von einem zeitgesteuerten Fortschreiten der Simulationsuhr ausgehen, stellt Ereignissteuerung eine effiziente Alternative dar, sofern die Abbildung variabler Zeitdauern im Vordergrund steht. Agenten werden nur dann aktiv und treffen eine Handlungsentscheidung, wenn der Eintritt eines externen oder selbst verursachten Ereignisses dies erfordert. Dabei ist Zeitkonsum explizit durch Angabe von Reaktivierungszeitpunkten oder mit den Aktivitäten der Agenten verknüpfte Dauern zu modellieren. Aufgrund der konzeptuellen Nähe des Agenten- und Objektbegriffs bilden objektorientierte ereignisdiskrete Simulationssysteme eine geeignete Grundlage für die agentenbasierte Modellierung. Vorhandene allgemeine und modellspezifische Simulationsfunktionalität kann wieder verwendet werden, während Erweiterungen hinsichtlich Raum- und Verhaltensmodellierung erforderlich sind.

Für die Modellierung von Kurierdiensten erscheint die agentenbasierte Sichtweise u.a. aus folgenden Gründen geeignet:

1. Kurierdienste verfügen (zumindest bei Anwendung einer Vermittlungsstrategie) über ein geringes Maß an zentraler Kontrolle. Kuriere handeln weitgehend autonom, indem sie eigenständig über die Annahme von Aufträgen entscheiden und ihre Touren planen. Es erscheint daher besonders nahe liegend, die Vorgänge in einem Kurierdienst aus Sicht der beteiligten Akteure (Kuriere und Funker) zu modellieren.
2. Die Kuriere bewegen sich in einer räumlichen Umwelt, dem Straßennetz. Dabei fahren sie eigenständig geplante Routen, die während der Fahrt gegebenenfalls aufgrund neuer Informationen (z.B. Verlesung eines Auftrags) angepasst werden müssen. Diese Balance reaktiven und pro-aktiven Verhaltens ist ein typisches Merkmal von Agenten.
3. Das in Kurierdiensten eingesetzte Vermittlungsprotokoll stellt aus theoretischer Sicht eine Variante des aus der verteilten künstlichen Intelligenz bekannten

Kontraktnetz-Protokolls (Smith 1980) zur verteilten Allokation von Aufgaben dar.

Im folgenden wird das auf dem Simulator DESMO-J basierende Framework FAMOS vorgestellt, mit dessen Hilfe die im Rahmen dieses Projektes erstellten Simulationsmodelle implementiert wurden.

6.2 Der diskrete Simulator DESMO-J als Grundlage von FAMOS

DESMO-J (Page/Lechler/Claassen 2000) ist ein an der Universität Hamburg entwickeltes und seit längerem in der Lehre eingesetztes Framework für ereignisdiskrete Simulation in Java. Konzeptionell geht es auf das in (Page 1991) beschriebene Simulationspaket DESMO zurück. DESMO-J unterstützt den ereignis- und prozessorientierten Modellierungsstil durch abstrakte Klassen für Entitäten, Ereignisse und Simulationsprozesse, die modellspezifisch erweiterbar sind. Ereignis- und prozessorientierte Verhaltensbeschreibungen werden durch Redefinition abstrakter Methoden für Ereignisroutinen bzw. Prozesslebenszyklen realisiert. Die Implementation der im prozessorientierten Ansatz notwendigen Koroutinensteuerung basiert auf *Java-Threads*, die mit der Simulationssteuerung synchronisiert werden und gegenüber ereignisorientierten Modellen eine unvermeidliche Erhöhung der Laufzeit bewirken (Page/Lechler/Claassen 2000).

Im Gegensatz zu einigen vergleichbaren Systemen erlaubt DESMO-J die Kombination prozess- und ereignisorientierter Modellierung, welche durch eine Vererbungsbeziehung zwischen Entitäten und Simulationsprozessen angelegt ist. Durch Bereitstellung auf Warteschlangen basierender höherer Synchronisationskonstrukte wie z.B. Ressourcen ist eine mit dem transaktions- und aktivitätsorientierten Stil vergleichbare Modellierung möglich. Die Simulationsinfrastruktur zeichnet sich durch Trennung von Modell- und Experimentobjekten aus, die im Simulationslauf dynamisch verknüpft werden. Möglichkeiten zur hierarchischen Modellierung sind durch Verwendung von Modellen als Komponenten übergeordneter Modelle im Rahmen des Entwurfsmusters „Kompositum“ (Gamma et al. 1994, S. 163) gegeben. Weiterhin stellt das Framework Zufallszahlenströme unterschiedlicher Verteilungen und die in der Simulation gängigen statistischen Datensammelobjekte zur Verfügung, welche Eintragungen in einen im HTML-Format ausgegebenen Ergebnisreport vornehmen.

6.3 Das Simulationsframework FAMOS

Im Rahmen eines während der Projektlaufzeit bearbeiteten Promotionsvorhabens (Meyer 2004) und einer daran angegliederten Diplomarbeit (Knaak 2002) wurde das Framework FAMOS entwickelt und prototypisch implementiert, welches DESMO-J um agentenbasierte Konzepte der Raum- und Verhaltensmodellierung erweitert. Im Folgenden wird zunächst die hauptsächlich in (Knaak 2002) behandelte Integration von Agenten und deren Interaktionsstrukturen in DESMO-J beschrieben. Anschließend werden in (Meyer 2004) entwickelte Konstrukte zur Raummodellierung vorgestellt, welche neben den üblichen regelmäßigen Gittern auch gerichtete Graphen und kontinuierliche Räume unterstützen. Graphenbasierte Modelle sind beispielsweise im Rahmen

der Verkehrssimulation sinnvoll zur Abbildung von Straßennetzen einsetzbar.

6.3.1 Agenten in FAMOS

Zur Integration simulierter Agenten in DESMO-J bilden prinzipiell sowohl ereignis- als auch prozessorientierte Konstrukte eine geeignete Basis. Die lokale Sichtweise prozess- und agentenorientierter Modelle legt eine Erweiterung von Simulationsprozessen um zusätzliche Fähigkeiten zur Kommunikation und Bewegung nahe. Aufgrund der mangelnden Flexibilität prozessorientierter Verhaltensbeschreibungen und des für Modelle großer Populationen zu erwartenden Laufzeitaufwands wurde jedoch eine Erweiterung der ereignisorientierten Konstrukte vorgezogen.

Benutzerdefinierte Agenten sind in FAMOS von der Basisklasse `Agent` abzuleiten, die ihrerseits eine Erweiterung der Klasse `Entity` für Entitäten ereignisorientierter Modelle darstellt (Abbildung 4). Entitäten sind in DESMO-J generell passiv; ihr Zustand wird von außen durch Ereignisroutinen von der Klasse `Event` abgeleiteter modellspezifischer Ereignisse verändert. Im Hinblick auf die agentenbasierte Verhaltensbeschreibung ist eine Umkehrung der Sichtweise erforderlich: Ein Agent kapselt neben einem Zustand auch ein dynamisches Verhalten und verarbeitet aktiv auftretende Ereignisse, welche ihm Informationen über fremd- oder selbst verursachte Systemzustandsänderungen vermitteln.

Dementsprechend kommunizieren FAMOS-Agenten mit ihrer Umwelt über typisierte *Signale*, die durch Objekte von Unterklassen einer abstrakten Klasse `Signal` dargestellt werden und dem Agenten Änderungen des Modellzustands anzeigen. Signale sind durch ihren Typ und eine Liste von Parametern bestimmt, die der Benutzer durch Ableitung einer Unterklasse deklariert. Der Agent erhält Signale entweder aus der Umwelt oder merkt sie selbst als zukünftige Handlungsabsichten zu bestimmten Simulationszeitpunkten vor. Bei Erhalt eines Signals wird zu dessen Eintrittszeitpunkt automatisch ein von `Event` abgeleitetes Aktivierungsereignis auf die Ereignisliste von DESMO-J geschrieben, welches den Agenten für die Behandlung aktiviert.

Die Handlungsauswahl des Agenten erfolgt in Reaktion auf Signale und wird an ein Stellvertreterobjekt der Klasse `Behaviour` delegiert, welches das Verhalten kapselt. Bei jeder Aktivierung wählt dieses anhand des Agentenzustands und den seit der letzten Aktivierung eingegangenen Signalen Aktionen aus, die als Aufrufe benutzerdefinierter Effektor-Methoden des Agenten ausgeführt werden. Die abstrakte Klasse `Behaviour` stellt eine allgemeine Schnittstelle zur Behandlung von Signalen bereit, von der konkrete Architekturen zur Verhaltenssteuerung abgeleitet werden können. Somit wird den vielfältigen Möglichkeiten der agentenbasierten Verhaltensmodellierung durch Erweiterbarkeit Rechnung getragen. Eine vergleichbare Abstraktion von konkreten Mechanismen zur Verhaltensimplementation ist in mehreren Rahmenwerken zur Agentenprogrammierung wie z.B. *Jade*⁴ oder *MadKit*⁵ zu finden. Allerdings haben Verhal-

⁴ <http://jade.tilab.com>

⁵ <http://www.madkit.org>

tensobjekte hier zum Teil eher den Charakter von Planbausteinen.

Auf dieser Grundlage wurden in FAMOS bislang vier Ansätze zur Verhaltensmodellierung realisiert. Diese sind sämtlich der subkognitiven Ebene erscheinend (Klügl 2001, S. 24) zuzuordnen (d. h. es werden keine expliziten Zielrepräsentationen oder Planungsmechanismen berücksichtigt), die vielen praktischen Simulationsanwendungen angemessen.⁶ Die Klassen `SimpleBehaviour` und `ProcessBehaviour` ermöglichen eine ereignis- bzw. prozessorientierte Beschreibung des Agentenverhaltens, wobei Reaktionen auf eingehende Signale vom Anwender in Java zu implementieren sind. Diese Beschreibungsebene entspricht annähernd den Möglichkeiten des Frameworks `Swarm`⁷ und eignet sich zur Implementation einfacher reaktiver Agenten.

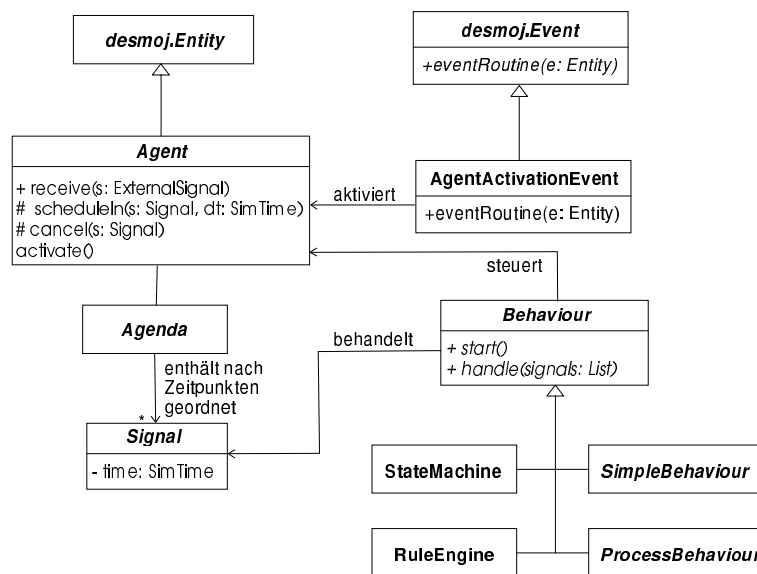


Abbildung 4: Aufbau eines Agenten in FAMOS im UML-Klassendiagramm.

Die Klasse `StateMachine` bildet den Kern eines Automatenframeworks und kapselt einen Interpreter zur Ausführung hierarchischer und nebenläufiger Zustandsdiagramme entsprechend der UML-Semantik. Der Interpreter basiert auf einem im Zusammenhang mit dem Java-basierten UML-Tool `Fujaba`⁸ entwickelten Algorithmus (Köhler 1999), welcher hinsichtlich der Behandlung nebenläufiger Zustände korrigiert und dessen Performanz für die Anwendung der ereignisdiskreten Simulation optimiert wurde. Statecharts erscheinen zur Modellierung subkognitiver Agenten besonders angemessen,

⁶ Eine zusätzliche Erweiterung um deliberatives (d. h. dynamisch planendes) Agentenverhalten erfolgte in einer Diplomarbeit (Matzen/Czogalla 2003), welche in Kooperation mit der Firma Airbus entstand.

⁷ <http://www.swarm.org>

⁸ <http://www.fujaba.de>

da ihre grafische Anschaulichkeit eine einfache Verifizierbarkeit des Agentenverhaltens gewährleistet. Im Gegensatz zu rein regelbasierten Formalismen sind neben zustandsabhängigen Reaktionen auch Aktionssequenzen als Zustandsfolgen darstellbar (Klügl 2001, S. 66). Mit Codegeneratoren und visuellen Programmierwerkzeugen lassen sich grafische Spezifikationen unmittelbar auf ablauffähige Agenten abbilden, was die in der Modellierung kritische Lücke zwischen Konzeptmodell und Implementation wesentlich reduziert (Klügl 2001, S. 86).

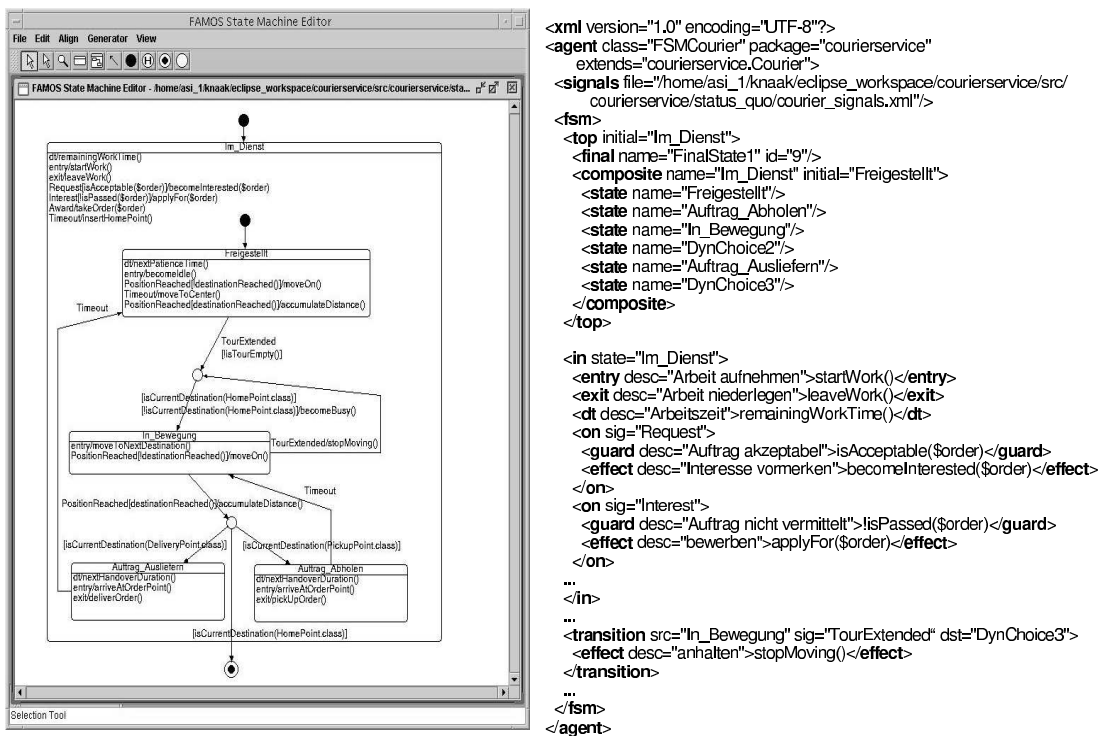


Abbildung 5: XML-basierte Skriptsprache und grafischer Editor zur Modellierung von Agenten mit UML-Statecharts (Beispiel: Statechart eines simulierten Stadtkuriers).

Zu diesem Zweck beinhaltet FAMOS eine XML-basierte Skriptsprache und einen grafischen Statechart-Editor (Abbildung 5). Bei der Konzeption der Skriptsprache stand im Gegensatz zu standardisierten Formaten wie XMI⁹ die Gewährleistung einer trotz der starren XML-Struktur hinreichenden Lesbarkeit im Vordergrund, die u.a. durch Trennung der Deklarationsblöcke für Zustandshierarchien, Zustandsattribute und Transitionen unterstützt wird. Beim Entwurf des Editors wurde von der – im vergleichbaren Ansatz des SeSAM-Systems (Klügl 2001, Kap. 7) realisierten – Möglichkeit zur *vollständig* grafischen Spezifikation von Agenten abgesehen: Sensoren und Effektoren sind manuell als Methoden einer Agentenklasse zu implementieren und nach deren Import in den Editor als Diagrammbeschriftungen auswählbar. Die kombinierte grafische und sprachliche Modellierung bietet programmiererfahrenen Anwendern im Vergleich zu rein visuellen Lösungen möglicherweise den Vorteil größerer Flexibilität und Effizienz. Die Ver-

⁹ <http://www.omg.org/technology/documents/formal/xmi.htm>

haltensbeschreibung mit Statecharts wird im Rahmen dieses Projektes zur Verhaltensmodellierung der Stadtkuriere und Funker eingesetzt.

Alternativ zur Verhaltensspezifikation mit Statecharts ermöglicht FAMOS die deklarative Modellierung mit der Expertensystem-Shell JESS¹⁰, für deren Inferenzmaschine die Klasse `RuleEngine` einen Adapter bildet. JESS ergänzt die Basissprache Java um eine an das Expertensystem CLIPS angelehnte Syntax zur Formulierung von Regeln über einer symbolischen Wissensbasis. Eingehende Signale werden als Fakten abgelegt und bewirken eine Auswertung der Regeln. Aufgrund der Möglichkeiten zur Symbolverarbeitung eignet sich dieser Ansatz zur Verhaltensspezifikation auf der Grundlage qualitativer Kausalbeziehungen. Zudem ist die symbolische Wissensrepräsentation für Agenten angemessen, die bei der Handlungswahl aufwändige interne Weltmodelle berücksichtigen.

6.3.2 Modellierung von Organisation und Kommunikation

Die Untersuchung von Organisationsstrukturen und Kommunikationsmechanismen stellt einen zentralen Aspekt der agentenbasierten Simulation dar und sollte daher durch ein Rahmenwerk angemessen unterstützt werden. In FAMOS wurden zu diesem Zweck verschiedene Ansätze kombiniert, wobei u.a. das Agent/Group/Role-Modell von Ferber (1999), die auch im *Swarm*-Framework realisierte hierarchische Gruppierung von Agenten und die in vielen Multiagentensystemen übliche direkte Kommunikation über Nachrichten Berücksichtigung fand.

Wie im vorigen Abschnitt bereits angedeutet, kommunizieren Agenten in FAMOS über typisierte, parametrisierbare Signalobjekte, wobei zwischen externen Signalen für die Kommunikation und internen Signalen zur Vormerkung von Handlungsabsichten unterschieden wird. Signale mit modellspezifischer Bedeutung werden durch Erweiterung der entsprechenden Oberklasse realisiert und anhand ihrer den Signaltyp repräsentierenden Klasse unterschieden. Gegenüber der Verwendung einer einzigen Signalklasse, welche den Typ und die Parameterliste eines bestimmten Signals als Attribute kapselt, ist dieses Vorgehen mit zusätzlichem Aufwand für den Benutzer verbunden, bietet allerdings Vorteile der Typsicherheit und der Möglichkeit zur Bildung von Signalthierarchien auf der Grundlage objektorientierter Vererbung (vgl. Douglass 1999).

Die Organisationsstrukturen von Multiagentenmodellen werden in FAMOS in Anlehnung an das Agent/Group/Role-Modell durch Agentengruppen der Klasse `Group` dargestellt. Diese Klasse erfüllt folgende Aufgaben:

- Abbildung hierarchischer, vom Modellierer vorgegebener oder dynamisch von den Agenten erzeugter Organisationsstrukturen.
- Anwendung von Operationen auf alle Gruppenmitglieder wie z.B. Weiterleitung von Signalen bei der Multicast-Kommunikation.

¹⁰ JESS kann unter <http://herzberg.ca.sandia.gov/jess> herunter geladen werden und wurde ähnlich wie hier beschrieben u.a. auch in die Agentenplattform *MadKit* integriert.

- Einfache funktionale (d. h. an Eigenschaften orientierte) Referenzierung der Gruppenmitglieder (vgl. Klügl, S. 73).

Die hierarchische Strukturierung von Gruppen wird in nahe liegender Weise durch das Kompositum-Entwurfsmuster realisiert (vgl. Abbildung 6) Gruppen akzeptieren als Mitglieder Objekte aller Klassen, die das Interface `GroupMember` implementieren. Hierzu gehört die Klasse `Group` selbst, so dass Gruppen Mitglieder übergeordneter Gruppen sein können. Durch Implementation der Schnittstelle `SignalReceiver` können Gruppen als Adressaten externer Signale eingesetzt werden, welche sie bei Eingang an alle Mitglieder verteilen. Auf diese Weise stellt FAMOS eine u.a. für das Kuriermodell nutzbare Möglichkeit zur Multicast-Kommunikation zur Verfügung. Die Verwaltung der Gruppen eines Multiagentenmodells erfolgt über das Umweltobjekt der Klasse `Environment`, welches auch für die Weiterleitung von Signalen zuständig ist.

