

# **Mikroskopische Simulation von Flächennutzung, Verkehr und Umwelt**

Michael WEGENER, Carsten SCHÜRMAN, Klaus SPIEKERMANN,  
Institut für Raumplanung,  
Universität Dortmund

## **ZUSAMMENFASSUNG**

In dem Beitrag wird über laufende und geplante Forschungsprojekte zur Entwicklung und Erprobung eines mikroskopischen Simulationsmodells der Wechselwirkungen zwischen Flächennutzung, Verkehr und Umwelt in Stadtregionen berichtet. Das Modell simuliert räumliche Entscheidungen von Individuen, Haushalten und Betrieben unter dem Einfluß technischer, sozialer, ökonomischer und informationeller Restriktionen nach dem Prinzip der Mikrosimulation. Aus Gründen der praktischen Anwendbarkeit soll es keine hohen Ansprüche in Bezug auf Daten- und Rechenzeitbedarf stellen und insbesondere keine aufwendigen örtlichen Haushaltsbefragungen erfordern. Diese Beschränkung erfordert innovative Methoden zur Gewinnung synthetischer Mikrodaten aus allgemein verfügbaren statistischen Daten und eine sorgfältige Abwägung des bei der Modellierung der täglichen Mobilität erforderlichen Detaillierungsgrads.

## **1. RÄUMLICHE SIMULATIONSMODELLE**

Die Diskussion über umweltverträgliche räumliche Stadtentwicklung leidet unter dem Mangel an konkreten und vergleichbaren Informationen über die Vor- und Nachteile möglicher siedlungsstruktureller Leitbilder. Zwar besteht Einigkeit darüber, daß die gegenwärtige Tendenz zu immer disperse- ren Siedlungsformen mit ihrem großen Flächenverbrauch und hohem Ver- kehrsaufkommen nicht nachhaltig ist. Aber die Frage, ob es statt dessen richtiger ist, eine Rückkehr zu kompakten städtischen Siedlungsformen ('Innenverdichtung') anzustreben oder bestehende Siedlungskerne im Um- land zu stärken ('dezentrale Konzentration'), ist umstritten (Fürst u.a., 1999; Spiekermann, 1999). Die vorhandenen empirischen Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen Siedlungsstruktur und Verkehrsaufkommen konnten nur einen geringen Einfluß der Siedlungsform auf das Verkehrs- aufkommen nachweisen. Dies könnte sich unter anderen Rahmenbedingun- gen, etwa bei höheren Energiepreisen, ändern; in welchem Umfang, kann nur mit Modellrechnungen herausgefunden werden.

Modelle der städtischen Flächennutzung gibt es seit den sechziger Jahren. Ihr Einsatz in der Planungspraxis und ihr Einfluß auf Planungsentscheidungen sind jedoch aufgrund des Wandels der Auffassung von Stellenwert und Aufgabe der Raumplanung - von umfassender, langfristiger Stadtentwicklungsplanung zu kurzfristiger, projektbezogener Aushandlungsplanung - gering geblieben. Heute jedoch, ausgelöst durch die Umweltdebatte, finden integrierte, langfristige Planungsansätze neues Interesse. In der Öffentlichkeit wächst das Bewußtsein dafür, daß die vorherrschenden Marktkräfte mit großer Wahrscheinlichkeit zu noch disperseren, flächen- und energieverschwendenden Siedlungsformen führen werden, und daß nur durch eine Kombination von höher verdichteten und durchmischten Flächennutzungsstrukturen und von Maßnahmen zur Förderung des öffentlichen Nahverkehrs und zur Eindämmung des Autoverkehrs die langfristig erforderlichen Reduktionsziele in den Bereichen Energieverbrauch und Treibhausgasausstoß erreicht werden können.

Allerdings stellen sich den Modellen heute neue Herausforderungen. Neue Verkehrsalternativen wie "Park-and-Ride" und "Kiss-and-Ride", Car-Sharing, Fahrgemeinschaften, Gemeinschaftstaxis oder Rufbusse, neue Lebensstile und Arbeitsformen wie Teilzeit, Gleitzeit, Telearbeit und Teleshopping können mit den traditionellen hochaggregierten Verkehrsmodellen nicht abgebildet werden. Die neuen aktivitätsorientierten Verkehrsnachfragemodelle benötigen detaillierte Informationen über Haushalte und Arbeitsplätze. Neue städtebauliche Maßnahmen zur Förderung des öffentlichen Nahverkehrs und des Fuß- und Fahrradverkehrs erfordern Informationen über die kleinräumige Anordnung der Orte, an denen Aktivitäten ausgeübt werden. Neue Konzepte des umweltverträglichen Güterverkehrs in Städten ('City-Logistik') benötigen Kenntnisse über die kleinräumigen Standorte von Versendern und Empfängern. Darüber hinaus müssen die Modelle heute nicht nur sozioökonomische und verkehrliche, sondern auch ökologische Auswirkungen von Flächennutzungs- und Verkehrsplanungen vorhersagen, und dies erfordert kleinräumige Prognosen der Emissionen stationärer und mobiler Quellen und der aus ihnen resultierenden Immissionen an den Wohnstandorten der betroffenen Einwohner.

Die gegenwärtig existierenden Modelle sind zu aggregiert, um diese Aussagen machen zu können:

- Typische Flächennutzungsmodelle berücksichtigen zu wenige Wirtschaftssektoren, sozioökonomische Gruppen und Wohnungstypen, um neue Produktions- und Distributionstechniken und sich herausbildende Lebensstile und Arbeitsformen abbilden zu können.
- Die vorhandenen Modelle arbeiten durchweg mit relativ großen Teilgebieten ('Zonen'), wobei angenommen wird, daß alle Wohnstandorte, Ar-

beitsplätze usw. homogen über die gesamte Fläche der Zone verteilt sind. Räumliche Interaktionen zwischen den Zonen erfolgen über Netze, an die die Zonen lediglich über ihre Mittel- oder Schwerpunkte angebunden sind. Die Modelle berücksichtigen keine topologischen Beziehungen und ignorieren, daß sozio-ökonomische und ökologische Auswirkungen räumlich kontinuierlich sind. Somit fehlt ihnen die räumliche Auflösung, andere Umweltauswirkungen als Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen vorzuschätzen. Algorithmen zur Berechnung von Immission aus Emissionen wie Luftschadstoff- und Lärmausbreitungsmodelle sowie Modelle zur Berechnung von Oberflächen- und Grundwasserströmen erfordern eine höhere räumliche Auflösung.

- Die vorhandenen Modelle sind zeitlich zu wenig differenziert. Ihre zeitlich-rekursive Struktur mit nur wenigen Simulationsperioden von zumeist mehreren Jahren Länge berücksichtigt nicht die Wechselwirkungen zwischen langsamen und dauerhaften Veränderungen der physischen Struktur der Stadt, schnelleren und häufig revidierten Änderungen der genutzten Aktivitätsstandorte und der fast verzögerungsfrei ablaufenden Anpassung der Aktivitäten und Bewegungen im Lauf eines Tages.

Diese Herausforderungen verlangen eine grundlegend andere, mikroskopische Organisation von Flächennutzungs- und Verkehrsmodellen. Die sich hierfür anbietende Methode ist die Mikrosimulation nach dem Monte-Carlo-Prinzip.

Mikrosimulation wurde in den Sozialwissenschaften zuerst von Orcutt u.a. (1961) zur Simulation von Sozialversicherungssystemen angewandt. Erste räumliche Anwendungen befaßten sich mit räumlicher Diffusion (Hägerstrand, 1968), städtischer Flächennutzungsentwicklung (Chapin und Weiss, 1968), Verkehrsverhalten (Kreibich, 1979), Bevölkerungs- und Haushaltsentwicklung (Clarke u.a., 1980; Clarke 1981; Clarke und Holm 1987) und Wohnstandortwahl (Kain und Apgar, 1985; Wegener, 1985). Diese Anwendungen blieben jedoch Experimente ohne tiefere Wirkung. Erst in jüngerer Zeit hat die Mikrosimulation zunehmendes Interesse gefunden, weil mit ihr auch Phänomene modelliert werden können, die sich mit aggregierten Modellen nicht abbilden lassen, (Clarke, 1996). Heute sind mehrere mikroanalytische städtische Flächennutzungs- und Verkehrsmodelle in der Entwicklung. (Hayashi und Tomita 1989; Mackett 1990a; 1990b; Landis, 1994; Landis und Zhang, 1998a; 1998b; Waddell, 1998; 1999; Wegener und Spiekermann, 1996; Spiekermann und Wegener, 2000).

