

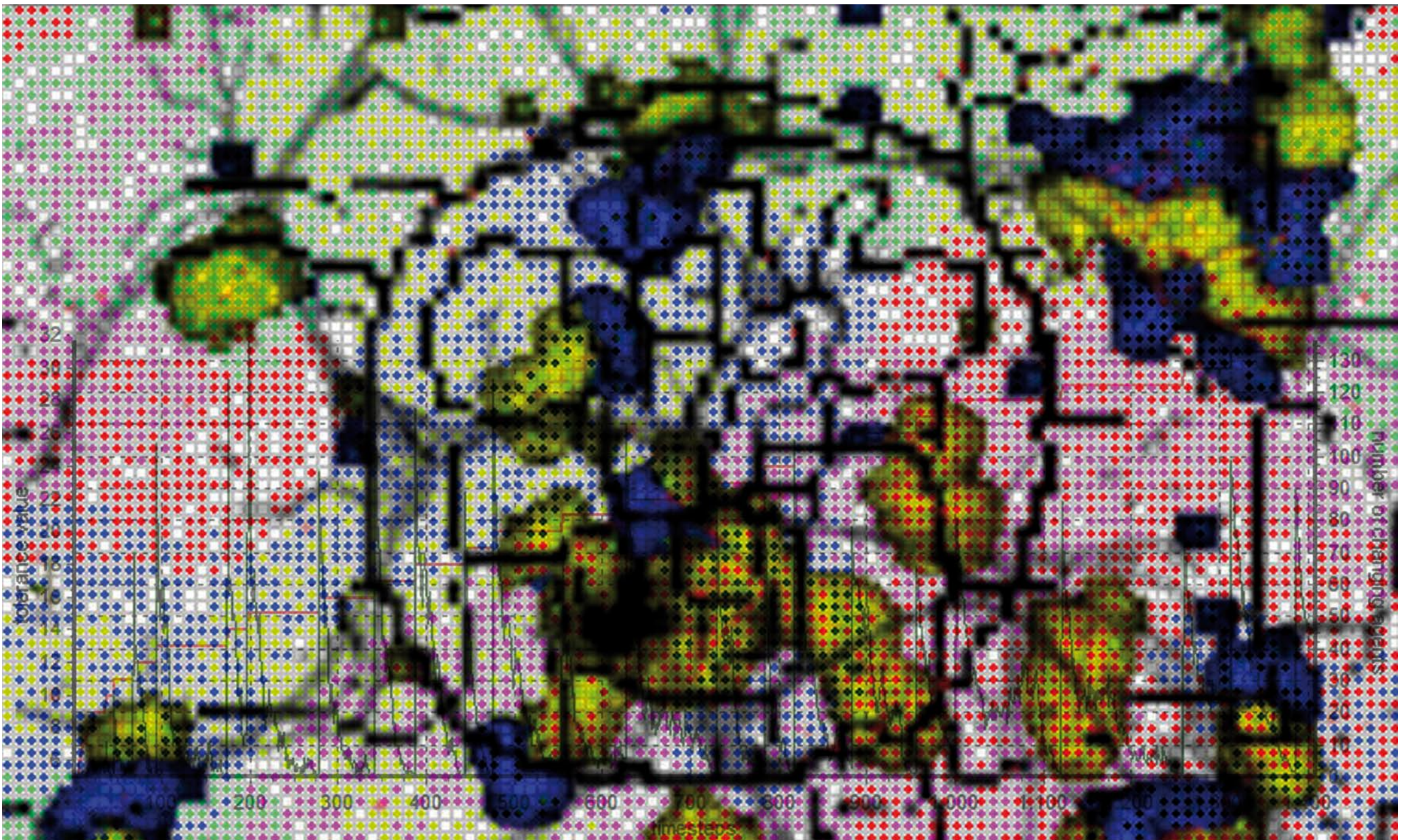
adsf

MAK

kone

rieder

## Die Stadt der Agenten und Automaten



Collage Computersimulationen. Grafiken: Reinhard König

### COMPUTERSIMULATIONEN IN DER RAUMPLANUNG

#### PLANUNGSUNTERSTÜTZUNG DURCH DIE ANALYSE RÄUMLICHER PROZESSE MITTELS COMPUTERSIMULATIONEN

Erst wenn man – zumindest im Prinzip – versteht, wie eine Stadt mit ihren komplexen, verwobenen Vorgängen im Wesentlichen funktioniert, ist eine sinnvolle Stadtplanung möglich. Denn jede Planung bedeutet einen Eingriff in den komplexen Organismus einer Stadt. Findet dieser Eingriff ohne Wissen über die Funktionsweise des Organismus statt, können auch die Auswirkungen nicht abgeschätzt werden. Dieser Beitrag stellt dar, wie urbane Prozesse mittels Computersimulationen unter Zuhilfenahme so genannter Multi-Agenten-Systeme und Zellulärer Automaten verstanden werden können.

