

# 1 Zum Einstieg

## 1.1 Motivation und Ziele der Arbeit

Mit den Multiagentensystemen (MAS) hat eine neue Modellierungstechnik in den Sozialwissenschaften Einzug erhalten. Auch in den entsprechend ausgerichteten Teildisziplinen der Geographie sind sie bereits zum Einsatz gekommen.<sup>6</sup> Mit dieser Arbeit wird jedoch in mehrerer Hinsicht Neuland betreten:

1. Mikrosimulationen im Allgemeinen und Multiagentensimulationen im Besonderen sind bisher in der Handels- bzw. Konsumentenforschung kaum eingesetzt worden.<sup>7</sup> Insbesondere die Handelsgeographie hat sich viel stärker mit der Angebotsseite beschäftigt.
2. Neu ist ebenfalls die Verbindung von Modellierungsverfahren der Mikroebene mit einer regionalen Maßstabsebene der Betrachtung. Damit stellen sich nicht nur neue Anforderungen an selbige Verfahren, es ergeben sich auch bessere Chancen der Modellkalibrierung, da Daten auf regionaler Ebene eher verfügbar sind.

Für die projektbezogene Arbeit wurden drei vorrangige Ziele formuliert:

1. Modellierung und Simulation von Interaktionsströmen von Personen und Kapital zwischen Elementen der Nachfrage (den Konsumenten) und des Angebots (den Geschäften), in ihrer Abhängigkeit von Raum und Zeit. Damit soll die Eignung von Multiagentensystemen und ihrem Einsatz für die Mikrosimulation zur Abbildung von räumlichem Konsumentenverhalten und Einkaufsverflechtungen auf der Nachfrageseite und zur Marktgebietsabgrenzung auf der Angebotsseite nachgewiesen werden.
2. Lösung der Frage der räumlichen Aggregate und damit Vergleich mit bisherigen in der Handelsgeographie gängigen Methoden. Hier geht es nicht nur um einen qualitativen Vergleich, sondern auch um die Frage, ob und in wie weit die bisherigen Verfahren durch Mikrosimulationen ergänzt oder ersetzt werden sollen. Dieser Abgleich ist sowohl formal als auch empirisch auf mehreren Ebenen der räumlichen Aggregation vorzunehmen.
3. Einordnung der Verfahren der agentenbasierten Simulation in die Theoriegebäude der Sozialgeographie, die bisher ausgeblieben ist.

Was sind Multiagentensysteme und welche Relevanz haben sie für die Geographie? Die Idee dazu entstammt der Informatik und der Suche nach einer Lösung des Problems, Maschinen stets nur Anweisungen für vorhersehbare Situationen geben zu können. Programme bestehen oft aus langen Reihen von Wenn-Dann-Relationen, etwa „Wenn hier geklickt wird,

---

<sup>6</sup> Siehe Kapitel 1.2.

<sup>7</sup> Siehe Kapitel 1.2.2.

führe eine Aktion aus“. Für viele Anwendungen reicht das auch aus. Lange Zeit herrschte die Vorstellung, man müsse der Maschine nur eine genügende Anzahl solcher Wenn-Dann-Relationen einprogrammieren, vielleicht einige Millionen, dann sollte der Rechner mit dem Großteil aller auftretenden Eventualitäten zurechtkommen. Dennoch kann man dann aber immer noch Situationen benennen, auf die ein Programm nicht vorbereitet ist. Als Ausweg aus diesem Dilemma entstand die Idee, Algorithmen zu entwickeln, die sich quasi selbst schreiben. Sie sollten aus Softwarebausteinen („Agenten“) bestehen, die sich selbst in einem (Multiagenten-) System<sup>8</sup> organisieren und eine Struktur bilden, die das anstehende Problem löst, also in gewissem Sinne und mit Abstrichen intelligent handeln. Daraus entstand in der Informatik ein eigenes Forschungsfeld der „Künstlichen Intelligenz“.

Dieser Ansatz kommt dem sozialwissenschaftlichen Konzept von der (Selbst-) Organisation von Gesellschaften sehr nahe und hat insbesondere mit der Geographie die Vorstellung gemein, dass aus massenhaften individuellen Entscheidungen und Verhaltensweisen geordnete Systeme (Raumstrukturen) entstehen<sup>9</sup>. Auch das Prinzip autonom handelnder oder interagierender Akteure, die zusammen eine Gesellschaft bilden und mit ihr in Wechselwirkung treten, ist in unserer Disziplin fest verankert. Sich von Ideen der Psychologie nährend, kamen in den 1960er Jahren erste Ansätze einer *behavioural geography* aus dem anglophonen Wissenschaftsraum<sup>10</sup>. Besonders wichtig war dort die Abgrenzung der Erforschung des *spatial behaviour*, der Suche nach Modellen für die Entscheidungsprozesse und ihren Regeln, die räumlichem Verhalten zu Grunde liegen, von der des *behaviour in space*, der statistischen Beschreibung (nicht Erklärung!) von Interaktionen im Raum<sup>11</sup>. Einige Jahre später drang das Konzept auch in das restliche Europa vor. HÄGERSTRAND fragte (1970): „What about people in regional science?“ und forderte eine stärkere Beachtung individueller Verhaltensmuster in den Raumwissenschaften. In der deutschsprachigen Geographie, der außer der englischsprachigen Vorarbeiten die Habilitationsschrift von Dietrich BARTELS (1968) als Denkanstoß diente, finden sich erste Diskussionen u.a. bei THOMALE (1974) als „Geographische Verhaltensforschung“ oder bei WIESSNER (1978) als „Verhaltensorientierte Geographie“. Aus der Kritik dieser Ansätze, die sich vor allem gegen das Menschenbild eines Mediums vorherbestimmter Reaktionen auf Reize und gegen die Vernachlässigung von Intentionalität wandte, konzeptionalisierte sich eine Theorie des Handelns (Handlungstheorie), die sich in der deutschsprachigen Literatur zunächst bei WIRTH (1977, 1981) und SEDLACEK (1982) findet und, von WERLEN (1987) übernommen, heute einen festen Platz in aktuellen Lehrbüchern hat<sup>12</sup>. Ende der 1980er Jahre galt diese theoretische Diskussion bereits als weitgehend abgeschlossen<sup>13</sup>. Eine ausführliche Darstellung all dieser Ansätze und Theorien findet sich in Kapitel 2.1 dieser Arbeit.

Wenn sich die Sozialgeographie nun darüber einig ist, dass Strukturen im Raum nicht a priori gegeben, sondern Ergebnisse individuellen Handelns sind, sollten auch die Methodiker unter den Geographen darum bemüht sein, sich von der Modellierung dieser Raumstrukturen (Makromodelle) auf die Modellierung von Individualentscheidungen (Mikromodelle) zu verlegen. Arbeiten, die sich mit den Entscheidungsprozessen von Individuen (*Discrete Choice*) auseinandersetzen, liegen in großer Anzahl vor<sup>14</sup> und beschäftigen neben Geographen auch Ökonomen und Psychologen. Dabei sind die Anwendungsbereiche sehr unterschiedlich

<sup>8</sup> Zur genauen Definition von Multiagentensystemen siehe Kapitel 3.2.

