

# Simulation suburbaner Siedlungsentwicklung im Großraum Wien mittels räumlicher Agenten und Zellulärem Automaten

Wolfgang LOIBL und Tanja TÖTZER

Mag. Dr. Wolfgang Loibl, Dipl.-Ing. Tanja Tötzer ARC Seibersdorf research GmbH, Systemforschung/Umweltplanung,  
[wolfgang.loibl@arcs.ac.at](mailto:wolfgang.loibl@arcs.ac.at)

## 1. EINLEITUNG

Siedlungsentwicklung ist ein komplexer Prozess, der von verschiedensten ökonomischen, sozialen und demographischen Wirkungszusammenhängen geprägt wird. Um die damit zusammenhängenden Probleme in den Griff zu bekommen, wurde bereits seit Jahrzehnten versucht die Siedlungsentwicklung der Vergangenheit und Szenarien möglicher künftiger Entwicklungen durch Modelle zu simulieren (z.B. Alonso 1964, Lowry 1964, Forrester 1996).

Die Makrosimulationsmodelle vergangener Jahrzehnte, die von einer Stadt als Einheit bzw. bestehend aus wenigen homogenen Modell-Stadtviertel ausgegangen sind, führten dabei nicht zum gewünschten Ergebnis. Erst wachsende Rechnerkapazitäten und kleinräumige Datengrundlagen (etwa aus der Fernerkundung) provozierten Modellkonzepte, die räumlich-dynamische, selbst-regulierende Entwicklungen nachvollziehbar machten. Seit etwa 15 Jahren werden derartige Mikrosimulationsmodelle basierend auf Zellulären Automaten (CA) eingesetzt (z.B. Couclelis 1985, 1997, Batty et al. 1997, White et al. 1997, Torrens 2000). Dabei wird der lokale Nutzungswandel vor allem von lokalen Nachbarschaftsstrukturen der Landnutzung gesteuert. Ein derartiger Ansatz führt allerdings dazu, dass ähnliche Nachbarschaftsstrukturen immer gleichförmige Allokationsbedingungen nach sich ziehen.

Da das (suurbane) Siedlungswachstum nicht nur von lokalen Bedingungen abhängt und deshalb nicht in allen Teilräumen ähnlich schnell verläuft, bedarf es einer Differenzierung der Nachfrage nach Wohnfläche. Eine geeignete Methode hierfür ist ein polyzentrisch orientierter Mikrosimulationsansatz, der die unterschiedliche Wachstumsdynamik innerhalb des Siedlungssystems basierend auf den eigentlichen treibenden Kräften der Suburbanisierung - etwa den Wanderungsströmen - simuliert. Solche Modelle operieren mit „Agenten“, (vielen einzelnen) virtuellen Akteuren, die entsprechend vorgegebener Eigenschaften auf ihre Umwelt jeweils unterschiedlich reagieren und infolge ihrer Interaktionen mit der Umwelt komplexe räumliche Entwicklungsmuster entstehen lassen. Agentenbasierte Modelle werden zur Simulation von Stadtentwicklung erst seit wenigen Jahren eingesetzt (Wegener & Spiekerman 1997, Portugali 1999, Torrens, 2001).

Das hier beschriebene Modell greift nun beide Ansätze auf, Anfangs wurde es als Zellulärer Automat konzipiert, schließlich jedoch als Kombination eines räumlichen Agentenmodells mit einem CA umgesetzt.

## 2. MODELLSTRUKTUR

Das Modell simuliert die Siedlungserweiterung im Stadtumlandbereich als Effekt der Zuwanderung. Die Nachfrage nach neuer Wohnbebauung wird über regionale Attraktivitätsmuster sowie über Restriktionen (Verfügbarkeit an Bauland, Widmungen, naturräumliche Beschränkungen) gelenkt. Der Bauungsdruck, induziert durch Wanderungsströme, entlädt sich auf jenen Flächen, die aufgrund ihrer Nachbarschaftsbeziehungen günstige Rahmenbedingungen für neue Bebauung aufweisen. Die Entscheidung wohin gewandert wird, erfolgt anhand regionaler Attraktivitätskriterien und den lokal vorhandenen Möglichkeiten für Siedlungserweiterung oder Verdichtung. Ein Zellulärer Automaten entscheidet dabei, ob und wo sich in der jeweiligen Zielgemeinde die Landnutzung ändert. Für jene Gemeinden, wo keine bzw. nur geringe Siedlungserweiterung möglich ist, bzw. für jene Zuwanderer, die Geschößwohnformen in Anspruch nehmen wollen, wird eine potentielle Bebauungsdichte als Lenkungskriterium für eine mögliche Verdichtung herangezogen.