von Reinhard König

Bisher gibt es für die Raum- und Stadtplanung nur eine Möglichkeit, die Tauglichkeit einer Planung und der zu Grunde liegenden Theorie zu überprüfen: Ein entsprechendes Projekt wird realisiert, und die Auswirkungen werden in einer Art Feldversuch beobachtet. Bei der Auswertung der gebauten Projekte beschränkt man sich allerdings meist auf qualitative Aussagen und verzichtet auf Langzeituntersuchungen zur Gewinnung quantitativer Ergebnisse, welche zu einer Falsifizierung der zu Grunde liegenden Planungstheorie herangezogen werden könnten. Die Gründe hierfür liegen zum einen in den methodischen Schwierigkeiten solcher Langzeituntersuchungen, zum anderen am Desinteresse der Beteiligten und der skeptischen Haltung gegenüber wissenschaftlichen Methoden innerhalb der Planungsdisziplinen im Allgemeinen.

Um nun einen alternativen Weg zur Überprüfung bestimmter Planungstheorien zu erkunden, bieten Computersimulationen relativ neue Techniken wie Zelluläre Automaten und Multi-Agenten-

Systeme, welche die Modellierung der entsprechenden Theorien erlauben. Die vorgestellten Simulationsansätze sollen beispielhaft zeigen, wie man Auswirkungen unterschiedlicher Planungen anhand von Szenarienmodellen in einer Art Laborumgebung untersuchen könnte (Abb. 1).

#### COMPUTERMODELLE

Seit ungefähr zehn Jahren gewinnen urbane Simulationsmodelle zunehmend an Aufmerksamkeit (Benenson & Torrens, 2004). Im Gegensatz zu den Computermodellen, die seit den Fünfzigerjahren entwickelt wurden, den so genannten Large Scale Urban Models (LSUM), verfolgt man heute einen neuen Ansatz, dessen Entstehung sich größtenteils der zunehmenden Verbreitung der Theorie komplexer Systeme verdankt (Batty, 2005). Ausgehend von dem 1984 gegründeten Santa Fe Institute, ist die Komplexitätstheorie inzwischen ein weltweit etablierter Forschungsbereich. Er bildet die Grundlage für die im Folgenden dargestellte

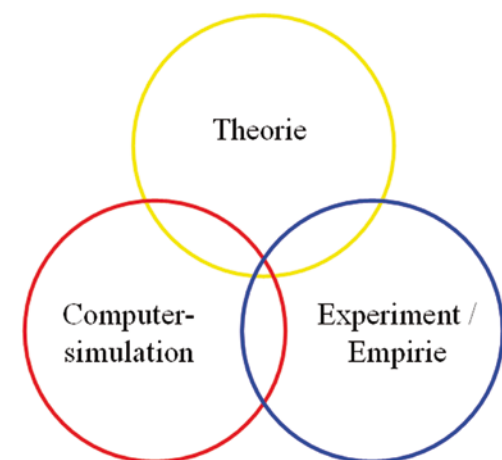


Abb. 1: Forschungsmethode: Computersimulationen ergänzen den Planungsprozess, der normalerweise von einem Plan (= Theorie) zur Realisierung (= Experiment) führt.

generative Methodik. Bei diesem (bottom-up-)Konzept wird eine Stadt als adaptives Kollektiv interagierender Einheiten verstanden und steht damit im Gegensatz zu den reduktionistischen (top-down-)Ansätzen der LSUM (König, 2005). In den nächsten beiden Abschnitten werden die Techniken eingeführt, die zur Repräsentation eines urbanen Systems als generatives Computermodell angewandt werden (Abb. 2).

#### MULTI AGENTEN SYSTEM

Die wesentlichen Elemente eines Modells werden als Agenten bezeichnet. Ein Agent hat verschiedene Eigenschaften, beispielsweise seine Farbe und räumliche Position. Außerdem kann ein Agent mit seiner Umwelt, die aus anderen Agenten besteht, Informationen austauschen und daraufhin sein Verhalten ändern. Sowohl die Eigenschaften als auch das Verhalten werden in Zahlenwerten gespeichert und unter bestimmten Bedingungen abgerufen oder ausgeführt. Aus pragmatischen Gründen werden zwei → 10



Fortsetzung von Seite 9

Arten von Agenten unterschieden. Die Mitglieder der ersten Gruppe können sich frei über die gegebene Fläche bewegen. Sie werden in den Simulationsprogrammen als Kreise dargestellt und als „mobile Agenten“ bezeichnet. Dagegen sind die Agenten der zweiten Gruppe fest an einen Ort gebunden und in einem regelmäßigen Raster angeordnet. Die Mitglieder der zweiten Gruppe werden als Zellen bezeichnet und bilden zusammen einen Zellulären Automaten, der im nächsten Abschnitt erläutert wird.

Der Informationsfluss findet in der Regel so statt, dass die mobilen Agenten bei der jeweiligen Zelle, über der sie sich gerade befinden, Informationen speichern und abrufen. Die mobilen Agenten kommunizieren auf diese Weise indirekt über das Zellenraster miteinander.

