

POSSIBLE CITIES

Simulation von Siedlungsentwicklung mit zellularen Automaten

Leopold RIEDL

(Dipl.-Ing. Leopold RIEDL, Institut für Stadt- und Regionalforschung der TU-Wien, email: leopold.riedl@tuwien.ac.at)

EINLEITUNG UND MOTIVATION

Der Einsatz von zellularen Automaten (ZA) hat mittlerweile in der quantitativen Geographie eine gewisse Tradition erlangt [TOBLER 1979]. Das Anwendungsspektrum reicht in der physischen Geographie von der Simulation der Ausbreitung von Feuer oder Schadstoffen hin bis zur Modellierung von Wasserqualität in Fließgewässern (für einen Überblick siehe [CAMARA et al. 1996]). In der Humangeographie existieren vielversprechende Ansätze zur dynamischen Modellierung von Stadt- und Siedlungsstrukturentwicklung in ihrer sozialen, ökonomischen und räumlichen Dimension. Für einen Überblick über aktuelle Forschungsergebnisse siehe [BATTY et al. 1997] und auch die anderen Artikel in dieser *special issue*-Ausgabe der Zeitschrift *Planning and Design* über ZA.

Vor allem letztgenannte Ansätze sind von hoher Relevanz für die Raumplanung, die ja ebenfalls den Mensch in seinem sozialen Umfeld und seine Handlungen bzw. deren mannigfaltige und insbesondere räumliche Auswirkungen in den Fokus ihrer Betrachtungen stellt. Deshalb werden nach einer kurzen Einführung in die Funktionsweise von ZA und ihre Einbettung im Rahmen geographischer Informationssysteme (GIS) in weiterer Folge zwei konkrete ZA zur Modellierung von urbaner Aktivität und Landnutzung vorgestellt. Eine resümierende Bewertung sowie ein Ausblick auf künftige Forschungsvorhaben schließen den Beitrag ab.

ZELLULARE AUTOMATEN

ZA dienen zur Modellierung einer Vielzahl von diskreten und zeitabhängigen Prozessen. Sie können in ihrer reinen Form durch folgende Eigenschaften näher charakterisiert werden [WEIMAR 1998]:

- ?? ZA bestehen aus einer regelmäßigen Anordnung von nichtüberlappenden Zellen.
- ?? Jede Zelle ist durch einen Zustand z aus einer endlichen Zustandsmenge Z beschrieben.
- ?? Die Zustandsänderung (Evolution) erfolgt in diskreten Zeitschritten $t=0, 1, 2, \dots$
- ?? Der Zustand einer Zelle zum Zeitpunkt $t+1$ hängt von den Zuständen der Zelle selbst und von Zellen in einer definierten, endlichen Umgebung zum Zeitpunkt t ab.
- ?? Die Definition der Umgebung ist lokal (relativ zur betrachteten Zelle) und für alle Zellen gleich.

Die Funktionsweise eines ZA wird anhand eines einfachen Beispiels vorgestellt. Ein echter Klassiker ist das vom englischen Mathematiker John Conway 1970 erfundene *Game of Life* [BATTY et al. 1997]. Die Zellen dieses ZA sind in Form eines regelmäßigen Quadratgitters angeordnet und können entweder „lebend“ oder „tot“ sein. Die Übergangsfunktion von einem Zeitpunkt zum nächstfolgenden ist denkbar einfach: eine tote Zelle wird geboren, wenn ihre Umgebung genau 3 lebende Zellen enthält und eine lebende Zelle überlebt, wenn sich in ihrer Umgebung 2 oder 3 ebenfalls lebende Zellen befinden (Abb. 1 rechts).

In allen anderen Fällen stirbt die Zelle wegen Überbevölkerung bzw. aus Einsamkeit oder bleibt ganz einfach tot (in Abb. 1 rechts nicht dargestellt). Die lokale Zellumgebung hat quadratische Form und besteht aus den 8 direkt und diagonal angrenzenden Zellen.

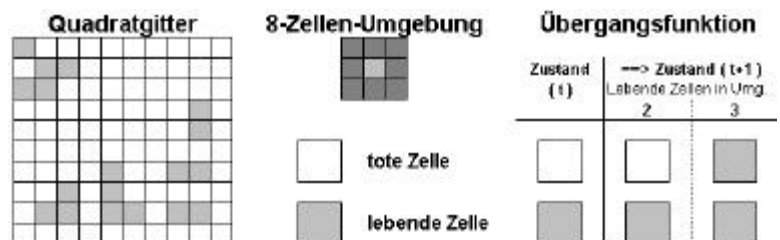


Abb. 1: Die Regeln des „Game of Life“

Zu beobachten ist, daß sogar diese sehr einfachen und nur lokal geltenden Regeln ein sehr komplexes, globales Verhalten des Systems bewirken (Abb. 2). Besonders interessant sind vor allem zwei Umstände:

- ?? Manche Strukturen sind selbstreproduzierend. Die 5-zellige Anordnung ganz links oben ($t=0$) wiederholt sich alle 4 Generationen um eine Zelle schräg nach rechts unten versetzt ($t=4$). Sie wandert also.
- ?? Es existieren stabile Strukturen. So bleibt das „4er-Quadrat“ knapp oberhalb der Mitte der Miniwelt in den Generationen 8 bis 16 unverändert – es „schläft“ quasi – bevor es durch andere Strukturen in der Generation 17 wieder „wachgeküßt“ wird und sich in der Folge wieder auflöst.