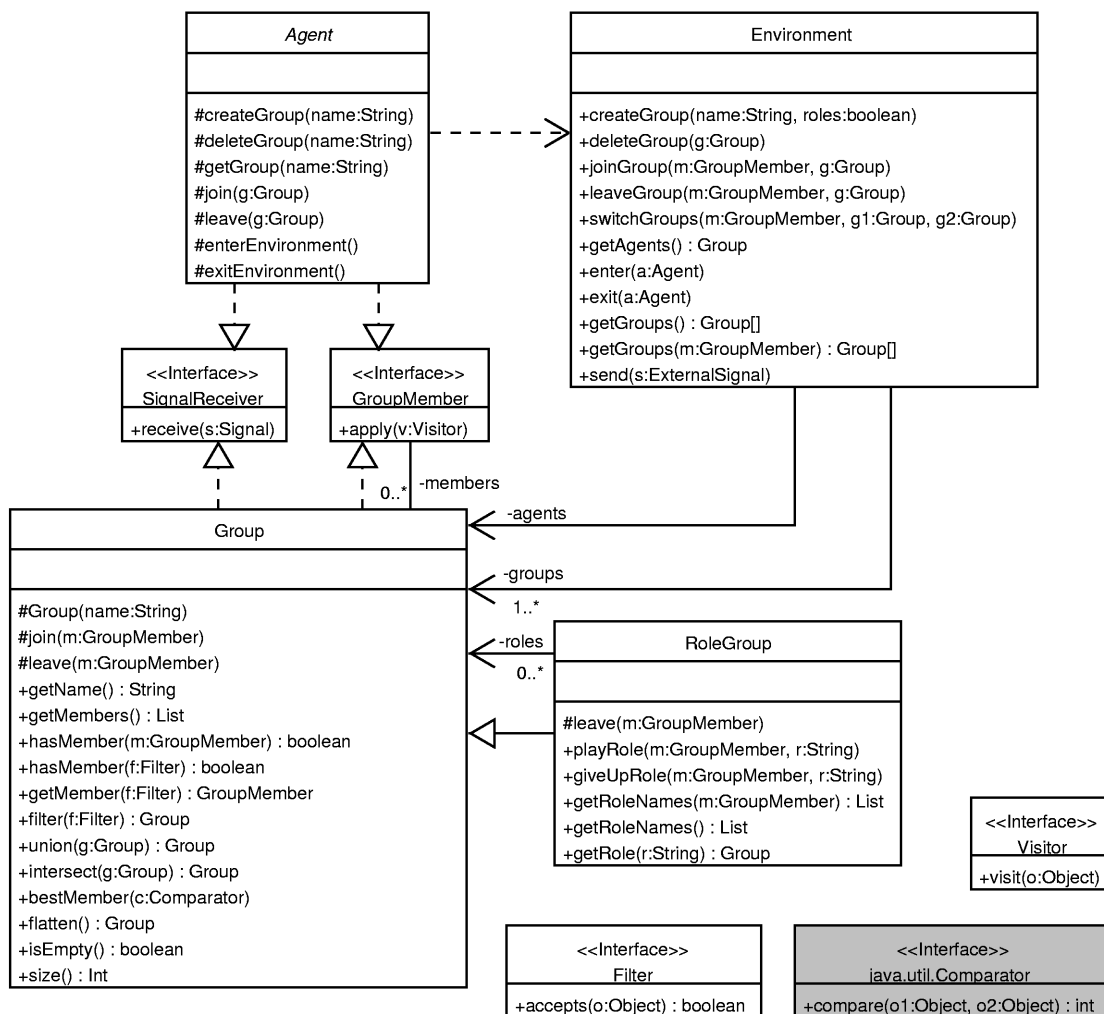


Abbildung 6: Rahmenwerk zur Modellierung von Organisationsstrukturen

Die funktionale Referenzierung von Gruppenmitgliedern wird durch verschiedene Operationen unterstützt. Beispielsweise gibt die Methode `bestMember()` das Gruppenmitglied zurück, welches bezüglich eines bestimmten Vergleichskriteriums den höchsten Wert aller Gruppenmitglieder erzielt. Mit der Methode `filter()` werden dagegen

alle Mitglieder, welche eine bestimmte Eigenschaft besitzen, zu einer dynamischen Teilgruppe zusammengefasst. Eine besondere Form der funktionalen Referenzierung durch Rollen erlaubt die von `Group` abgeleitete Klasse `RoleGroup`. Mitglieder einer `RoleGroup` können innerhalb der Gruppe eine oder mehrere durch eindeutige Namen identifizierte Rollen annehmen. Zudem unterstützt die Klasse `Group` die Bildung von Schnitt- und Vereinigungsmengen und ermöglicht somit die nachträgliche Verknüpfung funktional referenzierter Teilgruppen.

6.3.3 Ein allgemeines Rahmenwerk zur Raummodellierung

Neben der Modellierung des Verhaltens von Agenten bildet die Umwelt- und Raummodellierung einen weiteren Schwerpunkt des Frameworks FAMOS. Während in den meisten vergleichbaren Systemen Raum nur durch regelmäßige zweidimensionale Gitter darstellbar ist, erlaubt FAMOS die Raummodellierung mit gerichteten Graphen, Gittern und kontinuierlichen Modellen¹¹. Die räumliche Umgebung eines Multiagentenmodells ist Teil des Umweltobjekts der Klasse `Environment`, welches als Komponente jedes Modells der von `desmoj.Model` abgeleiteten Klasse `MultiAgentModel` vorhanden ist (vgl. Abbildung 7). Als Grundlage der Raummodellierung dient eine abstrakte Klasse `Space`, von der beliebige Raummodelle ableitbar sind. Prinzipiell wird dabei zwischen kontinuierlichen und diskreten Räumen unterschieden. Als diskrete Modelle sieht das Framework gerichtete Graphen und Tesselationen (Gitter) vor. Diese setzen sich aus diskreten Raumelementen zusammen, die bei Graphen durch Knoten und bei Gittern durch Zellen gegeben sind. Da zu jedem Gitter prinzipiell ein dualer Graph existiert, werden die Nachbarschaftsrelationen zwischen den Raumelementen immer als Kanten eines Graphs repräsentiert. Den Knoten des Graphen sind Referenzkoordinaten als Objekte der Klasse `Point` zugeordnet. Neben gerichteten Graphen stellt FAMOS bisher die in der agentenbasierten Simulation am häufigsten eingesetzten zweidimensionalen Gitter mit quadratischen bzw. sechseckigen Zellen identischer Größe oder mit unregelmäßig geformten Zellen zur Verfügung.

Jedes Raumelement kann eine Menge von Objekten und Agenten enthalten, die sich im Modell dann an dieser Position befinden. Im Raum positionierbare Objekte müssen eine Schnittstelle `Situated` implementieren, die das Setzen und Abfragen der räumlichen Position erlaubt. Jede Position verweist auf ein Element des zugrunde liegenden Raummodells. Neben Objekten und Agenten enthält jedes Raumelement eine Liste sogenannter Attribute. Ein Attribut besitzt einen eindeutigen Namen und einen veränderlichen Wert der Basisklasse `Object`. Eine raumbezogene Dynamik ist darstellbar, indem Ereignisse oder Simulationsprozesse Attributwerte von Raumelementen im Simulationslauf ändern. Die Veränderung räumlicher Attribute und das Hinzufügen bzw. Entfernen von Objekten zu Raumelementen erfolgt aus weiter unten erläuterten Gründen ähnlich wie die Gruppenverwaltung stets über Methoden der Klasse `Environment`.

¹¹ Letztere wurden im Rahmen der Diplomarbeit (Czogalla/Matzen 2003) weiterentwickelt.

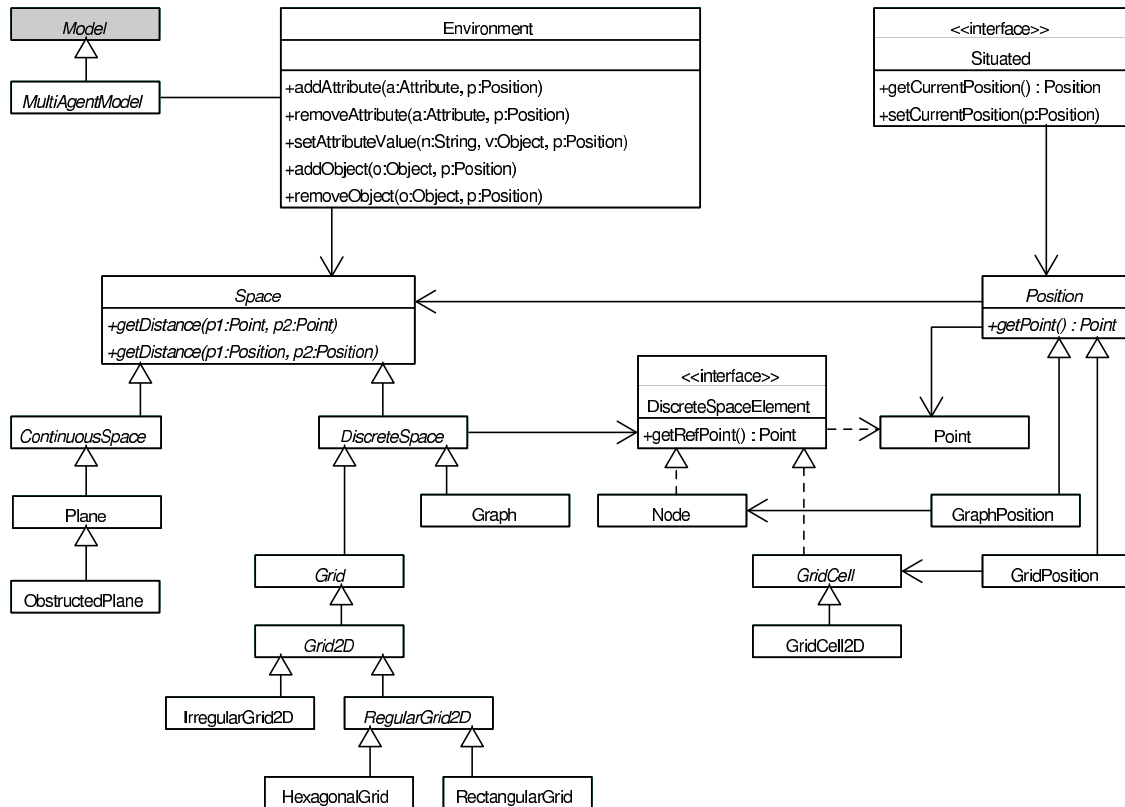


Abbildung 7: Ein Rahmenwerk zur flexiblen Raummodellierung

Mit der Methode `getDistance()` der Klasse `Space` kann in jedem Raummodell die Distanz zwischen zwei Positionen oder Raumkoordinaten bestimmt werden. Koordinaten werden in diskreten Modellen auf die nächstliegenden Raumelemente abgebildet. In einem Graphen gibt die Methode die Länge des mit dem Algorithmus von Dijkstra (vgl. Domschke 1989, S. 61) berechneten kürzesten Pfades zurück, der die angegebenen Knotenpositionen verbindet. In Gittern wird der kürzeste Weg zwischen zwei Zellenpositionen unter Berücksichtigung von deren Nachbarschaftsbeziehungen (z.B. Vierer- oder Achter-Nachbarschaft) berechnet. Als kontinuierliche Raummodelle sind in FAMOS bislang zweidimensionale Ebenen mit Hindernissen realisiert.

Die Interaktion zwischen Agent und Umwelt umfasst einerseits die lokal beschränkte Wahrnehmung und Veränderung der Umgebung durch den Agenten und andererseits die Agentenbewegung. Beide Aspekte werden in FAMOS in Unterklassen der Klasse `Agent` realisiert. Die Klasse `SituatedAgent` repräsentiert einen situierten Agenten, der durch Implementation der Schnittstelle `Situated` in der räumlichen Umgebung positionierbar ist, jedoch nicht über spezielle Fähigkeiten zur Bewegung verfügt. Der situierte Agent besitzt einen eingeschränkten Wahrnehmungshorizont, dessen Radius durch ein Attribut festgelegt ist. Zur Umweltwahrnehmung innerhalb dieses Radius dient die Methode `observe()`, die den Zustand der vom Agenten wahrnehmbaren Umgebung als Objekt der Klasse `EnvironmentState` zurückliefert. Der Umgebungszustand beinhaltet alle Positionen des Raummodells (z.B. Zellen eines Gitters) inner-

halb des Wahrnehmungsradius sowie alle dort beheimateten Agenten, Objekte und Attribute. Neben der reinen Wahrnehmung kann der Agent an seiner derzeitigen Position Attribute verändern oder Objekte aufnehmen bzw. ablegen. Die Methodenaufrufe werden an das Umgebungsobjekt der Klasse `Environment` weitergeleitet, welches an den zugehörigen Elementen des Raummodells Änderungen vornimmt. Zudem benachrichtigt es alle situierten Agenten, in deren Wahrnehmungshorizont die Änderung stattgefunden hat, durch ein Signal. Die „Bewegung“ unmittelbar von `SituatedAgent` abgeleiteter Agenten ist nur durch explizite Positionsänderungen mit Hilfe einer Methode `setCurrentPosition()` möglich.

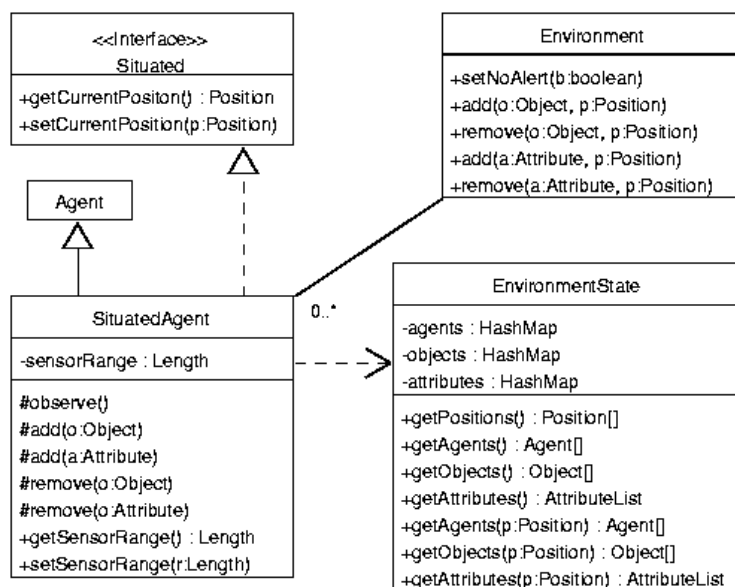


Abbildung 8: Klassenstruktur für situierte Agenten.

Zur Implementation von Agenten mit komplexeren Bewegungsmustern dient die von `SituatedAgent` abgeleitete Klasse `MobileAgent` (vgl. Abbildung 9). Jedem „mobilen“ Agenten ist ein Objekt der Klasse `Movement` zugeordnet, welches die Fähigkeit des Agenten zur Bewegung entsprechend einer bestimmten Strategie repräsentiert. Mit Hilfe einer Bewegungsstrategie bestimmt das `Movement`-Objekt ausgehend von der aktuellen Position des Agenten im Raummodell eine Folgeposition. Nach Ablauf der für die Bewegung veranschlagten Simulationsdauer „bewegt“ es den Agenten durch Änderung seiner Position an diese Stelle. Als Bewegungsstrategien sind u.a. die zufällige Bewegung, das Verfolgen eines durch Umgebungsattribute dargestellten Gradientenfelds und die Bewegung entlang einer vorab geplanten Route vorgesehen. Bewegungsstrategien sind vom zugrunde liegenden Raummodell weitgehend unabhängig und funktionieren daher z.B. sowohl in Gittern als auch in Graphen.

Ein Schritt der Agentenbewegung wird durch Aufruf der Methode `move()` der Klasse `MobileAgent` bzw. `Movement` initiiert. Dabei bestimmt das `Movement`-Objekt zunächst mit Hilfe seiner Bewegungsstrategie die anzusteuernde Folgeposition. Unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit des Agenten berechnet es anschließend den

Simulationszeitpunkt, an dem der Agent die neue Position erreicht. Durch Vormerkung von Ereignissen veranlasst es das Umgebungsobjekt, die Position des Agenten zu diesem Zeitpunkt zu ändern und dem Agenten dabei ein spezielles Signal der Klasse `PositionReached` zu senden. Auf diese Weise kann der Agent auf den Ortswechsel reagieren, indem er beispielsweise seine Umgebung erneut wahrnimmt oder sich zu einer anderen Position weiterbewegt. Der Abbruch einer einmal begonnenen Agentenbewegung vor Erreichen der angesteuerten Position ist bislang nicht vorgesehen.

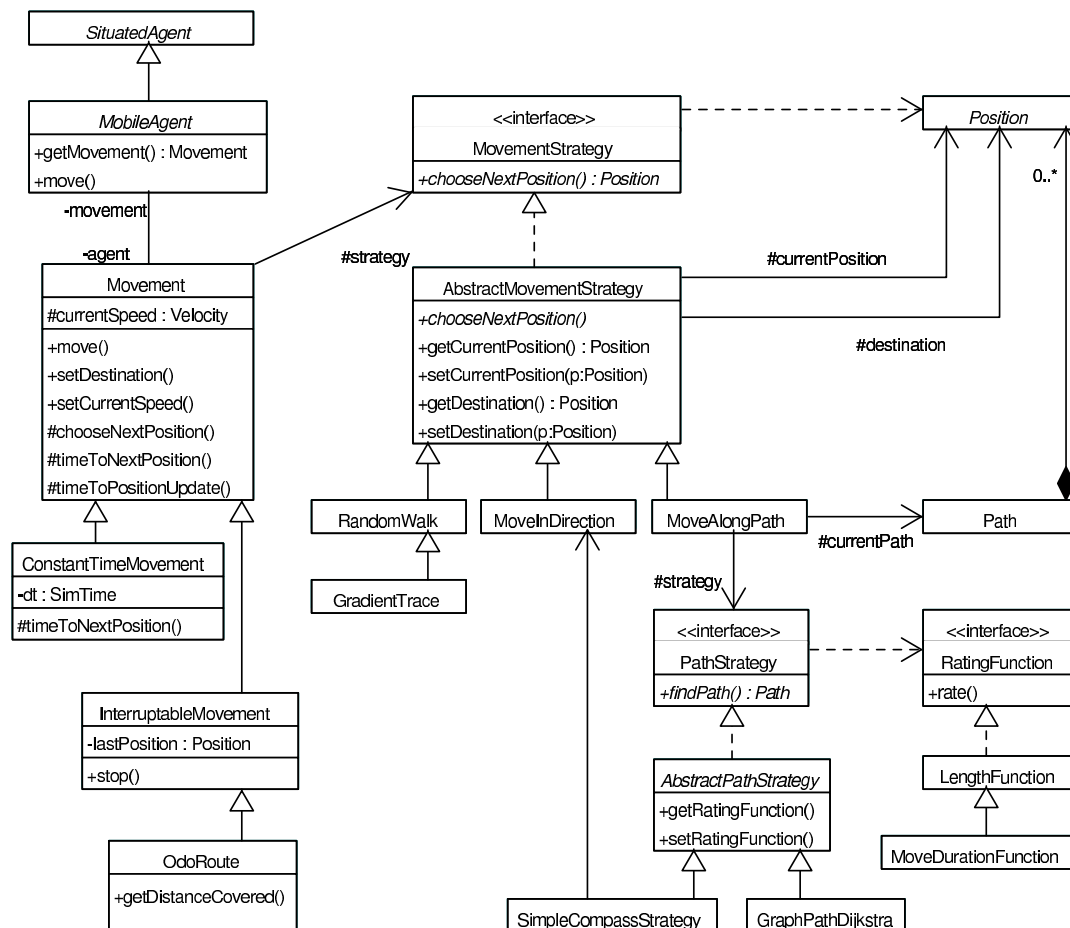


Abbildung 9: Klassenstruktur zur Modellierung „mobiler“ Agenten in FAMOS

Die u.a. zur Modellierung von Stadtkurieren nutzbare Bewegungsstrategie `MoveAlongPath` ermöglicht es einem Agenten, ausgehend von seiner aktuellen Position eine Route (d. h. eine Folge räumlicher Positionen) zu einer Zielposition zu planen und sich anschließend entlang dieser Route fortzubewegen. Zur Routenplanung dient eine entsprechend der Schnittstelle `PathStrategy` implementierte Suchstrategie (z.B. der bereits erwähnte Algorithmus von Dijkstra). Die Bewertung bei der Routensuche ermittelter Pfade erfolgt mit Hilfe einer die Schnittstelle `RatingFunction` implementierenden Bewertungsfunktion, welche den Pfad anhand von Attributen der enthaltenen Raumelemente bewertet. Eine nahe liegende Bewertungsfunktion für Graphen ist die Bewertung anhand der Länge der in einem Pfad enthaltenen Kanten. Prinzipiell sind jedoch auch andere Formen der Routensuche realisierbar wie z.B. die Suche der

schnellsten Route in einem graphbasierten Verkehrsnetz unter Berücksichtigung verschiedener „Straßentypen“.