**ZELLULÄRER AUTOMAT**

Ein Zellulärer Automat besteht aus einer meist regelmäßigen Anordnung einzelner Zellen, von denen jede einen definierten Zustand annehmen kann. Die Struktur der hier vorgestellten Modelle entspricht der eines Schachbretts. Wichtig für die Funktionsweise eines Zellulären Automaten ist die Definition jener Zellen, die als Nachbarn gelten. Man unterscheidet hier hauptsächlich zwischen der von-Neumann-Nachbarschaft, die aus den vier orthogonal angrenzenden Zellen im Westen, Norden, Osten und Süden besteht (Abb. 3/a) und der Moore-Nachbarschaft, bei welcher zusätzlich die vier diagonalen Zellen einbezogen werden, so dass sie aus den acht umliegenden Zellen besteht (Abb. 3/b).

**BEREICHE EINER STADT**

Um die komplexen und verwobenen Vorgänge in einer Stadt erfassen zu können, erscheint es sinnvoll, das gesamte urbane System in mehrere Teilbereiche zu gliedern. Im Rahmen dieses Artikels sollen in den beiden folgenden Unterpunkten lediglich zwei dieser Bereiche herausgegriffen und einige Aspekte daraus beleuchtet werden.

**DIE STADT UND IHRE BEWOHNER**

Die erste Frage lautet, wie und warum es in Städten zu einer Ungleichverteilung verschiedener Bevölkerungsgruppen kommt. Welche Prinzipien führen dazu, dass Einwohner mit gleicher Herkunft, Ethnizität oder sozialem Status räumlich näher beieinander zu finden sind und sich nicht gleichmäßig im städtischen Raum verteilen? In jeder Stadt gibt es Viertel, die mehrheitlich von Einwanderern, religiösen Minderheiten oder einfach ärmeren bzw. reicheren Bevölkerungsschichten bewohnt werden. Die Entmischung unterschiedlicher Gruppen wird als Segregation bezeichnet. Um zu erklären, wie dieser Prozess vor sich geht, haben sich Modelle etabliert, die auf Sakoda (Sakoda, 1971) und Schelling (Schelling, 1969) zurückgehen, die beide unabhängig voneinander und noch ohne Computereinsatz Thesen für die Prinzipien dieses Vorgangs entwickelt haben (Hegselmann & Flache, 1998).

Die folgenden Ausführungen orientieren sich an dem Modell von Thomas Schelling (Schelling, 1971), dessen Grundgedanke darin besteht, dass jeder Agent (Bewohner) genügend gleich gesinnte Nachbarn (mit ähnlichen Eigenschaften, Meinungen, Präferenzen, Herkunft o. Ä.) in seiner Umgebung haben möchte, um mit seiner Wohnlage zufrieden zu sein. Findet ein Agent nicht genügend Gleichgesinnte in seiner Umgebung vor, so siedelt er sich dort nicht an bzw. verlässt seinen bisherigen Aufenthaltsort wieder, sobald er einen geeigneteren Wohnort findet.

In einem ersten, möglichst einfachen Simulationsmodell sollen zwei Populationsgruppen betrachtet werden (Abb. 4/a), von denen angenommen wird, dass es sich bei der einen (den weißen Agenten) um Personen handelt, die lieber Bier trinken und bei den anderen (den schwarzen Agenten) um Weintrinker (Batty, 2005). Der Prozess wird initialisiert, indem eine bestimmte Anzahl von Agenten zufällig innerhalb des Zellenrasters verteilt wird, wobei sich auf jeder Zelle jeweils ein Agent befinden kann. Die Verhaltensregel der Agenten besagt nun, dass ein Biertrinker seinen Aufenthaltsort dann ändern möchte, wenn sich mehr Weintrinker in seiner Umgebung (3 x 3 Moore-Nachbarschaft) befinden, als sein Toleranzwert zulässt und vice versa.