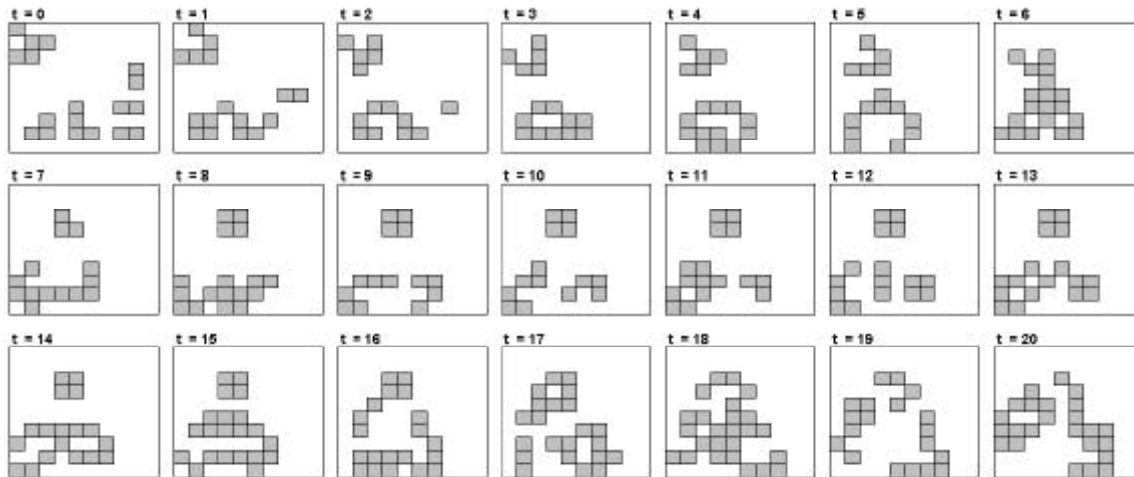


Abb. 2: Die ersten 20 Jahre des „Game of Life“

EINBETTUNG VON ZELLULAREN AUTOMATEN IN GIS

Aufgrund der Ähnlichkeit in der Datenstruktur eines ZA (regelmäßiges Gitter) mit der eines Raster-GIS (regelmäßiges Quadratgitter), liegt die Einbettung von ZA in GIS sehr nahe. Insbesondere kann der ZA-Mechanismus zur Berechnung von Zuständen und Zellumgebungen mit lokalen und fokalen Funktionen der Map-Algebra [TOMLIN 1990] gut in einem GIS abgebildet werden. Prinzipielle Möglichkeiten zur Integration beider Systeme GIS und ZA in Form einer sog. *Geo-Algebra* finden sich in [COUCLELIS 1997] und eine etwas detailliertere Abhandlung in [TAKEYAMA und COUCLELIS 1997].

Die vorliegende Implementierung von ZA erfolgt mit Hilfe von *MapModels* [RIEDL und KALASEK 1998]. MapModels ist eine unter ArcView-GIS-3.0 entwickelte Programmumgebung, welche die Modellierung von räumlichen Phänomenen in Form von direkt ausführbaren Flußdiagrammen erlaubt. Eine Demoversion von MapModels mit Anwendungsbeispielen zur multikriteriellen Standortsuche steht unentgeltlich via Internet unter der Adresse <http://esrnt1.tuwien.ac.at/MapModels/MapModels.htm> zur Verfügung.

Wenn die Zahlen 0 und 1 die Zustände „tot“ und „lebend“ darstellen, kann die Übergangsfunktion des ZA von „Game of Life“ in nebenstehendes Flußdiagramm (MapModel) übersetzt werden (Abb. 3).

Alle beteiligten Funktionen (Nachbarschaftssumme *FocalSum*, Vergleiche auf lokaler Zellebene *If*) sind Standardfunktionen von MapModels und können auf einfache Art und Weise ins Modell integriert (geladen) und miteinander verbunden werden (benutzerfreundliche Eingabe von Datenflüssen durch Ziehen mit der Maus).

Wiederholte Ausführungen des MapModels treiben die Evolution des ZA voran, und die Generationen $t=0,1,2,3,\dots$ werden in einem View-Fenster nacheinander angezeigt (Abb. 2 und 3).