Ein unterschiedlicher Ansatz entstand aus der Theorie der zellulären Automaten. Zelluläre Automaten sind mit räumlichen Einheiten oder 'Zellen' verbundene Objekte. Zelluläre Automaten folgen einfachen Reiz-Reaktions-Regeln, nach denen sie ihren Zustand in Abhängigkeit vom Zu-

stand benachbarter oder nahegelegener Zellen verändern oder nicht. Durch Hinzufügung von Zufallsstörungen werden komplexe Muster erzeugt, die realen Städten sehr ähnlich sehen (White und Engelen, 1993; Batty und Xie, 1994; Batty, 1997). Zelluläre Automaten mit komplexerem Verhaltensrepertoire werden multi-reaktive Agenten genannt. Multi-reaktive Agenten sind komplexe Automaten mit der Fähigkeit, ihre Interaktionen zu steuern; sie können ihre Umwelt verändern, aber auch ihr eigenes Verhalten, das heißt, sie können lernen (Ferrand, 2000). Der Unterschied zwischen dem Verhalten multi-reaktiver Agenten und dem in Mikrosimulationsmodellen generierten Entscheidungsverhalten ist gering.

Die am weitesten fortgeschrittene Anwendung der Mikrosimulation in räumlichen Modellen ist die Verkehrssimulation. Disaggregierte Verkehrsmodelle modellieren die zur Ausübung von Aktivitäten im Tagesablauf getroffenen Mobilitätsentscheidungen für jedes Individuum oder eine Stichprobe von Individuen (Axhausen und Gärling, 1992; Ben Akiva u.a., 1996). Aktivitätsorientierte Verkehrsmodelle übersetzen Aktivitätsprogramme der Mitglieder eines Haushalts in von der Wohnung ausgehende Wegeketten, die aus einem oder mehreren Wegen bestehen. So können Abhängigkeiten zwischen der Mobilität der Haushaltsmitglieder und zwischen den Wegen einer Wegekette sowie Wege, auf denen mehr als ein Verkehrsmittel benutzt wird, modelliert werden. Aktivitätsorientierte Verkehrsmodelle modellieren nicht nur den Verkehr in einer Spitzenstunde oder am ganzen Tag, sondern über alle 24 Stunden des Tages, so daß auch die Wahl der Abfahrtszeit modelliert werden kann. Disaggregierte Verkehrsumlegungsmodelle bilden die Bewegungen von Fahrzeugen im Straßennetz mit bisher nicht gekanntem Detail mit Hilfe von Warteschlangen- oder Zelluläre-Automaten-Modellen ab. Beispiele hierfür sind das Modell des Forschungsverbands Verkehrssimulation und Umweltwirkungen (Brilon u.a., 1998) und das US-amerikanische TRANSIMS-Modell (Nagel u.a., 1999; Barrett u.a., 1999).

## **2. RÄUMLICHE MIKRODATEN**

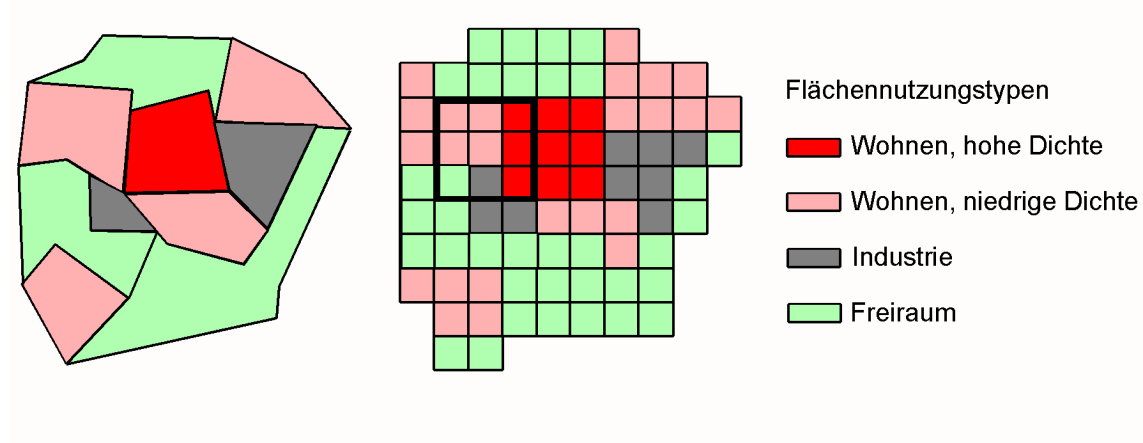
Räumliche Mikrosimulationsmodelle erfordern die genaue Verortung der im Modell abgebildeten Aktivitäten, das heißt Punktkoordinaten als Eingabe. Die allermeisten für die Stadtplanung verfügbaren Daten sind jedoch räumlich aggregiert, das heißt liegen für Gebietsflächen unterschiedlicher Größe wie Gemeinden, Stadtbezirke, statistische Bezirke und -unterbezirke vor. Die Gewinnung echter Mikrodaten, etwa durch Haushalts- oder Betriebsbefragungen, ist aus Kosten- und Datenschutzgründen nur in den wenigsten Fällen möglich. Deshalb müssen in der Regel synthetische Mikrodaten aus räumlich aggregierten Daten gewonnen werden.

Im folgenden wird eine Methode beschrieben, mit der aus für flächenhafte räumliche Bezugseinheiten vorliegenden sozioökonomischen Daten wie Haushalte, Arbeitsplätze oder Wohnungen mit Hilfe eines Geoinformationssystems (GIS) synthetische Mikrodaten erzeugt werden können (Wegener und Spiekermann, 1996; Spiekermann und Wegener, 2000). Die Methode besteht in der Zuordnung einzelner Datenelemente wie Haushalte, Arbeitsplätze oder Wohnungen zu Rasterzellen unter Berücksichtigung der im GIS gespeicherten Flächennutzungskartierung. Hierzu sind zwei Schritte erforderlich (siehe Abbildung 1):

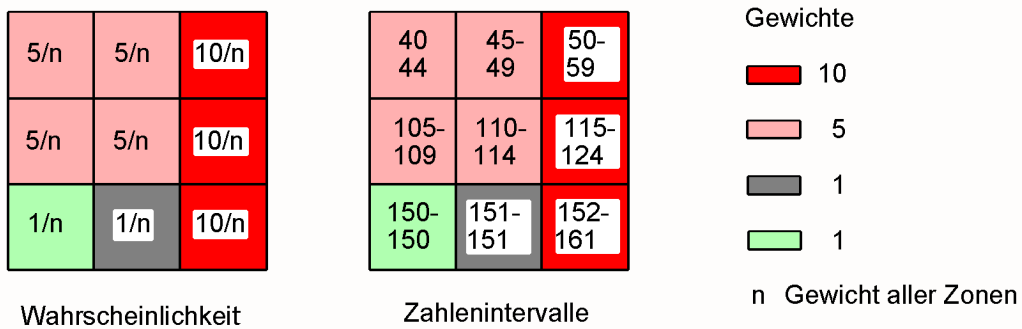
- *Erzeugung einer Rasterdarstellung der Flächennutzung.* Vektororientierte GIS bilden Flächennutzungsinformationen als Polygone mit unterschiedlichen Flächennutzungskategorien ab. Zur Umwandlung der Polygone in Rasterzellen wird ein quadratisches Gitter über das Untersuchungsgebiet gelegt. Jede Rasterzelle des Gitters wird mit Hilfe eines Point-in-Polygon-Algorithmus dem Polygon zugeordnet, in das ihr Mittelpunkt fällt. Diese Operationen sind heute in vielen GIS standardmäßig verfügbar. Als Ergebnis hat jede Rasterzelle zwei Merkmale: die Flächennutzungskategorie und die Zonennummer des Polygons, dem sie zugeordnet ist. Die Rasterzellen bilden die Adressen für die Disaggregation der Zonendaten und die nachfolgende Mikrosimulation. Die Rasterweite hängt von der gewünschten räumlichen Auflösung der Mikrosimulation ab und ist lediglich durch die Speichergröße und Rechengeschwindigkeit des verwendeten Computer begrenzt.
- *Zuordnung der sozioökonomischen Daten zu Rasterzellen.* Als erstes wird jeder Flächennutzungskategorie ein für die zu verteilende Datengruppe spezifisches Gewicht zugewiesen, Mit diesem werden alle Rasterzellen dieser Flächennutzungskategorie gewichtet. Geteilt durch die Summe aller Gewichte der Zone ergibt das die Wahrscheinlichkeit, mit der die Rasterzelle der Standort eines Datenelements ist. Durch Kumulierung der Wahrscheinlichkeiten erhält man für jede Rasterzelle einen Zahlenbereich. Mittels eine Zufallszahlengenerators wird für jedes zu verteilende Datenelement eine Zufallszahl gezogen, und das Datenelement wird der Rasterzelle zugewiesen, in deren Zahlenbereich diese fällt. Das Ergebnis ist eine Rasterdarstellung der Verteilung der Datenelemente, in der jedes Datenelement einen 'Mikrostandort', das heißt eine X- und eine Y-Koordinate in Rastereinheiten, hat.