Zur zielgerichteten Agentenbewegung entsprechend der Strategie `MoveAlongPath` kann die von `Movement` abgeleitete Klasse `OdoRoute`¹² verwendet werden, welche zusätzlich die Länge der zurückgelegten Strecken protokolliert. Darüber hinaus ermöglicht die `OdoRoute` zudem die Unterbrechung einer begonnenen Agentenbewegung vor Erreichen der angesteuerten Folgeposition. In diesem Fall erfolgt kein Positionswechsel des Agenten, die auf dem Weg zur Folgeposition bereits zurückgelegte Strecke geht jedoch in die Berechnung der Streckenlänge ein und wird berücksichtigt, sobald der Agent seine Bewegung fortsetzt. Die Bewegungsunterbrechung ist sinnvoll, wenn in Bewegung befindliche Agenten bei der Behandlung „unterwegs“ eingehender Signale ihre bereits zurückgelegte Strecke ermitteln oder eine geplante Route verändern müssen. Dieser Fall tritt beispielsweise im Modell des Stadtkurierdienstes immer dann auf, wenn Kurier während der Auslieferung einer Sendung einen weiteren Auftrag bewerten bzw. übernehmen (vgl. Abschnitt 7.2.3).

7 Agentenbasierte Modellierung und Simulation von Stadtkurierdiensten

Im diesem Kapitel wird zunächst das Basismodell eines Stadtkurierdienstes und die darauf aufbauenden Modelle der alternativen Logistikstrategien „Hub and Shuttle“ sowie „Innen/Außen“ vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Beschreibung der Implementation dieser Modelle im Framework FAMOS.

7.1 Festlegung relevanter Ein- und Ausgangsgrößen

Neben den in Interviews ermittelten Arbeitsabläufen als Ausgangspunkt der Verhaltensmodellierung steht für die Simulationen folgendes empirisches Datenmaterial zur Verfügung:

1. Das in einem geographischen Informationssystem (GIS) erstellte Verkehrsnetz der Stadt Hamburg in Form eines gerichteten Graphen. Kanten des Graphen sind Straßenabschnitte, während Knoten Kreuzungspunkte darstellen. Zusätzliche Kanteninformationen sind der Straßentyp (z.B. Autobahnen) und die Durchschnittsgeschwindigkeit. Das Verkehrsnetz liegt in zwei Detaillierungsstufen vor, wobei das gröbere Modell nur Hauptstraßen beinhaltet und aufgrund des geringeren Rechenaufwands zur Modellverifikation dient. Das detaillierte Modell umfasst etwa 17.000 Knotenpunkte, was bei der Simulation zu realistischeren Ergebnissen und deutlich höheren Rechenzeiten führt.
2. Von den Kurierdiensten zur Verfügung gestellte Daten des täglichen Auftragsaufkommens. Diese liegen als Listen eingehender Aufträge mit den Attributen Ankunftszeitpunkt, Abholort, Lieferort, Verkehrsmittelwunsch und Vermittlungs-

¹² Der Name dieser Klasse bezieht sich auf den Begriff Odometer (Streckenmesser).

zeitpunkt vor.

3. Informationen über an den relevanten Tagen tätige Kuriere mit den Attributen Fahrernummer, Verkehrsmittel, Heimatort, Arbeitsbeginn und Arbeitsende. Diese wurden teilweise aus den Auftragsdaten ermittelt.
4. Die Preisstruktur zur Berechnung der Auftragskosten, aus denen sich die Einnahmen der Kuriere ergeben. Pro Auftrag werden eine Anfahrtspauschale sowie eine Mindeststrecke von 3 km abgerechnet; längere Touren werden zusätzlich streckenbezogen vergütet.

Zur Untersuchung ökologischer, ökonomischer und sozialer Qualitäten verschiedener Organisationsformen sowie zur operationalen Validierung werden im Basismodell folgende Zielgrößen betrachtet:

1. Die mittlere motorisierte Fahrstrecke pro Auftrag als Kennzeichen für die ökologische Qualität.
2. Mittelwert und Standardabweichung des Ertrags pro gefahrenem Kilometer als Indikator für die Akzeptanz einer Organisationsform durch die Fahrer. Für motorisierte Kuriere gelten € 1,- pro Kilometer als akzeptabel. Biker kommen aufgrund geringerer Betriebskosten mit niedrigeren Umsätzen aus.
3. Durchschnittliche Lieferzeiten sowie die Anzahl nicht termingerecht ausgelieferter Aufträge und die maximale Verspätungszeit als Merkmal der ökonomischen Wettbewerbsfähigkeit. Modellvarianten, in denen bestimmte Aufträge überhaupt nicht ausgeliefert werden, deuten auf ein fehlerhaftes Modell hin.
4. Die durchschnittliche Vermittlungsdauer als Zeichen der Validität einer Vermittlungsstrategie. Tatsächliche Vermittlungsdauern sind in den Auftragsdaten enthalten und betragen im Mittel 6 bis 7 min.

7.2 Modellierung des Status Quo

Das erste Projektziel bestand in der Entwicklung eines Modells, welches den Ist-Zustand typischer Hamburger Stadtkurierdienste widerspiegelt und als Grundlage bzw. Referenz für die Evaluation alternativer Logistikkonzepte dienen soll. Ein ähnliches Modell wurde bereits 1997 als Teil einer Fallstudie im Rahmen des MOBILE-Projekts erstellt, allerdings in einem anderen technischen Rahmen implementiert (vgl. Hilty et al. 1998, S.291ff). Durch Einsatz von FAMOS und der zugehörigen Modellierhilfen können verschiedene Aspekte anschaulicher und näher am realen System modelliert werden.

In das Modell des Status Quo gehen folgende Annahmen ein, welche von beobachteten Organisationsformen verschiedener Kurierdienste abstrahieren und auch den weiteren Modellvarianten zu Grunde liegen:

1. Der Normalfall der Auftragsvergabe ist die Vermittlung, wobei ein Auftrag allen geeigneten Kurieren der Flotte angeboten wird. Die Kuriere bewerten jeden Auftrag nach identischen Kriterien und geben umso schneller eine Bewerbung ab, je besser die Bewertung ausfällt. Der erste interessierte Fahrer bekommt den Auftrag zugesprochen.

2. Es wird nur zwischen motorisierten und unmotorisierten Kurieren unterschieden. Verschiedene KFZ-Typen bleiben unberücksichtigt.
3. Bei der Auftragsvergabe werden Verkehrsmittelwünsche und Freistellungen, jedoch keine unterschiedlichen Freistellungsbezirke oder -dauern beachtet.
4. Kuriere können mehrere Aufträge gleichzeitig übernehmen und in geschachtelter Form abarbeiten. Jeder Kurier plant dabei eigenständig seine Touren. Neben der Minimierung der Fahrstrecke berücksichtigt er auch die Einhaltung der vom Kurierdienst garantierten maximalen Lieferdauer von 2,5 Stunden.
5. Kann ein Auftrag über längere Zeit nicht vermittelt werden, so führt der Vermittler eine „Druckvermittlung“ durch, die als Disposition abgebildet ist.

Die Umsetzung dieser Annahmen in ein Multiagenten-Modell umfasst die Modellierung der Umwelt, der Agenten sowie ihrer Organisationsstrukturen und Kommunikationsprotokolle.

7.2.1 Umweltmodellierung

Die Umwelt der Kuriere bildet das graphenbasierte Straßennetz, welches auf ein entsprechendes Raummodell in FAMOS abbildbar ist. Neben den Kurieren, denen zu jedem Simulationszeitpunkt die Position eines Verkehrsknotens zugeordnet ist, beinhaltet die Umwelt keine weiteren Objekte und auch keine eigene Dynamik. (Letztere wäre z.B. zur Darstellung des tageszeitabhängigen Verkehrsaufkommens erforderlich.) Die Kuriere bewegen sich zwischen Auftragspunkten entlang vorab geplanter Routen. Bei der Routensuche wird mit Hilfe des optimalen Suchalgorithmus von Dijkstra (vgl. Domschke 1989, S. 61) die schnellste Verbindung zwischen einem Start- und Zielknoten im Graphen ermittelt. In die Berechnung des Pfades gehen also sowohl Kantenlängen als auch durch Kantenattribute darstellbare durchschnittliche Geschwindigkeiten ein. Dabei sind jeder Kante verschiedene Geschwindigkeiten für motorisierte und unmotorisierte Kuriere zugeordnet. Auf diese Weise ist auch die unterschiedliche Nutzung von Straßen durch Autofahrer und Biker modellierbar. Bikern wird die Fahrt auf Autobahnen untersagt, indem die zugehörigen Geschwindigkeiten auf 0 gesetzt und entsprechende Pfade daher niemals gewählt werden. Andererseits wird Bikern üblicher Praxis gehorchend das Befahren von Einbahnstraßen in beiden Richtungen gestattet. Die Verwendung optimaler Routensuche erscheint angemessen, da Kurierfahrer allgemein über sehr gute Ortskenntnisse verfügen.

7.2.2 Organisation und Kommunikation

Aus Sicht der Funker ist die Kurierflotte in mehrere funktionale Rollen unterteilt, die bei der Auftragsvermittlung unterschiedlich zu behandeln sind:

1. Das Verkehrsmittel jedes Kuriers ist für die Einhaltung der Verkehrsmittelpräferenzen von Aufträgen zu beachten.
2. Der Beschäftigungsstatus jedes Kuriers ist aufgrund der Bevorzugung freigestellter Kuriere bedeutsam.

Diese Organisationsform kann durch eine hierarchische Gruppenstruktur modelliert werden, wobei die übergeordnete Gruppe aller angemeldeten Kuriere vier Untergruppen für jede mögliche Kombination der Kriterien (freigestellte Biker, beschäftigte Biker, usw.) enthält. Verändert sich der Status eines Kuriers bei Arbeitsbeginn, Arbeitsende, Freistellung oder Neubeschäftigung, so wechselt er entsprechend die Gruppenzugehörigkeit.

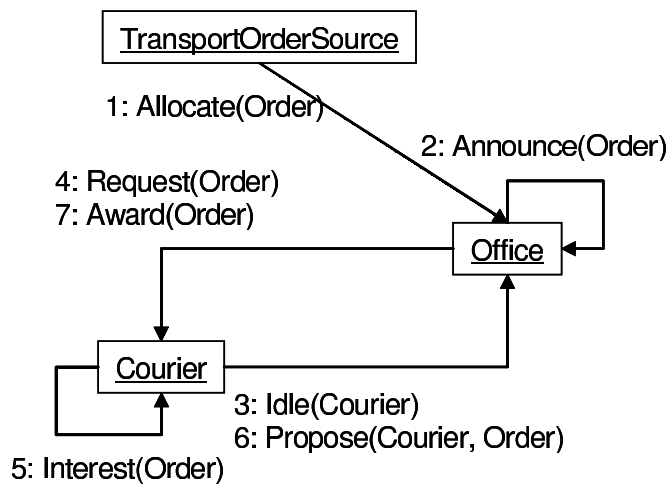


Abbildung 10: Vermittlungsprotokoll des Kurierdienst-Modells.

Abbildung 10 zeigt das Kommunikationsprotokoll der Auftragsvermittlung als UML-Kollaborationsdiagramm¹³. Da es sich aus theoretischer Sicht prinzipiell um eine Variante des aus der verteilten künstlichen Intelligenz bekannten Kontraktnetz-Protokolls¹⁴ (Smith 1980) handelt, werden die englischen Bezeichnungen der standardisierten Nachrichtentypen beibehalten. An der Kommunikation beteiligte Rollen sind Kuriere, Vermittler und Kunden, die über typisierte Nachrichten kommunizieren. Von mehreren beschäftigten Vermittlern wird durch Zusammenfassung zu einem einzigen Objekt *Zentrale* abstrahiert. Kunden werden zu einer Auftragsquelle zusammengefasst, welche anhand der vorliegenden Auftragsdaten zu bestimmten Zeitpunkten Transportaufträge ins System schleust. Die Auftragsvermittlung beginnt, indem die Auftragsquelle ein mit dem Auftrag parametrisiertes Signal *Allocate* an die Zentrale sendet. Die Zentrale merkt sich daraufhin selbst ein Signal *Announce* zum sofortigen Termin der ersten Auftragsverlesung vor. Die Zentrale verliest die einzelnen Aufträge in einem festen Zeitabstand nacheinander vor jeder Kuriergruppe, die zu deren Bearbeitung fähig ist. Abhängig vom Verkehrsmittelwunsch wird dabei folgende Verlesungsreihenfolge eingehalten:

¹³ Für eine nähere Erläuterung der Notation von Kollaborationsdiagrammen siehe z.B. (Österreich 1999, S. 301ff).

¹⁴ Das Kontraktnetz-Protokoll ist das am weitesten verbreitete Interaktionsprotokoll für Agenten, die bei der Lösung eines Problems kooperieren. Es gründet sich auf die Vertragsmechanismen, mit denen Unternehmen den Austausch von Gütern und Dienstleistungen regeln.

1. Auto-Aufträge werden zuerst allen freigestellten und anschließend allen beschäftigten Autofahrern angeboten. Biker können diese Auftragsart nicht ausführen.
2. Bike-Aufträge werden erst den freigestellten Bikern, dann den beschäftigten Bikern, als nächstes den freigestellten Autofahrern und zuletzt den beschäftigten Autofahrern angeboten.

Sobald eine Verlesung ansteht, sendet der Zentralen-Agent ein mit dem Auftrag parametrisiertes Signal *Request* an die nächste Kuriergruppe und merkt sich selbst die folgende Verlesung zum nächsten Verlesezeitpunkt vor. Alle angesprochenen Kuriere erhalten das *Request*-Signal und bewerten den Auftrag quantitativ anhand weiter unten genannter Kriterien. Das auf diese Weise ermittelte Auftragsinteresse jedes Kuriers wird auf eine „Bedenkzeit“ abgebildet, die umso kürzer ausfällt, je höher das Interesse ist. Jeder Kurier merkt sich im Anschluß an die Bewertung selbst ein Signal *Interest* nach Ablauf seiner Bedenkzeit vor und sendet bei Eintritt dieses Signals als Abgabe seiner Bewerbung ein *Propose*-Signal an die Zentrale. Der erste Kurier, dessen Bewerbung bei der Zentrale eintrifft, bekommt den Auftrag durch Zusendung des Signals *Award* zugesprochen und ordnet diesen nach einer weiter unten beschriebenen Strategie in seine Tour ein. Alle später eingehenden *Propose*-Signale werden von der Zentrale verworfen.

Die Zentrale liest jeden Auftrag allen geeigneten Kuriergruppen vor, bis der erste Kurier Interesse bekundet. Zeigt kein Kurier Interesse, so beginnt ein neuer Verlesungszyklus. Das Verhalten der Zentrale ändert sich, falls ein Auftrag innerhalb der vorgegebenen kritischen Zeitspanne nach Eingang nicht vermittelt werden konnte. Unter diesen Umständen muss berücksichtigt werden, dass der Funker die Einhaltung der garantierten Lieferzeit gefährdet sieht und beginnt, bei der Vermittlung Druck auszuüben. Dies ähnelt einer Disposition und ist im Modell folgendermaßen abgebildet: Zum ersten Verlesungszeitpunkt eines Auftrags nach Ablauf der kritischen Zeitspanne bestimmt die Zentrale den Kurier, dessen Standort dem Abholpunkt am nächsten liegt. Dabei berücksichtigt sie den Verkehrsmittelwunsch und bevorzugt freigestellte Kuriere. Anschließend sendet sie dem ermittelten Kurier ein *Award*-Signal, um anzuzeigen, dass er den Auftrag ausführen soll. Der Kurier ordnet den Auftrag in seine bestehende Tour ein und berücksichtigt dabei, dass es sich um einen „kritischen“ Auftrag handelt, der so schnell wie möglich auszuführen ist. Findet die Zentrale keinen Kurier, an den der Auftrag disponiert werden kann, weil z.B. bei der Disposition eines Autoauftrags nur Biker angemeldet sind, so merkt sie den nächsten Dispositionsversuch vor.

Ein weiterer Sonderfall ist zu berücksichtigen, wenn sich ein Kurier nach der Ausführung seines letzten Auftrags frei meldet. Zu diesem Zweck sendet er ein Signal *Idle* an die Zentrale. Bei Erhalt des Signals bestimmt die Zentrale unter allen noch nicht vermittelten Aufträgen denjenigen vom frei gemeldeten Kurier ausführbaren, dessen Abholpunkt seinem Standort am nächsten liegt. Existiert ein solcher Auftrag, so sendet die Zentrale ihn mit einem *Award*-Signal an den Kurier. Ansonsten bleibt der Kurier freigestellt. Innerhalb dieses Vermittlungsprotokolls kann mit geringen Modifikationen auch die reine Dispositionsstrategie von Kurierdienst B simuliert werden. Dazu ist lediglich

die kritische Vermittlungszeitspanne, nach deren Ablauf die Zentrale die Disposition eines Auftrags vorsieht, auf 0 zu setzen. Somit erfolgt die Disposition jedes Auftrags unmittelbar nach seinem Eingang ohne dass das Verhalten der Agenten angepasst werden muss. Zusätzlich muss die Disposition auf freigestellte Kuriere beschränkt werden, da bei Kurierdienst B jeder Fahrer nur einen Auftrag zur Zeit übernehmen darf.

7.2.3 Modellierung der Kuriere

Der Zustand eines Kuriers ist durch folgende Attribute gekennzeichnet:

1. Eine eindeutige Fahrernummer.
2. Ein Verkehrsmittel mit den Eigenschaften Typ (Auto, Fahrrad), durchschnittliche Geschwindigkeit, Betriebskosten und „Umweg-Faktor“. Aufgrund ihrer größeren Flexibilität im Stadtverkehr sind Biker im Modell mit durchschnittlich 25 km/h schneller als Autofahrer mit 20 km/h. Die Betriebskosten eines Autos werden mit € 0,25 pro Kilometer höher als die eines Fahrrads mit € 0,05 angenommen. Der Umweg-Faktor bildet die Dichte des Verkehrsnetzes ab und dient zur Verbesserung der Entfernungsabschätzung gegenüber der reinen Luftliniendistanz.¹⁵
3. Arbeitsbeginn und geplantes Arbeitsende.
4. Die momentane Position im Verkehrsnetz.
5. Eine Tour, welche die Abhol- und Lieferpunkte aller derzeit vom Kurier übernommenen Aufträge in der Reihenfolge der geplanten Abarbeitung enthält.
6. Der aktuell vom Kurier bearbeitete Auftrag. Dieser ist nicht gesetzt, falls der Kurier freigestellt ist.
7. Weitere im Simulationslauf akkumulierte Größen wie Gesamtstrecke oder bisheriger Umsatz, die hauptsächlich für die Datensammlung relevant sind.

Das Verhalten eines Kuriers kann wie in Abbildung 11 durch ein hierarchisches Zustandsdiagramm (vgl. Österreich 1999, S. 310ff) modelliert werden und setzt sich im Wesentlichen aus den Aspekten „Kommunikation mit der Zentrale“ und „Auftragsausführung“ zusammen. Der Lebenszyklus jedes Kuriers beginnt zum Zeitpunkt seines aus den Fahrerdaten ermittelten Arbeitsbeginns. Zunächst nimmt er den Zustand *Im_Dienst* ein, wobei als Eintrittsaktion *Arbeit aufnehmen* verschiedene Aktualisierungen der Statistik durchgeführt werden. Ein Zeitsignal wird für den Zeitpunkt des geplanten Arbeitsendes vorgemerkt. Im nächsten Schritt nimmt der Kurier den Zustand *Freigestellt* ein, wobei er sich freimeldet, d.h. der Zentrale ein Signal *Idle* sendet und sich der seinem Verkehrsmittel zugeordneten Gruppe freigestellter Kuriere anschließt. Da über längere Zeit freigemeldete Kuriere meist nicht an ihrem Standort verharren,

¹⁵ Der für Kfz auf städtischen Straßen geeignete Umweg-Faktor von 1,3 bedeutet, dass die auf dem Straßennetz zurückzulegenden Wege im Schnitt 1,3 mal so lang sind wie die direkte Luftlinienentfernung.

sondern in Richtung eines höheren Auftragsaufkommens fahren, wird in *Freigestellt* ein weiteres Zeitsignal vorgemerkt. Nach Ablauf dieser Wartezeit „verliert der Kurier die Geduld“ und beginnt, sich zu einem markanten Punkt in der Stadtmitte zu bewegen, wo generell ein hohes Auftragsaufkommen zu erwarten ist.¹⁶

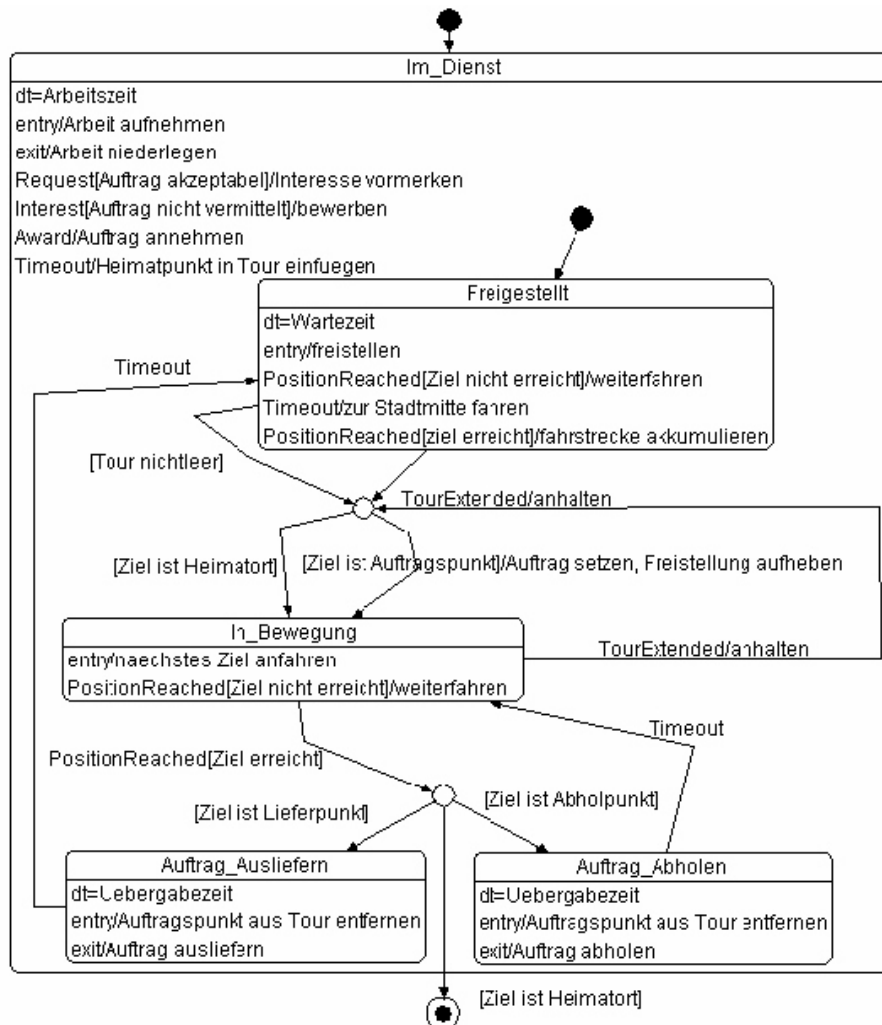


Abbildung 11: Zustandsdiagramm eines Kuriers.