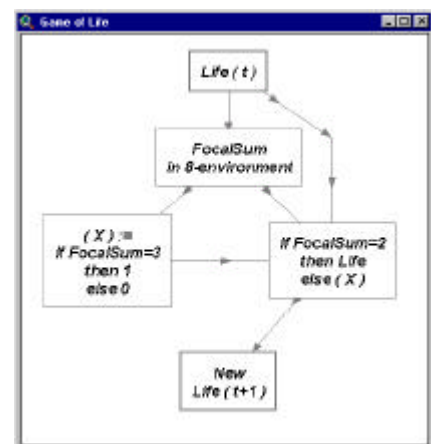


Abb. 3: Das MapModel zu „Game of Life“

STADT ALS ZELLULARER AUTOMAT

Um die Entwicklung einer komplexen, urbanen Siedlungsstruktur mit ZA zu modellieren, muß der vorgestellte Ansatz etwas erweitert werden. Drei Forderungen stehen dabei im Vordergrund:

- ?? Die Zustandsvariable z muß strukturiert sein. Diese Forderung zielt auf die Tatsache ab, daß eine Siedlung wohl schwerlich mit nur *einem* Datum pro Zelle hinreichend gut zu beschreiben ist.
- ?? Die Zustandsvariable z muß über eine Art Gedächtnis verfügen. Dies resultiert aus der Überlegung, daß nicht nur die Gegenwart (Zeitpunkt t), sondern auch die Vergangenheit (Zeitpunkte $0, \dots, t-1$) einer Siedlung auf ihre zukünftige Entwicklung wirkt.
- ?? Die Evolution im „*Game of Life*“ läuft streng deterministisch – und somit eher unrealistisch – ab. Zur Modellierung von realer Siedlungsentwicklung ist demgegenüber die Integration von stochastischen Komponenten unbedingt notwendig.

Stadt ist geprägt durch mannigfaltige Aktivitäten (Standortwahl, Wohnungsbau, andere direkt oder indirekt raumwirksame Investitionen, etc.). In erster Annäherung wird daher ein ZA zur Simulation von vorerst noch unstrukturierter Aktivität entwickelt. Die diesbezüglichen Ausführungen folgen in Diktion und Vorgangsweise im wesentlichen [WU 1998], der untersucht hat, wie das Entstehen von Subzentren in einem städtischen Gefüge mit Hilfe von ZA nachgebildet werden kann.

Die Stadt besteht dabei aus einem regelmäßigen Quadratgitter mit den Koordinaten $ij \in G$. Der Zustand z zum Zeitpunkt t wird durch zwei Variable a und q beschrieben:

$$z^t = (a^t, q^t) \quad \text{mit} \quad a^t = (a_{ij}^t) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } ij \text{ zum Zeitpunkt } t \text{ aktiv ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$q^t = (q_{ij}^t) = q_{ij}^0 + \sum_{k=1}^t a_{ij}^k$$

Die ij -Matrix a bildet aktuelle Aktivität ab – sie steht somit für die Gegenwart – und in der Matrix q wird vergangene Aktivität akkumuliert. Um aus dem Zustand z zum Zeitpunkt t den Zustand zum Zeitpunkt $t+1$ abzuleiten, wird

$$z^{t+1} = f(z^t)$$

als Übergangsfunktion des ZA eingeführt. Da die Zustandsvariable q im mathematischen Modell vollständig von der Aktivitätsvariable a abhängt, reduziert sich die Funktion f auf die Frage: „Wo entsteht neue Aktivität und warum?“. Um vor allem das „Warum“ zu modellieren, wird eine zusätzliche Funktion ϕ in die Funktion f integriert:

$$a_{ij}^{t+1} = f(\phi(ij, t))$$

Die Funktion ϕ wird als *cognition function* bezeichnet und bildet die subjektive *Wahrnehmung* der individuellen Entscheidungsträger ab, deren Beschlüsse ja letztlich in einem sozialen System für das Aufkommen von Aktivität verantwortlich sind. Die Funktion ϕ hat als Ergebnis ein Bündel von Variablen, auf deren Grundlage die Funktion f , die sog. *action function*, die Entscheidung zur Aktivität oder Nichtaktivität fällt. Die Funktion f modelliert somit das *Verhalten* der Entscheidungsträger.

Im Beispiel „*Game of Life*“ ist das Ergebnis von ϕ der Zustand der Zelle selbst und die Summe der lebenden Zellen in der 8er-Umgebung und f die Überföhrungsfunktion aus Abb. 1 rechts.

SIMULATION „BOOMTOWN“

In der ersten Simulation „Boomtown“ soll folgendes, zutiefst menschliches Verhalten der Entscheidungsträger modelliert werden:

- ?? Jeder rennt in die Gegend, wo alle hinrennen.
- ?? Standorte, wo schon sehr viele waren, werden eher gemieden.

Als subjektive Wahrnehmungskomponente des ZA wird die *cognition function*

$$n_{ij}^t = \sum_{kl \in G} a_{kl}^t \cdot q_{ij}^t \cdot \exp(-\alpha \cdot \text{dist}(ij,kl))$$

verwendet. Sie liefert zwei Variable: (1) die Summe n der Aktivitäten a innerhalb einer bestimmten Entfernung max („Die Gegend, wo alle hinrennen“) und (2) die weiter oben definierte Aktivitätskumulierungsfunktion q („Wo schon viele waren“).