Mikrosimulation wird auch verwendet, um synthetische mehrdimensionale Verteilungen nichträumlicher sozioökonomischer Merkmale von Haushalten, Arbeitsplätzen und Wohnungen aus Daten zu erzeugen, für die nur eindimensionale Randverteilungen vorliegen. Das Ergebnis ist eine sachlich und räumlich disaggregierte synthetische Mikrodatenbasis (siehe Abschnitt 3.1).

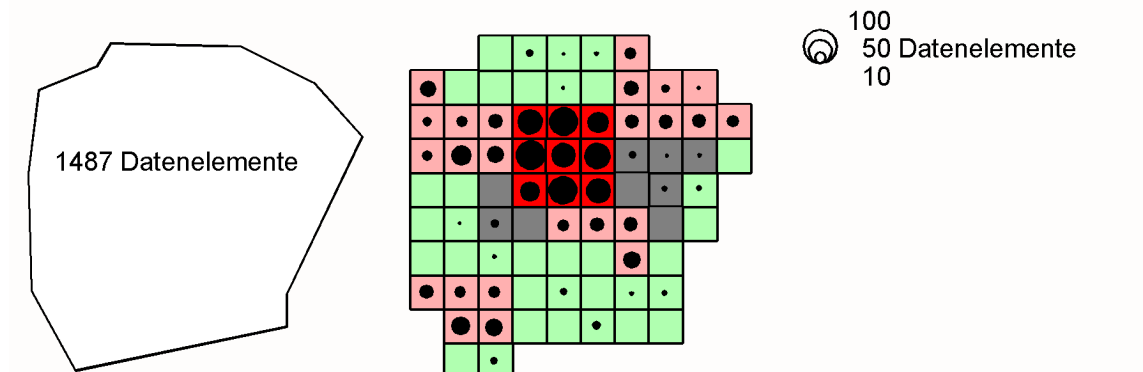
Umwandlung von Flächendaten in Rasterdaten



Wahrscheinlichkeiten der Rasterzellen



Umwandlung von Zonendaten in Mikrodaten



**Abb. 1:** Räumliche Disaggregation räumlich aggregierter Daten

### 3. MIKROSIMULATIONSBAUSTEINE

In diesem Abschnitt werden beispielhaft drei grundlegende Bausteine eines mikroskopischen Modells von Flächennutzung, Verkehr und Umwelt in Stadtregionen beschrieben: die Mikrosimulation von Haushaltsentwicklung, Wohnungsmarkt und Mobilität.

#### 3.1 Haushaltsentwicklung

Das Mikrosimulationsmodell der Haushaltsentwicklung bildet die Veränderungen von Haushaltsmerkmalen ab, die den Lebensstil eines Haushalts ausmachen.

*Lebensstil* ist hier ein empirisches Konzept zur Charakterisierung des raumzeitlichen Verhaltens von Individuen. Der Lebensstil einer Person ist der räumliche Ausdruck ihrer Aktivitäten in Raum und Zeit im Rahmen der durch sie selbst und durch andere gesetzten Restriktionen (Salomon, 1983; 1997). Das Lebensstilkonzept ist geeigneter zur Vorhersage von Verhalten als die herkömmliche Klassifikation von Marktsegmenten nach sozio-demographischen und ökonomischen Variablen. Da ein gewählter Lebensstil Wunschvorstellungen in Bezug auf die Art zu leben (nämlich Aktivitäten in Raum und Zeit auszuüben) ausdrückt, steht das von den Menschen tatsächlich an den Tag gelegte Verhalten im Einklang mit diesen Wunschvorstellungen oder weicht auf Grund von Restriktionen von ihnen ab. Um die Reaktion einer Person auf neue Situation vorhersagen zu können, ist es gut, ihren Lebensstil zu kennen.

In den Sozialwissenschaften werden Lebensstile gewöhnlich in der Form freiformatiger 'Erzählungen' dargestellt. Diese Darstellungsform ist offen und potentiell inhaltsreich, aber wenig geeignet für eine mathematische Modellierung. Deshalb müssen Lebensstile in eine quantitative Darstellung übersetzt werden, die soviel wie möglich von der Vielfalt der in der Realität existierenden Lebensstile bewahrt. Eine solche Darstellung ist die Darstellung als 'unscharfe Objekte' (fuzzy objects). In dem Modell ist ein Lebensstil daher ein *fuzzy object*, das durch probabilistische Mitgliedsfunktionen definiert wird. Eine Mitgliedsfunktion ist ein Vektor von Wahrscheinlichkeiten, die angeben, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Individuum mit einem spezifischen Lebensstil einer Kategorie eines klassifizierten Merkmals angehört.

Die Wahrscheinlichkeiten der Mitgliedsfunktionen könnten in Haushaltsbefragungen ermittelt werden. Wenn solche Befragungen nicht möglich sind, werden sie durch Expertenschätzungen festgelegt und durch Abgleich mit aus der amtlichen Statistik gewonnen Randverteilungen sozio-demographischer und ökonomischer Merkmale geeicht. Der Abgleich erfolgt eben-

falls durch Mikrosimulation, indem eine synthetische Bevölkerung von Individuen und Haushalten erzeugt wird, die soweit wie möglich mit den Mitgliedsfunktionen der Lebensstile sowie mit den aus der Statistik gewonnenen Randverteilungen und der räumlichen Verteilung der Flächennutzungen in jeder Zone der Stadtregion übereinstimmt (Moeckel und Wegener, 2000).

Haushalte werden im Modell in Listenform abgespeichert. Eine Liste ist eine Abfolge von Datensätzen mit Informationen über je einen Haushalt. Haushalte können in beliebiger Reihenfolge in der Liste angeordnet sein, da durch Zeiger effizientes Suchen in der Liste ermöglicht wird. Datensätze enthalten Haushaltsmerkmale und Zeiger auf andere Datensätze in einer mit der Haushaltsliste verketteten weiteren Liste mit Merkmalen der den Haushalten angehörenden Personen.