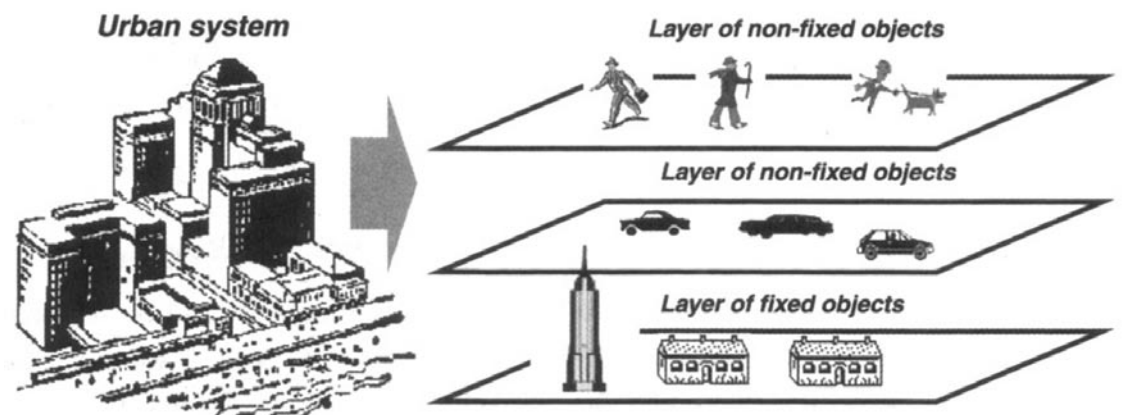


Abb. 2: Die Ebenen des urbanen Systems: Ein urbanes System kann in Layer für Objekte verschiedenen Typs gegliedert werden. Die beiden oberen Ebenen zeigen mobile Akteure (Agenten); Die untere Ebene stellt örtlich fixe Elemente dar, die anhand von Zellen repräsentiert werden. Grafik: Benenson und Torrens

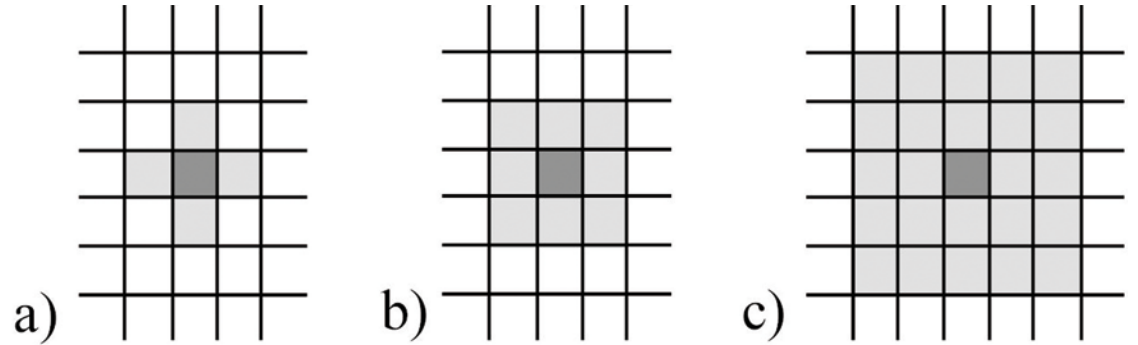


Abb. 3: Die verschiedenen Nachbarschaften eines Zellulären Automaten: a) von-Neumann-Nachbarschaft, b) 3 x 3 Moore-Nachbarschaft, c) erweiterte 5 x 5 Moore-Nachbarschaft. Grafik: Reinhard König

Die Ergebnisse verschiedener Simulationsdurchläufe (Abb. 4/b-f) überraschen insofern, als bei den entstehenden Strukturen die Agenten wesentlich mehr gleichartige Nachbarn um sich herum aufweisen, als es die Einstellung des Toleranz-Schwellenwerts erwarten lässt. Es kommt bereits bei hohen Toleranzwerten der Agenten zu deutlichen Entmischungseffekten und der Herausbildung homogener Cluster. Das Zustandekommen der Clusterstrukturen auf der Makroebene war nicht durch die Regeln der Elemente vorgegeben und kann daher als Emergenzphänomen bezeichnet werden (Vollmer, 1996).

Wie lässt sich dieses Modell nun für die Unterstützung von Planungsprozessen verwenden? Anstatt den Segregationsprozess am Beispiel von zwei Gruppen mit individuellen Vorlieben für Bier oder Wein abzubilden, sollten natürlich die Agenten die Bevölkerungszusammensetzung des urbanen Raums abbilden, der geplant werden soll. Hierzu eignet sich beispielsweise eine Aufteilung in zirka sechs sozioökonomische oder ethnische Gruppen (Benenson, 2004; Breßler & Harsche, 2004).

Weiterhin stellt sich die Frage, was die abstrakten Parameter des Computermodells mit den Eigenschaften und Verhaltensweisen der realen Stadtbewohner zu tun haben. Aus welchen Präferenzen und Einstellungen setzt sich beispielsweise der Toleranzwert der Agenten zusammen? Es ist nicht zu erwarten, dass ein Fußballfan seine Wohnung aufgibt, wenn er nicht genügend Fans des gleichen Vereins in seiner Nachbarschaft vorfindet. Wenn sich aber zusätzlich seine Nachbarschaft aus anderen sozioökonomischen Gruppen zusammensetzt und diese außerdem eine andere