Die *action function* f entscheidet auf Basis der kognitiven Wahrnehmung n und q , ob ein Standort ij aktiviert werden soll oder nicht. Zu ihrer Modellierung wird ein nutzentheoretischer Ansatz gewählt, der hier vereinfacht mit linear verknüpften Nutzentermen und ohne Kalibration und Zeitindex t dargestellt wird:

$$a_{ij}^t = f(U_{ij})$$

mit $U_{ij} = \beta \cdot n_{ij} - \gamma \cdot q_{ij}$

U_{ij} ist dabei der Nutzen, der aus der Aktivierung (Investition) in ij zu erwarten ist, und β , γ und α sind zu schätzende Parameter, auf deren Kalibration an dieser Stelle jedoch verzichtet wird. In der folgenden Simulation werden die Werte 0, 4 und -1 verwendet, also ein positiver Nutzenfaktor für aktuelle Aktivität in der Umgebung und ein negativer Faktor für bereits vergangene Aktivität am betrachteten Standort.

Antwort auf die Frage, ob nun ein Standort tatsächlich aktiviert wird oder nicht, liefert die *descrete choice theory*, deren Wahrscheinlichkeitskalkül unter bestimmten Verteilungsannahmen im hier vorliegenden binären Fall (nur Entscheidung *ja/nein*) einen logistischen Verlauf der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Form

$$prob_{ij} = \text{prob}(a_{ij} = 1) = \frac{1}{1 + e^{-U_{ij}}}$$

unterstellt. $prob_{ij}$ ist die Wahrscheinlichkeit, daß der Standort ij aktiviert wird (Abb. 4).

Eine der drei Kardinalforderungen zu Beginn dieses Abschnittes war die Einführung einer stochastischen (i.e. zufälligen) Komponente in die Überföhrungsfunktion f .

Diese Forderung wird hier erfüllt durch den (lokalen) Vergleich der Aktivitätswahrscheinlichkeiten $prob_{ij}$ mit einer Matrix aus gleichverteilten Zufallszahlen $random_{ij}$ (Abb. 5).

Die resultierende Verteilung der Aktivitäten ist damit direkt proportional zu den vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten.

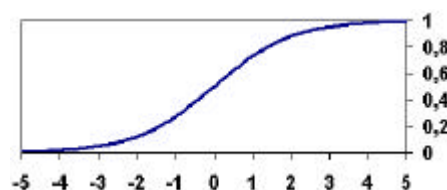


Abb. 4: logistische Wahrscheinlichkeitsfunktion $prob_{ij}$

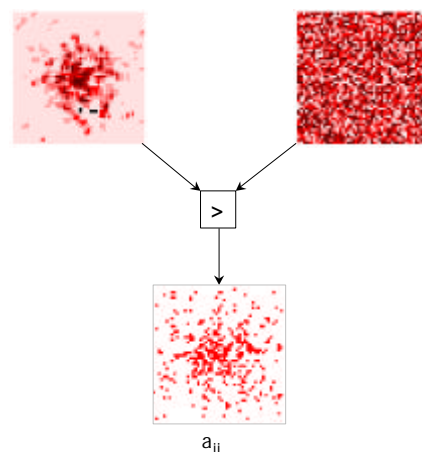


Abb. 5: stochastische Simulation

Das *MapModel* zu „Boomtown“ ist natürlich etwas komplexer als beim simplen „Game of Life“, folgt aber genau der zuvor besprochenen Funktionalität (Abb. 6).

Drei zusätzliche *Linear Stretch*-Funktionen bewirken die Standardisierung der Nutzenterme, was die Einhaltung eines bestimmten globalen Aktivitätserwartungswertes gewährleistet.

Vor Beginn der eigentlichen Simulation muß noch der Anfangszustand des Systems zum Zeitpunkt $t=0$ festgelegt werden. Dazu wird hier beispielhaft eine monozentrische Stadt mit der Anfangsaktivitätssumme A_0 im Zentrum angenommen. Diese Aktivitätssumme soll mit der Entfernung zum Stadtzentrum exponentiell abnehmen, also

$$q_{ij}^0 = A_0 e^{-bd_{ij,0}}$$

wobei b ein zu kalibrierender Distanzsensibilitätsparameter ist und d die Entfernung zum Stadtzentrum darstellt. Die aktuellen Aktivitäten a zu Beginn der Evolution werden analog Abb. 5 mit ebenfalls exponentiell abnehmender Dichte mit wachsender Entfernung zum Zentrum berechnet (Abb. 7, Generation 0).