<sup>9</sup> OPENSHAW & OPENSHAW 1997: 8.

<sup>10</sup> U.a. COX & GOLLEDGE 1969, auch 1981.

<sup>11</sup> COX & GOLLEDGE 1981: xvi.

<sup>12</sup> WERLEN 2000, HEINEBERG 2004 u.a.

<sup>13</sup> TZSCHASCHEL 1986: 7.

<sup>14</sup> GOLLEDGE & TIMMERMANS 1988, für einen aktuelleren Überblick siehe TIMMERMANS et al. 2002.

und reichen von der Verkehrsmittel-, Wohn- und Unternehmensstandortwahl über die Wahl von Freizeitstätten bis zum Konsumentenverhalten. Stets schlug sich aber der Bezug zur Mikroebene auch in der betrachteten Fallzahl nieder. Schließlich erlaubte auch der Stand der Rechner Technik kein aufwändiges Experimentieren mit großen Datenmengen und umfangreichen Versuchsanordnungen. Eine Erläuterung und Diskussion der bekannten Modellierungsansätze wird in Kapitel 2.2 vorgenommen.

Das führt uns zur zweiten Säule dieser Arbeit, der Simulation. Grundsätzlich ist die Simulation von der Modellbildung zu trennen. Das Modell definiert die Wertebereiche seiner Parameter und quantifiziert die Beziehungen unter ihnen, was man unter Modellannahmen subsumiert, die sowohl deterministische als auch stochastische Elemente enthalten können. Erst in der Simulation nehmen die Modellparameter Werte an, die dann nach den Vorschriften des Modells manipuliert werden. Die Simulation verbindet also das Modell mit den Daten. Jedes einmalige Verändern der – jetzt – Simulationsparameter betrachtet man als einen Simulationsschritt. In der Regel reihen sich viele solche Simulationsschritte aneinander, wobei jeweils Informationen (Ergebnisse der Parametermanipulationen) von vorherigen Schritten in die folgenden eingehen können. Dieses ‚Fortpflanzen‘ von Wirkungen, also die Abhängigkeit der Simulationsschritte untereinander, und der Einbezug von Zufallskomponenten in das Modell machen die Simulation überhaupt erst erforderlich. Andernfalls wäre die Modellrechnung nur ein einziges Mal durchzuführen, was streng genommen keine Simulation ist, sondern nur das Ausführen eines Algorithmus.

Man kann viele Arten von Simulationen unterscheiden, beispielsweise danach, wie sie die Dimension der Zeit berücksichtigen, ob sie also kontinuierlich oder zeitdiskret sind, ob sie eine räumliche Komponente besitzen oder nicht. Das hängt ganz von der gestellten Aufgabe ab. Simulationen kommen in vielen Wissenschaftsbereichen zum Einsatz, die allgemein bekanntesten Anwendungen sind wohl die der Ingenieurwissenschaften, z.B. in Flugsimulatoren. Auch hier liegt der Simulation natürlich ein Modell zugrunde, das etwa festlegt, wie das simulierte ‚Flugzeug‘ auf Änderungen der Luftströmung oder auf einen Eingriff des Piloten in die Steuerung reagiert. Weitere Anwendungsbereiche finden sich in den Materialwissenschaften (z.B. Wechselwirkungen zwischen Schiene und Rad eines fahrenden Zugs), in der Physik und Astronomie (z.B. Aufeinanderprallen von Massen), in der Klimatologie (Wettervorhersage), in der Geologie und Geomorphologie (Massenbewegungen), in der Biologie (Verhaltensforschung) und schließlich in den Sozialwissenschaften und damit in den entsprechend ausgerichteten Teildisziplinen der Geographie (menschliches Verhalten). Gemeinsam ist diesen Beispielen, dass sie erlauben, aus dem Kenntnis der Vergangenheit (Modellannahmen) Aussagen über die Zukunft zu treffen.

Modellbildung und Simulation existieren jedoch nicht unabhängig voneinander. Ebenfalls Bestandteil dieser Arbeit ist, die Ergebnisse der Simulation mit der Realität, insbesondere mit der Vergangenheit, in Beziehung zu setzen. Dieser Vergleich kann zu neuen Erkenntnissen und zur Veränderung der Modellannahmen führen. Eine solche Kalibrierung des Modells ist insbesondere für den Einsatz der Simulation als Prognosewerkzeug unverzichtbar, denn die Genauigkeit, mit der die Simulation in der Lage ist, vergangene Entwicklungen nachzubilden, entspricht der Eintrittswahrscheinlichkeit der vorhergesagten Ereignisse in der Zukunft. Modelle und Simulationen, die diesen Abgleich nicht vornehmen oder nicht quantifizieren können, sind für die Prognose wertlos.

## 1.2 Stand der Forschung: MAS in der Geographie

Hier soll es vorrangig um bisherige Einsätze von Multiagentensystemen (MAS) zur Simulation von räumlichen Interaktionen allgemein und im Konsumentenverhalten im Besonderen gehen. Das häufigste Anwendungsfeld von Multiagentensystemen in der Geographie ist das zur Simulation von Siedlungsstrukturen, urbanen Systemen und Verkehr, dem ein eigener Abschnitt (1.2.1) gewidmet ist. Danach wird auf die bisherigen Anwendungen von MAS auf Konsumentenentscheidungen eingegangen (1.2.2). Schließlich gibt es noch einige weitere Anwendungsbereiche, die in einem dritten Unterkapitel zusammengefasst werden (1.2.3).

### 1.2.1 Siedlungsstrukturen, urbane Systeme und Verkehr

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden hier einige neuere Anwendungen von Multiagentensystemen aus dem Bereich der Stadtforschung vorgestellt, ausgehend von einer überregionalen bis zur innerstädtischen Maßstabsebene.