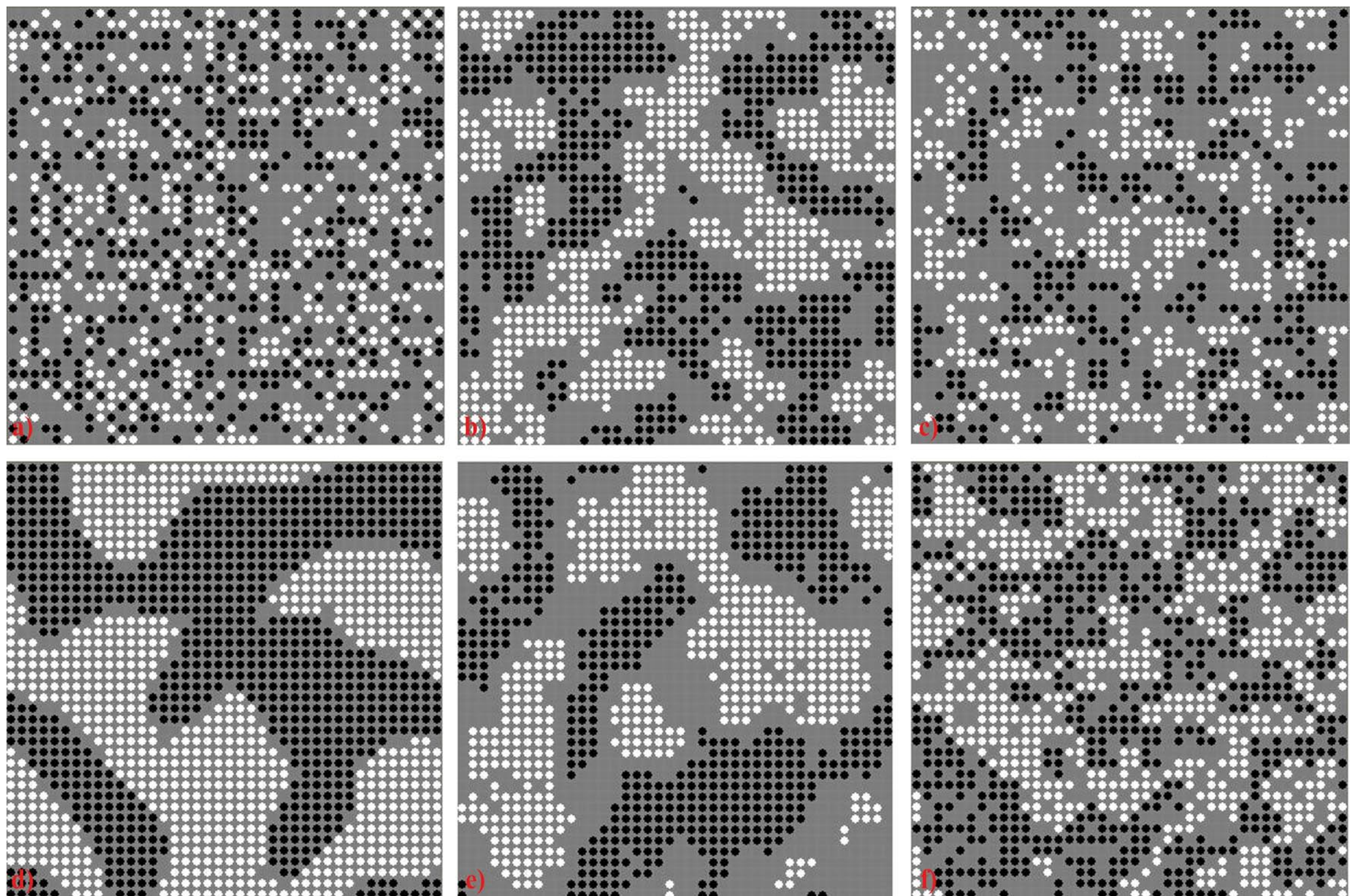


Abb. 4: Segregationsmuster: Das Raster besteht aus 40 x 40 = 1600 Zellen. Die Einstellungen für den Toleranzparameter  $\phi$  und die Anzahl der Agenten  $M$  variieren in jedem Bild. a) Anfangsverteilung mit  $M = 1,000$  Agenten, anschließend Gleichgewichtszustände der Simulationen mit b)  $\phi = 50, M = 1,100$ ; c)  $\phi = 30, M = 800$ ; d)  $\phi = 50, M = 1,500$ ; e)  $\phi = 74, M = 1,000$ ; f)  $\phi = 30, M = 1200$ .