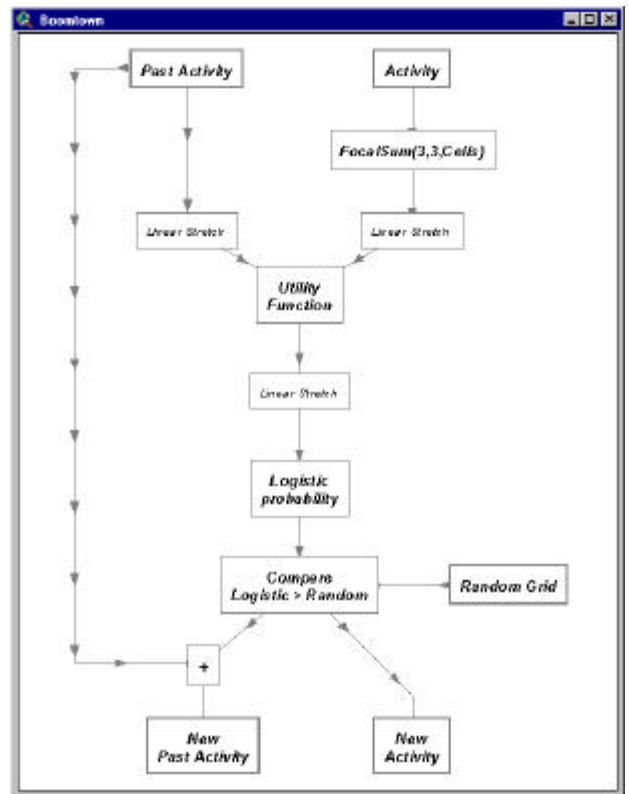


Abb. 6: das MapModel zu „Boomtown“

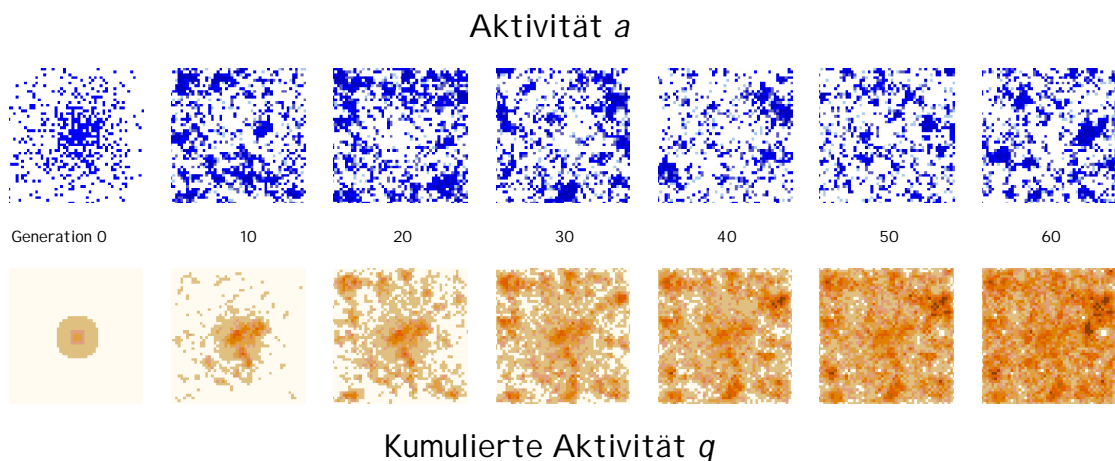


Abb. 7: Simulationsergebnisse „Boomtown“

In der Simulation bemerken die Entscheidungsträger bald, daß das Stadtzentrum bereits „abgegrast“ ist ($t=0-10$) und verlegen deshalb die Aktivität auf den noch jungfräulichen Rand der Region ($t=10-40$). Stochastische Unregelmäßigkeiten, verstärkt durch die Parameter der Übergangsfunktion, verursachen immer wieder das Entstehen von kurzfristig stabilen Subzentren („Boomtowns“). Diese bleiben solange bestehen, bis es in bislang noch weniger frequentierten Bereichen zu anderen Zusammenrottungen an Aktivität kommt. In weiterer Folge verlagert sich der Schwerpunkt der Aktivität zunehmend in die „Halbdistanz“ zwischen Zentrum und Peripherie ($t=40-60$). Das Spiel setzt sich solange fort, bis die gesamte Region ungefähr gleichmäßig mit Aktivität gefüllt ist. Danach „wabert“ die Welt nur noch chaotisch wie eine – je nach Rechnerleistung und Parametereinstellung mehr oder weniger – zäh brodelnde „Ursuppe“ vor sich hin ...

SIMULATION „LANDUSE“

Um aus dieser „Ursuppe“ eine richtige Stadt mit vielfältiger Nutzungsstruktur zu formen, bedarf es weiterer Veränderungen des ZA. Die folgenden Ausführungen sind vor allem inspiriert durch [WHITE et al. 1997], die sich erfolgreich an der Simulation der historischen Entwicklung der Landnutzung der amerikanischen Stadt Cincinnati mit Hilfe von ZA versucht haben.