BURA et al. beanspruchten 1996, mit dem Modell SIMPOP die erste Multiagentensimulation in der Geographie unternommen zu haben (ebd.: 165). Sie modellierten die langfristige Entstehung und Entwicklung eines Siedlungssystems mit einem Multiagentenansatz, um damit Hypothesen zu dessen Dynamik zu testen und Vorhersagen über seine Zukunft zu treffen. Ausgangspunkt ist die Annahme, dass Siedlungssysteme aus der Selbstorganisation der Interaktionen unter ihnen entstehen und sich weiterentwickeln (ebd.: 162). Die Agenten repräsentieren Raumzellen, die physische Attribute (Landbedeckung, natürliche Ressourcen, etc.) besitzen und zusätzlich Ort einer Siedlung sein können. Die Siedlungen entwickeln sich wiederum von einem Initialstadium zu Industrie-, Verwaltungs-, Handels-, und „komplexen“ Städten, die alle vorgenannten Funktionen vereinen (ebd.: 167). Diese Entwicklung verläuft dabei für jede modellierte Siedlung unterschiedlich und setzt sich aus drei Modellteilen zusammen: Der Modellierung der Arbeitsteilung und Spezialisierung der Siedlungen untereinander in Bezug auf ihre zentralörtlichen Funktionen, den Austausch von Waren und Dienstleistungen, und ihr Wachstum sowie Auf- und Abstieg in der Hierarchie. Für den Güteraus-tausch werden lediglich Angebot und Nachfrage modelliert, ein Gleichgewicht zwischen beiden zu finden, wird der Selbstorganisation der Agenten überlassen. Je nach ihrem wirtschaftlichen Erfolg wachsen die Städte schneller oder langsamer als der Systemdurchschnitt (ebd.: 169). Die frühen Stadien der agrarischen Arbeitsteilung, wie sie auch in historisch-geographischen Arbeiten belegt sind, kann das Modell recht gut nachbilden. Größere Innovationen, wie die der industriellen Revolution, müssen dem Modell aber exogen zugeführt werden. Schließlich ist die Güte des Modells aber auch von einer Reihe voreinzustellender und empirisch nicht ohne Weiteres begründbarer Parameter abhängig, wie etwa ein Bevölkerungsschwellenwert, ab dem eine Stadt eine zusätzliche Funktion wahrnehmen kann (ebd.: 175). Eine ähnliche Arbeit lieferte DIBBLE 1996, die die Wirkungsweise von Modellen zur Entstehung von Siedlungssystemen in Abhängigkeit der Ausprägungen verschiedener Wirtschaftssektoren untersuchte. Auch hier wurde ein Multiagentensystem zur Hypothesenprüfung eingesetzt.

Eine Maßstabsebene tiefer untersuchten SEMBOLONI et al. (2004) die wirtschaftlichen Beziehungen innerhalb einer Stadt<sup>15</sup>. Als Agenten firmierten die Einwohner (in Gestalt von „Familien“ mit jeweils 100 Individuen), Industrie- und Dienstleistungsbetriebe, „Öffentliche Dienstleistungen“ und Immobilienmakler. Jede dieser Agentenklassen<sup>16</sup> trifft Entscheidungen über ihren Standort und den Austausch von Waren und Dienstleistungen sowie ihres monetären Gegenwerts unter Maximierung ihrer Nutzenfunktion. Für die Bewertung der Waren und Dienstleistungen mit Geldbeträgen wird eine Reihe von initialen Annahmen getroffen. Die Agenten können diese Preise jedoch verändern, sollten sich ihre angebotenen Waren und Leistungen in einem Simulationsschritt nicht verkauft haben. Weitere Voreinstellungen betreffen Parameter wie den Flächenbedarf von Familien und Produktion sowie der Zufallsanteil in den Zielfunktionen. Ganz eigenständig verläuft die Simulation allerdings nicht: Der Bediener des Programms übernimmt die Rolle der öffentlichen Planung, er bestimmt die zu bebauenden Flächen, setzt deren initiale Preise fest und reguliert die Austauschbeziehungen zur Außenwelt über die Preise für Import- und Exportgüter. Die Autoren stellen damit eine Simulation vor, die die wirtschaftlichen Beziehungen in einer Stadt basierend auf den Prinzipien der neoklassischen Ökonomie nachbildet. Für einen Vergleich mit der Realität legten die Autoren ein digitales Höhenmodell der Stadt Prato (bei Florenz) zugrunde und beobachteten nach 150 Simulationsschritten eine ähnliche Ausbreitung der Stadt wie 1978. Durch die große Zahl voreinzustellender Parameter und die Möglichkeit des Users, diese zur Laufzeit der Simulation noch zu verändern, stehen die Chancen dafür aber auch nicht schlecht. Versuche, nach einmal getroffenen Annahmen die Simulation ‚frei laufen‘ zu lassen wurden nicht unternommen oder deren Ergebnisse nicht dokumentiert.

Tatsächlich individuenbasiert ist das Modell eines „urbanen Systems“ (ILUTE: Integrated Land Use, Transportation, Environment) von MILLER et al. (2004), das sich durch den Versuch auszeichnet, Landnutzungsstrukturen und Verkehrsnachfrage miteinander in Beziehung zu setzen. Mikrosimulationen von Verkehrsnachfrage sind schon in großer Zahl vorhanden (ebd.: 10), jedoch erfordert ihre Verbindung mit der urbanen Form tiefgreifende Erkenntnisse über diese Zusammenhänge, was auch die Modellkomplexität notwendigerweise deutlich erhöht. Hier sind insbesondere die langfristigen Wechselwirkungen und „feedbacks“ von Interesse, also deren zweiseitige Beeinflussung. Ein Modell, das den Anspruch erhebt, ein urbanes System integrativ zu erfassen, muss folgerichtig alle Elemente des Wirkungsgefüges zwischen Landnutzung und Verkehr und deren Beziehungen untereinander abbilden. Dazu gehört die Simulation der bebauten Umwelt, der Bevölkerungsveränderungen in ihren natürlichen und migrativen Bestandteilen, der Standortentscheidungen von privaten Haushalten und Unternehmen, der ökonomischen Aktivitäten des urbanen Systems, sofern sie für den Transport von Personen und Waren relevant sind, schließlich die Simulation ihrer täglichen Bewegungen nach gewähltem Verkehrsmittel, Route und Tageszeit, ferner der Leistungsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur bei der auftretenden Nachfrage, sowie der daraus resultierenden Emissionen (ebd.: 14f). Als Agenten firmieren Individuen, Haushalte, Unternehmen und Arbeitsstellen, die jeweils eine oder mehrere „Rollen“ einnehmen, etwa als Grundbesitzer, Arbeitnehmer oder –geber, Produzent oder Konsument von Waren und Dienstleistungen etc. Das Modell arbeitet mit einem „100%-sample“, das für das Beispiel Toronto aus Zensusdaten disaggregiert wurde. Den Agenten wird zunächst mittels regelgesteuerter Auswahlmethoden eine Teilfolge von Alternativen zugewiesen, aus denen er dann unter Nutzenmaximierung seine Entscheidung trifft (ebd.: 21). Aus diesen Entscheidungen für nicht am Wohnort stattfindende Aktivitäten resultieren dann die simulierten Interaktio-

<sup>15</sup> Das Modell ist unter dem Namen CityDev auch online verfügbar: [fs.urba.arch.unifi.it:8080/suncity/](http://fs.urba.arch.unifi.it:8080/suncity/).

<sup>16</sup> Zur Begrifflichkeit von Objektklassen und –instanzen wird auf die Einführung in objektorientierte Programmierung in Kapitel 5.4 verwiesen.

nen, die die Verkehrsnachfrage darstellen, und für die die Agenten Verkehrsmittel und Route wählen. Weitere Simulationselemente schließen die Modellierung des Immobilienmarkts, des Arbeitsmarkts sowie des Pkw-Besitzes privater Haushalte ein. Die Entwicklung der Landnutzungen werden auf Basis von Zellen simuliert, die ihren Zustand über die Zeit verändern können.