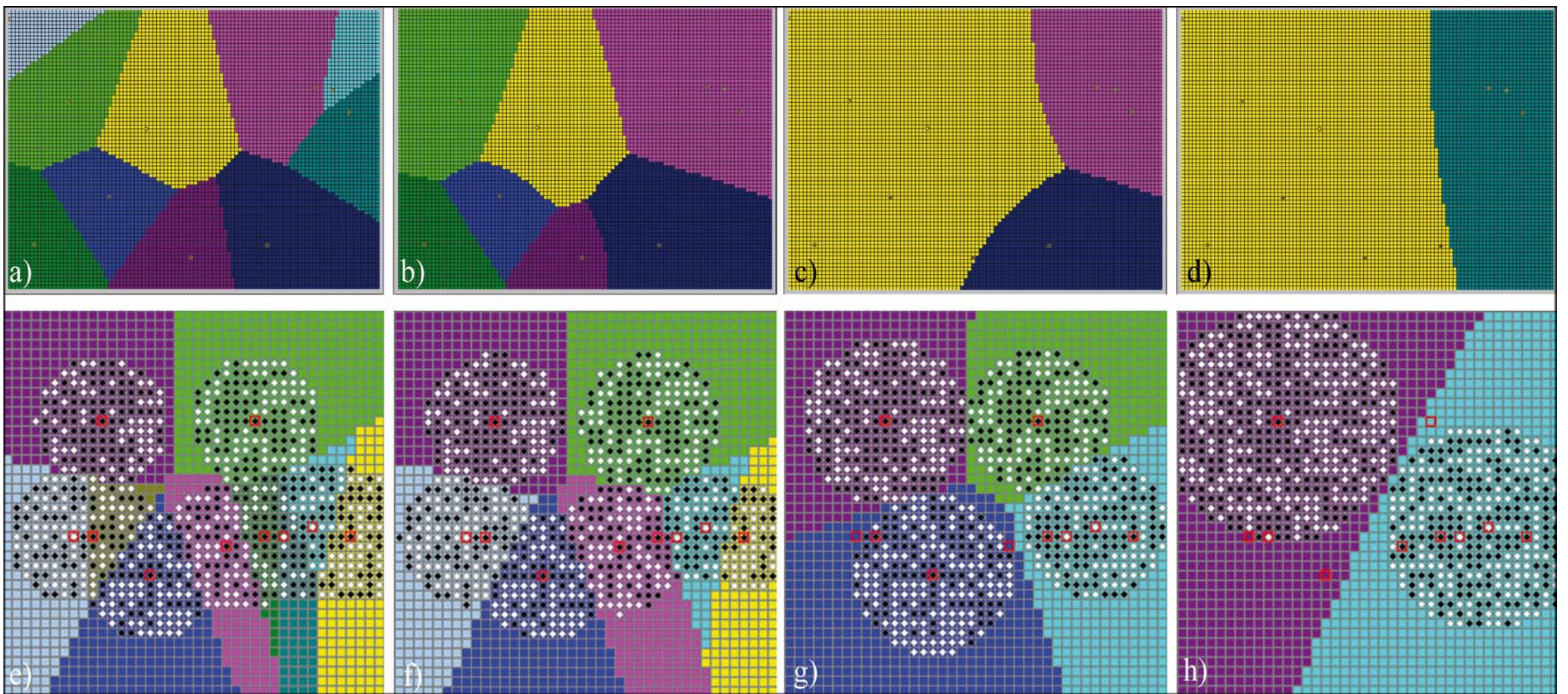


Abb. 5: Konkurrenzkampf bei positiven Skalenerträgen: Die Bilder a bis d der oberen Reihe zeigen die Expansion des gelben Einzugsgebiets und den Rückgang der anderen, bis ein Anbieter beinahe ein Monopol über den gesamten Raum gebildet hat. In der unteren Reihe, e bis h, findet der gleiche Verdrängungsprozess statt, nur dass hier die Kunden durch mobile Agenten repräsentiert werden. Grafiken: Reinhard König

Religion und Herkunft haben, die Wohnung in Ausstattung und Komfort nicht seinen Vorstellungen entspricht und er einen Erholungspark in seiner Nähe vermisst, wird sich der Mieter irgendwann überlegen, ob er nicht lieber in eine ihm angemessenere Wohngegend umziehen sollte. Der Toleranzparameter des Modells kann sich demnach aus mehreren Parametern der Wirklichkeit zusammensetzen. Man spricht dann von einem aggregierten Wert.

Ferner bieten weitere Parameter des Simulationsmodells interessante Untersuchungsgegenstände. Was geschieht zum Beispiel, wenn die Nachbarschaftsgröße eines Agenten verändert wird und statt der 3 x 3 Moore-Nachbarschaft die erweiterte 5 x 5 Moore-Nachbarschaft betrachtet wird? Verändern sich die Simulationsergebnisse, wenn alle anderen Parameter konstant gehalten werden? Und wie können verschiedene große Einflussbereiche auf einen Bewohner im realen Stadtraum interpretiert werden? Ebenso lässt sich fragen, wie sich unterschiedliche Siedlungsdichten, was der Anzahl der Agenten in einem System entspricht, auswirken, oder was geschieht, wenn ein Agent einen kleinen oder großen Aktionsradius hat, innerhalb dessen er eine bessere Wohnumgebung suchen kann, ein Bewohner also mehr oder weniger mobil ist.

Nicht zuletzt spielen natürlich die Miet- und Bodenpreise eine entscheidende Rolle für die Zugänglichkeit bestimmter Orte für unterschiedliche Gruppen. Nicht jeder kann sich ein Seegrundstück oder eine Wohnung mit zentraler Innenstadtlage leisten. Die Preise wiederum sind im Allgemeinen dort am höchsten, wo die Attraktivität der Wohnorte am größten ist.