?? Den „Ursuppen-Einheitsbrei“ an Aktivitäten in mehrere Landnutzungsklassen auflösen, also z.B.:

$$a'_{ij} \ ? \ z \ ? \ Z \ ? \ \{ \text{vacant, housing, commerce, road} \}$$

?? Einführung von Distanzklassen d und entsprechende Adaption der *cognition function* ??:

Waldo Tobler's *first law of geography* folgend, wonach alles miteinander verknüpft ist, nur Näheres eben mehr als Entfernteres [TOBLER 1970], wird der bestehende Ansatz um Distanzklassen und damit verbundene landnutzungsspezifische Distanzringe um die einzelnen Zellen erweitert.

$$c'_{ij}(t) \ ? \ \int_{d,z} c'_{ij} \ ? \ \text{mit} \ c'_{ij} \ ? \ \int_{\substack{kl \ ? \ G \\ \text{dist}(ij,kl) \ ? \ d}} I'_{kl,z} \ \text{und} \ I'_{kl,z} \ ? \ \begin{cases} 1 & \text{wenn } a'_{kl} \ ? \ z \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die *cognition function* ?? liefert also für jede Kombination aus einer Distanzklasse d und einer Landnutzung z eine Variable c mit der Anzahl der Zellen in Distanzklasse d mit Landnutzung z , betrachtet vom jeweiligen Standort ij aus.

?? Adaption der *action function* f durch die Definition von landnutzungsspezifischen Potentialen p :

$$p'_z \ ? \ \int_{d,y} w_{d,z,y} * c'_{d,y}$$

Die distanzklassen- und landnutzungsspezifischen Gewichte w drücken den potentiellen Nutzen aus, welcher aus der Existenz einer Landnutzungseinheit y innerhalb der Distanzklasse d auf die Landnutzung z am Standort ij zu erwarten ist. Zu beachten ist, daß diese Gewichte sowohl positiv als auch negativ sein können, was die Modellierung von differenzierten, wechselseitigen Anziehungs- und Abstoßungsbeziehungen zwischen einzelnen Landnutzungsklassen ermöglicht. Die folgende Tabelle enthält keine konkreten Zahlenwerte, sondern soll nur eine Tendenz vermitteln, mit welchen Gravitationskräften das anschließende Experiment durchgeführt wurde (Abb. 8, Zahlenwerte siehe Abb. 9).

So wurde z.B. angenommen, daß die Nutzungsart *commerce* in ihrer unmittelbaren Umgebung sehr positiv auf andere *commerce*-Zellen wirkt (gemeinsames Anziehen von Kundenpotential, +++), hingegen im etwas weiteren, zweiten Ring eher negativ (Gefahr des „Absaugens“ potentieller Kunden, --).

z \ y \ d	vacant		housing		commerce		roads	
	1	2	1	2	1	2	1	2
vacant	+							
housing			++	+	-	++	-	+
commerce			+	+	+++	-	++	+

Abb. 8: Potential-Gewichtungparameter (Tendenz)

?? Bessere Kontrolle der Evolution der ZA:

Dies wird ermöglicht durch die Einführung von extern vorgegebenen, nutzungsspezifischen Überlebenswahrscheinlichkeiten und Wachstumsraten. Der stochastische Mechanismus der *action function* wird dergestalt angepaßt, daß in jeder Generation die „richtige“ Anzahl von Nutzungszellen „sterben“ und „geboren“ werden – das natürlich alles proportional zu den Nutzungspotentialen p in jeder Zelle. Daneben werden manche Zellen apriori als unveränderbar definiert, sog. *fixed features* (in der folgenden Simulation sind das die Straßen und aus methodischen Gründen der Rand der Region. In einer „real-world“-Anwendung sind hier etwa auch historische Stadtzentren oder andere Siedlungskeime denkbar.

Im *MapModel* zu *Landuse* wird zuerst die aktuelle Landnutzung in ihre einzelnen Kategorien zerlegt (Abb. 9).

Die jeweiligen Anzahlen an Zellen in den beiden Distanzklassen $d_1=1-2\ cells$ und $d_2=3-4\ cells$ werden berechnet (*RingStatistics*) und fließen mit Gewichten w versehen in die Potentialberechnungen ein.

Zusammen mit den exogenen Wachstums- und Überlebensraten und den vorgegebenen *fixed features* erzeugen diese Potentiale – vom Zufall getrieben – eine neue *Landuse*-Generation.

Ausgangspunkt der folgenden drei Simulationsläufe ist eine „leere“ Region, die nur die Straßen enthält (Abb. 10).