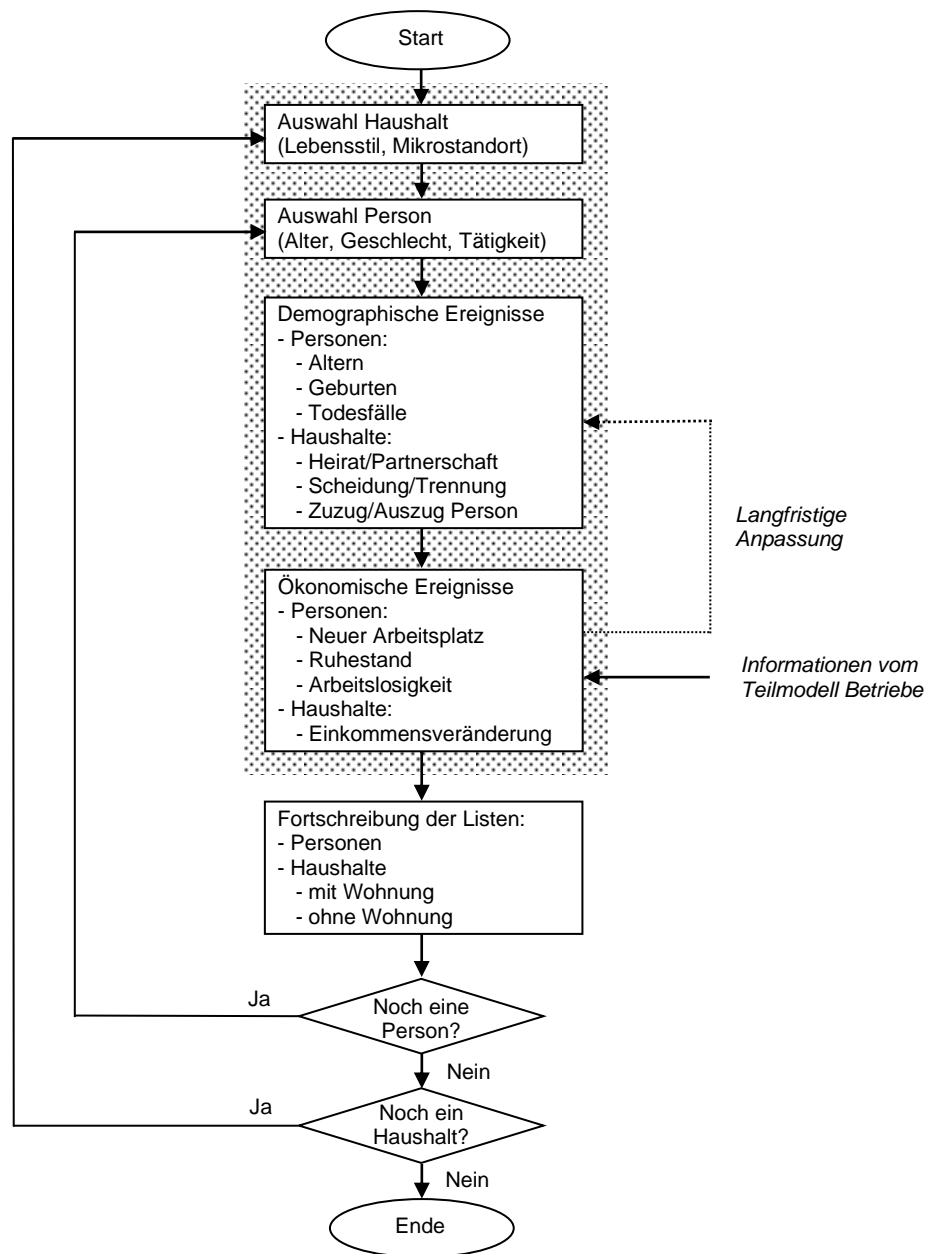
Im Haushaltsentwicklungsmodell werden simultan für Haushalte und Personen folgende Haushaltseignisse simuliert (siehe Abbildung 2):

- Geburt, Altern, Tod
- Haushaltsgründung, Haushaltsauflösung
- Heirat/Partnerschaft, Scheidung/Trennung, Auszug/Zuzug eines Kindes/Angehörigen
- Neuer Job, Ruhestand, Arbeitslosigkeit
- Einkommensveränderung

Obwohl Haushaltseignisse in der Realität das Ergebnis von mehr oder weniger rationalen Entscheidungen sind, werden sie nicht als solche modelliert, sondern als *Übergänge*, das heißt als Folge allein des Zeitablaufs (vgl. Wegener, 1985). Ein Übergang ist ein Wechsel von einem Zustand in einen anderen. Typische Übergänge sind zum Beispiel Veränderungen des Haushaltsstatus in Bezug auf Alter oder Größe als Funktion der Wahrscheinlichkeit von Ereignissen wie Altern/Tod, Geburt eines Kindes, Auszug oder Zuzug eines Angehörigen. Selbst Ereignisse, die offensichtlich das Ergebnis bewußter Entscheidungen sind wie Heirat oder Scheidung, werden als Übergänge modelliert, da die Gründe, die zu ihnen geführt haben, im Modell nicht abgebildet sind.

Einige Ereignisse resultieren in der Auflösung eines Haushalts oder in der Gründung eines neuen Haushalts. Andere Ereignisse wie zum Beispiel der Antritt einer neuen Beschäftigung oder der Verlust des Arbeitsplatzes werden durch Ereignisse wie Neueinstellungen oder Entlassungen im hier nicht dargestellten Teilmodell Betriebe ausgelöst. Veränderungen des Einkommens sind die Folge derartiger arbeitsplatzbezogener Ereignisse.





**Abb. 2:** Mikrosimulation der Haushaltsentwicklung: ein Jahr

Neben diesen direkten Abhängigkeiten könnten auch komplexere Zusammenhänge zwischen Haushaltseignissen und ökonomischen Entwicklungen im Modell abgebildet werden. So könnte das vermehrte Auftreten von Haushalten mit zwei Erwerbstätigen zum Teil auf Lebensstilentscheidungen beruhen, zum Teil aber auch die Folge steigender Wohnkosten und stagnierender Realeinkommen sein. Aus ähnlichen Gründen könnten junge Erwachsene ihren Auszug aus dem Elternhaus hinausschieben und später heiraten und Kinder bekommen. Die Chancen auf dem Arbeitsmarkt spielen für derartige Haushaltsentscheidungen eine erhebliche Rolle.

### 3.2 Wohnungsmarkt

Das Modell des Wohnungsmarkts bildet das Suchverhalten und die Wahlentscheidungen von Haushalten auf dem regionalen Wohnungsmarkt ab: von Haushalten, die aus der Region wegziehen (Fortzug), in die Region zuziehen (Zuzug), zum ersten Mal in eine Wohnung einziehen (Einzug) oder von einer Wohnung in eine andere umziehen (Umzug).

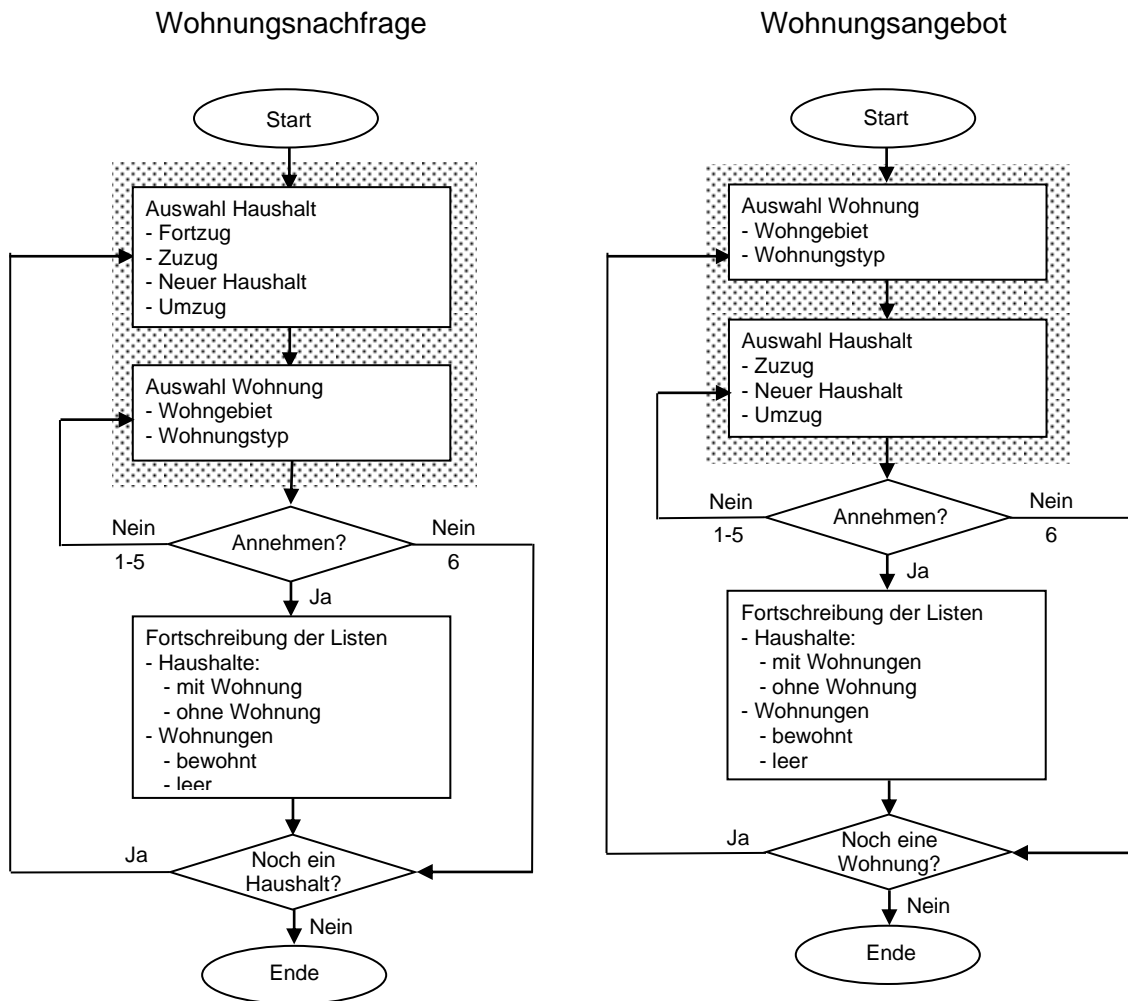
Haushalte und Wohnungen sind für die Mikrosimulation in vier miteinander verknüpften Listen organisiert:

- Die erste Liste ist die Liste der Haushalte mit der mit ihr verketteten Liste der Haushaltsangehörigen aus dem Modell der Haushaltsentwicklung (siehe Abschnitt 3.1).
- Die zweite Liste enthält Haushalte ohne Wohnung - am Ende einer Simulationsperiode sind Haushalte in dieser Liste obdachlos.
- Die dritte Liste enthält Wohnungen mit ihren Merkmalen (Gebäudeart, Größe, Eigentumsform, Qualität) und ihrem Mikrostandort.
- Die vierte Liste enthält leere Wohnungen.

Wohnungen altern und verfallen und sind von Investorenentscheidungen über Neubau, Modernisierung und Abriss betroffen, die in anderen hier nicht beschriebenen Modellteilen simuliert werden.

Das Modell des Wohnungsmarkts ist eine Monte-Carlo-Simulation der Transaktionen auf dem Wohnungsmarkt. Eine Markttransaktion ist jede erfolgreich abgeschlossene Operation, infolge derer ein Haushalt in eine Wohnung einzieht, aus einer Wohnung auszieht oder von einer Wohnung in eine andere umzieht. Es gibt zwei Typen von Akteuren auf dem Wohnungsmarkt: Haushalte auf der Suche nach einer Wohnung (Wohnungsnachfrage) und Hausbesitzer auf der Suche nach Wohnungsmietern oder Wohnungskäufern (Wohnungsangebot). Eine Wohnungsmarkttransaktion hat vier Phasen (siehe Abbildung 3):

- In der *Auswahlphase* wird ein wohnungssuchender Haushalt oder ein wohnungsanbietender Hausbesitzer für die Simulation ausgewählt. Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Haushalt ausgewählt wird, ist eine Funktion seiner Zufriedenheit mit seiner gegenwärtigen Wohnung.
- In der *Suchphase* sucht der Haushalt eine Wohnung oder der Hausbesitzer einen Käufer oder Mieter. Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Haushalt in einem bestimmten Wohngebiet sucht, ist eine Funktion der Attraktivität dieser Gegend aus der Sicht des Haushalts. Die Wahrscheinlichkeit, daß der Haushalt eine bestimmte Wohnung in Betracht zieht, ist eine Funktion ihrer Attraktivität aus der Sicht des Haushalts.



**Abb. 3:** Mikrosimulation des Wohnungsmarkts: ein Jahr

- In der *Entscheidungsphase* entscheidet der Haushalt ob er die angebotene Wohnung akzeptiert oder nicht. Er akzeptiert sie, wenn sich hierdurch seine Wohnzufriedenheit wesentlich verbessert. Andernfalls tritt er in eine neue Suchphase ein. Nach mehreren erfolglosen Versuchen gibt er die Suche auf und bleibt in seiner alten Wohnung. Die erforderliche Verbesserung der Wohnzufriedenheit nimmt mit jedem erfolgreichen Versuch zu und mit jedem erfolglosen Versuch ab, das heißt, der Haushalt paßt seine Ansprüche den Verhältnissen auf dem Wohnungsmarkt an.
- In der *Ausführungsphase* werden alle aus der Transaktion resultierenden Änderungen der Zuordnung von Haushalten und Wohnungen ausgeführt. Bezogene Wohnungen werden aus der Liste der leeren Wohnungen entfernt, frei gewordene Wohnungen in ihr eingetragen. Neu einziehende Haushalte werden aus der Liste der Haushalte ohne Wohnung gestrichen und mit einer Wohnung verknüpft, umziehende Haushalte von ihrer alten Wohnung getrennt und mit ihrer neuen Wohnung verknüpft.

Die Attraktivität einer Wohnung für einen Haushalt ist eine gewichtete mehrdimensionale Funktion der Attraktivität ihrer Lage, ihrer Qualität und ihres Kaufpreises bzw. ihrer Miete in Relation zum Haushaltseinkommen. Die Attraktivitäten der Lage und Qualität einer Wohnung sind mehrdimensionale Funktionen der Merkmale des Wohngebiets und der Wohnung.

### 3.3 Verkehr

Die Mikrosimulation des Verkehrsverhaltens simuliert für jedes Mitglied jeden Haushalts die Auswahl eines Aktivitätsprogramms und für jeden Weg des Aktivitätsprogramms eine Startzeit, ein Ziel, das benutzte Verkehrsmittel und die benutzte Route (siehe Abbildung 4):

- *Auswahl Haushalt.* Als erstes wird räumlich zufällig ein Haushalt aus der Haushaltsliste (siehe Abschnitt 3.1) zur Bearbeitung ausgewählt. Jeder ausgewählte Haushalt ist definiert durch seine Haushaltsmerkmale und seinen Lebensstil und durch die persönlichen Merkmale seiner Mitglieder. Die Haushaltsmerkmale schließen seinen Wohnstandort ein. Alle Standorte im Modell sind Mikrostandorte (siehe Abschnitt 2).
- *Auswahl Person.* Als nächstes wird das erste Haushaltsmitglied zur Bearbeitung ausgewählt. Für jede erwerbstätige Person des Haushalts ist der Mikrostandort des Arbeitsplatzes bekannt. Für Schüler und Studierende ist der Standort der Schule bzw. der Universität bekannt.
- *Auswahl Aktivitätsprogramm.* Je nach Alter, Geschlecht, Tätigkeit und Arbeits- bzw. Ausbildungsplatz des Haushaltsmitglieds wird aus einem Katalog von Aktivitätsprogrammen eines ausgewählt. Ein Aktivitätsprogramm ist eine zeitliche Abfolge von Wegekettens im Lauf eines Tages.
- *Bestimmung von Pkw-Besitz und -verfügbarkeit.* Je nach den Merkmalen des Haushalts und des Haushaltsmitglieds wird festgelegt, ob es über einen Pkw verfügt oder nicht.
- *Bestimmung der Startzeit.* Der erste Weg der ersten Wegekette wird ausgewählt. Die Startzeit ist eine stochastische Variation der ursprünglich angestrebten Startzeit.
- *Zielwahl.* Das Ziel des Weges wird mit Hilfe eines Logit-Modells ausgewählt. Die möglichen Ziele sind ebenfalls Mikrostandorte. Generalisierte Reisekosten zu den möglichen Zielen werden als logistische Summe der stochastischen Minimalrouten (siehe unten) der in Frage kommenden Verkehrsarten berechnet. Die berücksichtigten Verkehrsarten sind Fuß, Fahrrad, öffentlicher Nahverkehr und Auto (sofern vorhanden, siehe oben). Für Berufs- und Ausbildungswege sind die Ziele bekannt.