Insgesamt ist dieses Modell eines urbanen Systems als ein sehr ehrgeiziges Projekt einzustufen. Leider fehlen in der zitierten Arbeit genaue Schilderungen bzw. idealerweise Gleichungen, die über das Zusammenwirken der Modellkomponenten Auskunft geben würden. Auch ist eine Validierung des Modells an Zensusdatenreihen aus der Vergangenheit noch nicht vorgenommen worden (ebd.: 38). Nach eigener Aussage verstehen die Autoren ihr Vorhaben als ein Labor, das mannigfaltige Modellierungsmethoden testen und deren Eignung überprüfen soll.

Beinahe zeitgleich haben WADDEL et al. (2003) mit UrbanSim<sup>17</sup> ein Modell für Landnutzungs-Verkehrs-Zusammenhänge am Beispiel US-amerikanischer Agglomerationsräume vorgestellt. Auch hier werden exogene Einflüsse (Wirtschaftslage, sektorale Gliederung, politische Rahmenbedingungen) vom Anwender zugeführt. Das Modell besteht aus mehreren Modulen für die ökonomischen und demographischen Veränderungen, für die Mobilität sowie die Standortwahl von Unternehmen und Haushalten und den Immobilienmarkt. Im Gegensatz zur Arbeit von MILLER (2004) wird die Funktionsweise der einzelnen Module mittels Gleichungen und einfacher Algorithmen angegeben. Zusätzlich hat der Anwender die Möglichkeit, exogene Ereignisse, wie Änderungen der politischen Rahmenbedingungen oder Ansiedlung eines größeren Unternehmens, dem Modell zuzuführen. Ergebnisse der Simulation werden in der Arbeit nicht vorgestellt.

Für einen deutschen Untersuchungsraum (Stadt Dortmund und umliegende Gemeinden) simuliert das ILUMASS-Modell die Wechselwirkungen zwischen Flächennutzung und Verkehr<sup>18</sup>. Es besteht aus vier integrierten Teilmodulen für die Organisation der Flächennutzung, die Verkehrsnachfrage, den Verkehrsablauf und die Raum- und Umweltwirkungen des Verkehrs (ebd.: 123), die ihre Zustandsinformationen untereinander austauschen. Damit gehört das vorgestellte Modell zur Familie der so genannten LTE-Modelle (Land Use, Transportation, Environment). Die einzelnen Module werden nicht im Detail vorgestellt, stattdessen wird auf vorhandene Komponenten oder „state-of-the-art“-Modelle verwiesen. Als Datengrundlage dient eine disaggregierte, synthetische Bevölkerung, „deren statistische Eigenschaften denen der realen Bevölkerung gleichen“ (ebd.: 127), als räumliche Auflösung wurden 207.000 Rasterzellen mit einer Kantenlänge von 100 Metern gewählt. Die Verkehrsnachfrage wird auf Basis von nach Personengruppen (Schüler, Erwerbstätige, etc.) klassifizierten Mobilitätstagebüchern modelliert. Ergebnisse werden nicht vorgestellt.

PARKER et al. lieferten 2003 einen umfangreichen Überblick über aktuelle Anwendungen von Multiagentensystemen für die Modellierung von Landnutzungsänderungen. Dabei reicht die Bandbreite der Anwendungsgebiete von der Diffusion von Technologien in der Landwirtschaft, über die Auswirkungen von Land- und Forstwirtschaft auf Entwaldung v.a. in ökologisch sensiblen Räumen bis zu Studien über die Veränderungen von bebauten Flächen in Städten und innerstädtischer Migration (ebd.: 319) und sind in großer Zahl vorhanden. Die Autoren nehmen eine Gliederung solcher Modellierungen nach deren Ansätzen vor und unterscheiden dabei:

---

<sup>17</sup> Mehr Informationen auch unter [www.urbansim.org](http://www.urbansim.org).

<sup>18</sup> STRAUCH 2003.

- Gleichungsbasierte Modelle, deren Gleichungssysteme zumeist auf Gleichgewichtsannahmen beruhen, wie einem gleichmäßigen Bevölkerungswachstum oder ähnliches. Ein Nachteil dieser Modelle ist, dass für ihre Gültigkeit stets eine numerische oder analytische Lösung der Gleichungssysteme erreicht werden muss, was den Grad der Komplexität solcher Modelle deutlich einschränkt.
- Systemmodelle, deren Gegenstand die Mengenflüsse zwischen den Modelleinheiten sind. Alle diese Flüsse müssen dabei quantifizierbar sein. Räumliche Aspekte lassen sich nur schwer integrieren.
- Statistische Modellierungen, deren Vorteile v.a. in ihrer großen Akzeptanz, ihrer einfachen Anwendbarkeit und ihrer weit fortgeschrittenen Entwicklung liegen. Ohne theoretischen Rahmen laufen sie jedoch Gefahr, individuelle Entscheidungsprozesse und soziale Phänomene nicht ausreichend zu erfassen.
- Expertenmodelle, die, basierend auf dem Konzept der Expertensysteme, qualitative Informationen (die Beurteilung durch Experten) in quantitative Modelle einzubeziehen versuchen;
- Die „biologisch inspirierten“ Evolutionsmodelle, die, ähnlich Neuronalen Netzen, in einem Trainingsprozess Problemlösungen herbeiführen;
- Zellenmodelle, wie Zelluläre Automaten, für Zustandsänderungen räumlich fester und scharf abgegrenzter Einheiten, die von Übergangsregeln in Abhängigkeit ihrer eigenen früheren Zustände und der der Nachbarzellen gesteuert werden. Die flächenhafte Gestalt solcher Zellulären Automaten kommt der Anwendung für Landnutzungsmodellierung entgegen, ist aber nicht in der Lage, individuelle Entscheidungen, insbesondere von mobilen Akteuren, abzubilden. Nicht immer sind Prozesse von Landnutzungsänderungen in Nachbarschaftsbeziehungen zu fassen.
- Agentenbasierte Modelle, die als einzige explizit menschliche Entscheidungen zum Modellierungsgegenstand erklären. Agenten sollen autonom entscheiden, also selbständig Ziele verfolgen können, jedoch in eine Umwelt eingebettet sein, die von den Agenten nach bestimmten Regeln wahrgenommen wird und auch eine Kommunikation sowie den Austausch von Informationen zwischen ihnen ermöglicht. Damit bietet sich die Möglichkeit, neben rationalen auch hedonistische oder rekursive (d.h. von den Aktionen anderer Agenten abhängige) Entscheidungskomponenten einzubeziehen.
- Hybridmodelle aus beliebigen Kombinationen der vorgenannten Modelle. In Landnutzungsmodellen werden dafür häufig Zelluläre Automaten als Repräsentation der Nutzungsflächen verwendet, die Akteure aber als Agenten modelliert.