Die Kommunikation zwischen Kurier und Zentrale erfolgt durch statische Reaktionen des Zustands *Im_Dienst*. Erhält der Kurier ein *Request*-Signal, so berechnet er sein Interesse am beigefügten Auftrag. Falls dieses einen Grenzwert überschreitet, erscheint der Auftrag dem Kurier akzeptabel und er merkt für den Ablauf seiner Bedenkzeit ein *Interest*-Signal vor. Bei Eintritt dieses Signals prüft der Kurier zunächst, ob der zugehörige Auftrag bereits an einen anderen vermittelt wurde¹⁷ und bekundet andern-

¹⁶ Alternativ zu dieser einfachen Heuristik könnte er das Auftragsaufkommen beobachten und den daraus errechneten Schwerpunkt aller relevanten Aufträge ansteuern, was allerdings ein komplexeres Verhaltensmodell zur Folge hätte.

¹⁷ Die Überprüfung erfolgt durch Abfrage eines Attributs „ausführender Kurier“, das bei vermit-

falls durch Aussenden eines *Propose*-Signals der Zentrale sein Interesse. Bekommt der Kurier den Auftrag zugesprochen, so erhält er ein *Award*-Signal, auf das er mit der Einsortierung des Auftrags in die bestehende Tour reagiert.

Mit der letzten Reaktion des Zustands *Im_Dienst* behandelt der Kurier das zum geplanten Arbeitsende eintretende Zeitsignal. Auf dieses Signal kann nicht mit unmittelbarer Niederlegung der Arbeit reagiert werden, da die Tour möglicherweise noch Aufträge enthält, die zuvor abgearbeitet werden müssen. Stattdessen fügt der Kurier seinen speziell gekennzeichneten Heimatort als letzten anzufahrenden Punkt in die Tour ein. Auf diese Weise fährt er im Anschluss an alle noch ausstehenden Auftragspunkte zum Heimatort und beendet bei dessen Erreichung seinen Lebenszyklus. Nach Ablauf der regulären Arbeitszeit bewirbt sich der Kurier weiterhin um angebotene Aufträge, berücksichtigt bei der Berechnung des Auftragsinteresses jedoch, inwiefern deren Ausführung mit der Heimfahrt vereinbar ist.

Bei jedem Einfügen eines weiteren Punktes in die Tour wird ein Signal *TourExtended* vorgemerkt. Dieses signalisiert, dass der Kurier nun den ersten Punkt der Tour anfahren soll. Im Zustand *Freigestellt* wird das Signal durch einen Übergang nach *In_Bewegung* behandelt. Zuvor prüft der Kurier jedoch, ob der anzufahrende Punkt ein Auftragspunkt oder der Heimatort ist. Im ersten Fall wählt er den zugehörigen Auftrag zur Bearbeitung aus und hebt die Freistellung auf, indem er von der Gruppe der freigestellten in die der beschäftigten Kuriere wechselt. Bei Eintritt in den Zustand *In_Bewegung* berechnet er in der Eintrittsaktion die schnellste Verbindung zwischen seinem momentanen Standort und dem nächsten Punkt der Tour und beginnt anschließend, diesen Pfad im Verkehrsnetz abzufahren. Wenn das angestrebte Ziel erreicht ist, wechselt der Kurier in den Zustand der Warenübergabe. Werden während der Fahrt weitere Auftragspunkte in die Tour eingefügt, tauscht der Kurier gegebenenfalls sein aktuelles Ziel gegen einen neuen, günstiger gelegenen Auftragsort aus.

Die Abholung bzw. Auslieferung der Aufträge in den Zuständen *Auftrag_Abholen* und *Auftrag_Ausliefern* unterscheidet sich nur geringfügig. In beiden Fällen wird der nunmehr erreichte Auftragspunkt aus der Tour entfernt und anschließend eine im Modell mit 5 min veranschlagte Übergabezeit abgewartet. Beim Austritt aus dem jeweiligen Zustand erfolgt die Übergabe der Sendung, die in der Implementation hauptsächlich im Setzen einiger Auftragsattribute und Aktualisierung von Statistiken besteht. Beim Verlassen des Zustands *Auftrag_Abholen* erfolgt ein direkter Übergang nach *In_Bewegung*, da auf jeden Fall noch der Lieferpunkt des entsprechenden Auftrags in der Tour enthalten ist. Beim Verlassen von *Auftrag_Ausliefern* kann die Tour hingegen auch leer sein. Zur Vereinfachung der Diagrammstruktur wird hier in jedem Fall der Zustand *Freigestellt* eingenommen und, falls die Tour nicht leer ist, über die implizite Transition sofort wieder verlassen.

Abschließend sollen mit der Berechnung des Auftragsinteresses und der Touren-

telten Aufträgen gesetzt ist. Sie dient lediglich der Reduktion des Nachrichtenaufkommens und könnte für die korrekte Funktion des Modells auch entfallen.

planung die nicht im Zustandsdiagramm darstellbaren Aspekte des Kurierverhaltens kurz erläutert werden. Die zugrunde liegenden Ideen wurden aus dem MOBILE-Projekt (Hilty et al. 1998) übernommen und an die neuen Gegebenheiten angepasst. Zur Tourenplanung verwenden die Kuriere eine suboptimale Strategie, bei der Abhol- und Lieferpunkt eines neu angenommenen Auftrags mit möglichst geringem Umweg in die bestehende Tour eingefügt werden. Dazu wird im ersten Schritt der Abholpunkt und im zweiten der Lieferpunkt mit kleinstem Umweg zwischen zwei bestehenden Punkten der Tour eingeordnet. (Natürlich sind hierbei nur Lösungen gültig, die den Lieferpunkt hinter dem Abholpunkt einordnen.) Sobald nach Ablauf der regulären Arbeitszeit der Heimatort als letzter Punkt der Tour enthalten ist, bezieht der Kurier auch diesen in die Tourenplanung ein. In diesem Fall wird die Ausführung neuer Aufträge also bereits hinsichtlich der geplanten Heimfahrt betrachtet. Als erster Punkt der Tour wird stets der momentane Standort des Kuriers angenommen.

Zur Abschätzung der Entfernungen zwischen Auftragspunkten wird nicht das Straßennetz selbst, sondern die mit dem Umweg-Faktor des Fahrzeugs gewichtete Luftlinien-distanz verwendet. Dabei wird für Fahrräder mit 1,2 ein geringerer Faktor als für Autos mit 1,3 angenommen. Zusätzlich berücksichtigt die Abschätzung markante zu umfahrende Hindernisse im Stadtgebiet, zu denen in erster Annäherung nur die Alster gehört. Der Einsatz suboptimaler Tourenplanung erscheint angemessen, da Kuriere über Sprechfunk eine Vielzahl von Auftragsangeboten verfolgen und sich in kurzer Zeit entscheiden müssen. Zudem ist die Strategie aufgrund linearer Zeitkomplexität effizient ausführbar. Von der Zentrale zudisponierte und als „kritisch“ deklarierte Aufträge werden bei der Tourenplanung gesondert behandelt, indem ihre Auftragspunkte nicht mit geringstem Umweg, sondern stets am Anfang der Tour (bzw. hinter bereits vorhandenen „kritischen“ Aufträgen) einsortiert werden.

Die Berechnung des Auftragsinteresses erfolgt anhand eines in (Reick 1997) vorgeschlagenen und hier leicht modifizierten Schemas. Dieses berücksichtigt neben der Einhaltung der garantierten Lieferdauer die Kriterien Auftragsnutzen, Auftragsbedarf und individuelle Auslastung. Wird beim Einfügen eines neuen Auftrags o in die Tour die mit 2,5 h veranschlagte maximale Lieferdauer dieses oder eines bereits vorhandenen Auftrags überschritten, so lehnt der Kurier stets ab. Ansonsten bewertet er zunächst den Nutzen $Q(c, o)$ des neuen Auftrags, der als Verhältnis des zusätzlichen Gewinns (abzüglich der Fahrkosten) zur zusätzlichen Fahrzeit quantifiziert wird:

$$Q(c, o) = \text{revenues}(c, o) / \text{detour}(c, o) - \text{cost}(c) \cdot v_{\text{avg}}(c).$$

Dabei ist $\text{revenues}(c, o)$ der vom Kurier c mit Auftrag o erzielbare Umsatz und $\text{detour}(c, o)$ der zur Bearbeitung erforderliche Umweg gegenüber der bestehenden Tour. $\text{cost}(c)$ und $v_{\text{avg}}(c)$ bezeichnen Betriebskosten und Durchschnittsgeschwindigkeit des Kurierfahrzeugs.

Die Bereitschaft des Kuriers zur Annahme eines Auftrags hängt nicht allein vom absoluten Auftragsnutzen ab. Wurden ihm bislang nur wenige Aufträge vermittelt, so ist er aufgrund eines höheren Auftragsbedarfs eher bereit, auch Aufträge geringerer Qualität anzunehmen. Die quantitative Bewertung des Auftragsbedarfs berücksichtigt im Modell

allerdings nur die momentane Auftragslage $S(c)$ des Kuriers, die als Verhältnis der benötigten Zeit zur Abarbeitung der bestehenden Tour und der garantierten Lieferdauer operationalisiert werden kann:

$$S(c) = T(c) / T_{max}$$

Dabei ist $T(c)$ die geschätzte Bearbeitungsdauer der momentan angenommenen Aufträge und T_{max} die vom Kurierdienst garantierte maximale Lieferzeit. Ist $S(c) \geq 1$ so kann der Kurier keinen weiteren Auftrag annehmen, ohne die Lieferzeit mindestens eines Auftrags zu gefährden. Folglich ist der Auftragsbedarf in diesem Fall 0. Hat der Kurier dagegen keinerlei Aufträge angenommen, so ist der Auftragsbedarf am höchsten und wird der Einfachheit halber als 1 angenommen. Geht man davon aus, dass der anfänglich hohe Bedarf relativ schnell sinkt, sobald die ersten Aufträge vorhanden sind, und durch Akquirierung weiterer Aufträge geringfügiger beeinflusst wird, so kann der Auftragsbedarf $N(c)$ durch eine negativ-exponentielle Funktion ausgedrückt werden:

$$N(c) = (e^{-q \cdot S(c)} - e^{-q}) / (1 - e^{-q}).$$

Dabei ist q ein freier Parameter, welcher bestimmt, wie stark sich die Exponentialfunktion einer Geraden annähert. Anhand der Größen Auftragsnutzen und Auftragsbedarf lässt sich das Interesse des Kuriers an zu bewertenden Auftrag darstellen. Dieses kann prinzipiell dem Auftragsbedarf gleichgesetzt werden, da mit zunehmendem Bedarf die Bemühungen um einen Auftrag steigen. Ob sich um einen Auftrag beworben wird, hängt vom Auftragsnutzen ab. Ist allerdings der Auftragsbedarf hoch, werden schlechte Aufträge eher akzeptiert. Aus diesem Grund wird der „absolute“ Nutzen durch den „scheinbaren“ mit dem Auftragsbedarf gewichteten Nutzen $Q(c, o) \cdot N(c)$ ersetzt. Überschreitet dieser eine „Akzeptanzschwelle“ θ , so bewirbt der Kurier sich um den Auftrag, ansonsten bleibt die Bewerbung aus. Die Akzeptanzschwelle wird durch die mit einem Faktor gewichtete bisherige Auslastung $util(c)$ des Kuriers (Verhältnis der Arbeitszeit zur Gesamtzeit seit seiner Anmeldung) modelliert, da zu erwarten ist, dass Kuriere umso „wählerischer“ bei der Auftragsbewertung vorgehen, je mehr Aufträge sie bereits ausgeführt haben:

$$\theta = w \cdot util(c).$$

Die Auslastung ist zudem bei Fahrradkurieren stärker zu gewichten, da diese aufgrund physikalischer Anstrengung schneller ermüden. Der letzte Schritt besteht in der Abbildung des Auftragsinteresses auf die Bedenkzeit t_{delib} des Kuriers bezüglich des Auftrags. Diese verläuft umgekehrt proportional zum Auftragsinteresse und wird zusätzlich mit einem Zeitfaktor gewichtet:

$$t_{delib} = \delta \cdot (1 - N(c)).$$

7.2.4 Modellierung der Zentrale

Das Verhalten der Zentrale ist einfacher als das der Kuriere und stellt im Wesentlichen eine Variante des Vermittlers aus dem Kontraktnetz-Protokoll dar. Die Zentrale verfügt über eine Liste aller zur Vermittlung stehenden Aufträge und behandelt diese entsprechend dem in Abbildung 12 dargestellten Zustandsdiagramm. Zu Beginn ihres Lebens-

zyklus wartet sie im Zustand *Warten* auf eingehende Signale. Sobald das Signal *Allocate* den Eingang eines Auftrags meldet, trägt sie diesen in die Auftragsliste ein, bestimmt alle geeigneten Kuriergruppen und merkt ein *Announce*-Signal für die erste Verlesung vor. Anschließend geht sie in den Zustand *Aktiv* über, der im Anschluß an jede Handlung besucht wird. Der Aufenthalt in *Aktiv* bildet die Zeit ab, welche die Zentrale zur Ausführung ihrer Aktivitäten benötigt und in der keine weiteren Signale bearbeitet werden können. Diese Zeit kann ggf. auch vernachlässigt werden.

Zu jedem Verlesungstermin eines Auftrags prüft die Zentrale, ob der „kritische“ Zeitpunkt, ab dem mit der Disposition begonnen wird, bereits erreicht ist. In diesem Fall wird versucht, den Auftrag zu disponieren. Dazu bestimmt die Zentrale unter Berücksichtigung der Verkehrsmittelpräferenz und der Freistellungen denjenigen Kurier, dessen Standort dem Abholpunkt am nächsten liegt und sendet diesem ein *Award*-Signal. Wird kein Kurier gefunden, so merkt sie den nächsten Dispositionsversuch vor. Kann der Auftrag noch herkömmlich vermittelt werden, sendet sie allen Kurieren der nächsten anstehenden Kuriergruppe ein *Request*-Signal, woraufhin diese den Auftrag bewerten. Anschließend merkt sie die Verlesung vor der folgenden relevanten Kuriergruppe zum nächsten Verlesezeitpunkt vor.

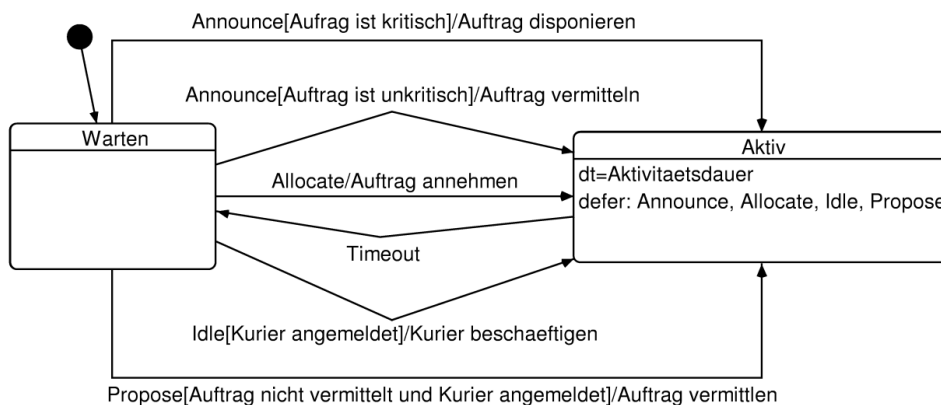


Abbildung 12: Zustandsdiagramm der Kurierdienst-Zentrale.

Geht das Angebot *Propose* eines Kuriers ein, so prüft die Zentrale, ob der betreffende Auftrag nicht bereits vermittelt wurde, und der anbietende Kurier noch angemeldet ist. Wenn beides der Fall ist, gewährt sie dem Kurier als erstem Bieter durch ein *Award*-Signal den Zuschlag und löscht anschließend den Auftrag aus der Auftragsliste; damit gilt der Auftrag als vermittelt. Auch beim Eingang einer Freimeldung *Idle* prüft die Zentrale zunächst, ob der freimeldende Kurier noch angemeldet ist, da er möglicherweise in der Zeit zwischen der Abgabe der Freimeldung und deren Bearbeitung durch die Zentrale die Arbeit niedergelegt hat. Ist der Kurier noch angemeldet, versucht die Zentrale, ihn mit dem am besten geeigneten Auftrag der Auftragsliste zu beschäftigen.

7.3 Modellierung alternativer Logistikkonzepte

Auf der Grundlage des Basismodells können mit relativ geringen Modifikationen Modelle der alternativen Logistikkonzepte „Hub and Shuttle“ und „Innen/Außen“ entwickelt werden. Dabei wurde versucht, das Verhalten der beteiligten Agenten (Kuriere und Zentrale) so geringfügig wie möglich zu verändern. Dies erlaubt es einerseits, Auswirkungen der Logistikstrategien isoliert betrachten zu können, und erfüllt andererseits die Forderung nach möglichst weitgehender Beibehaltung bestehender Kurierdienst-Strukturen.

7.3.1 Hub and Shuttle

Im Modell der „Hub and Shuttle“-Strategie wird von drei bzw. fünf auf Basis einer manuellen Auftragsanalyse ermittelten Schwerpunktgebieten mit zugehörigen Umschlagpunkten ausgegangen. Den Aufträgen werden als zusätzliche Attribute ein Start- und ein Ziel-Hub zugeordnet, welche nur dann gesetzt sind, wenn der Auftrag über das Hub-System abzuwickeln ist. Zwischen den Hubs verkehren zwei Lieferanten in festem Linienverkehr mit gegenläufiger Richtung. Die Anfahrtspauschale der über Umschlagpunkte abgewickelten Aufträge wird halbiert, da diese aufgrund der doppelten Vermittlung zwei Anfahrten, jedoch oft nur geringe Anfahrtswege erfordern.

Bei Eingang eines Auftrags bestimmt die Zentrale anhand der Auftragsattribute zunächst, ob dieser über einen Hub abzuwickeln ist. Dies ist der Fall, wenn Abhol- und Lieferpunkt in unterschiedlichen Schwerpunktgebieten liegen und die unter Berücksichtigung des „Umweg-Faktors“ geschätzte Auftragsdistanz 3 km überschreitet. Dementsprechend vermittelt die Zentrale den Auftrag entweder vom Sender zum Empfänger oder zum Hub des Startgebiets. Das übrige Vermittlungsverfahren unterscheidet sich nicht vom Basismodell. Auch das Verhalten der Kuriere bleibt weitgehend unverändert, wobei zusätzlich das Abholen und Deponieren von Aufträgen am Umschlagpunkt zu berücksichtigen ist. Von Kurieren zu unterscheiden sind dagegen die Lieferanten. Jeder Lieferant fährt nacheinander alle Umschlagpunkte seiner festgelegten Tour an. Bei der Ankunft liefert er zunächst die für das jeweilige Gebiet bestimmten Aufträge ab, indem er diese am Hub deponiert. Anschließend teilt er der Zentrale mit, welche Aufträge abgeliefert wurden, damit diese mit der zweiten Vermittlung vom Ziel-Hub zum Empfänger beginnt. Die Meldung erfolgt durch ein *Allocate*-Signal und wird somit als modifizierter Auftragseingang behandelt. Im letzten Schritt entnimmt der Lieferant alle Aufträge aus dem Hub, die zur Lieferung in ein anderes Schwerpunktgebiet bestimmt sind, und setzt seine Tour fort.

Der Lieferverkehr beginnt mit dem Start der Simulation und endet zu einem Zeitpunkt, zu dem keine relevanten Auftragsmengen mehr für den Transport über das Hub-System eingehen. (Im Modell wird dies für 19:30 des simulierten Arbeitstages festgelegt.) Die von den Shuttles zurückgelegten Gesamtstrecken gehen zusätzlich in die Berechnung des motorisierten Verkehrsaufwands ein.