#### DIE STADT UND DER HANDEL

Bei der in diesem Abschnitt vorgestellten Simulation betrachten wir den Zusammenhang zwischen positiven Skalenerträgen und dem Einzugsgebiet eines Händlers bzw. Marktes. Bei der Herstellung eines Produkts fallen bestimmte Kosten an. Können bei der Produktion die Mehrkosten für jede weitere hergestellte Einheit reduziert werden (Grenzkosten), spricht man von einem Skalenertrag (mit Faktor größer als eins). Anders ausgedrückt, sinken bei positiven Skalenerträgen die Stückkosten, je mehr Einheiten produziert werden können. Dieses Prinzip hängt unter anderem damit zusammen, dass bei einer Massenproduktion die Produktionsmittel, (z. B. Maschinen, Gebäude, fest angestellte Mitarbeiter usw.), sobald sie einmal vorhanden sind, effektiver eingesetzt werden können, wenn statt einer Einheit die maximal mögliche Anzahl hergestellt wird (Franck, 1992).

Im vorliegenden Simulationsmodell wird die Konkurrenz zwischen zehn zufällig innerhalb des Zellenrasters platzierten Märkten, die alle dieselben Produkte herstellen und verkaufen, untersucht. Zu Beginn sind die Angebotspreise bei allen Händlern gleich hoch. Die potenziellen Kunden eines Marktes werden als gleichmäßig im Raum verteilt angenommen (eine Zelle entspricht einem Kunden). In welchem Markt die Käufer ein Produkt erwerben werden, entscheiden sie rationell danach, wo es für sie am billigsten ist. Der relative Preis für einen Kunden an einem bestimmten Ort im zellulären Raum berechnet sich aus dem Angebotspreis eines Händlers plus den Fahrtkosten, um den Markt vom Wohnort aus zu erreichen. Unter diesen Bedingungen wird ein Bewohner einfach im nächstgelegenen Markt einkaufen.

Nach diesem ersten Schritt werden die Kunden den Märkten zugeordnet, bei welchen sie einkaufen. Daraus lassen sich wiederum das Einzugsgebiet der Händler und damit die Menge der Produkte bestimmen, die sie herstellen und verkaufen können. Die jeweiligen Absatzgebiete der Märkte werden im Simulationsmodell farblich markiert (Abb. 5). Unter der Annahme positiver Skalenerträge, deren Faktor bei dem Simulationsprogramm über einen Parameter eingestellt werden kann, berechnen sich nun auf Grundlage der Ausdehnung der jeweiligen Einzugsgebiete verschiedene Angebotspreise bei den zehn Märkten. Jetzt lohnt es sich unter Umständen für einige Kunden an der Grenze zweier Absatzgebiete, einen weiteren Weg und damit höhere Fahrtkosten auf sich zu nehmen, um ein billiger gehandeltes Produkt in einem weiter entfernten Markt zu erwerben. Durch den Wechsel des Einkaufsmarktes einiger Kunden verändern sich in der nächsten Simulationrunde die Absatzgebiete der Märkte (Abb. 5/a–d) und damit die Angebotspreise für die darauf folgende Berechnung usw. Bei dem ausgelösten Konkurrenzkampf handelt es sich um eine positive Rückkoppelung, bei der sich einige gut platzierte Anbieter durchsetzen können und örtliche Monopole bilden. Der Verdrängungsprozess der Märkte mit kleineren Absatzgebieten endet, sobald sich die Fahrtkosten und die Kosten der Produkte in den nächstgelegenen Märkten an den Grenzen der Einzugsgebiete ausgleichen.

Wie sich die Einzugsgebiete der Märkte ergeben, ist neben dem Faktor für die Skalenerträge von zwei weiteren Parametern abhängig. Erstens haben die Kosten pro Streckeneinheit, aus welchen sich die Fahrtkosten zu einem Händler ergeben, wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung der Absatzgebiete. Diese Kosten können wieder als aggregierter Wert verstanden werden, der sich beispielsweise zusammensetzt aus den Benzinkosten und der Reisezeit. Sind die Fahrtkosten hoch, lohnt sich der längere Weg zu einem Markt mit billigerem Angebot möglicherweise nicht mehr. Zweitens macht es einen Unterschied, welche Produkte für die konkurrierenden Händler angenommen werden. Bei teureren Produkten, die seltener gekauft werden, wie Fernseher, Computer oder Autos können die möglichen Ersparnisse einen weiteren Weg rechtfertigen, als es bei billigen Produkten des täglichen Bedarfs wie Lebensmittel der Fall ist.

Auf der Basis dieses Modells können nun weitere Untersuchungen angestellt werden. Was passiert zum Beispiel, wenn die Händler ihren Standort verändern können, in der Hoffnung, dadurch ihre Einzugsgebiete und Konkurrenzfähigkeit zu verbessern? Außerdem kann das Simulationsmodell der Wirklichkeit weiter angenähert werden, indem eine zusätzliche Produktart eingeführt wird, die mit der anderen nicht konkurriert. Dann könnten Händler den Effekt der Mehrfachledigungen ausnützen und ihren Standort so wählen, dass sie von den Einzugsgebieten der Märkte profitieren, die andere Produkte anbieten. Denn ein Kunde wird in der Regel den Vorteil nutzen, mit einer Fahrt mehrere Produkte zu erwerben, um dadurch seine Fahrtkosten zu reduzieren.