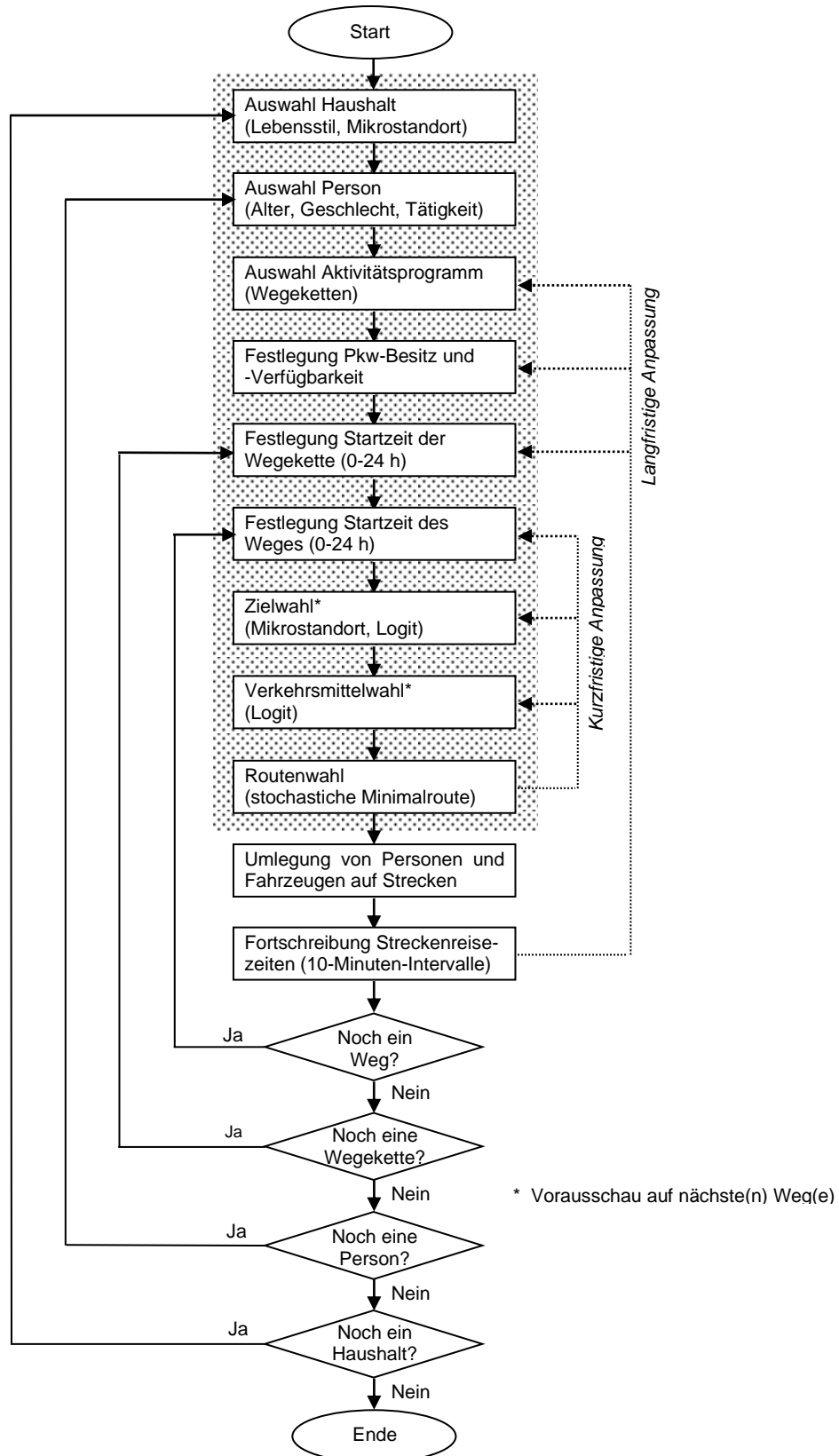


Abb. 4: Mikrosimulation des Verkehrs: ein Tag

- *Verkehrsmittelwahl*. Das benutzte Verkehrsmittel wird mit Hilfe eines Logitmodells aufgrund der generalisierten Kosten der stochastischen Minimalrouten (siehe unten) der verfügbaren Verkehrsarten zum gewählten Ziel ausgewählt.
- *Routenwahl*. Die benutzte Route ist die stochastische Minimalroute der gewählten Verkehrsart. Die stochastische Minimalroute ist die Minimalroute, bei deren Ermittlung zu jedem Streckenwiderstand und jeder Warte- und Umsteigezeit im öffentlichen Nahverkehr eine stochastische Störgröße addiert wird.
- *Umlegung*. Für jede Strecke des Verkehrsnetzes wird die Zahl der auf ihr im Lauf eines Tages verkehrenden Personen und Fahrzeuge in Zehnminutenintervallen festgehalten.
- *Fortschreibung der Streckenreisezeiten*. Nach jedem Weg werden die Reisezeiten aller benutzten Strecken als Funktion ihrer Fahrzeugbelastung neu berechnet.

Falls auf einem Weg erhebliche Stauzeiten auftreten, kann Anpassungsverhalten wie zeitliche Verschiebung des Weges oder Änderung von Verkehrsart oder Route simuliert werden. Nach jedem Weg wird der nächste Weg der Wegekette ausgeführt. Nach jeder Wegekette wird die nächste Wegekette der Person ausgeführt. Nach jeder Person wird die nächste Person des Haushalts bearbeitet. Nach jedem Haushalt wird der nächste Haushalt ausgewählt. Um langfristiges Lernen zu berücksichtigen, werden Informationen über die mittleren Streckenreisezeiten jedes Tageszeitintervalls der laufenden Simulationsperiode in der nachfolgenden Simulationsperiode verwendet.

Ein Ziel des beschriebenen Ansatzes der Mikrosimulation des Verkehrs ist eine realistische Umlegung von Wegen auf Verkehrsarten und Routen ohne aufwendige Iterationen, da sich im TRANSIMS-Projekt (Nagel et al., 1999) gezeigt hat, daß die Rechenzeitanforderungen iterativer Umlegungsverfahren in großen Verkehrsnetzen ein erhebliches Problem darstellen.

#### **4. DAS GESAMTMODELL**

Die drei im vorigen Abschnitt beschriebenen Mikrosimulationsmodelle stehen stellvertretend für weitere ähnlich aufgebaute Modellbausteine zur Mikrosimulation anderer Prozesse der räumlichen Stadtentwicklung wie der Entwicklung des Gebäudestands und der Bautätigkeit und der Entwicklung und Standortentscheidungen von Betrieben im produzierenden Gewerbe, im Einzelhandel und im Dienstleistungsbereich.