7.3.2 Innen/Außen

Im „Innen/Außen“-Modell wird ein zusätzlicher Agententyp „Bereichskurier“ eingeführt. Jeder Bereichskurier ist genau einem Außenbezirk zugeordnet und führt ausschließlich Aufträge aus, deren Abhol- oder Lieferpunkt in diesem Bezirk liegt. Dabei werden Aufträge, die vollständig innerhalb des Außenbezirks liegen, direkt ausgeliefert, während die Abwicklung von Aufträgen zwischen Außen- und Innenbezirk (bzw. zwischen zwei verschiedenen Außenbezirken) über den zentralen Hub erfolgt.

Nach Festlegung einer geeigneten Aufteilung des Stadtgebiets in Innen- und Außenbezirke besteht das erste Modellierungsproblem in der Gebietszuordnung der Kuriere. Da diese zugunsten größerer Flexibilität nicht statisch (d.h. fest in den Eingangsdaten codiert) erfolgen soll, wird sie anhand des folgenden einfachen Verfahrens bestimmt: Für jeden Außenbezirk wird auf Grundlage des lokalen Auftragsaufkommens eine maximale Kapazität dort beschäftigter Kuriere bestimmt (z.B. 7 Kuriere für Bezirke mit stärkerem Auftragsaufkommen, 4 Kuriere für weniger frequentierte Bezirke). Bei Arbeitsbeginn wird jeder motorisierte Kurier dem Außen- bzw. Innenbezirk zugeordnet, in dem momentan am wenigsten Kuriere beschäftigt sind und dessen Kapazität nicht überschritten ist. Ist die Kapazität aller Außenbezirke überschritten, wird der Kurier dem Innenbezirk zugeordnet. Ebenso werden Biker stets dem Innenbezirk zugewiesen, da ihr Verkehrsmittel für die in den Außenbezirken erwünschte hohe Auftragsbündelung ungeeignet ist.

Die Gebietszuteilung und Vermittlung der Aufträge obliegt wiederum der Zentrale. Bei Eingang eines Auftrags bestimmt diese zunächst dessen Start- und Zielgebiet. Aufträge mit Abhol- und Lieferpunkt im Innengebiet werden unter Berücksichtigung der bekannten Prioritäten (Freistellung und Verkehrsmittelwunsch) vor den Kurieren des Innengebiets verlesen, die sich anschließend wie im „Status Quo“-Modell bewerben. Ein „Außen“-Auftrag wird dagegen stets demjenigen Bereichskurier aus dem entsprechenden Außengebiet zugeordnet, der den Auftrag mit minimalem Umweg bezüglich seiner bisherigen Tour ausliefern kann. Um eine gleichmäßige Auslastung der Bereichskuriere zu gewährleisten, werden auch hier Freistellungen bevorzugt. Dieses Verfahren bildet eine sorgfältigere Absprache der (wenigen) Bereichskuriere eines Außengebiets bei der Tourenplanung ab, da die Anwendung des herkömmlichen Vermittlungsmodells in den Außenbezirken nicht zu befriedigenden Ergebnissen führte.

Das Verhalten der Bereichskuriere weicht im Gegensatz zu den im Innenbezirk eingesetzten Kurieren vom „Status Quo“-Modell ab. Aufträge, die über den zentralen Hub abzuwickeln sind, werden vom Bereichskurier nicht unmittelbar bei Eingang ausgeführt. Stattdessen werden sie während 30-minütiger Intervalle gesammelt. Erst nach Ablauf eines solchen Zeitfensters werden die angesammelten Aufträge in die momentane Tour des Kuriers eingeplant, und auf diese Weise Bündelungschancen für die Fahrt zum zentralen Hub erhöht. Bei Ankunft am Hub werden alle dort abgelieferten Aufträge (ähnlich wie im „Hub and Shuttle“-Modell) der Zentrale durch ein *Allocate*-Signal zur zweiten Vermittlung gemeldet. Aufträge, die vollständig innerhalb eines Außenbezirks liegen, werden von den Bereichskurieren nicht gesammelt, sondern unmittelbar in die Tour eingeplant.

7.4 Implementation im Simulationsframework FAMOS / DESMO-J

Die bereits weitgehend operationalisierten Modelle können unter Verwendung der Klassen des Frameworks FAMOS mit relativ geringem Aufwand implementiert werden. Abbildung 13 zeigt zunächst die Implementation der Agenten als wichtigster Modellkomponenten. Die Zentrale (*Office*) wird als rein kommunizierender Agent von der Klasse *Agent* abgeleitet. Ihr Verhalten wird im von FAMOS bereitgestellten Editor für Zustandsdiagramme entsprechend dem Modell aus Abbildung 11 implementiert. Dabei sind lediglich die verbalen Diagrammbeschriftungen in Java-Anweisungen umzusetzen. Für jede elementare Handlung (Effektor) oder Bedingungsabfrage (Sensor) der Zentrale erhält die Klasse *Office* eine Methode, die vom Zustands-Automaten aus aufgerufen werden kann. Dabei entspricht beispielsweise die Methode `takeOrder()` der informellen Anweisung „Auftrag annehmen“. Mit Hilfe eines Codegenerators wird aus der Basisklasse *Office* und dem im Editor spezifizierten Zustandsdiagramm eine abgeleitete Klasse *FSMOffice* mit einem Verhaltens-Objekt der Klasse *StateMachine* erzeugt. Diese Klasse realisiert das Verhalten der Kurierdienstzentrale als ablauffähiger Zustandsautomat.

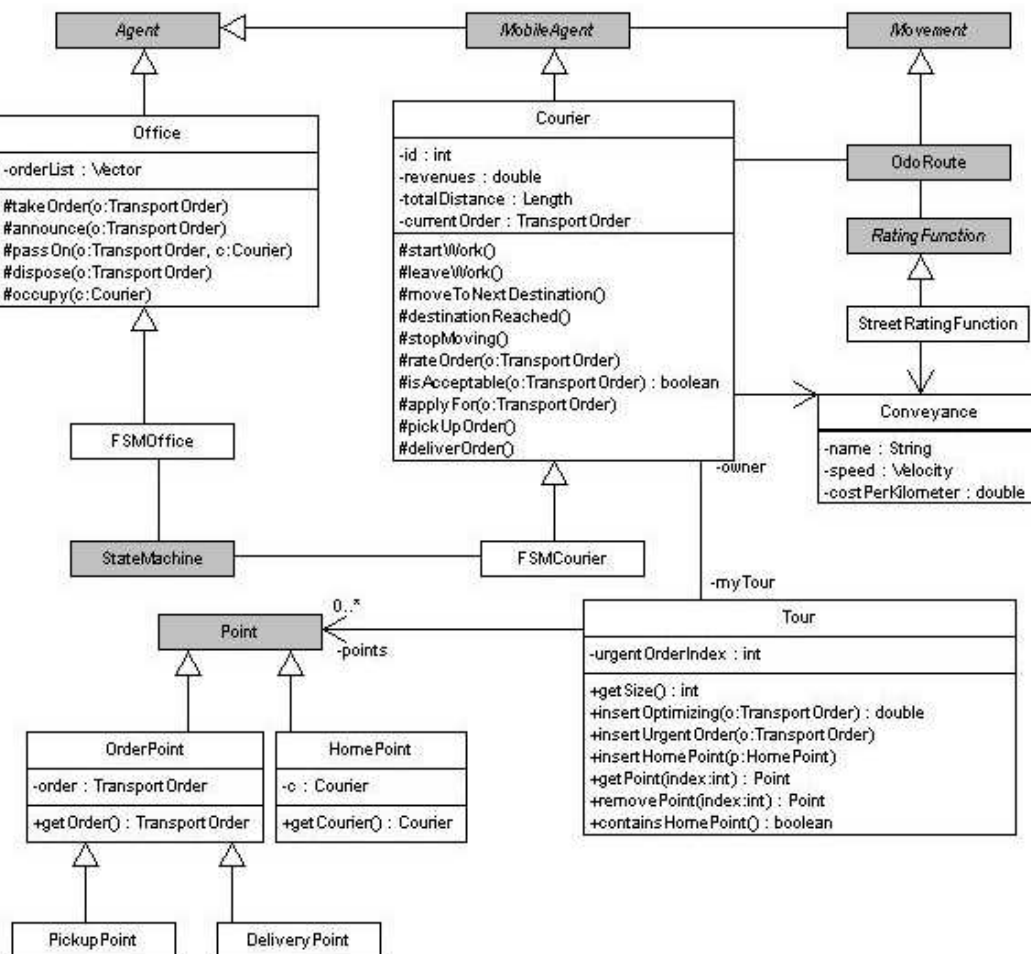


Abbildung 13: Implementation der Agenten des Kurierdienstmodells. Die verwendeten Klassen des Frameworks FAMOS sind grau unterlegt.

Auf ähnliche Weise wird die Klasse `Courier` mit Zustandsattributen sowie Sensor- und Effektor-Methoden der Kuriere implementiert und daraus mit Hilfe des Codegenerators die Klasse `FSMCourier` zur Kapselung des Kurierverhaltens erzeugt. Im Gegensatz zur Zentrale sind Kuriere als situierte und im Verkehrsnetz mobile Agenten von `MobileAgent` abgeleitet. Als Bewegungsstrategie (`Movement`) der Kuriere dient die Klasse `OdoRoute`. Diese ermöglicht die zielgerichtete Bewegung im Graphen des Verkehrsnetzes entlang einer vorab ermittelten Route zwischen einem Anfangs- (Position des Kuriers) und einem Zielpunkt (Auftrags- bzw. Heimatpunkt) und protokolliert dabei die zurückgelegten Strecken. Dem `OdoRoute`-Objekt obliegt auch die Ermittlung der schnellsten Verbindung zwischen diesen Punkten, welche mit Hilfe der Suchstrategie `GraphPathDijkstra` nach dem Kürzeste-Wege-Algorithmus von Dijkstra erfolgt. Da in die Kantenbewertung des Algorithmus normalerweise nur die Kantenlänge eingeht (da der kürzeste Weg berechnet wird), erhält die `OdoRoute` hier zusätzlich eine benutzerdefinierte Bewertungsfunktion der Klasse `StreetRatingFunction`. Diese berücksichtigt neben der Kantenlänge auch die vom Verkehrsmittel abhängige Durchschnittsgeschwindigkeit entlang einer Kante. Auf diese Weise wird im Graphen der schnellste Weg in Abhängigkeit des Kurierfahrzeugs bestimmt.

Die Implementation der Kurierbewegung ist bereits weitgehend vom Framework FAMOS vorgegeben. Im Konstruktor werden der Oberklasse `MobileAgent` die erforderlichen Bewegungs- und Pfadsuche-Strategien übergeben. Wenn der Kurier den ersten Punkt seiner Tour anfährt, setzt er diesen als neuen Zielpunkt der `OdoRoute`, welche dabei die schnellste Route zum Ziel berechnet. Durch Aufruf der Methode `move()` von `MobileAgent` beginnt der Kurier, sich zum ersten Knotenpunkt der Route zu bewegen. Die Bewegung wird entsprechend dem Ansatz der ereignisorientierten Simulation durch Vormerkung eines Ankunftsereignisses realisiert. Nach Verstreichen der Fahrzeit zum nächsten Knotenpunkt wird dem Kurier die Ankunft am Zwischenziel durch ein Signal der Klasse `PositionReached` signalisiert und automatisch seine Position aktualisiert. Der erneute Aufruf von `move()` setzt die Fahrt zum nächsten Knotenpunkt fort, bis das Ziel erreicht ist. Erhält der Kurier auf dem Weg zwischen zwei Knotenpunkten einen neuen Auftrag, so tauscht er wie oben beschrieben gegebenenfalls sein Ziel gegen einen günstiger gelegenen Auftragspunkt aus.

Die Tourenplanung und Auftragsbewertung der Kuriere wird nicht durch Framework-Klassen unterstützt und ist daher von Hand zu implementieren. Dieser Aspekt der Implementation basiert auf einer bereits im Rahmen der Vorstudie (Hilty et al. 1998) erstellten einfachen Java-Simulation. Die Tour eines Kuriers wird durch ein Objekt der Klasse `Tour` repräsentiert, welches die Auftragspunkte aller bearbeiteten Aufträge in der Reihenfolge ihrer geplanten Abarbeitung enthält. Zu diesem Zweck besitzt die Klasse `Tour` eine Liste von `Point` abgeleiteter modellspezifischer Punkte. Hierbei wird zwischen Auftragspunkten, d.h. Abhol- und Lieferpunkten (`PickupPoint` bzw. `DeliveryPoint`) sowie Heimatpunkten (`HomePoint`) unterschieden. Anhand der Klasse eines Zielpunkts bestimmt der Kurier, welche Handlungen bei dessen Erreichung auszuführen sind. Neue Punkte können auf verschiedene Weise in die Tour eingefügt werden. Die Methode `insertOptimizing()` ordnet Abhol- und Zielpunkt eines „Normalauftrags“ entsprechend der beschriebenen suboptimalen Strategie mit gering-

stem Umweg in die Tour ein und gibt für die Auftragsbewertung den ermittelten Umweg zurück. Mit `insertUrgentOrder()` ordnet der Kurier einen disponierten und als „kritisch“ deklarierten Auftrag am Anfang der Tour bzw. hinter dem letzten bereits enthaltenen „kritischen“ Auftrag ein.

Abbildung 14 zeigt schließlich eine Übersicht der verbleibenden Klassen zur Implementation des Kuriermodells, welche die Umwelt und die Simulationsinfrastruktur realisieren. Zur Zusammenfassung der Agenten und der weiteren Modellkomponenten dient die von `MultiAgentModel` abgeleitete Klasse `CourierModel`. Die Umgebung `Environment` beinhaltet ein Raummodell der Klasse `Graph`. In dieses Raummodell kann das im geographischen Informationssystem erstellte Straßennetz mit seinen Knoten, Kanten und Kantenattributen aus einer Datei eingelesen werden. Des Weiteren dient ein kontinuierliches Raummodell der Klasse `ObstructedPlane` zur Entfernungsschätzung bei der Auftragsbewertung durch die Kuriere.

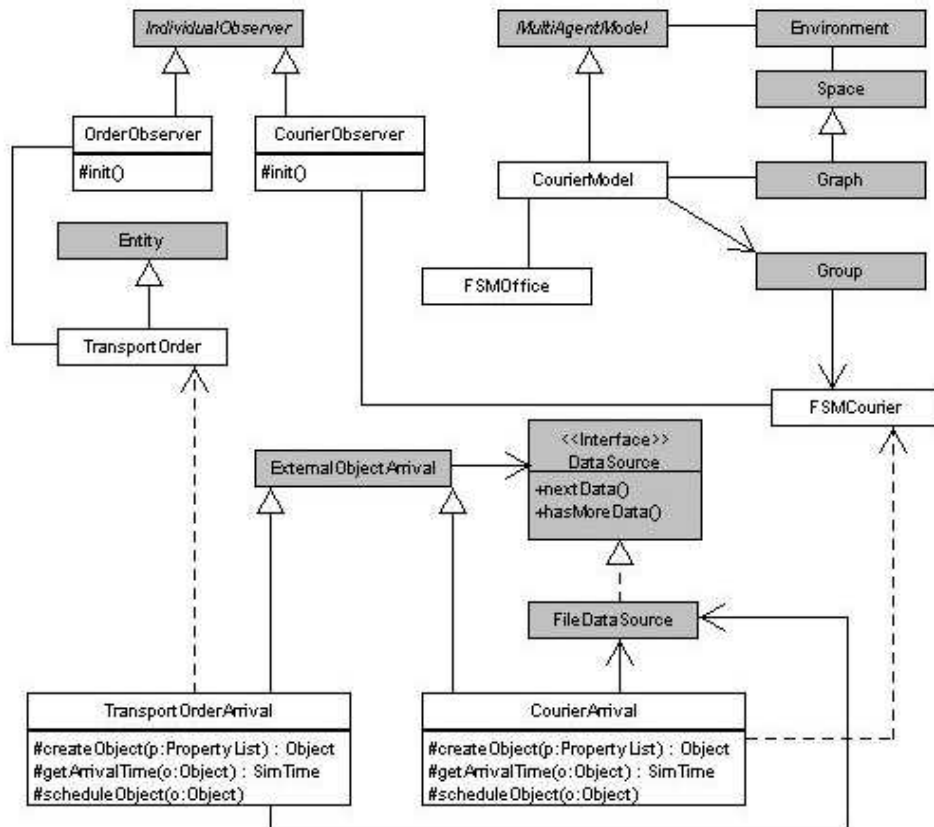


Abbildung 14: Übersicht über die Implementation von Umwelt und Simulationsinfrastruktur des Kurierdienstmodells.

Eine andere Aufgabe der Umgebung ist die Verwaltung der zur Multicast-Kommunikation bei der Vermittlung benötigten hierarchischen Gruppenstruktur. Diese besteht aus einer übergeordneten Gruppe der Klasse `Group` für alle angemeldeten Kuriere mit vier Untergruppen für jede Kombination der berücksichtigten Kriterien „Verkehrsmittel“ und „Beschäftigungs-Status“. Auf diese Weise kann die Zentrale gezielt eine bestimmte

Kuriergruppe (z.B. die frei gemeldeten Biker) ansprechen, indem sie an die entsprechende Gruppe ein Signal sendet. Das `Group`-Objekt verteilt dieses an alle Mitglieder.

Transportaufträge sind im Modell als passive Entitäten der Klasse `TransportOrder` realisiert. Diese Klasse kapselt lediglich eine Reihe hier nicht näher betrachteter Auftragsattribute wie Abhol- und Lieferpunkt, Vermittlungsdauer usw., die im Simulationslauf gesetzt und bei der Datensammlung ausgelesen werden. Zur Datensammlung dienen die Klassen `CourierObserver` und `OrderObserver`, welche während der Simulation gesetzte Attribute der Kuriere bzw. Aufträge über benutzerdefinierte Sonden auslesen und in tabellarischer Form im Ergebnisreport ausgeben. Das Modell beinhaltet zwei `CourierObserver` zur getrennten Beobachtung von Bikern und Autokurieren sowie einen `OrderObserver` zur Beobachtung aller erledigten Transportaufträge.

Die empirischen Eingabedaten des Kuriermodells (Auftrags- und Fahrerdaten) liegen in einem für die Klasse `FileDataSource` lesbaren Format vor. Von `ExternalObjectArrival` abgeleitete Ankunftsprozesse `CourierArrival` und `TransportOrderArrival` erzeugen aus den eingelesenen Daten Objekte der Klassen `FSMCourier` bzw. `TransportOrder` und schleusen diese zu den gegebenen Simulationszeitpunkten (Ankunft eines Auftrags bzw. Arbeitsbeginn eines Kuriers) ins System.

Lieferanten des „Hub and Shuttle“-Modells sind durch eine von `MobileAgent` abgeleitete Klasse `Shuttle` realisiert, deren Verhalten auf prozessorientierte Weise beschrieben wird. Für Umschlagpunkte dient eine Klasse `Hub`, welche als Attribute zwei Warteschlangen zum Lagern ein- und ausgehender Aufträge besitzt. Durch Verwendung der Warteschlangen des FAMOS zu Grunde liegenden Simulationsframeworks DESMO-J erscheinen Statistiken über die an den Hubs anfallenden Wartezeiten und Auftragszahlen automatisch im Ergebnisreport. An Modifikationen des Basismodells ist die Erweiterung der Transportaufträge um zusätzliche Attribute für den Start- und Ziel-Hub zu nennen. Diese werden ähnlich wie Auftragspunkte durch Unterklassen `StartHub` und `DestinationHub` von `Point` realisiert. Auf diese Weise können Kuriere Fahrten zu Umschlagpunkten ähnlich wie Auftragsorte in ihre Tour einplanen und müssen dort lediglich andere Handlungen zum Deponieren bzw. Entnehmen der Aufträge ausführen. Zudem ist bei jeder Vermittlung eines Auftrags anzuzeigen, zwischen welchen Auftragspunkten die Tour vermittelt wird (z.B. vom Abholpunkt zum Start-Hub). Auch dies kann durch ein Attribut der Klasse `TransportOrder` erfolgen, das beim Eingang des Auftrags von der Zentrale gesetzt und bei der Bearbeitung von den Kurieren interpretiert wird.

Die Bereichskuriere des „Innen Außen“-Modells unterscheiden sich implementationstechnisch von herkömmlichen Kurieren durch die Verwaltung zweier verschiedener Touren. Neben der aktuellen Tour der anzufahrenden Auftragspunkte verfügen sie über eine weitere Auftragsliste, welche die Abhol- und Lieferpunkte der innerhalb eines 30minütigen Zeitfensters gesammelten Hub-Aufträge beinhaltet. Die Zusammenführung beider Touren erfolgt einerseits bei Einplanung der gesammelten Aufträge in die aktuelle Tour nach Ablauf eines Zeitfensters. Andererseits werden die Touren temporär vereinigt, wenn bei der Bewertung eines Hub-Auftrags der zu dessen Ausführung benötigte Umweg zu bestimmen ist.

8 Durchführung und Auswertung der Simulationsexperimente

In diesem Abschnitt werden die Resultate der mit den oben beschriebenen Modellvarianten durchgeführten Simulationsexperimente dargestellt. Dabei wird zunächst auf die Validierung (Gültigkeitsprüfung) des „Status Quo“-Modells eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse des Vergleichs zwischen einer Vermittlungs- und Dispositionsstrategie sowie zwischen den verschiedenen Logistikkonzepten beschrieben.

In diesem Zusammenhang werden auch Aspekte der praktischen Umsetzung solcher Konzepte (z.B. Kosten eines Hub-Systems) thematisiert.