Des Weiteren lässt sich das Modell dahingehend modifizieren, dass die Bewohner nicht mehr gleichmäßig im Raum verteilt sind, sondern ihren Wohnort verändern können. Unter dieser Bedingung würden die Kunden (mobile Agenten) versuchen, sich so nah wie möglich an den vorteilhaftesten Märkten zu platzieren, um dadurch Fahrtkosten zu sparen (Abb. 5/e–h). Hieraus ergibt sich eine Beschreibung des Prozesses der Zentrenbildung, wie er in allen Städten beobachtet werden kann. Nimmt man weiter an, dass die attraktiveren Orte umso höhere Mieten aufweisen, je zentraler sie liegen, lässt sich daraus eine Preislandschaft ableiten und eine Verbindung zu dem oben beschriebenen Segregationsmodell herstellen. Dieses könnte nun die räumliche Trennung der Bevölkerung nach dem ökonomischen Potenzial der Bürger abbilden.

#### AUSBLICK

Der augenscheinliche Nutzen der Computermodelle besteht darin, die Eigenschaften und das Verhalten eines komplexen Sachverhalts Schritt für Schritt zu verstehen. Im dritten Kapitel wurde versucht, eine entsprechende Forschungsmethode zu umreißen. In einem pragmatischen Sinn eignen sich die Simulationen also zur Abschätzung bestimmter Entwicklungstendenzen im Rahmen von Szenariomodellen, bei welchen die Auswirkungen bestimmter Eingriffe innerhalb eines räumlich und zeitlich begrenzten Systems untersucht werden.

Des Weiteren ergeben sich interessante Fragen dahingehend, wie die Einsichten, die durch die Simulationsmodelle vermittelt werden, in politische und administrative Entscheidungsprozesse übertragen werden können. In der Wirklichkeit werden Entwicklungen oft durch komplizierte Entscheidungsstrukturen gelenkt, deren einzelnen Schritte den aggregierten Parametern der stark abstrahierten Modelle zugeordnet werden müssten.

#### Anmerkung

Die vorgestellten Computersimulationen können als ausführbare Windowsprogramme (exe-Dateien) auf folgender Internetseite bezogen werden: [http://www.entwurforschung.de/RaumProzesse/mas\\_za\\_city.htm](http://www.entwurforschung.de/RaumProzesse/mas_za_city.htm). Hier werden auch weiterführende Informationen zu den Fragen bereitgestellt, die zu den beiden Modellen, beschrieben im Kapitel „Bereiche einer Stadt“ dieses Artikels aufgeworfen wurden.

#### Referenzen

- M. Batty (2005): *Cities and Complexity. Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*. MIT Press, Cambridge
- I. Benenson (2004): *Agent-Based Modeling. From Individual Residential Choice to Urban Residential Dynamics*. In: M. F. Goodchild & D. G. Janelle (Hrsg.): *Spatially Integrated Social Science. Examples in Best Practice*. Oxford University Press
- I. Benenson, & P. M. Torrens (2004): *Geosimulation – Automata-based modeling of urban phenomena*. John Wiley & Sons, England
- C. Breßler, & M. Harsche (2004, 2006/11/12): *Einführung in die Kultur- und Sozialgeographie*. Quelle: [http://www.mygeo.info/skripte/skript\\_bevoelkerung\\_siedlung/](http://www.mygeo.info/skripte/skript_bevoelkerung_siedlung/)
- G. Franck (1992): *Raumökonomie, Stadtentwicklung und Umweltpolitik*. Kohlhammer, Stuttgart
- R. Hegselmann, & A. Flache (1998): *Understanding Complex Social Dynamics: A Plea for Cellular Automata Based Modelling*. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 1(3).
- R. König (2005): *Simulation und Visualisierung der Dynamik räumlicher Prozesse*. Paper presented at the CORP & Geomultimedia, Wien.
- J. M. Sakoda (1971): *The checkerboard model of social interaction*. *Journal of Mathematical Sociology*, 1, S. 119–132.
- T. Schelling (1969): *Models of segregation*. *American Economic Review*, 59, S. 488–493.
- T. Schelling (1971): *Dynamic models of segregation*. *Journal of Mathematical Sociology*, 1, S. 143–186.
- G. Vollmer (1996): *Das Ganze und seine Teile. Holismus, Emergenz, Erklärung und Reduktion*. In: R. Hegselmann & H.-O. Peitgen (Hrsg.): *Modelle Sozialer Dynamiken. Ordnung, Chaos und Komplexität* (3 ed., S. 187–224). Hölder-Pichler-Tempsky, Wien