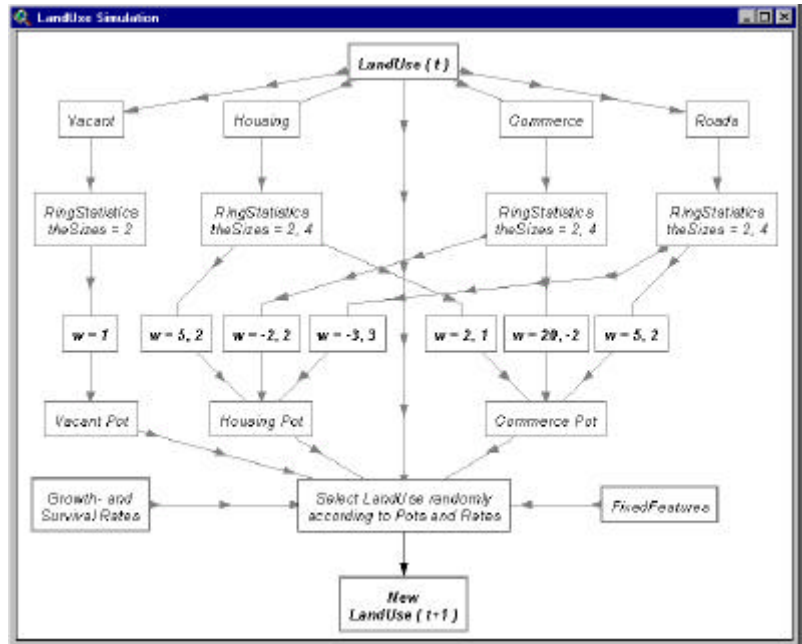


Abb. 9: Das MapModel von „Landuse“

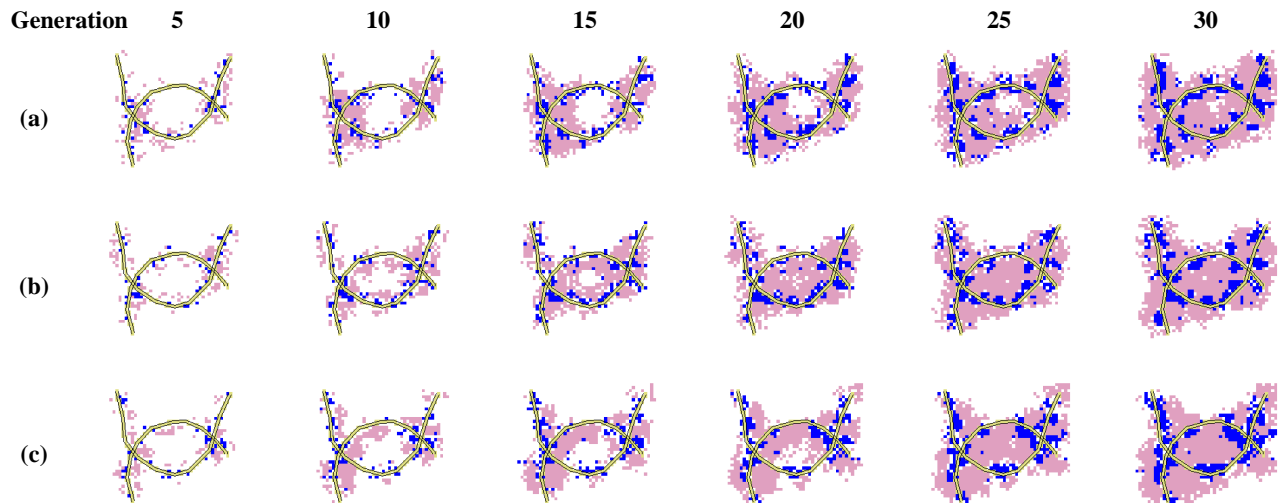


Abb. 10: Simulationsergebnisse „Landuse“: (a) $w_{1,housing,housing}=2, w_{2,housing,commerce}=5$, (b) stochastische Variante von (a), (c) $w_{1,housing,housing}=5, w_{2,housing,commerce}=2$

Die dunklen *commerce*-Zellen (Abb. 10) entstehen in allen Simulationsläufen infolge des hohen *road*-Potentialgewichtes vorwiegend in unmittelbarer Nähe von Straßen ($w_{1,commerce,roads}=5$, siehe auch Abb. 9).

Die hohe Affinität von *housing* zu *commerce* im zweiten Distanzring ($w_{2,housing,commerce}=5$) in den Simulationen (a) und (b) verursacht das Entstehen von vielen, relativ kleinen und verstreut liegenden *commerce*-Zentren. Dieser Effekt wird zusätzlich verstärkt durch die Neigung von *commerce*-Zellen, andere *commerce*-Zellen in der weiteren Umgebung zu meiden ($w_{2,commerce,commerce}=-2$).

Im Lauf (c) wird die enge Bindung von *housing* zu *commerce* etwas abgeschwächt ($w_{2,housing,commerce}=2$) und das *housing*-interne Zusammenballungspotentials gleichzeitig etwas angehoben ($w_{1,housing,housing}=5$).

Das wirkt einer Durchmischung der beiden Nutzungsarten entgegen, und gemeinsam mit der unverändert hohen Agglomerationstendenz der Landnutzung *commerce* ($w_{1,commerce,commerce}=20$) entstehen infolgedessen vergleichsweise weniger, dafür aber größere *commerce*-Zentren.

RESÜMEE UND AUSBLICK

Die eingeschlagene Vorgangsweise erinnert nicht ganz zu Unrecht an das bekannte und verbreitete Computerspiel „SimCity“ und scheint tatsächlich ein gangbarer Weg zur Modellierung der chaotischen Komponenten des Wachstums von Siedlungsstrukturen zu sein [BATTY et al. 1997].