8.1 Modellvalidierung und –kalibrierung

Bevor eine vergleichende Bewertung der alternativen Logistikstrategien vorgenommen werden kann, muss zunächst das „Status Quo“-Modell sorgfältig validiert werden. Dabei sind insbesondere die zahlreichen Modellparameter anzupassen. Während einige Größen wie z.B. die garantierte Lieferzeit oder die kritische Zeitspanne bis zum Beginn der Druckvermittlung auf Grundlage der Systemanalyse abschätzbar sind, stellen die Parameter der Auftragsbewertung Modellartefakte dar, deren Werte in Testläufen kalibriert werden müssen.

Abbildung 15: Empirische Eingangsdaten und Parameterwerte der Simulationen.

Übersicht von den Kurierdiensten bereitgestellter Eingangsdaten

Datensatz	Kurierdienst	Biker	Autokuriere	Aufträge
1	A	33	132	1925
2	A	34	132	1801
3	A	33	147	1893
4	A	34	139	1772
5	A	40	130	1781
6	B	0	53	288
7	B	0	49	289

Modellparameter

Parameter	Wert	Beschreibung
t_{crit}	20 min	Dauer bis Beginn der Druckvermittlung
t_{anc}	60 sec	Zeit zwischen Auftragsverlesungen
t_{active}	0 sec	Dauer jeder Aktivität der Zentrale (vernachlässigt)
$t_{handover}$	5 min	Dauer der Sendungsübergabe beim Kunden
T_{max}	2.5 h	Garantierte maximale Lieferzeit
w_{Car}	0.02	Gewichtung der Auslastung bei motorisierten Kurieren
w_{Bike}	0.035	Gewichtung der Auslastung bei Bikern
δ	50 sec	Faktor zur Berechnung der Bedenkzeit
q	1	Faktor zur Berechnung des Auftragsbedarfs

Abbildung 15: Empirische Eingangsdaten und Parameterwerte der Simulationen

Detaillierte Informationen über die Zuweisung einzelner Aufträge zu Kurieren in den Auftragsprofilen des Kurierdienstes A erlaubten die Durchführung folgender mehrstufiger Validierungs- und Kalibrierungsprozedur:

1. Im ersten Schritt wurde zu jedem Datensatz ein Simulationslauf mit „empirischer Auftragszuordnung“ durchgeführt, wobei jeder Kurier die Aufträge erhielt, die er laut der Auftragsdaten tatsächlich ausgeführt hatte. Die Tourenplanung und Auftragsauslieferung wurde dagegen wie im herkömmlichen „Status Quo“-Modell simuliert.
2. Die mit dem Modell der „empirischen Auftragszuordnung“ erzielten Resultate wurden einem Domänenexperten vorgelegt und nach Durchführung einiger Modifikationen und Fehlerbereinigungen am Modell (z.B. Einführung straßentyp-abhängiger Geschwindigkeiten) als akzeptabel eingestuft. Somit konnte die Modellierung der Tourenplanung und Auftragsausführung als valide hinsichtlich der untersuchten Größen (Auftragslieferzeiten, Fahrleistungen, Auslastungen, Umsätze) angesehen werden.
3. Die Resultate der Simulationen mit „empirischer Auftragszuordnung“ dienten anschließend als Referenz für die Kalibrierung des Modells der Auftragsvermittlung und –bewertung. Hierbei erfolgte insbesondere eine Anpassung der verkehrsmittelabhängigen Faktoren für die Gewichtung der bisherigen Auslastung eines Kuriers als Schwellwert bei der Auftragsbewertung.

Die Parameterkalibrierung wurde ausgehend von einigen aus der Vorstudie bekannten Initialwerten manuell durchgeführt und erwies sich als schwierig, da die Gewichtungsfaktoren starke und vorab schwer einschätzbare Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse zeigten. Annehmbare Resultate konnten mit den in Abbildung 15 aufgelisteten Werten erzielt werden, wobei insbesondere die plausibel erscheinende stärkere Gewichtung der Auslastung bei Fahrradkurieren aufgrund früherer physikalischer Er-schöpfung zu beachten ist.

	Fahrstrecke (km)	Umsatz (€ / km)	Auslastung (% d. Arbeitszeit)	Auftragslieferzeit (min)
Emp. Auftragszuordnung				46,7 (32,5)
Fahradkuriere	47,7 (25,4)	1,80 (0,43)	68,0 (17,0)	
Motorisierte Kuriere	91,4 (44,6)	1,12 (0,45)	64,4 (18,3)	
Simulierte Vermittlung				47,9 (28,2)
Fahradkuriere	46,1 (16,9)	1,65 (0,34)	65,4 (6,1)	
Motorisierte Kuriere	91,3 (32,1)	1,15 (0,28)	59,1 (14,7)	

Abbildung 16: Ergebnisse der Kalibrierung des „Status Quo“-Modells. Dargestellt sind über die Kurierflotte bzw. das Auftragsaufkommen gemittelte Werte verschiedener relevanter Ausgangsgrößen (Standardabweichungen in Klammern).

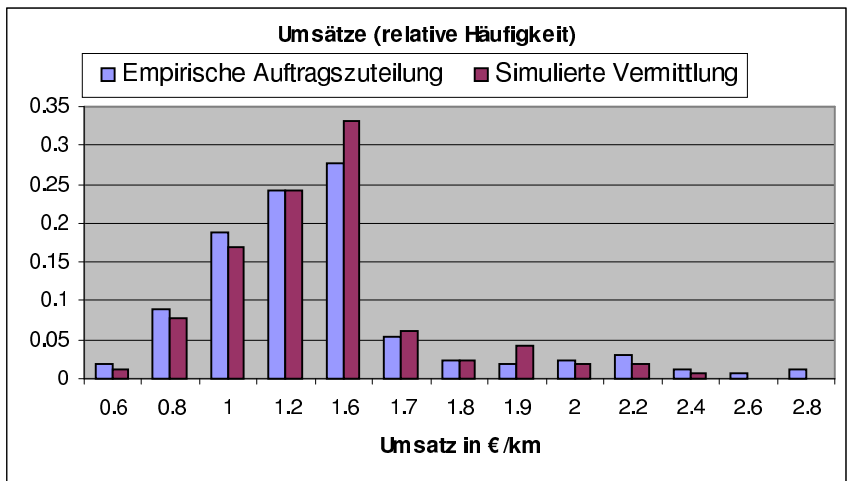
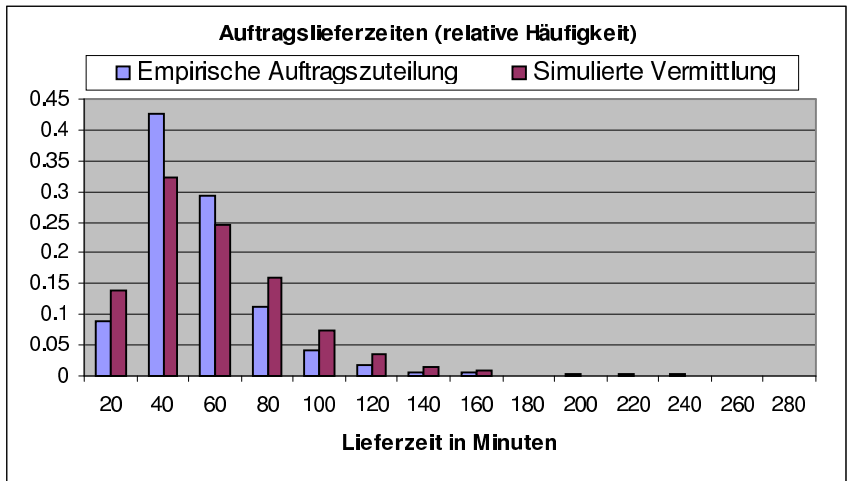
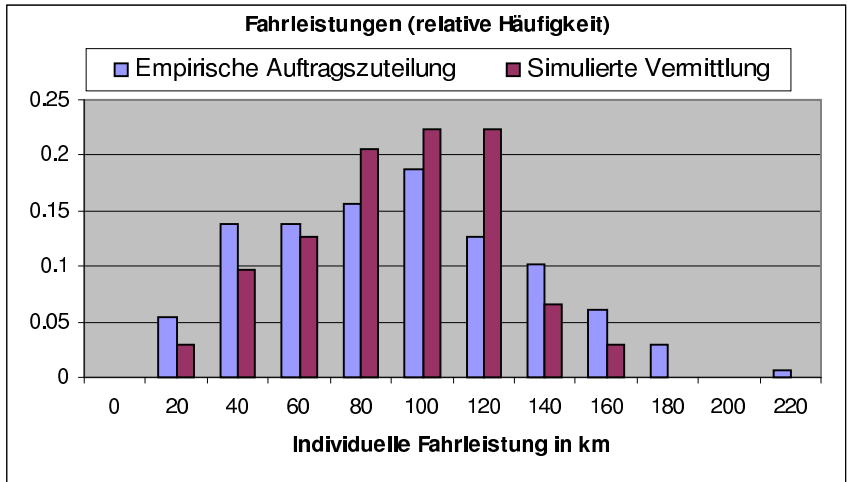


Abbildung 17: Detaillierte Untersuchung der Übereinstimmung zwischen empirischer Auftragszuordnung und simulierter Vermittlung in einer Simulation mit Datensatz 2.

Abbildung 16 zeigt, dass die über vier Simulationsläufe mit den Datensätzen 1, 2, 3 und 5 gemittelten Ergebnisse hinsichtlich der Mittelwerte und Standardabweichungen aller betrachteten Ausgangsgrößen recht gut mit den Resultaten der „empirischen Auftragszuordnung“ übereinstimmen. Eine detaillierte Untersuchung der Verteilung von Auftragslieferzeiten, Fahrleistungen und Umsätzen innerhalb einzelner Simulationsläufe lässt hingegen stärkere Abweichungen zu Tage treten, welche die in Abbildung 17 gezeigten Histogramme veranschaulichen. Die Ergebnisse der Kalibrierungsläufe wurden dennoch als im Rahmen der Modellierungsgenauigkeit akzeptabel eingestuft.

Ergänzend zur manuellen Kalibrierung wurden automatische Kalibrierungsläufe mit dem simulationsbasierten Optimierungssystem DISMO (vgl. Gehlsen/Page 2001) durchgeführt. Die Grundidee der automatischen Kalibrierung besteht darin, den Vorgang als simulationsbasiertes Optimierungsproblem aufzufassen, dessen Ziel die Minimierung von Abweichungen an Modell und Originalsystem gemessener Ausgangsgrößen ist (vgl. Drogoul et al. 2002, S. 12).

Bei der automatischen Kalibrierung des Kuriermodells wurden der Mittelwert und die Standardabweichung der Auftragslieferzeiten sowie die Summe und die Standardabweichung der individuellen Fahrleistungen (für Biker und motorisierte Kurier getrennt) berücksichtigt. Die Abweichungen dieser Größen von den Referenzergebnissen wurden in einer quadratischen Fehlerfunktion verrechnet, welche als multikriterielle Zielfunktion der simulationsbasierten Optimierung diente. Optimiert wurden wiederum die Parameter q , w_{Bike} und w_{Car} , deren Werte das DISMO-System während der Kalibrierung automatisch mit Hilfe eines genetischen Algorithmus variierte.

In jeder Generation erzeugt der genetische Algorithmus verschiedene Parameterkonfigurationen, die in Simulationsläufen evaluiert werden müssen. Da diese Simulationsläufe unabhängig sind, ist es im DISMO-System möglich, sie parallel in einem Rechnernetz auszuführen. Die Simulationen der beschriebenen Kalibrierungsstudie wurden innerhalb einer Nacht auf ca. 20 SUN-Workstations des Informatik-Rechenzentrums ausgeführt. Die automatisierte Studie konnte die Ergebnisse der (wesentlich zeitaufwändigeren) manuellen Kalibrierung bestätigen, wobei sich die Betrachtung allerdings bislang auf einen Datensatz beschränkt. Der Ansatz und die Ergebnisse der automatischen Kalibrierung werden detaillierter in (Bachmann/Gehlsen/Knaak 2004) beschrieben.

8.2 Vergleich einer Vermittlungs- und Dispositionsstrategie

Wie bereits erwähnt unterscheiden sich die am Projekt beteiligten Kurierdienste hinsichtlich des Auftragsaufkommens, der Flottengröße und der Organisationsform. Kurierdienst B verfügt über relativ geringe Auftragszahlen und eine kleine, durchgehend motorisierte Kurierflotte. Aufträge werden mit Softwareunterstützung an den freigestellten Kurier disponent, dessen Standort dem Abholpunkt am nächsten liegt. Kurierdienst A besitzt im Vergleich dazu eine größere Flotte mit ca. 20 Prozent Bikern und ein deutlich höheres Auftragsaufkommen. Zur Auftragsvergabe wird ein Vermittlungsverfahren eingesetzt, bei dem es nur in einigen bereits genannten Sonderfällen zu Dispositionen kommt. Da beide Strategien im Modell simuliert werden können, sollen die-

se im Experiment einmal auf die unterschiedlichen Eingangsdaten angewendet werden. Durch diesen Vergleich kann untersucht werden, ob jeder Kurierdienst bereits das für sein Auftragsprofil am besten geeignete Verfahren einsetzt.

Zum Vergleich der Vermittlungs- und Dispositionsstrategie wurden beide Verfahren mit sämtlichen Datensätzen sowie den in Kalibrierungsläufen ermittelten Parameterwerten (vgl. Abbildung 15) simuliert. Die über alle Datensätze der jeweiligen Kurierdienste gemittelten Simulationsergebnisse sind in Abbildung 18 tabellarisch zusammengefasst. Sie lassen prinzipiell den Schluss zu, dass jeder Kurierdienst bereits die für sein Auftrags- und Flottenprofil besser geeignete Auftragsvergabe-strategie einsetzt.

Auftragsbezogene Größen

	Verspätete Aufträge	Verspätung	Lieferzeit pro Auftrag	Strecke pro Auftrag
	<i>Anteil in %</i>	<i>Maximum in Min</i>	<i>Mittel (StdAbw) in Min</i>	<i>Mittel in km A: Auto (Bike)</i>
Kurierdienst B				
Vermittlung	2,8	32,56	64,5 (35,0)	16,5
Disposition	0	0	39,9 (15,9)	16,1
Kurierdienst A				
Vermittlung	0,4	30,2	47,0 (27,3)	8,6 (3,9)
Disposition	0,1	15,4	30,7 (13,5)	10,2 (5,8)

Kurierbezogene Größen

	Strecke pro Kurier	Aufträge pro Kurier	Umsatz pro Strecke	Auslastung
	<i>Mittel (StdAbw) in km</i>	<i>Mittel (StdAbw)</i>	<i>Mittel (StdAbw) in € / km</i>	<i>Mittel (StdAbw) in %</i>
Kurierdienst B				
Vermittlung	93,5 (31,8)	5,7 (2,2)	0,78 (0,20)	51,6 (15,6)
Disposition	91,4 (35,9)	5,7 (2,8)	0,81 (0,16)	53,2 (13,1)
Kurierdienst A				
Vermittlung (Biker)	44,9 (17,1)	11,4 (5,5)	1,65 (0,34)	65,8 (6,3)
Vermittlung (Autos)	91,2 (32,1)	10,6 (4,2)	1,14 (0,27)	58,7 (14,3)
Disposition (Biker)	59,9 (27,5)	10,3 (4,6)	1,31 (0,28)	69,1 (13,8)
Disposition (Autos)	110,6 (36,7)	10,9 (4,3)	0,93 (0,15)	69,3 (15,7)

Abbildung 18: Aggregierte Resultate des Vergleichs zwischen einer Vermittlungs- und Dispositionsstrategie anhand der Eingangsdaten beider beteiligter Kurierdienste.

Unter der Dispositionsstrategie sind im Mittel geringere Auftragslieferzeiten zu beobachten, da Aufträge nur an freigestellte Kuriere disponiert werden, welche diese dann sofort vollständig ausführen. Andererseits bewirkt der Verzicht auf Auftragsbündelung beim stärker ausgelasteten Kurierdienst A eine deutliche Erhöhung der pro Auftrag zurückgelegten Fahrstrecken, die für die Kuriere u.a. eine Senkung der pro gefahre-

nem Kilometer erzielten Erträge zur Folge hat. Hinsichtlich der Fairness der Auftragsvergabe lässt keine der Strategien einen wesentlichen Vorteil erkennen, was wahrscheinlich auf die in beiden Verfahren berücksichtigte Bevorzugung freigestellter Kuriere zurückzuführen ist. Die relativ hohen Standardabweichungen von Größen wie Auslastung oder Umsatz sind auch in den Ergebnissen der „empirischen Auftragszuordnung“ (vgl. Abbildung 16) zu beobachten und lassen sich mit den stark variierenden Arbeitszeiten der Kuriere erklären.

Für das Auftrags- und Flottenprofil von Kurierdienst A erweist sich die Vermittlungsstrategie unter Berücksichtigung sozialer und ökologischer Bewertungskriterien somit als überlegen. Die als wesentliche Ursache beobachtete Erhöhung der Fahrstrecken unter der Dispositionsstrategie tritt in Simulationen mit den Datensätzen des Kurierdienstes B hingegen nicht auf, so dass hier das (in der Realität auch eingesetzte) Dispositionverfahren zu bevorzugen ist. Einschränkend bleibt allerdings zu erwähnen, dass die Anzahl der von Kurierdienst B bereitgestellten Datensätze noch keine statistisch hinreichend gültige Aussage erlaubt. Zudem basiert die Kalibrierung des Auftragsvermittlungsmodells auf den Daten von Kurierdienst A. Fahrer des Kurierdienstes B würden bei Einführung einer Vermittlungsstrategie aufgrund des unterschiedlichen Auftrags- und Flottenprofils möglicherweise eine andere Gewichtung von Größen wie Auftragsbedarf und Auslastung bei der Auftragsbewertung vornehmen.

8.3 Vergleich alternativer Logistikkonzepte

Den Schwerpunkt dieser Studie bildet ein simulativer Vergleich der bestehenden Organisationsform von Stadtkurierdiensten mit den oben beschriebenen Modellen alternativer Logistikkonzepte. Zu diesem Zweck wurden Simulationen der drei Modelle „Status Quo“, „Innen/Außen“ und „Hub and Shuttle“ mit den 5 von Kurierdienst A bereitgestellten Datensätzen durchgeführt. Daten von Kurierdienst B wurden zunächst nicht verwendet, da dieses Unternehmen über ein zu geringes Auftragsvolumen verfügt, als dass auf erhöhter Auftragsbündelung beruhende Logistikkonzepte sinnvoll einsetzbar wären.

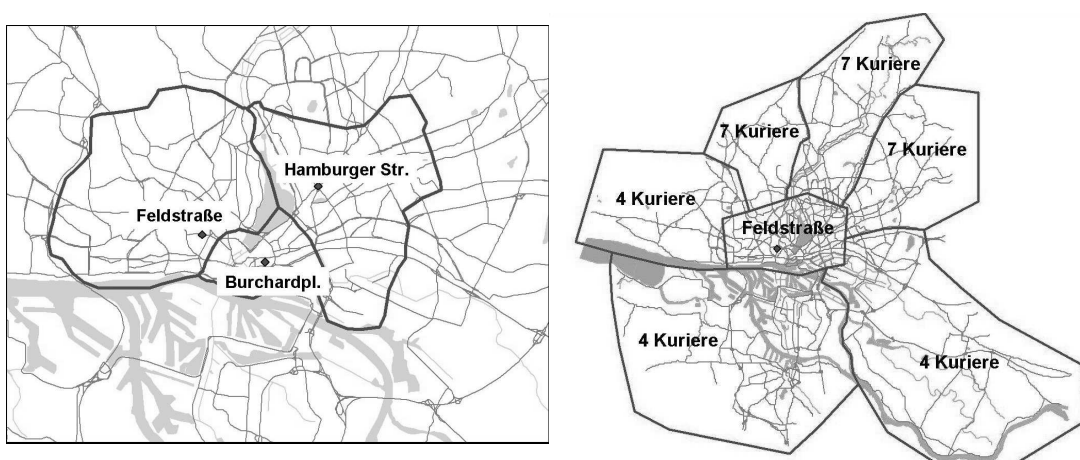


Abbildung 19: Aufteilung des Hamburger Stadtgebiets im „Hub and Shuttle“- (links) und „Innen/Außen“-Modell.

Während die Einstellungen der allen Modellen gemeinsamen Parameter unverändert aus den Kalibrierungsläufen übernommen werden können (vgl. Abbildung 15), verfügen die alternativen Logistikkonzepte über zusätzliche Freiheitsgrade. In beiden Modellen ist zunächst eine geeignete Gebietsaufteilung vorzunehmen. Im „Hub and Shuttle“-Modell muss zusätzlich die Organisation des Lieferverkehrs, im „Innen/Außen“-Modell die Zahl der in den Außengebieten eingesetzten Bereichskuriere festgelegt werden. Die Dimensionierung dieser Parameter wurde manuell anhand der Auftragsdaten durchgeführt und in einigen Kalibrierungsläufen verfeinert. Für die Simulationen der „Hub and Shuttle“-Strategie wurde eine Aufteilung des inneren Stadtgebiets in 3 Schwerpunktgebiete mit Hubs an verkehrsgünstigen Standorten mit bekannt hohem Auftragsaufkommen gewählt (vgl. Abbildung 19). Zwischen den Hubs verkehren 2 Shuttles in gegenläufigem Linienverkehr, welche Aufträge jeweils nur zum Folgehub transportieren. Für das „Innen/Außen“-Modell wurde die ebenfalls in Abbildung 18 gezeigte Aufteilung in ein Innengebiet und 6 umliegende Außengebiete mit in den Gebieten angegebenen Anzahlen von Bereichskurieren vorgenommen, welche die räumliche Verteilung des Auftragsaufkommens recht angemessen widerspiegelt.