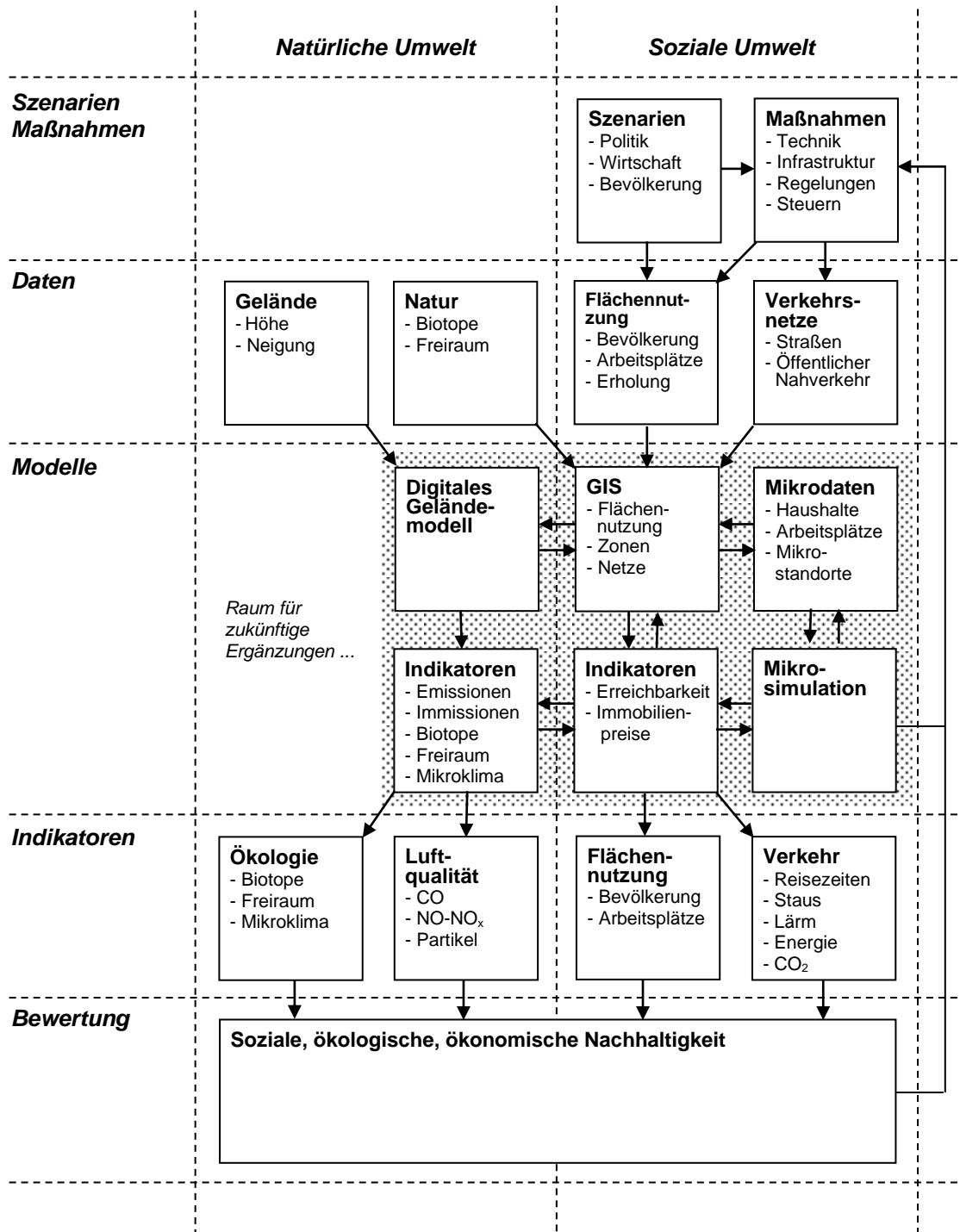
Es ist geplant, diese Mikrosimulationsbausteine in das vorhandene Simulationsmodell der räumlichen Stadtentwicklung (Wegener, 1998) zu integrieren. Wegen seiner modularen Struktur, ist das Modell besonders gut zur Aufnahme neuer Komponenten geeignet. Die Mikrosimulationsmodelle von Haushaltsentwicklung und Verkehr ersetzen die derzeit vorhandenen aggregierten Teilmodelle, und die Mikrosimulation des Wohnungsmarkts ersetzt das vorhandene Mikrosimulationsmodell des Wohnungsmarkts, das bisher noch nicht mit Mikrostandorten arbeitet.

Änderungen ergeben sich bei der Datenbasis des Modells. Gegenwärtig enthält diese nach der Simulation die Ergebnisse aller Perioden auf Zonenbasis zur Analyse und Präsentation in Diagrammen und Karten. In den Mikrosimulationsmodellen der Haushaltsentwicklung und des Wohnungsmarkts dagegen geben die Listen von Haushalten, Personen und Wohnungen stets den jeweils aktuellen Zustand wieder, und das Mikrosimulationsmodell des Verkehrs speichert lediglich die Verkehrsströme des letzten simulierten Tages. Deshalb müssen die Mikrosimulationsergebnisse nach jeder Periode in aggregierter Form in die Datenbasis übertragen werden.

Für die Berechnung kleinräumiger Umweltindikatoren sind die Mikrostandorte der Emissionsquellen und der Wohnstandorte der betroffenen Bevölkerung erforderlich. Diese Information liegen im integrierten Mikrosimulationsmodell für die stationären Emissionsquellen und die betroffene Bevölkerung differenziert nach sozioökonomischen Gruppen, Beschäftigung und Wohn-, Büro- und Gewerbeflächen vor. Für die Berechnung der Emissionen des Verkehrs müssen die linearen Emissionsquellen (Verkehrsbelastungen der Straßen- und Bahnstrecken nach Fahrzeugkategorien) von der im Verkehrsmodell verwendeten Vektordarstellung in Rasterdarstellung transformiert werden.

Es ist geplant, mit Hilfe von im EU-Projekt SPARTACUS entwickelten rasterbasierten Umweltmodellen (LT Consultants, 1998; Spiekermann und Wegener, 1999) die Luftbelastung durch verschiedene Schadstoffe und die Lärmbelastung durch den Verkehr zu berechnen und den Mikrostandorten der Haushalte einzelner Bevölkerungsgruppen zuzuordnen. Darüber hinaus sollen weitere Umweltindikatoren wie Luftschadstoff- und Lärmemissionen stationärer Quellen, Flächenverbrauch, Mikroklima und Beeinträchtigung schutzwürdiger Biotope berechnet werden.

Abbildung 5 zeigt das integrierte Mikrosimulationsmodell im Ablauf einer typischen Modellanwendung. Die rechte Hälfte des Diagramms zeigt die traditionellen Elemente der Stadtplanung wie Flächennutzung, Haushalte und Betriebe und Verkehr, die linke Hälfte die Auswirkungen der menschlichen Aktivitäten auf die Umwelt.



**Abb. 5:** Simulation von Flächennutzung, Verkehr und Umwelt

Die Modellanwendung beginnt mit der Aufstellung von Szenarien exogener Entwicklungen in den Bereichen Politik, Wirtschaft und Bevölkerung sowie mit der Definition zu untersuchender Maßnahmen. Als nächstes werden die benötigten sozioökonomischen und ökologischen Daten sowie die Daten über die Verkehrsinfrastruktur in ein Geoinformationssystem



bzw. ein digitales Geländemodell eingegeben. Mit Hilfe der im Abschnitt 2 beschriebenen Methode werden die sozioökonomischen Daten individualisiert und Mikrostandorten zugeordnet. Das Mikrosimulationsmodell selbst erzeugt sozioökonomische und ökologische Indikatoren, die einzelnen Zielbereichen zugeordnet und mittels eines Bewertungsverfahrens im Hinblick auf soziale, ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit bewertet werden.

## **5. SCHLUSSBEMERKUNGEN**

In diesem Beitrag wurde ein Konzept für ein integriertes Mikrosimulationsmodell von Flächennutzung, Verkehr und Umwelt in Stadtregionen vorgestellt.

Die als Beispiele vorgestellten Mikrosimulationsbausteine der Haushaltsentwicklung, des Wohnungsmarkts und des Verkehrs erlauben die Anwendung mikroskopischer Modellierungstechniken im Zusammenhang mit Veränderungen in Lebenszyklus und Standortwahlentscheidungen von Haushalten. Dies eröffnet neue Möglichkeiten der Modellierung der Auswirkungen langfristiger Lebensstilentscheidungen auf mittel- und kurzfristige Entscheidungen über Standortwahl und Mobilität.

Die Verwirklichung des Modellkonzepts trägt dazu bei, daß Modelle der räumlichen Stadtentwicklung menschliches Verhalten realistischer abbilden und besser auf mögliche Flächennutzungs- und Verkehrsmaßnahmen reagieren. Die höhere räumliche und zeitliche Auflösung mikroskopischer Modelle macht sie geeigneter, auch kleinräumige Umweltauswirkungen wie Luftbelastung und Verkehrslärm aus der Sicht der betroffenen Bewohner vorherzusagen. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für ihren Einsatz in einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Stadtplanung.