Nach der Aufzählung einiger Anwendungsbeispiele halten die Autoren ein Plädoyer für den Einsatz von Multiagentensystemen bei Landnutzungsmodellierungen. Ihrer Meinung nach bringen MAS besonders ihre Fähigkeit ein, „komplexe Systeme“ abzubilden, die „am Rand des Chaos“ anzusiedeln sind und sich durch räumliche und temporale Interdependenzen, Heterogenität und verschachtelte Hierarchien unter den Agenten sowie zwischen ihnen und der Umwelt auszeichnen (ebd.: 321). Über das Konzept der Emergenz stellen MAS auch die Verbindung zwischen Mikro- und Makroebene her, woran nicht nur Modellierer von Landnutzungsänderungen besonders interessiert sind. Darüber hinaus bieten sie die Möglich-

keit, zeitliche Dynamiken ohne zusätzliche Gleichgewichts- oder Stetigkeitsannahmen abzubilden. Die Modellierung von Anpassungsleistungen und von Pfadabhängigkeiten ist damit ebenso durchführbar. Zum Abschluss geben die Autoren einen Ausblick auf die Potenziale des Multiagentenansatzes, besonders in ihrem speziellen Arbeitsgebiet der Landnutzungsmodelle.

Eine Anwendung von agentenbasierten Modellen für Landnutzungsänderungen stellen LOIBL & PETERS-ANDERS (2003) vor. Sie richten ihr Augenmerk auf „jene Prozesse, die eine Mensch-Umwelt-Reaktion als Basis haben“ (ebd.: 90). In zwei getrennten Modellen untersuchen die Autoren, wie sie es nennen, Landschaftsveränderungen in suburbanen und ländlichen Räumen. Zu diesem Zweck werden Nutzungsänderungen von Rasterzellen als Resultate von Entscheidungen involvierter Akteure modelliert (ebd.: 97). In der Suburbanisierungssimulation (am Beispiel der Region Wien) erfolgt die Standortwahl der Agenten in zwei Schritten: Zunächst wird eine Zielgemeinde ausgewählt, deren Attraktivität sich aus der Fahrzeit zum Agglomerationszentrum, der Landschaftsattraktivität (operationalisiert durch den Waldanteil der Gemeinde), ihrem Dienstleistungsangebot und ihrer Baulandreserven berechnet (ebd.: 101). Zu bemerken ist, dass Waldanteil und Baulandreserve einer Gemeinde in Rückkopplung von der Zuwanderung abhängig sind, so dass hier die Möglichkeit von Veränderungen der Migrationsströme zur Laufzeit der Simulation besteht. Zur Bewertung besitzen die Agenten zusätzlich Präferenzen für diese Kriterien in Abhängigkeit ihrer sozioökonomischen Position, die wiederum am Bildungsstand festgemacht wird. Im zweiten Schritt wählen die Agenten eine Zielzelle innerhalb der Gemeinde. Die Agenten wandern dabei durch die Raumzellen der Gemeinde, vergleichen deren Eigenschaften, gewichtet mit ihren eigenen Präferenzen, miteinander und wählen schließlich diejenige mit der maximalen Attraktivität. Das Modell wird auf zwei räumlichen Ebenen validiert: Auf „regionaler“ Ebene werden für jede Gemeinde die Zahl der simulierten mit den realen Nutzungsänderungen im Zeitraum von 1968-1999 verglichen, auf lokaler Ebene können die beobachteten und simulierten Rasterkarten gegenübergestellt werden. Beide Analysen zeigten gute Übereinstimmungen.

Zwei im Ansatz recht ähnliche Arbeiten zur innerstädtischen Migration stellen die von BENENSON (1999) und TORRENS (2001) dar. Ersterer gibt zunächst einen disziplingeschichtlichen Überblick über Modelle „städtischer Dynamik“ und stellt dabei Makro- und Mikroansätze gegenüber. Bei den Makromodellen unterscheidet er zwischen solchen, die auf Analogieschlüssen zu ökologischen Systemen beruhen, da sie Interaktionen zwischen Bevölkerungsgruppen und „anderen urbanen Komponenten“ (ebd.: 151) zum Gegenstand haben. Die zweite Familie von Makromodellen, die in der Arbeit Aufmerksamkeit erhält, ist die der „regionalen Modelle“, die Raumparameter explizit einbezogen und somit erstmals zwischen Eigenschaften des Raumes und der Bevölkerung unterscheiden konnten. Grundlegende Arbeiten konnten modellhafte Zusammenhänge zwischen Arbeitsplätzen, Infrastruktur und Bevölkerungsdynamik in Städten bestätigen. Die Repräsentation des Raumes erfolgte dabei als „Zonen“, einer Vorstufe zum Konzept der Zellularen Automaten<sup>19</sup>. Dafür war jedoch eine Umkehr der Perspektive von einer Modellierung ‚von oben‘ (top-down) zu einer ‚von unten‘ (bottom-up) notwendig. Der Raum wird nun durch Zellen repräsentiert, die sich jeweils in einem aus einer endlichen Menge von Zuständen befinden und diesen in Abhängigkeit ihres eigenen und der Zustände ihrer direkten Nachbarn in diskreten Zeitschritten ändern (ebd.: 154). Mikromodelle einer urbanen Gesellschaft entstehen jedoch erst, wenn Entscheidungen und Aktionen von Individuen einbezogen werden. Dafür eignet sich der Multiagentenansatz besonders, da er auf die Betrachtung individueller Entscheidungen übergeht. Ist der Betrachtungsgegenstand die innerstädtische Migration, sind Wohnstandortwahlen von – als Agenten

---

<sup>19</sup> Zur Definition von Zellularen Automaten s. Kap. 3.1.



modellierten – Individuen relevant. Ausgestattet mit entsprechenden Verhaltensregeln, können Prozesse ökonomischer und kultureller Segregation nachgebildet werden. Sind die Agenten zusätzlich in der Lage, ihre Zustände zu ändern, kann die Herausbildung neuer soziokultureller Gruppen nachvollzogen werden.