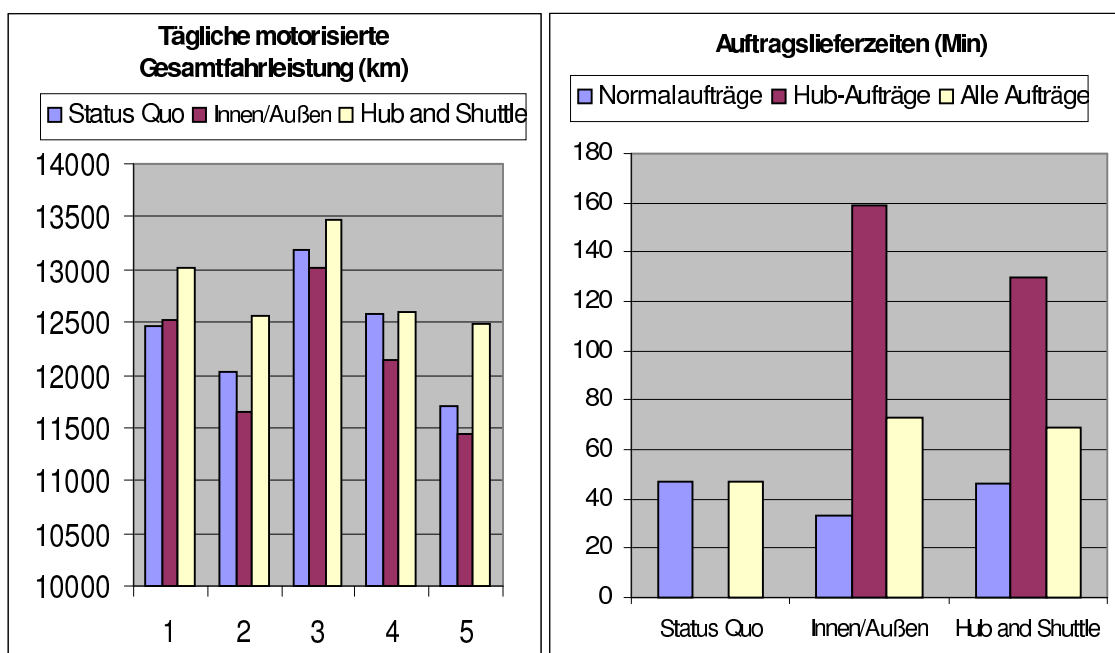


Abbildung 20: Vergleich der täglichen motorisierten Gesamtfahrleistung (links) und der mittleren Auftragslieferzeit (rechts) in Simulationen des Status Quo und der alternativen Logistikstrategien.

Abbildung 20 zeigt die wichtigsten Resultate eines Vergleichs der drei Modellvarianten in Simulationen mit den Datensätzen des Kurierdienstes A (1-5).¹⁸ Im linken Diagramm ist die täglich anfallende motorisierte Gesamtfahrleistung aus den 5 Simulationen jeder

¹⁸ Detaillierte Simulationsreports zu allen Experimenten finden sich im Anhang.

Modellvariante dargestellt. Dabei ist im „Innen/Außen“-Modell im Mittel eine Senkung dieser ökologisch relevanten Kenngröße gegenüber dem „Status Quo“ zu beobachten. Das Ausmaß der Einsparungen erscheint allerdings bei einer mittleren Ersparnis von täglichen 238,17 km (bzw. jährlichen 59541,5 km bei angenommenen 250 Arbeitstagen) für die gesamte Kurierflotte recht gering und bleibt hinter den anfänglichen Erwartungen zurück. Im „Hub and Shuttle“-Modell tritt gegenüber dem „Status Quo“ sogar eine Erhöhung der täglichen motorisierten Gesamtfahrleistung auf, welche sowohl durch die von den beiden Shuttles zusätzlich aufgewendete Fahrleistung als auch durch geringfügig verlängerte individuelle Fahrten der Kuriere verursacht wird.

Bezüglich der im rechten Diagramm von Abbildung 20 dargestellten über alle Simulationsläufe gemittelten durchschnittlichen Auftragslieferzeit weisen beide alternative Logistikkonzepte eine ähnliche Charakteristik auf. Die mittlere Lieferzeit der über einen Hub abgewickelten (und folglich zweimal vermittelten) Aufträge ist gegenüber der mittleren Lieferzeit im „Status Quo“-Modell deutlich erhöht. Dies betrifft allerdings stets nur einen mit 20 – 30 % relativ geringen Anteil des gesamten Auftragsaufkommens. Darüber hinaus könnten nach Aussage der beteiligten Kurierdienste längere Zeitfenster für bestimmte Aufträge durchaus akzeptiert werden, so dass das in den Simulationen erzielte Resultat nicht unbedingt eine Einschränkung für die Konkurrenzfähigkeit eines Kurierdienstes bedeuten muss. Für den höheren Anteil der nicht über einen Hub abgewickelten Aufträge ist im „Innen/Außen“-Modell sogar eine mittlere Senkung der Lieferzeit um mehr als 10 Minuten gegenüber dem „Status Quo“ zu beobachten. Diese wird wahrscheinlich durch deutliche Verkürzungen der Auftragsdistanzen verursacht, welche von den Kurieren des Innengebiets zurückzulegen sind. Die Verlagerung langer Auftragsdistanzen auf die motorisierten Bereichskuriere der Außengebiete würde eine generelle Erhöhung des Bikeranteils im Innengebiet ermöglichen, falls Maße und Gewichte der anfallenden Sendungen den Fahrradtransport erlauben.¹⁹

Hinsichtlich der als soziales Bewertungskriterium betrachteten Umsätze der Kuriere zeigt sich im „Innen/Außen“-Modell gegenüber dem „Status Quo“ eine wesentliche Steigerung bei den motorisierten Kurieren bei gleichzeitigem Anstieg der Standardabweichung (vgl. Abbildung 21). Dies ist wahrscheinlich einerseits auf Verdienstunterschiede zwischen Bereichskurieren und „herkömmlichen“ motorisierten Kurieren im Innengebiet und andererseits auf die stark variierende Auslastung der Kuriere in den verschiedenen Außengebieten zurückzuführen. Im „Hub and Shuttle“-Modell steigt sowohl der Umsatz der motorisierten Kuriere als auch der Umsatz der Biker. Dies ist neben besseren Bündelungsmöglichkeiten eventuell auf eine erhöhte Anzahl von Kurzaufträgen zurückzuführen, welche aufgrund der Anfahrtspauschale finanziell vorteilhaft erscheinen.

¹⁹ Die bereitgestellten Datensätze beinhalten keinerlei Informationen über Maße und Gewichte der Sendungen, so dass zu diesem Punkt bislang keine Aussage möglich ist.

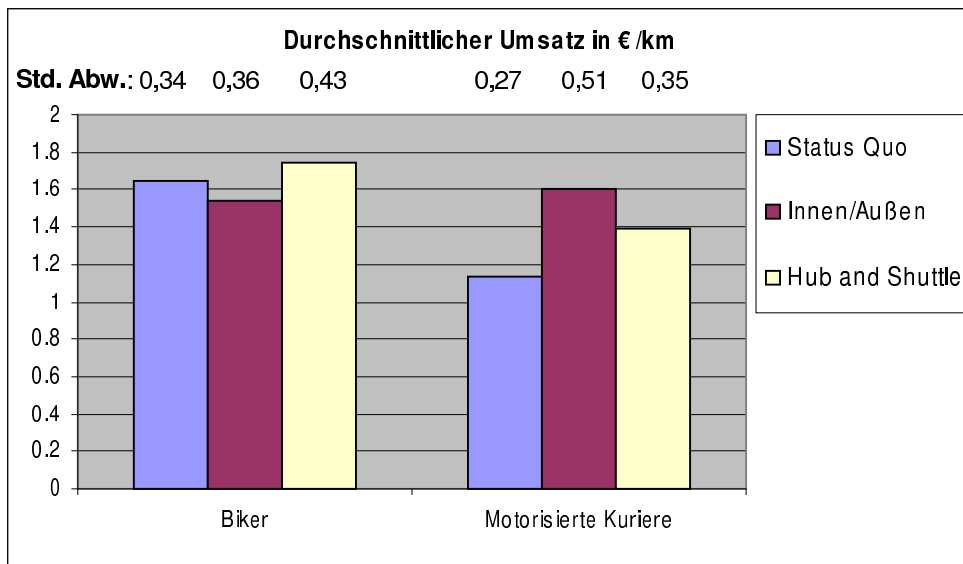


Abbildung 21: Durchschnittlicher Kurier-Umsatz pro Kilometer in Simulationen mit den Datensätzen 1 – 5. Die Standardabweichung ist oberhalb der Balken angegeben.

Angesichts des relativ geringen ökologischen Optimierungspotenzials beider alternativer Logistikstrategien wurden weitere Experimente durchgeführt, in denen mit synthetischen Datensätzen ein erhöhtes Auftragsvolumen simuliert wurde. Dazu wurde einerseits das in den Datensätzen 4 und 5 enthaltene Aufkommen zweier Tage zusammengefügt (Datensatz 9, 3553 Aufträge). Andererseits wurden Aufträge aus Datensatz 2 und 3 des Kurierdienstes A mit den beiden Datensätzen von Kurierdienst B kombiniert (Datensatz 8, 3207 Aufträge). Zugehörige Kurierflotten wurden unverändert aus den Datensätzen 2 (zu Datensatz 8) und 4 (zu Datensatz 9) übernommen.

Die Ergebnisse der Experimente mit näherungsweise verdoppeltem Auftragsaufkommen sind in Abbildung 22 zusammengefasst. Hier fällt beim „Innen/Außen“-Modell zunächst die wesentlich stärkere Senkung der täglichen motorisierten Gesamtfahrleistung gegenüber dem „Status Quo“ auf, welche für Datensatz 8 tägliche 5530 km (jährlich 1382700 km) und für Datensatz 9 tägliche 2221 km (jährlich 555305 km) beträgt. Das „Hub and Shuttle“-Modell zeigt dagegen wiederum keinen ökologischen Vorteil. Hinsichtlich der mittleren Auftragslieferzeit ähneln die Resultate prinzipiell den bereits mit den Datensätzen 1-5 durchgeführten Simulationen. Dabei ist eine noch deutlichere Senkung der Lieferzeit bei den Normalaufträgen im „Innen/Außen“-Modell erkennbar, während die Lieferzeit der Hub-Aufträge (hier über ein Drittel des Auftragsaufkommens) im Mittel auf 5 Stunden ansteigt.

Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass das ökologische Optimierungspotenzial der „Innen/Außen“-Strategie erst bei deutlich höheren Auftragszahlen als denen der betrachteten Kurierdienste in vollem Maße nutzbar wird. Eine denkbare Umsetzungsmöglichkeit bestünde in der Bearbeitung von Aufträgen mehrerer Kurierdienste durch die Bereichskuriere. Allerdings bedürfen die Resultate weiterer statistischer Absicherung, wobei insbesondere die nichtlineare Reaktion des Modells (mehr als verzehnfache Senkung der täglichen motorisierten Gesamtfahrleistung bei Verdoppelung des

Auftragsvolumens) genauer zu untersuchen ist. Auch könnte die Gültigkeit des Modells bei erhöhtem Auftragsvolumen eventuell nicht ausreichen, da bestimmte Einschränkungen realer Kurierfahrer (z.B. Arbeitspausen) nur ungenügend berücksichtigt werden. Generell verdeutlichen jedoch alle Simulationsergebnisse eine deutliche Überlegenheit der „Innen/Außen“-Strategie gegenüber dem „Hub and Shuttle“-Modell. Diese ist wahrscheinlich in erster Linie auf bessere Berücksichtigung der charakteristischen Auftragsprofile mit stark ausgelasteten Innengebiet und geringer ausgelasteten Außenbereichen zurückzuführen und kann als wesentliches Ergebnis der Untersuchung angesehen werden.

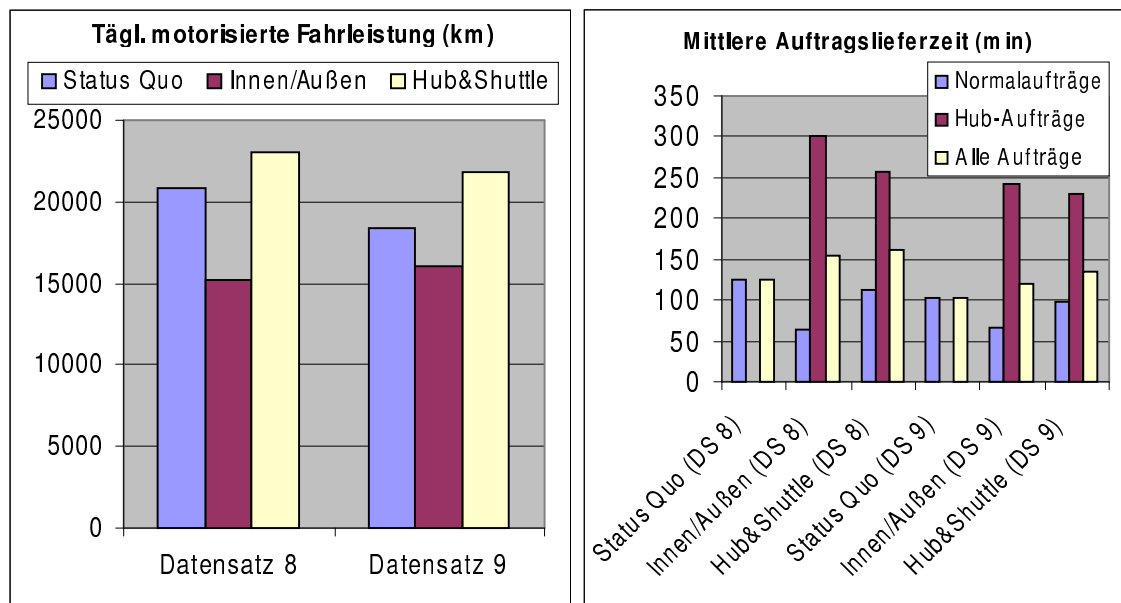


Abbildung 22: Tägliche motorisierte Gesamtfahrleistung (links) und mittlere Auftragslieferzeit der unterschiedlichen Logistikstrategien in 2 Simulationen mit verdoppeltem Auftragsaufkommen.

8.4 Umsetzungspotenzial

Die Simulationen dieser explorativen Studie haben gezeigt, dass bei Stadtkurierdiensten erhebliche Effizienzverbesserungen hinsichtlich ökologischer Parameter bei der Auftragsabwicklung zu erzielen sind, ohne dass die betriebswirtschaftliche Situation der Kurierere oder der Vermittlungszentralen beeinträchtigt wird. Ergebnis der Untersuchung ist allerdings auch, dass nicht alle Modelle in jeder Stadt und in jeder Konstellation zu einem derartigen Erfolg führen. Die durchgeführten Simulationsstudien und die Konstruktion der alternativen Organisationsmodelle zeigen, wie außerordentlich voraussetzungsvoll die Realisierung innovativer Modelle ist.

Eine wichtige Erfolgsbedingung ist sicherlich ein hohes Sendungsaufkommen. Zusammen mit der geografischen Struktur der Aufträge (Verteilung von Quell- und Zielpunkten) verweisen die Simulationsergebnisse darauf, dass alternative Organisations-

strukturen nur für größere Kurierunternehmen oder den (operativen) Zusammenschluss mehrerer kleinerer Unternehmen erfolgreich sind. Damit hängt eng die Einsicht zusammen, dass derartige Bedingungen vor allem in größeren Städten und Metropolregionen zu finden sein dürften.

Ein in den bisherigen Ausführungen vernachlässigter, jedoch entscheidender Aspekt der praktischen Umsetzung alternativer Logistikkonzepte sind die Unterhaltskosten der erforderlichen Infrastruktur. Die Kosten eines bemannten Hubs müssen aufgrund von Erfahrungswerten mit etwa 3500 € monatlich veranschlagt werden. Zusätzlich ist beim „Hub and Shuttle“-Konzept der Transportservice zu finanzieren, wobei pro Fahrzeug monatliche Kosten von ca. 1000 € (inkl. Kraftstoff) sowie pro Fahrer ca. 2000 € anfallen. Bereits für das einfachste denkbare System mit 2 Hubs und einem Shuttle ergeben sich somit monatliche Gesamtkosten von rund 10.000 €. Bei durchschnittlich 21 Tagen Betriebszeit zu jeweils 10 Stunden sind dies etwa 48 Euro Kosten pro Stunde.

Bei einem täglichen Aufkommen von 1000 Sendungen, von denen die Hälfte über den Hub abgewickelt wird, bedeutet dies, dass jede Sendung mit etwa 1,05 Euro zusätzlicher Kosten belastet wird, den die Kurierfahrer von ihrem Umsatz abgeben müssen. Der Mindestauftragswert für eine Sendung, die über die Hubs abgewickelt wird, müsste damit bei etwa 13 Euro liegen. Dann kann sowohl der anliefernde als auch der ausliefernde Kurier den Mindestumsatz (Anfahrpauschale + 3 km, 6 €) erzielen. Der Mindestauftragswert aber kann natürlich geringer sein, wenn die Kurier bei der An- und Ablieferung bündeln können. Für die „Innen/Außen“-Strategie fallen entsprechend niedrigere Kosten an, da lediglich ein einzelner bemannter Hub zu finanzieren ist.

9 Fazit und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Nachhaltige Logistikkonzepte für Stadtkurierdienste“ wurden ökologische, ökonomische und soziale Auswirkungen alternativer, auf vermehrter Auftragsbündelung basierender Logistikstrategien für Kurierdienste untersucht. Zu diesem Zweck wurden agentenbasierte Simulationsmodelle bestehender Organisationsformen von Stadtkurierdiensten (Vermittlungs- und Dispositionsverfahren) sowie neuartiger Logistikkonzepte („Hub and Shuttle“, „Innen/Außen“) entworfen und mit Hilfe des parallel entwickelten Simulationsframeworks FAMOS auf Basis des diskreten Simulators DESMO-J in Java implementiert.

Die Modelle wurden sowohl manuell als auch mit Hilfe eines simulationsbasierten Optimierungssystems sorgfältig anhand realer Daten über Auftragsaufkommen und Flottenprofile zweier Kurierdienstunternehmen (hier aus Gründen der Anonymisierung als A und B bezeichnet) validiert und kalibriert. In einer ersten Untersuchung wurde die Eignung der Vermittlungs- und Dispositionsstrategie für die an der Studie beteiligten Unternehmen verglichen. Dabei bestätigte sich, dass beide Kurierdienste im Hinblick auf die untersuchten Ausgangsgrößen bereits das für ihr jeweiliges Auftragsprofil geeignete Verfahren einsetzen.

Als Schwerpunkt der Studie wurde das bestehende Vermittlungsmodell („Status Quo“) mit Modellen der alternativen Logistikstrategien „Hub and Shuttle“ und „Innen/Außen“

verglichen. Dabei zeigte die „Innen/Außen“-Strategie einen durch Senkung der motorisierten Gesamtfahrleistung begründbaren geringen ökologischen Vorteil gegenüber dem „Status Quo“-Modell. Darüberhinaus erlaubt diese Strategie die effizientere Ausführung innerstädtischer Kurzaufträge, welche beim Kurierdienst A einen Großteil des Auftragsvolumens ausmachen. Auch der vermehrte Einsatz von Fahrradkurieren im Innenstadtbereich ist gut mit dem Konzept vereinbar, falls Maße und Gewichte der anfallenden Sendungen den Fahrradtransport zulassen. Eine deutlich bessere Nutzung des ökologischen Optimierungspotenzials der „Innen/Außen“-Strategie wurde in Simulationen mit näherungsweise verdoppeltem Auftragsvolumen erzielt.

Im Gegensatz dazu konnte beim „Hub and Shuttle“-Modell kein ökologischer oder effizienzbezogener Vorteil gegenüber dem „Status Quo“ nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis wurde in Simulationen mit erhöhtem Auftragsaufkommen, einer alternativen Gebietsaufteilung mit 5 Schwerpunktgebieten und auf Basis einer Clusteranalyse ermittelten Hub-Positionen (hier nicht näher ausgeführt) bestätigt. Als vorläufige Erklärung des Verhaltens muss angenommen werden, dass die „Hub and Shuttle“-Strategie weniger zur untersuchten Auftragsverteilung passt, welche durch die eher im „Innen/Außen“-Modell berücksichtigte Diskrepanz zwischen hoch ausgelastetem Innenbereich und geringer ausgelasteten Außenbereichen gekennzeichnet ist. Auch hinsichtlich des Umsetzungsaufwands erscheint die „Innen/Außen“-Strategie mit nur einem Umschlagspunkt günstiger.