Ein Hauptziel der Anwendung des Modells wird die Untersuchung von städtebaulichen Leitbildern wie 'Innenverdichtung' oder 'dezentrale Konzentration' sein (Fürst u.a., 1999; Spiekermann, 1999). Die Debatte über diese Leitbilder leidet unter der Unsicherheit darüber, ob die Rückkehr zu dichten, durchmischten, fußgängerfreundlichen Siedlungsformen tatsächlich zu einer Verringerung der mit dem Auto zurückgelegten Entfernungen führen würde, das heißt in welchem Maße Haushalte, die in solche Wohngebiete ziehen, auch ihren Lebensstil und damit ihr Mobilitätsverhalten ändern würden. Die Anwendung des Modells könnte dazu beitragen, durch bessere Informationen über die Auswirkungen vorgeschlagener Maßnahmen die Rationalität dieser Debatte zu erhöhen.

## LITERATUR

- Axhausen, K.W., Gärling, T. (1992): Activity-based approaches to travel analysis: conceptual frameworks, models and research problems. *Transport Reviews* **12**, 324-341.
- Barrett, C.L. et al. (1999): TRAnspOrtation ANalysis SIMulation System (TRANSIMS). Version TRANSIMS-LANL-1.0. Volume 0 - Overview. LA-UR 99-1658. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory. [http://transims.tsasa.lanl.gov/PDF\\_Files/Vol0-jmhF\\_990602\\_.pdf](http://transims.tsasa.lanl.gov/PDF_Files/Vol0-jmhF_990602_.pdf).
- Batty, M. (1997): Cellular automata and urban form: a primer. *Journal of the American Planning Association* **63**, 264-274.
- Batty, M., Xie, Y. (1994): From cells to cities. *Environment and Planning B: Planning and Design* **21**, 31-48.
- Ben-Akiva, M.E., Bowman, J.L., Gopinath, D. (1996): Travel demand model system for the information era. *Transportation* **23**, 241-166.
- Brilon, W., Huber, F., Schreckenberg, M., Wallentowitz, H. (Hg.) (1998): *Traffic and Mobility: Simulation, Economics, Environment*. Berlin: Springer.
- Chapin, F.S., Weiss S.F. (1968): A probabilistic model for residential growth. *Transportation Research* **2**, 375-390.
- Clarke, G.P. (Hg.) (1996): *Microsimulation for Urban and Regional Policy Analysis*. European Research in Regional Science 6. London: Pion.
- Clarke, M. (1981): A first-principle approach to modelling socio-economic interdependence using microsimulation. *Computers, Environment and Urban Systems* **6**, 211-227.
- Clarke, M., Holm, E. (1987): Microsimulation methods in spatial analysis and planning. *Geografiska Annaler* **69B**, 145-164.
- Clarke, M., Keys, P., Williams, H.C.W.L. (1980): *Micro-Analysis and Simulation of Socio-Economic Systems: Progress and Prospects*. Leeds: School of Geography, University of Leeds.
- Ferrand, N. (2000): Multi-reactive agents paradigm for spatial modelling. In: Fotheringham, A.S., Wegener, M. (Hg.): *Spatial Models and GIS: New Potential and New Models*. London: Taylor & Francis, 167-184.
- Fürst, F., Himmelsbach, U., Potz, P. (1999): *Leitbilder der räumlichen Stadtentwicklung im 20. Jahrhundert - Wege zur Nachhaltigkeit?* Berichte aus dem Institut für Raumplanung 41. Dortmund: Institut für Raumplanung.
- Hägerstrand T. (1968): *Innovation Diffusion as Spatial Process*. Chicago: University of Chicago Press.

- Hayashi, Y., Tomita, Y. (1989): A micro-analytic residential mobility model for assessing the effects of transport improvement. *Transport Policy, Management and Technology - Towards 2001. Selected Proceedings of the Fifth World Conference on Transport Research, Yokohama. Ventura, CA: Western Periodicals*, 91-105.
- Kain, J.F., Apgar, W.C. Jr. (1985) *Housing and Neighborhood Dynamics: A Simulation Study*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Kreibich, V. (1979): Modelling car availability, modal split, and trip distribution by Monte Carlo simulation: a short way to integrated models. *Transportation* **8**, 153-166.
- Landis, J.D. (1994): The California Urban Futures Model: a new generation of metropolitan simulation models. *Environment and Planning B: Planning and Design* **21**, 99-422
- Landis, J.D., Zhang, M. (1998a): The second generation of the California urban futures model. Part 1: Model logic and theory. *Environment and Planning B: Planning and Design* **25**, 657-666.
- Landis, J.D., Zhang, M. (1998b): The second generation of the California urban futures model. Part 2: Specification and calibration results of the land-use change submodel. *Environment and Planning B: Planning and Design* **25**, 795-824.
- LT Consultants, IRPUD, ME&P, TRT, MECSA (1998): *SPARTACUS: System for Planning and Research in Towns and Cities for Urban Sustainability*. Final Report. <http://www.ltcon.fi/spartacus>.
- Mackett, R.L. (1990a): *MASTER Model (Micro-Analytical Simulation of Transport, Employment and Residence)*. Report SR 237. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- Mackett, R.L. (1990b): Comparative analysis of modelling land-use transport interaction at the micro and macro levels. *Environment and Planning A* **22**, 459-75.
- Moeckel, R., Wegener, M. (2000): *Creating a Synthetic Population*. Working Paper. Dortmund: Institut für Raumplanung.
- Nagel, K., Beckman, R.J., Barrett, C.L. (1999): TRANSIMS for transportation planning. LA-UR 98-4389. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory. [http://transims.tsasa.lanl.gov/PDF\\_Files/LAUR98-4389.pdf](http://transims.tsasa.lanl.gov/PDF_Files/LAUR98-4389.pdf)
- Orcutt, G., Greenberger, M., Rivlin, A., Korbel, J. (1961): *Microanalysis of Socioeconomic Systems: A Simulation Study*. New York: Harper and Row.
- Salomon, I. (1983): The use of the life-style concept in travel demand models. *Environment and Planning A* **15**, 623-638.

- Salomon, I. (1997): Incorporating newly emerging travel and activity patterns in microsimulation approaches. Working Paper. Jerusalem. Department of Geography, Hebrew University.
- Spiekermann, K. (1999): *Leitbilder der räumlichen Stadtentwicklung in der kommunalen Planungspraxis*. Berichte aus dem Institut für Raumplanung 42. Dortmund: Institut für Raumplanung.
- Spiekermann, K., Wegener, M. (1999): Disaggregate environmental modules for modelling sustainable urban development. In: Rizzi, P. (Hg.): *Computers in Urban Planning and Urban Management on the Edge of the Millennium*. Mailand: F. Angeli.
- Spiekermann, K., Wegener, M. (2000): Freedom from the tyranny of zones. In: Fotheringham, A.S., Wegener, M. (Hg.): *Spatial Models and GIS: New Potential and New Models*. London: Taylor & Francis, 45-61.
- Waddell, P. (1998): An Urban Simulation Model for Integrated Policy Analysis and Planning: Residential Location and Housing Market Components of UrbanSim. *Proceedings of the 8th World Conference on Transport Research*, Antwerp, Belgium.
- Waddell, P. (1999): UrbanSim Overview: <http://urbansim.org>.
- Wegener M. (1985): The Dortmund housing market model: a Monte Carlo simulation of a regional housing market. In: Stahl, K. (Hg.): *Microeconomic Models of Housing Markets*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 239. Berlin/Heidelberg/New York, 144-191.
- Wegener, M., Spiekermann, K. (1996): The potential of microsimulation for urban models. In: Clarke, G.P. (Hg.): *Microsimulation for Urban and Regional Policy Analysis*. European Research in Regional Science 6. London: Pion, 149-163.
- Wegener, M. (1998): *The IRPUD Model: Overview*. <http://irpud.raumplanung.uni-dortmund.de/irpud/pro/mod/mod.htm>.
- White, R., Engelen, G. (1994). Cellular dynamics and GIS: modelling spatial complexity. *Geographical Systems* 1, 237-253.

Veröffentlicht in: Bernard, L., Krüger, T. (Hg.): *Simulation raumbezogener Prozesse: Methoden und Anwendungen*. IfGIprints 9. Münster: Institut für Geoinformatik, Universität Münster, 2000, 61-82.