BENENSON (1999) stellt ein solches Modell vor, das innerstädtische Migration zunächst als ökonomischen Austauschprozess zwischen Individuen versteht. Die Entscheidung des Agenten, den Wohnstandort zu wechseln, wird durch einen Vergleich des eigenen ökonomischen Status mit dem seiner Nachbarn induziert. Ein neuer Wohnstandort wird unter Minimierung ökonomischer Unterschiede zu den neuen Nachbarn gesucht. Ein „Gleichgewicht“ ökonomischer Segregation stellt sich bei der Simulation relativ schnell ein (ebd.: 159). In ähnlicher Weise lassen sich kulturelle Segregationsprozesse simulieren, wenn die Agenten ethnisch-kulturelle Merkmale erhalten und auf eine entsprechende Homogenität ihres Wohnumfeldes bedacht sind. Hier wird zusätzlich die Möglichkeit betrachtet, außer durch Umzug durch Anpassung der kulturellen Identität, also durch einen Assimilationsprozess, die „kulturelle Spannung“ zwischen einem Agenten und seinen Nachbarn zu verringern (ebd.: 163). Abschließend thematisiert der Autor die Schwierigkeiten bei der Wahl der zeitlichen und räumlichen Auflösung solcher Modelle. Während der Anwender bei der räumlichen Auflösung meist auf die Verwendung administrativ-statistischer Einheiten (z.B. Zählbezirke) angewiesen ist, kann er die zeitliche Auflösung für seinen Modellierungsgegenstand geeignet wählen. Problematisch wird diese Entscheidung jedoch, wenn die modellierten Prozesse unterschiedliche zeitliche Dynamiken zeigen, und so unterschiedliche „Zeitmaßstäbe“ zu betrachten sind (ebd.: 168).

Um innerstädtische Migration geht es auch in der Arbeit von TORRENS (2001). Der Beitrag behandelt den Versuch, Makro- und Mikrosimulationsmodelle am Beispiel der Wohnmobilität im urbanen Raum zusammenzuführen. Beide Formen der Simulation sollen sich dabei ergänzen („feed back“). Der Autor beginnt mit einer Darstellung der Stärken und Schwächen von Makromodellen. Ihre Entstehung beruhe auf der historisch eingeschränkten Datenverfügbarkeit (räumliche und temporale Auflösung) und Rechnerleistung. Je besser beides wird, desto hinfalliger werden Makroansätze, und desto mehr Möglichkeiten bieten Modelle auf der Mikroebene. Als Schwächen der Makromodelle werden ihr zentralistischer Ansatz, die Vernachlässigung von Dynamik, ihre geringe Detailtreue, mangelnde Flexibilität und mangelnder Realismus angeführt: Sie stellen die Realität als ein Ganzes dar, anstatt sie als Summe von Teilphänomenen zu begreifen. Geosimulationen bieten eben diese Funktionalität: Aus dem mit wenigen Regeln versehenen Individualverhalten entstehen regelhafte Raumuster auf der Makroebene, die sich sogar ohne Eingriff von außen mit der Zeit verändern können. In Kap. 3.4 (ebd.: 14) kommen dann die Entstehung, Definition und Merkmale von Zellularen Automaten und Multiagentensystemen zur Sprache.

Weil in Städten oft individuelle Entscheidungen und externe Makroeffekte (z.B. Planungsrestriktionen, ökonomische Rahmenbedingungen) zusammenwirken, wird die Verwendung von Hybridmodellen vorgeschlagen: Darin werden Individuen als Agenten, Orte als Zellulare Automaten und Außenbedingungen mit räumlich nicht differenzierten Makroansätzen modelliert. Als Beispiel dient ein Modell der Wohnortwahl, in dem Anbieter und Nachfrager des Immobilienmarktes durch Agenten und die Standorte durch Zellulare Automaten repräsentiert werden. Alle potenziellen Wohnstandorte, die in die Budgetgrenzen eines Agenten fallen, kommen in dessen Vorauswahl. Außerdem besitzen die Agenten soziale Präferenzen: Jedem wird als Kennzeichnung der sozialen Gruppe eine von drei Farben zugewiesen, wobei jede Gruppe andere Toleranzschwellen gegenüber den jeweils anderen besitzt: Im Entscheidungsprozess betrachten die Agenten also auch die bereits besetzten Raumzellen in der Umgebung ihrer potenziellen neuen Wohnung.

Stellvertretend für eine größere Anzahl von Arbeiten über die Anwendung von Multiagentensimulationen im Verkehrsbereich sei hier die von RANEY et al. (2003) zusammengefasst. Sie hat die Simulation der Verkehrsmittel und Routenwahl der gesamten Schweizer Bevölkerung zum Gegenstand und besteht aus mehreren Modulen (ebd.: 25): Die Agenten planen ihre Aktivitäten für einen Tag und wählen unter Minimierung der erwarteten Fahrzeit Verkehrsmittel und Route, um zu den Standorten dieser Aktivitäten zu gelangen. Allerdings wird angenommen, dass nur 90% der Agenten die optimale Route wählen. Im Simulationsmodul führen die Agenten diese Aktivitäten schließlich aus. Ein interessanter Aspekt ist die an dieser Stelle eingebaute Möglichkeit eines „feed back“, das etwa erlaubt, die erwarteten Reisezeiten der Routen zu verändern, wenn diese durch mehr Agenten als zulässig benutzt wurden, und es so zu einem „Stau“ kam. Sollte nach dieser Neukalkulation eine andere Route besser bewertet sein, wird in Zukunft diese gewählt, um zum Ziel zu gelangen, wobei angenommen wird, dass nur 10% der Agenten tatsächlich eine andere Route wählen. Leider sind diese Routenänderungen bislang nur nach und nicht während der Fahrt möglich.

In der vorgestellten Version beschränkt sich die Simulation noch auf den motorisierten Individualverkehr und nimmt keine Unterscheidung nach Fahrtzwecken vor. Die Autoren haben ihr erstes Ziel, ca. 10 Millionen Fahrten gleichzeitig zu simulieren, erreicht, insgesamt befand sich das Modell aber noch in der Aufbauphase. Neben der Unterscheidung von Fahrtzwecken und Verkehrsmitteln soll auch die Wahl von nicht optimalen Routen besser integriert werden, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass den Agenten vielleicht nicht alle möglichen Routen bekannt sind. Valide suboptimale Routen automatisch zu generieren, stellt dabei eine nicht zu unterschätzende Herausforderung dar. Um dem Stau zu entgehen, sollen die Agenten neben der Routenänderung während der Fahrt auch die Möglichkeit erhalten, Aktivitäten auf andere Tageszeiten mit weniger Verkehrsbelastung zu verlegen.

Da als Ausgangsdaten kleinräumige Verkehrsmengendaten verwendet wurden, schließt sich ein Vergleich mit diesen zur Validierung der Simulationsergebnisse an. Jedoch konnten automatische Fahrzeugzählungen an ausgewählten Straßen zum Vergleich herangezogen werden. Die Aufkommensschätzungen der Simulation lagen dabei zwischen halb und doppelt so hoch wie die Zählwerte.

## 1.2.2 Konsumentenentscheidungen

Da sich diese Arbeit mit der Anwendung von Multiagentensimulationen im Konsumentenverhalten beschäftigt, werden an dieser Stelle einige Vorarbeiten in genau diesem Kontext besprochen. Teile dieses Kapitels sind RAUH et al. (2006) entnommen.