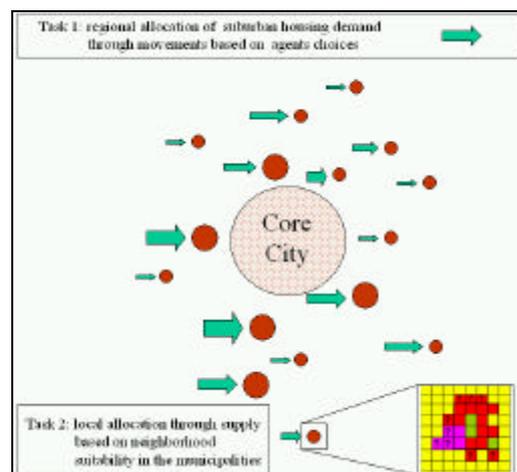


Abb.1: Integration des räumlichen Agentenmodells und des Zellulären Automaten in ein kombiniertes Modell zur Simulation suburbanen polyzentrischen Wachstums auf lokaler Ebene

Abbildung 1 verdeutlicht das Modellkonzept: die Kernstadt ist von Gemeinden - Entwicklungskern mit unterschiedlicher Wachstumsgeschwindigkeit - umgeben. Je nach Attraktivität der Gemeinden ist (unabhängig von ihrer Siedlungsgröße - dargestellt durch unterschiedliche Kreisgrößen) mit stärkerer oder schwächerer Zuwanderung (dargestellt durch Pfeile unterschiedlicher Breite) und damit entsprechendem Flächenverbrauch bzw. Verdichtung zu rechnen. Nach Auswahl einer Gemeinde als Wanderungsziel (in

der Abbildung unten vergrößert dargestellt) wird innerhalb der Gemeinde "gesucht", ob passende Flächen für die jeweiligen Zuwanderer vorhanden sind. Wenn ja erfolgt eine Nutzungsänderung (oder eine Änderung der Bebauungsdichte). Das Modell erfasst nicht nur Wohnbauentwicklung sondern auch Gewerbe-/Industrieflächenwachstum. In dieser Präsentation konzentrieren wir uns auf den Wanderungs-induzierten Wohnbaulandverbrauch.

Das formale Modell ist mehrstufig aufgebaut (vgl. dazu Abb.2).

(a) Makroebene (Task 1): Bevölkerungsprognose

Die Bevölkerungsentwicklung ist die Basis für alle weiteren Modellierungsschritte zur Simulation der Wohnbaulandentwicklung. Auf die Makroebene – den Task 1 - wird hier nicht weiter eingegangen. Die Entwicklung der Bevölkerungszahlen wird den nationalen Bevölkerungsprognosen nach Bezirken (bzw. Bezirks-Aggregaten) entnommen, wobei davon ausgegangen wird, dass (wie bisher in den vergangenen Jahrzehnten) Bevölkerungswachstum ausschließlich durch Zuwanderung verursacht wird.

(b) Mesoebene (Task 2): Einwohnerallokationsmodell

Der entscheidende Modell-Task verteilt die Nachfrage nach Wohnfläche im Stadtumland und regelt damit die unterschiedliche Entwicklungsgeschwindigkeit. Die Simulation erfolgt über ein räumliches Agentenmodell (vgl. 2.1).

(c) Mikroebene (Task 3): das Landnutzungs(allokations-)modell auf der lokalen Ebene

Die endgültige Wahl des (Wohn-)Standortes erfolgt anhand der lokalen Nachbarschaftsbedingungen sowie der Flächenwidmung. Die Berechnung erfolgt mittels Zellulärem Automaten. (vgl.2.2).

Task 2 und Task 3 werden jeweils nacheinander in Such-Iterationen abgearbeitet.

Die folgende Grafik zeigt die Modellstruktur und den Ablauf der Modellierung in den einzelnen Tasks.