Zu berücksichtigen ist bei der Beurteilung der hier vorgestellten Ergebnisse, dass nur ein Ausschnitt möglicher alternativer Organisationsstrukturen für die Abwicklung von Kuriersendungen entwickelt und simuliert wurde. Auch konnte auf die vielfältigen und unterschiedlichen Gegebenheiten von einzelnen Stadtkurierunternehmen nicht detailgenau eingegangen werden. Zum einen sind diese zu spezifisch, um in einer Modellierung angemessen berücksichtigt werden zu können. Zum anderen fehlen für eine ausreichend genaue Validierung und Kalibrierung der Modelle häufig die erforderlichen Daten. Insgesamt ist eine sorgfältige Prüfung alternativer Organisations- und Ablaufstrukturen erforderlich, damit gleichermaßen betriebswirtschaftlicher Erfolg, Fahrleistungsreduzierungen, Verringerungen von Energieverbrauch und Schadstoffemissionen bei Stadtkurierunternehmen realisiert werden können.

Auch wäre eine weitere statistische Absicherung für sämtliche Resultate der Studie wünschenswert. Ein erster Schritt hierzu besteht in der Ableitung von Verteilungen aus den bereitgestellten (und eventuell weiteren) Auftragsprofilen, welche eine flexiblere und variabelere Erzeugung von Eingangsdaten ermöglichen würden. Während für bestimmte Eingangsgrößen wie z.B. die Auftragsankunftsrate Standardverfahren einsetzbar sind, müssen zur Generierung der räumlichen Auftragsverteilung eventuell zusätzliche Untersuchungen über „Auftragsströme“ zwischen verschiedenen Großkunden angestellt werden, die zu einem komplexeren Verkehrserzeugungsmodell führen könnten.

Auch die Optimierung der Modelle bedarf weiterer Arbeiten, wobei am Fachbereich Informatik entwickelte und noch weiter zu entwickelnde Werkzeuge sinnvoll einsetzbar sind. Insbesondere kann die Parameterkalibrierung und Optimierung automatisiert mit

Hilfe des auf genetischen Algorithmen beruhenden simulationsbasierten Optimierungswerkzeugs DISMO (Gehlsen/Page 2001) erfolgen. Durch die Möglichkeit zur verteilten Ausführung der Simulationsexperimente wird dabei auch dem Problem der relativ langen Simulationslaufzeit in komplexen agentenbasierten Modellen Rechnung getragen. Neben der noch erforderlichen statistischen Absicherung bei der Kalibrierung des Auftragsbewertungsmodells ließen sich auch Parameter der alternativen Logistikkonzepte wie z.B. Gebietsaufteilungen und Hub-Positionen mit Hilfe dieses Werkzeugs optimieren. Schließlich bleibt das Modell der bislang nur angedachten Strategie der „fixierten Austauschpunkte“ zu entwerfen und zu implementieren, was auch im Rahmen einer studentischen Projekts realisierbar wäre.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass Simulationsexperimente eine geeignete Voraussetzung für die Umsetzung innovativer Organisationsstrukturen im Stadtkurierbereich darstellen. Sie können insbesondere dazu beitragen, bei der Planung und Konzeptionierung Modellvarianten kostengünstig auf ihre Praxistauglichkeit hin zu überprüfen. Durch eine enge Zusammenarbeit mit Kurierunternehmen können Simulationen mit detaillierteren unternehmensspezifischen Parametern und unterschiedlichen Modellen praxisnah durchgeführt werden.

Die Entwicklung leistungsfähiger Modellierungs- und Simulationstools, die eine zeitnahe und kostengünstige Prüfung praxisnäherer Modelle erlauben, erscheint daher sehr sinnvoll. Aufbauend auf den bereits im Projekt MOBILE entwickelten Werkzeugen und deren Weiterentwicklung im Projekt „Nachhaltige Logistikkonzepte für Stadtkurierdienste“ konnten dafür wichtige Grundlagen geschaffen werden.

10 Literatur

- Bachmann, R.; Gehlsen, B.; Knaak, N. (2004): *Werkzeuggestützte Kalibrierung agentenbasierter Simulationsmodelle*. In: Schulze, T.; Schlechtweg, S.; Hinz, V. (Hrsg.): *Proceedings der Tagung Simulation und Visualisierung 2004*, Magdeburg, S. 115-126.
- Czogalla, R.; Matzen, B. (2003): *Agentenbasierte Simulation von Personenbewegungen in einer Flugzeugkabine*. Diplomarbeit am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg.
- Deecke, H.; Meyer, R.; Page, B. (2000): *Erster Zwischenbericht des Projekts „Nachhaltige Logistikkonzepte für Stadtkurierdienste“ – Zusammenfassung der Unternehmensgespräche*. Interner Bericht, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg.
- Deecke, H.; Knaak, N.; Meyer, R.; Page, B. (2003): *Nachhaltige Logistikkonzepte für Stadtkurierdienste: Projekt-Endbericht*. Interner Bericht, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg.
- Domschke, W. (1989): *Logistik Bd. 1: Transport, Grundlagen, Lineare Transport- und Umladeprobleme*. 3. erg. Aufl., Oldenbourg, München.
- Douglass, B. P. (1999): *Doing Hard Time: Developing Real Time Systems with UML, Objects, Frameworks and Patterns*. Addison-Wesley, Reading (MA).
- Drogoul, A.; Vanbergue, D.; Meurisse, T. (2002): *Multi-Agent Based Simulation: Where are the Agents*. In: Sichman, J. S.; Bousquet, F.; Davidsson, P. (Hrsg.): *Multi-Agent Based Simulation II*, Springer, Berlin u.a., S. 2-15.
- Ferber, J. (1999): *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison-Wesley, Harlow.
- Gamma, E. et al. (1994): *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. 2. Print, Addison-Wesley, Reading (MA).
- Gehlsen, B.; Page, B. (2001): *A Framework for Distributed Simulation Optimization*. In: Peters, B. A. et al.: *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*.
- Hilty, L. et al. (1998): *Instrumente für die ökologische Bewertung und Gestaltung von Verkehrs- und Logistiksystemen – Abschlussbericht des Forschungsprojekts MOBILE*. Bericht am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg.
- Köhler, H.-J. (1999): *Code-Generierung für UML Kollaborations-, Sequenz-, und Statechart-Diagramme*, Diplomarbeit an der Universität Paderborn, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik.
- Klügl, F. (2001): *Multiagentensimulation – Konzepte, Werkzeuge, Anwendungen*. Addison-Wesley, München.
- Knaak, N. (2002): *Konzepte der agentenbasierten Simulation und ihre Umsetzung im Rahmen des Simulationsframeworks DESMO-J*. Diplomarbeit am Fachbereich

Informatik der Universität Hamburg.

- Knaak, N.; Meyer, R.; Page, B. (2002a): *Zweiter Zwischenbericht des Projekts „Nachhaltige Logistikkonzepte für Stadtkurierdienste“ – Entwurf und Implementation von agentenbasierten Simulationsmodellen*. Interner Bericht, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg.
- Knaak, N.; Meyer, R.; Page, B. (2002b): Agentenbasierte Simulation mit einem objektorientierten Framework in Java. In: D. Tavangarian, R. Grützner (eds.): *Frontiers in Simulation (12)*, ASIM 2002, 10.-13. September, Rostock.
- Meyer, R. (2004): *Agenten in Raum und Zeit: Agentenbasierte Simulation mit expliziter Raumrepräsentation*. Dissertation am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg (in Vorbereitung), Hamburg.
- Österreich, B. (1998): *Objektorientierte Softwareentwicklung – Analyse und Design mit der Unified Modeling Language*. 4. Auflage, Oldenbourg, München.
- Page, B. (1991): *Diskrete Simulation – Eine Einführung mit Modula-2*. Springer, Berlin.
- Page, B.; Lechler, T.; Claassen, S. (2000): *Objektorientierte Simulation in Java mit dem Framework DESMO-J*. Libri, Hamburg.
- Page, B.; Reick, C. (1999): *Projektantrag „Nachhaltige Logistikkonzepte für Stadtkurierdienste“*. Fachbereich Informatik, Universität Hamburg.
- Reick, C. (1997): *Zur Modellierung von Stadtkurieren*. Internes Arbeitspapier, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg.
- Smith, R. G. (1980): *The Contract Net Protocol: High Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver*. IEEE Transactions on Computers 29(12), S. 1104-1113.

11 Anhang: Simulationsreports

11.1 Kurierbezogene Daten

Datensatz 1 KD A	Verkehrsmittel	Anzahl Fahrer	Mittlere Distanz (km)	StdAbw Distanz (km)	Mittlere Leerfahrt (km)	Mittlere Auftragszahl	StdAbw. Auftragszahl	Mittlerer Umsatz (€/km)	StdAbw Umsatz	Mittl. Auslastung (%)	StdAbw Auslastung
Status Quo (Vermittlung)	Bike	33	46.2	16.73	18.46	12.36	6	1.71	0.34	66.97	6.13
	Car	132	94.47	32.97	30.84	11.49	4.32	1.2	0.27	59.05	15.76
	Bike	33	63.39	30.39	27.95	10.27	4.71	1.23	0.18	70.46	16.43
	Car	132	124.89	39.43	53.97	12.02	4.21	0.91	0.14	73.51	14.22
Empirische Auftr.Vergabe Innen/Außen	Bike	33	47.72	21.68	13.13	13	7.58	1.83	0.32	70.52	17.01
	Car	132	96.58	49.21	30.51	11.33	6.39	1.13	0.31	63.75	19.17
	Bike	33	46.42	17.33	21.16	11.45	5.71	1.55	0.35	64.27	3.99
	Car	132	94.81	40.68	28.62	16.34	8.25	1.64	0.51	62.32	13.2
Hub&Shuttle	Bike	33	45.28	17.16	21.14	13.09	6.1	1.83	0.47	63.98	5
	Car	132	96.4	33.02	34.35	15.22	5.24	1.46	0.36	61.65	12.83
	Shuttle#1		146.98								
	Shuttle#2		141.57								
Datensatz 2 (KD A)											
Status Quo (Vermittlung)	Bike	34	43.01	18.87	16.37	10.82	5.54	1.64	0.3	65.85	6.37
	Car	132	91.12	27.41	29.16	10.86	4.24	1.15	0.29	59.32	13.94
	Bike	34	59.65	27.76	25.23	10.44	4.72	1.38	0.6	71.25	8.87
	Car	132	110.47	36.81	44.56	10.95	4.3	0.93	0.14	70.23	15.1
Empirische Auftr.Vergabe Innen/Außen	Bike	34	45.28	26.66	13.25	11.44	6.85	1.89	0.6	70.84	14.79
	Car	132	91.16	41.04	30.02	10.7	6.16	1.1	0.28	64.97	18.98
	Bike	34	38.97	15.18	18.35	9.56	5.08	1.5	0.42	60.63	4.13
	Car	132	88.29	40.3	26.03	15.58	8.74	1.63	0.5	62.13	12.82
Hub&Shuttle	Bike	34	41.67	18.95	18.68	11.29	5.78	1.72	0.45	63.87	8.75
	Car	132	94.04	34.81	33.59	14.57	5.72	1.42	0.39	61.57	12.61
	Shuttle#1		139.39815								
	Shuttle#2		140.45289								

Datensatz 3 (KD A)	Verkehrsmittel	Anzahl Fahrer	Mittlere Distanz (km)	StdAbw Distanz (km)	Mittlere Leerfahrt (km)	Mittlere Auftragszahl	StdAbw. Auftragszahl	Mittlerer Umsatz (€/km)	StdAbw Umsatz	Mittl. Auslastung (%)	StdAbw Auslastung
Status Quo (Vermittlung)	Bike	33	51.07	16.43	18.94	12.79	4.82	1.65	0.3	65.38	4.88
	Car	147	89.71	30.65	30.87	10.01	4.12	1.09	0.27	58.24	13.86
Disposition	Bike	33	62.76	22.02	23.57	11.45	4.22	1.34	0.19	66.31	13.98
	Car	147	99.74	34.58	38.18	10.31	4.46	0.97	0.16	63.82	18.57
Empirische Auftr.Vergabe Innen/Außen	Bike	33	50.86	26	13.46	11.58	5.21	1.69	0.33	62.66	17.22
	Car	147	88.66	43.33	29.93	10.28	5.76	1.1	0.29	64.37	16.71
Hub&Shuttle	Bike	33	47.92	14.9	21.14	11.91	4.48	1.57	0.27	61.11	4.58
	Car	147	88.47	40.81	29.02	14.33	7.73	1.54	0.51	61.15	11.68
Shuttle#1	Bike	33	50.51	18.74	23.11	13.52	5.52	1.72	0.38	62.39	6.14
	Car	147	89.76	32.59	33.47	13.31	5.44	1.36	0.35	59.74	11.98
Datensatz 5 (KD A)	Shuttle#1		140.45289								
	Shuttle#2		141.57083								
Status Quo (Vermittlung)	Bike	40	44.09	15.73	16.95	10.67	5.45	1.6	0.43	63.52	6.87
	Car	130	90.02	37.43	31.2	10.42	4.05	1.16	0.27	59.67	15.06
Disposition	Bike	40	60.29	29.22	26.57	9.77	4.78	1.22	0.19	68.38	14.93
	Car	130	120.55	39.72	54.66	10.69	3.89	0.86	0.15	76.64	12.94
Empirische Auftr.Vergabe Innen/Außen	Bike	40	46.81	27.44	13.18	11.5	6.83	1.77	0.48	67.98	19.02
	Car	130	89.14	45.01	29.58	10.16	6.35	1.15	0.9	64.43	18.54
Hub&Shuttle	Bike	40	41.32	16.88	17.18	9.85	5.08	1.54	0.4	59.76	5.8
	Car	130	88.03	39.11	27.16	14.95	7.63	1.65	0.57	64.31	12.85
Shuttle#1	Bike	40	41.49	15.85	18.76	11.67	5.86	1.76	0.48	61.13	7.72
	Car	130	93.9	35.29	34.43	13.88	5.5	1.35	0.31	61.89	13.77
Shuttle#2	Shuttle#1		141.59442								
	Shuttle#2		137.35854								

Datensatz 4 (KD A)	Verkehrsmittel	Anzahl Fahrer	Mittlere Distanz (km)	StdAbw Distanz (km)	Mittlere Leerfahrt (km)	Mittlere Auftragszahl	StdAbw. Auftragszahl	Mittlerer Umsatz (€/km)	StdAbw Umsatz	Mittl. Auslastung (%)	StdAbw Auslastung
Status Quo (Vermittlung)	Bike	34	39.99	17.59	15.36	10.29	5.52	1.63	0.35	67.47	7.32
	Car	139	90.43	32.2	30.59	10.23	4.23	1.08	0.27	57.08	12.97
Disposition	Bike	34	53.21	27.87	20.91	9.71	4.64	1.36	0.24	69.23	14.57
	Car	139	97.14	33.16	37.5	10.37	4.41	0.98	0.17	62.36	17.52
Innen/Außen	Bike	34	39.13	16.38	17.56	9.76	4.99	1.54	0.36	64.45	7.45
	Car	139	87.4	38.12	28.89	14.12	6.88	1.54	0.46	60.27	12.34
Hub&Shuttle	Bike	34	38.37	15.61	18.79	10.53	5.26	1.68	0.39	62.72	5.32
	Car	139	88.5	29.25	33.82	13.61	5.14	1.36	0.33	58.52	12.28
	Shuttle#1		146.97607								
	Shuttle#2		139.39815								
Datensatz 6 (KD B)											
Vermittlung	Car	53	94.96	28.39	38.91	5.43	1.99	0.75	0.19	52.02	13.14
Disposition	Car	53	92.51	35.1	36.08	5.43	2.05	0.79	0.15	50.95	16.94
Datensatz 7 (KD B)											
Vermittlung	Car	49	92.05	35.2	36.06	5.9	2.43	0.8	0.21	54.3	12.97
Disposition	Car	49	90.27	36.75	33.95	5.9	2.51	0.83	0.17	52.19	14.21
Datensatz 8											
Status Quo (Vermittlung)	Bike	34	55.36	24.92	12.99	18.24	9	2.34	0.55	81.92	9.24
	Car	132	157.43	55.31	26.75	19.6	6.14	1.36	0.37	85.85	14.68
Innen/Außen	Bike	34	43.84	18.9	13.79	13.5	6.81	2.03	0.54	74.27	7.11
	Car	132	115.53	57.38	21.11	30.11	17.92	2.59	0.88	84.86	8.47
Hub&Shuttle	Bike	34	59.66	29.15	18.19	20.53	10.68	2.27	0.53	80.6	8.29
	Car	132	172.74	56.77	31.14	27.28	7.91	1.58	0.45	88.52	11
	Shuttle#1		141.59442								
	Shuttle#2		137.35854								
Datensatz 9											
Status Quo (Vermittlung)	Bike	34	47.8	17.81	11.85	19.26	8.79	2.67	0.57	86.02	9.68
	Car	139	131.91	49.02	25.71	20.85	7.63	1.62	0.53	84.91	13.46
Innen/Außen	Bike	34	43.19	16.69	15.14	15.15	6.89	2.28	0.45	78.83	10.2
	Car	139	115.93	46.4	25.91	29.63	13.4	2.46	0.78	86.26	11.04
Hub&Shuttle	Bike	34	60.67	21.9	20.74	21.76	8.34	2.38	0.39	86.18	7.04
	Car	139	154.62	51.1	32.76	27.2	8.37	1.65	0.46	89.62	9.65
	Shuttle#1		154.49812								
	Shuttle#2		163.29765								

11.2 Auftragsbezogene Daten

Datensatz 1 (KD A)	Auftrags- typ	Anzahl	Mittl. Liefer- zeit (min)	StdAbw. Lieferzeit	Mittl. Verspä- tung (min)	Max. Verspä- tung (min)	Disponiert (Anteil in %)
Vermittlung	std	1925	49.49	30.08	8.09	27.56	0.1039
Disposition	std	1925	32.48	16.31	39.41	104.23	100
Emp. Auftr.	std	1925	49.31	42.14	0	0	0
Innen/Außen	std	1315	34.34	21.2	41.17	100.87	0.076
Hub&Shuttle	hub	610	163.75	74.16	70.39	389.39	2.7869
	std	1409	47.84	35.38	17.81	80.03	0.4968
	hub	516	131.85	37.59	30.45	104.72	0.5814
Datensatz 2 (KD A)							
Vermittlung	std	1801	48.84	27.84	5.27	9.34	0.0555
Disposition	std	1801	29.78	11.65	0	0	100
Emp. Auftr.	std	1801	45.39	27.3	0	0	0
Innen/Außen	std	1220	31.64	19.87	28.35	53.26	0.082
Hub&Shuttle	hub	581	167.2	76.75	73.42	290.43	3.0981
	std	1295	48.13	34.75	24.61	135.04	0.695
	hub	506	133.51	40.57	37	142.6	0.1976
Datensatz 3 (KD A)							
Vermittlung	std	1893	43.69	24.42	0.52	0.84	0.1585
Disposition	std	1893	28.44	10.49	0	0	100
Emp. Auftr.	std	1893	44.57	29.41	0	0	0
Innen/Außen	std	1287	32.24	21.36	34.39	83.68	0
Hub&Shuttle	hub	606	148.15	61.97	55.74	224.29	2.4752
	std	1383	45.53	31.67	8.25	25.7	0.2169
	hub	510	128.09	35.41	29.09	125.44	0

Datensatz 4 (KD A)	Auftrags- typ	Anzahl	Mittl. Liefer- zeit (min)	StdAbw. Lieferzeit	Mittl. Verspä- tung (min)	Max. Verspä- tung (min)	Disponiert (Anteil in %)
Vermittlung	std	1772	43.58	23.84	5.66	9.07	0.0564
	std	1772	28.11	10.7			100
Innen/Außen	std	1249	32.61	18.4	16.94	25.58	0.0801
	hub	523	150.2	56.34	50.71	192.25	0.956
Hub&Shuttle	std	1294	40.41	27.47	3.6	7.71	0.0773
	hub	478	121	31.29	20.81	96.41	0.2092
Datensatz 5 (KD A)							
Vermittlung	std	1781	49.53	30.32	7.85	30.38	0.1684
	std	1781	34.47	18.43	19.14	46.8	100
Emp. Auftr.	std	1781	47.72	31.32	0	0	0
	std	1224	34.6	25.36	95.39	209.82	0.0817
Innen/Außen	hub	557	165.39	79.63	77.9	497.22	3.0521
	std	1291	51.16	37.68	10.61	39.19	0.4648
Hub&Shuttle	std	490	134.47	39.85	33.44	128.96	0.2041
	hub						
Datensatz 6 (KD B)							
Vermittlung	std	288	63.1	32.65	13.07	29.97	1.0417
	std	288	41.25	17.77	0	0	100
Datensatz 7 (KD B)							
Vermittlung	std	289	65.94	37.34	16.49	35.15	0.692
	std	289	38.46	13.98			100
Datensatz 8							
Vermittlung	std	3207	124.27	97.84	90.4	579.42	15.9651
	std	1980	64.38	56.51	112.17	586.68	0.1515
Innen/Außen	hub	1227	299.84	192.19	199.36	1062.23	22.8199
	std	2113	112.01	108.63	116.22	563.71	22.5272
Hub&Shuttle	std	1092	257.22	127.76	145.36	685.01	34.6154
	hub						
Datensatz 9							
Vermittlung	std	3553	103.2	69.98	54.68	493.89	9.7945
	std	2473	66.5	42.38	35.34	361.83	0.6874
Innen/Außen	hub	1080	242.62	134.37	136.45	841.85	26.6667
	std	2585	98.06	91.21	95.04	592.8	15.4739
Hub&Shuttle	std	968	230.71	101.81	112.95	546.04	27.376
	hub						

2 Aufträge nicht inner-
halb der Simulations-
dauer ausgeliefert.