Eine der ersten Realisationen war die Simulation der Einkaufsstättenwahl von Einwohnern der Gemeinde Bad Münstereifel<sup>20</sup>. Erkenntnisse aus einer Haushaltsbefragung nutzend, wurde das Versorgungsverhalten von 11 als Agenten modellierten Konsumenten mit Gütern unterschiedlicher Bedarfsstufen anhand der Angebotssituation in Bad Münstereifel simuliert. Die Einkaufsfahrten der Agenten beginnen und enden dabei am Wohnort, können jedoch mehrere Ziele kombinieren. Bei jedem Kauf geht ein Teil des Ladeninventars (10%) in den Besitz des Agenten über und kann konsumiert werden. Wenn der Vorrat erschöpft ist, erkennt der Agent erneut den Bedarf einer Einkaufsfahrt. Dazu betrachten die Agenten zunächst geeignete Geschäfte in ihrer Umgebung und wählen dann eines für den Einkauf aus,

---

<sup>20</sup> KOCH 2000.

das ihren von ihren Haushaltseigenschaften abhängigen persönlichen Präferenzen entspricht. Diese erste Agentensimulation von Konsumentenverhalten weist jedoch noch eine Reihe von Defiziten auf. Da sind zuerst einmal unnötige und auch unbegründete Restriktionen zu nennen, etwa die, dass ein Geschäft nur jeweils von einem Agenten zeitgleich aufgesucht werden darf. Sie hat direkten Einfluss auf das Simulationsergebnis, denn sie führt auch für niedrigere Bedarfsstufen zu einer starken Orientierung der Einkaufsfahrten auf den Zentralen Ort Bad Münstereifel, in dem ein breiteres Angebot zur Verfügung steht. Auch die Interpretation der Ergebnisse wird nicht konsequent zu Ende geführt. Zwar wird recht ausführlich auf das beobachtete Kopplungsverhalten der Agenten eingegangen, ob jedoch die Bedarfserkennung für Güter unterschiedlicher Fristigkeit zu einer bestimmten Simulationszeit zusammenfällt, hängt ganz wesentlich von der angenommenen Konsumptionsrate ab, über die aber keine näheren Angaben gemacht werden. Der Zusammenhang zum Kopplungsverhalten wird nicht thematisiert. Ebenso unterbleiben ein Realitätsvergleich und eine Validierung des Modells. Die als Ausgangsdaten genutzte Befragung hätte hier eine naheliegende Gelegenheit dazu geboten.

Aus einer etwas anderen Perspektive nähern sich FOX et al. (2004) der Thematik. Sie vergleichen Muster des Einkaufsverhaltens nach Betriebsformaten, insbesondere Lebensmittelsupermärkte, Discounter und Drug Stores in USA. Die Autoren stellen fest, dass Sortiment und Werbung eher das Einkaufsverhalten beeinflussen als das Preisniveau, und dass Konsumenten, die viel (bzgl. des Geldwertes) im Discounter kaufen, auch bei anderen Formaten viel kaufen, woraus gefolgert wird, dass Discounter die klassischen Lebensmittel-Märkte nicht ersetzen können und beide somit nur untereinander und nicht mit anderen Formaten in Konkurrenz stehen. Besonders wird auf die Wirkung von Werbung hingewiesen: Konsumenten, die auf Werbung reagieren, tun dies stets und ohne Rücksicht auf Preisniveau oder Sortiment des Geschäftes (ebd.: S55).

Im empirischen Teil wird in einem Mikromodell das Einkaufsverhalten von 96 Haushalten simuliert, deren demographische Daten aus einem kommerziellen Panel stammen. Obwohl es sich dabei nicht um eine Agenten-, sondern um eine Monte-Carlo-Simulation handelt, ist das Modell individuenbasiert und soll deshalb hier besprochen werden. Die Haushalte entscheiden sich zuerst für ein Betriebsformat (Regressionsgleichung aus Zahl der tatsächlichen Besuche in den letzten 24 Monaten) und anschließend für einen Ausgabebetrag sowie für ihre Loyalität zu dem besuchten Geschäft anhand ihrer Präferenzen, abhängig von einem Vektor der Haushaltsattribute (mit: Größe, Einkommen, Grundbesitz, erwerbstätige Frau, Bildung, Anzahl Kinder unter 6; ebd.: S33). Als Entscheidungskriterien formieren Produktpreise, Werbung, Auswahl und Fahrtzeit zum Geschäft. Im Ergebnisteil werden zunächst die geschätzten Parameter für die Zusammenhänge zwischen Nachfrage- und Angebotsvariablen diskutiert. Der verbleibende Teil der Publikation widmet sich der Erklärung von Wettbewerb zwischen Betriebsformaten und innerhalb derselben, sowie Folgerungen aus der Untersuchung für das Management im Lebensmitteleinzelhandel.

RAUH & HESSE (2002) nutzten eine Multiagentensimulation, um die Anordnung von Geschäften in Shopping Centern zu optimieren. Als Basis diente wiederum eine Konsumentenbefragung, die Informationen zur „generellen Affinität unterschiedlicher Kundentypen zu bestimmten Geschäften oder zu Kopplungswahrscheinlichkeiten“ (ebd.: 12) lieferte. Diese werden den Agenten, den simulierten Kunden des Einkaufszentrums, als „Gedächtnis“ mitgegeben und bestimmen deren Handlungen. Zusätzlich nehmen die Agenten aber auch alle von ihrer Position im Einkaufszentrum sichtbaren Geschäfte wahr und haben damit die Möglichkeit, auf deren Anreize reagierend diese spontan zu betreten und dort Käufe zu tätigen. Solche Aktionsausführungen ändern dann den Zustand der Agenten und können ihre weiteren Aktionen beeinflussen. Die eigens dafür entwickelte Software bietet darüber hinaus die Möglichkeit, die Simulationsergebnisse am Bildschirm zu verfolgen. Für die Planung von

Shopping Centern können so die Auswirkungen von Änderungen in der Anordnung der Geschäfte auf die Bewegungen der Konsumenten im Zentrum sehr anschaulich gemacht werden.

Zu den neuesten Arbeiten zählen u.a. die von ARENTZE & TIMMERMANS (2005a). Sie entwerfen ein Multi-Agenten-Modell des Konsumentenverhaltens, das neben strukturellen Parametern der Angebotsseite und der Distanz zum Angebotsort auch Öffnungszeiten als Teil des institutionellen Kontexts der Einkaufsstättenwahl berücksichtigt, und verlangen weiterhin die Integration von Kopplungen des Einkaufens mit anderen Aktivitäten in solche Modelle. ZHANG et al. (2005) machen sich die oben beschriebenen Eigenschaften der Multiagentensysteme in einem Modell zu nutze, das Einkaufsentscheidungen als Kooperation unter den Mitgliedern eines Haushalts auffasst. Selbst wenn nur eine Person den Einkauf tätigt, muss dennoch eine gemeinsame Entscheidung getroffen werden, etwa wenn es um die gemeinsame Nutzung von Ressourcen (z.B. ein Pkw) geht, oder zusätzliche Beschränkungen anderer Haushaltsmitglieder (z.B. Betreuung der Kinder während der Abwesenheit des Partners beim Einkaufen) zu berücksichtigen sind.