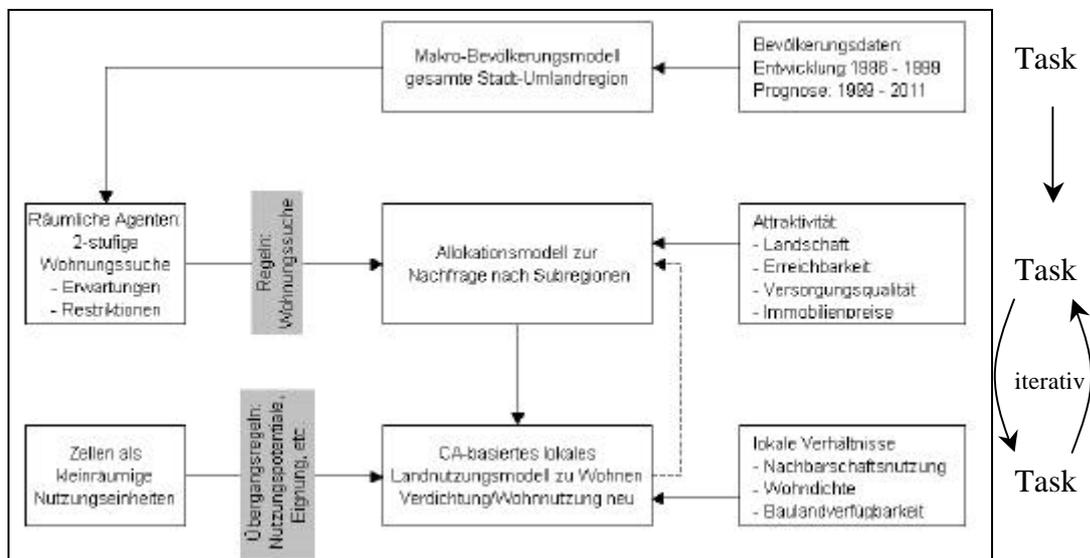


Abb.2: Modellstruktur und Modellschritte

## 2.1 Räumliches Agentenmodell (Task2)

Agenten-basierte Modelle sind Mikrosimulationsmodelle, in denen die einzelnen Akteure (oder Gruppen von Akteuren) basierend auf dem Prinzip der Selbstorganisation individuell im System agieren. Als Agenten werden nach Franklin und Graesser (1996) Objekte angesehen, die mit ihrer Umwelt in Wechselwirkung stehen, Veränderungen wahrnehmen und ihren individuellen Möglichkeiten und Interessen entsprechend darauf reagieren. Agentenmodelle sind damit in der Lage, komplexe Systeme mit vielen Aktionen einzelner Individuen oder Individuengruppen zu simulieren. Mit Hilfe eines räumlichen Agentenmodells wird hier versucht, das unterschiedliche Nachfragerverhalten bei der Suche und Wahl eines Wohngebietes abzubilden. Erst unter dieser 'agentorientierten' Sichtweise kann komplexe Stadtentwicklung als Ausdruck und Ergebnis menschlicher Handlungen modelliert werden.

In diesem Modell sind die Agenten wandernde bzw. wanderungswillige Personen/Haushalte/Unternehmer. Das Verhalten der Agenten hängt von ihrer Wahrnehmung/ihrem Wissen über die Region, von ihren Wünschen, ihren sozioökonomischen Rahmenbedingungen und von den Möglichkeiten, diese Wünsche am Zielstandort umzusetzen, ab. Es wird dabei von einem Suchprozess der Nachfrager-Haushalte ausgegangen, in dem potentielle Wohngemeinden nach ihrer Attraktivität beurteilt werden und bei positiver Beurteilung des Wanderungszieles die Wanderung angestrebt wird.

Modellregion ist der suburbane Raum ca 30 km im Umkreis um die Wiener Stadtgrenze (Loibl und Kramer 2001). Die Region sind gegliedert in über 1000 Zählsprengel, 180 Gemeinden und 9 (Teil-) Bezirke. Als statistische Daten zur Simulation der Wohnbauflächenentwicklung gehen vor allem Wohnbevölkerungszahlen 1971-2001 und die Wanderungsmatrizen 1971-1991 jeweils gegliedert nach sozioökonomischen Kriterien ein. Alle Daten entstammen den Volkszählungen 1971-2001. Sie liegen mit Ausnahme der Wanderungsdaten Zählsprengelbasis vor, Wanderungsmatrizen (und Bevölkerungsdaten 2001) nur auf Gemeindebasis.