Ein besonderer Vorteil des hier gewählten Ansatzes (Implementierung von ZA mit *ArcView/MapModels*) besteht darin, daß theoretische und inhaltliche Überlegungen ad hoc und ohne viel Aufwand in lauffähige Computermodelle übersetzt und sofort experimentell einer empirischen Validierung zugeführt werden können [RIEDL und KALASEK 1998]. Aus der dadurch entstehenden, fast direkten Rückkopplung kann unmittelbar neue Erkenntnis gewonnen werden, welche wiederum der Kalibration von Modellparametern oder sogar einer etwaigen Anpassung der zugrundeliegenden Theorie als Ausgangspunkt dient.

Weitere theoretische Überlegungen und empirische Untersuchungen stehen jedenfalls an:

- ?? Prüfen, welche Auswirkungen die Größenordnung und systematische Variation von Modellparametern auf das Ergebnis des ZA haben (Sensibilitätsuntersuchungen).
- ?? Messen von statistischen Kenngrößen, wie z.B. der fraktalen Dimension einer Landnutzungsverteilung und vergleichen mit der Realität ([WU 1998], [BATTY und LONGLEY 1994]).
- ?? Einbau von nutzungsspezifischen Eignungsfaktoren bezüglich naturräumlicher Gegebenheiten (Höhenlage, Hangneigung, Bodenart, etc.), sowie eine verbesserte Abbildung des Verkehrssystems (Bahn, Straßen inkl. Hierarchie, andere Modi) durch verschiedene *accessability indices* [WHITE et al. 1997].
- ?? Bessere Integration externer Parameter und Ereignisse (Wachstumsraten, Migrationssaldi, etc.) in Form von globalen „Storyboards“, die den ZA quasi steuern und dirigieren (das „Gaspedal“ der Evolution).
- ?? Modellierung von sozialen Anpassungs- und Segregationsprozessen in multiethnischen Gesellschaften [PORTUGALI et al. 1997].

Bei aller Euphorie darf natürlich nicht vergessen werden, daß es vermutlich nicht – oder nur sehr schwer – möglich sein wird, aus der Anwendung von ZA konkrete einzelne Ereignisse in der realen (sozialen) Welt vorherzusagen. Nichtsdestotrotz können ZA wertvolle Instrumente zur Überprüfung von Theorien sein und aus dieser Befassung heraus Erkenntnisse für die Planung bringen. ZA dienen in diesem Zusammenhang nicht zur Simulation der Entwicklung *realer* Städte, sondern im Sinne ihrer Theorie (denk-)möglicher Städte, eben POSSIBLE CITIES.

LITERATUR

- BATTY M., COUCLELIS H., EICHEN M., 1997: „Urban systems as cellular automata“, in: *Environment and Planning B: Planning and Design* 24(2), p.159-164.
- BATTY M., LONGLEY P., 1994: *Fractal Cities*, Academic Press, London.
- CAMARA A., FERREIRA F., CASTRO P., 1996: „Spatial simulation modelling“, in: Fischer, Scholten, Unwin (Eds.): *Spatial Analytical Perspectives on GIS (GISDATA 4)*, Taylor&Francis, p.201-212.
- COUCLELIS H., 1997: „From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation“, in: *Environment and Planning B: Planning and Design* 24(2), p.165-174.
- PORTUGALI J., BENENSON I., OMER I., 1997: „Spatial cognitive dissonance and sociospatial emergence in a self-organizing city“, in: *Environment and Planning B: Planning and Design* 24(2), p.323-343.
- RIEDL L., KALASEK R., 1998: „MapModels – Programmieren mit Datenflußgraphen“, in: Strobl, Dollinger (Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung: Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 1998*, Wichmann, Heidelberg.
- TAKEYAMA M., COUCLELIS H., 1997: „Map dynamics: integrating cellular automata and GIS through Geo-Algebra“, in: *International Journal of Geographic Information Science* 11(1), p.73-91.
- TOBLER W., 1970: „A computer movie simulating urban growth in the Detroit region“, in *Economic Geography* 46(2).
- TOBLER W., 1979: „Cellular geography“, in *Philosophy in Geography*, Gale, Ollson (Eds.), D.Reidel, Dortrecht, p.379-386.
- TOMLIN C. D., 1990: *Geographic Information Systems and Cartographic Modelling*, Prentice-Hall, Englewood Cliff, New Jersey.
- WEIMAR J., 1998: *Simulations with cellular automata*, <http://www.tu-bs.de/institute/WiR/weimar/ZAscriptnew/intro.html>
- WHITE R., ENGELEN G., ULJEE I., 1997: „The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics“, in: *Environment and Planning B: Planning and Design* 24(2), p.323-343.
- WU F., 1998: „An experiment on the generic polycentricity of urban growth in a cellular automatic city“, in: *Environment and Planning B: Planning and Design* 25(5), p.731-752.