### 1.2.3 Weitere Verwendungen

Neben den bisher besprochenen gibt es noch weitere Verwendungen von Multiagentensimulationen für Problemstellungen mit räumlicher Komponente<sup>21</sup>. So beschäftigen sich etwa BATTY & JIANG (2000) mit der Nutzung von MAS zu einer explorativen Form der Routenwahl. In der einfachsten Form besteht der Raum dabei aus einer Fläche mit Hindernissen. Jeder Agent besitzt zu Beginn eine Startposition und eine Laufrichtung und beginnt, sich in diese zu bewegen. Trifft er auf ein Hindernis, ändert er seine Laufrichtung. Wird dem Agenten zusätzlich eine Zielposition mitgegeben, erreicht man, dass der Agent nach Umrundung des Hindernisses wieder darauf zustrebt. In einem Straßennetz sind die Hindernisse (z.B. Häuserblocks) typischerweise flächenmäßig größer als die Freiflächen. Ob die Agenten nun zu ihrem Ziel finden, hängt stark von der lokalen Konfiguration ab, denn sie könnten auf dem Weg in Sackgassen „stecken bleiben“. Die kann nur verhindert werden, indem man die Toleranz gegenüber nicht auf das Ziel gerichteten Laufrichtungen senkt, d.h. dem Agenten erlaubt, sich für eine bestimmte Zeit vom Ziel wegzubewegen (ebd.: 60).

Mit dieser Form der Raumexploration können mit MAS in einem Netzwerk gültige Wege von einer Start- zu einer Zielposition gefunden werden, die aber nicht unbedingt die kürzest möglichen sein müssen, bzw. im Allgemeinen nicht sind. Der klassische Algorithmus zum Finden kürzester Wege von Dijkstra kann jedoch in dichten Graphen<sup>22</sup> einen hohen Aufwand bedeuten, da er von einer gegebenen Startposition die kürzesten Wege zu allen möglichen Zielpositionen berechnet. Wieder bieten MAS hier eine Lösung an, besonders wenn zu Beginn die Längen der Kanten im Graphen (noch) nicht bekannt sind. Dazu werden vom Startknoten aus auf jede inzidente Kante ein Agent geschickt, der zum nächsten Knoten wandert und dabei die zurückgelegte Distanz speichert. Erreicht ein Agent einen Knoten,

---

<sup>21</sup> Diese Bezeichnung wird bewusst gewählt, um keine scharfe Trennlinie zwischen ‚geographischen‘ und ‚nicht-geographischen‘ Anwendungen von MAS ziehen zu müssen. Der Übergang zwischen räumlichen und aräumlichen Modellen sind fließend, und dort sind auch solche zu finden, die sich nicht mit klassisch-geographischen Themen wie Städten, Verkehr, Landnutzung oder menschlichen Interaktionen beschäftigen.

<sup>22</sup> Graphen werden als dicht bezeichnet, wenn sie eine hohe Interkonnektivität besitzen, die Zahl der Kanten also wesentlich größer als die Zahl der Knoten ist.

und ist er der erste dort, so hat er den kürzesten Weg zu diesem Knoten gefunden. Erreichen zwei Agenten einen Knoten gleichzeitig, gilt dasselbe für denjenigen Agenten mit der niedrigeren bisher zurückgelegten Distanz. Der Algorithmus startet nun erneut unter Fortlassung der bereits durchlaufenen Kanten.

Eine ähnliche Aufgabe, jedoch von erweiterter Größenordnung, ist die Simulation von Fußgängerpfaden und –strömen in Straßennetzwerken oder Gebäuden. Ein Beispiel hierfür stammt ebenfalls von BATTY (2003b: 21-25). Er simuliert mit einem Multiagentenansatz die Bewegungen von Besuchern in der Tate Gallery in London mit dem Ziel der Vorhersage der Frequentierung einzelner Ausstellungsräume (ebd.: 24). Die Entstehung von Trampelpfaden ist ein ähnliches Anwendungsgebiet, mit dem Unterschied, dass die Umgebung sich durch die Bewegung der Agenten verändert, und die Agenten bei ihrer Routenwahl die vorherigen Entscheidungen anderer Agenten einbeziehen.

Dass in der Geographie angewandte Agentensimulationen nicht immer etwas mit Menschen und deren Handlungen zu tun haben müssen, zeigt der Beitrag von GALANDA & WEIBEL (2003). Sie verwenden den Ansatz zur vollautomatischen Generalisierung von Polygonmosaiken in thematischen Karten. Dazu werden verschiedene Agentenklassen angelegt, die entweder einzelne Polygone, Gruppen von Polygonen, die gemeinsame räumliche oder semantische Eigenschaften besitzen, oder räumliche Partitionen repräsentieren. Anschließend werden „Generalisierungsbedingungen“ formuliert, die für das Auffinden und Lösen von Generalisierungskonflikten sowie für die Bestimmung der Qualität einer Generalisierungslösung benötigt werden. Diese Qualität wird in Bezug auf vorher festgelegte Maße (z.B.: Kein Polygon darf kleiner als 4 mm<sup>2</sup> sein) gemessen. Aus dem Erfüllungsgrad dieser Bedingungen wird eine „Zufriedenheit“ eines Kartenobjekts mit seiner Generalisierung abgeleitet. Ist diese zu niedrig, wenden die Agenten ebenfalls vorher definierte Strategien („Pläne“) an, um diesem Ziel näher zu kommen, etwa in dem sie sich mit anderen Polygonen mit vergleichbaren räumlichen (in Bezug auf die Topologie) und semantischen Merkmalen vereinigen. Während des gesamten Generalisierungsprozesses wird die Konsistenz der geometrischen, topologischen und semantischen Information des bearbeiteten Kartenausschnitts überwacht und gewährleistet.

### 1.3 Gliederung der Arbeit

Nach diesem einführenden Kapitel wird zunächst der theoretische Bezugsrahmen der Arbeit abzustecken sein (Kapitel 2), bevor noch einmal genauer aus eher technischer Perspektive auf Simulationen in den Sozialwissenschaften eingegangen wird (Kapitel 3). Der empirische Teil beginnt mit der Vorstellung des Untersuchungsgebiets und der Datenbeschreibung (Kapitel 4) und wird mit der Darstellung des Modellentwurfs für die konkrete Fragestellung fortgeführt (Kapitel 5). Dem besonderen Teilziel des Forschungsprojekts, Modellentwürfe und Simulationen auf verschiedenen Aggregatsebenen miteinander zu vergleichen, wird ein eigenes Kapitel 6 gewidmet sein. Kapitel 7 schildert einige weitere Experimente mit dem Simulationsmodell, die teilweise in dem Projekt assoziierten Abschlussarbeiten durchgeführt wurden. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf offene Forschungsfragen und einigen Vorschlägen für zukünftige Entwicklungen im Kapitel 8.