Wanderer haben entsprechend ihrer sozioökonomischer Charakteristika unterschiedliche Präferenzen bei der Auswahl des Wanderungsziels. Um nun sich daraus ergebenden komplexen Strukturen der Siedlungsentwicklung nachvollziehen zu können,

müssen diese Präferenzen analysiert werden. Die sozioökonomische Typisierung erfolgt die Ausbildung, die eine hohe Beziehung zum Einkommen und damit zur finanziellen Leistungsfähigkeit hat, welche die Wahl des Wohnstandortes entscheidend beeinflusst. Die Verhaltensregeln bezüglich der Wanderung in bestimmte Wohngebiete (Gemeinden) werden demzufolge in Abhängigkeit von ihrer sozioökonomischen Position festgelegt. 4 Agentengruppen für Wanderung werden definiert (Loibl & Tötzer, 2001):

- wohlhabende Haushalte mit Präferenz Einfamilienhaus in guten Lagen mit guter Ausstattung und guter Erreichbarkeit,
- Mittelstandshaushalte mit Präferenz Einfamilienhaus in Lagen mit geringen Grundstückspreisen und adäquater Erreichbarkeit,
- relativ wohlhabende Haushalte mit Präferenz für gute Lagen mit guter Ausstattung und guter Erreichbarkeit mit Wohnform Geschosswohnungsbau,
- Mittelstandshaushalte mit Präferenz für geringe Grundstückspreise und Geschosswohnungsbau.

Zwei weitere Agentengruppen simulieren die Errichtung/Miete von Zweitwohnsitzen bzw. die Inanspruchnahme von Industrie- und Gewerbeflächen. Wir konzentrieren uns hier auf die Siedlungsentwicklung durch Wohnbauflächenzuwachs.

Um die Siedlungsentwicklung ausgehend von der Wohnungsnachfrage zu modellieren, gehen wir vom Wanderungsdruck (vor allem aus der Kernstadt) ins Stadt-Umland aus. Der Region werden dazu die Zuwanderer als Agenten-“Reservoir” zugeordnet. Als treibende Kräfte der Wanderungsbewegungen im suburbanen Raum werden keine ökonomischen Kriterien wie Arbeitsplatzangebot u.ä., wie sie für großräumige Wanderung gelten, herangezogen. Vielmehr konnte nachgewiesen werden, dass die regionale und lokale Attraktivität bzw. der Attraktivitätsgradient zwischen Kernstadt und Umland die Intensität und Richtung der Wanderungen in der Agglomeration beeinflusst. Folgende regionalen Attraktivitäten wurden für die räumliche Eingrenzung der Standortwahl identifiziert (Loibl und Kramer, 2001):

1. die Kosten (Mieten, Wohnungs-/Haus-/Grundstückspreise...)
2. Erreichbarkeit der Kernstadt, lokales Arbeitsplatzangebot
3. Versorgungsinfrastrukturangebot (Schulen, Freizeiteinrichtungen...)
4. Wohnumfeld (z.B. Nachbarschaft, Ruhelage, Waldrand, Hanglage, See-Nähe....)

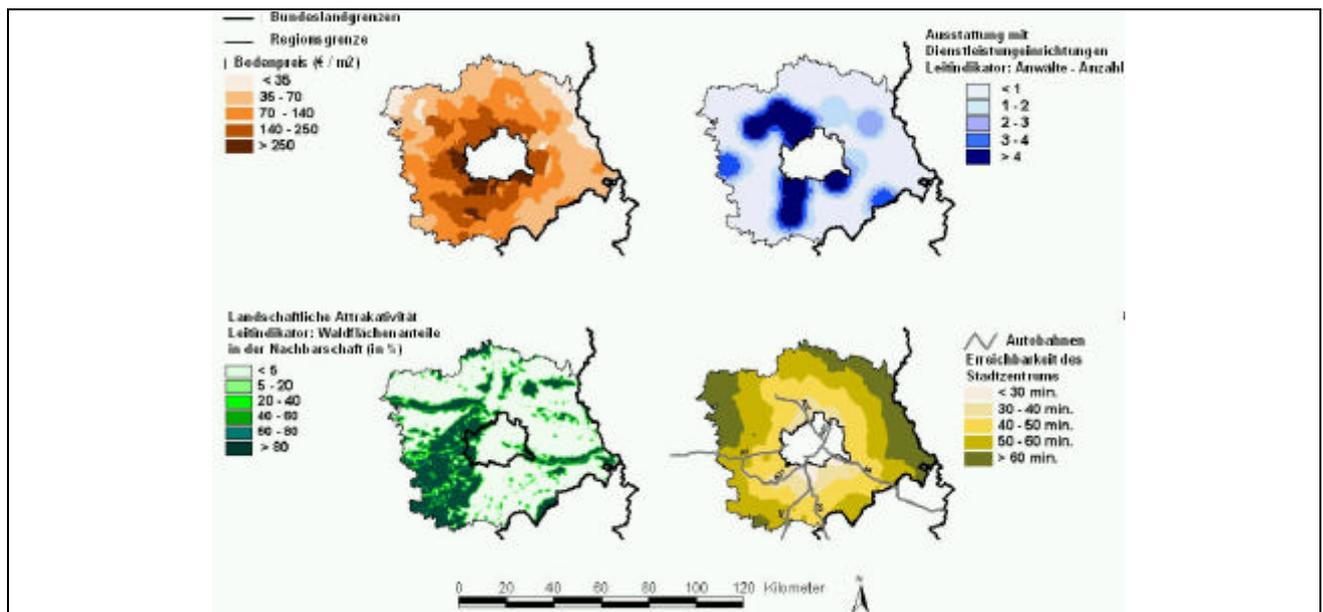


Abb.3: Regionale Attraktivitätslayer

Jeder Agent versucht entsprechend seiner Wahrnehmung/seinem Wissen von der Umwelt einen Standort zu finden, der seinen Bedürfnissen gerecht wird. Die regionalen Attraktivitätslayer (siehe Abb.3) stellen die Wissensbasis der Agenten für die Wahl ihres Wohnstandortes dar. Die Relevanz und Gewichtung der Attraktivitätskriterien wurden über multiple Regressionsanalysen überprüft bzw. ermittelt. Datenbasis der Analysen waren die Zuwandererzahlen, welche mit den auf Siedlungsflächen gemittelten Attraktivitäten jeder Gemeinde regressionsanalytisch erklärt wurden (Loibl & Kramer 2001).

Die Agentengruppen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ziele und ihrer Restriktionen. Agentenspezifische Grenzwerte oder Zielfunktionen für die Wanderungsentscheidung wurden iterativ über Tests festgelegt, wobei als Prüfkriterium die Übereinstimmung der Modell-Ergebnisse mit der realen Veränderung der Zellen je Gemeinde zum jeweiligen Zeitpunkt in der Beobachtungsperiode gilt. Folgende Entscheidungsregeln wurden für die Zuwanderer in die Stadt-Umland-Gemeinden anhand der Wanderungsströme zwischen 1971 und 1991 abgeleitet: für wohlhabende Haushalte stellen in erster Linie gute Wien-Erreichbarkeit (Arbeitsplatz weiterhin in Wien), Ausstattung mit urbaner Service-Infrastruktur (Schulen, Ärzte....), Grünlage und Freizeitqualität und zuletzt die (mittleren) Grundstückspreise je Gemeinde relevante Attraktivitäts-Kriterien dar. Abwanderer mit mittlerer sozioökonomischer Position (abgeleitet aus dem Bildungsstand) orientieren sich vorwiegend an günstigen Grundstückspreisen und akzeptieren dafür geringere landschaftliche Qualität und schlechtere Erreichbarkeiten in größerer Entfernung zur Kernstadt (Loibl & Tötzer 2001).

Die Wanderungsentscheidung wird durch einen stochastischen Prozess formalisiert, wo Nachfrager geeignete Gemeinden suchen, und dabei überprüfen, ob die Entscheidungskriterien für eine Wohnstandortänderung erfüllt sind. Die Wahrscheinlichkeit, welche der Gemeinden aus der Gruppe der potentiellen Zielgemeinden gewählt („gezogen“) wird, wurde aus der mittleren Ausprägung der Attraktivitätslayer jeder Gemeinde und dem Anteil an der Gesamtattraktivität für die jeweilige Agentengruppe, die sich aus den Regressions-Koeffizienten ergibt, abgeleitet. Die definitive Auswahl der potentiellen Zielgemeinden hängt dann von den für die einzelnen Attraktivitätskriterien geltenden Grenzwerten für die jeweiligen Agentengruppen ab. Falls die gezogene Gemeinde keine geeignete Fläche aufweist, wird in einer weiteren Iteration die nächste Gemeinde aus der Gruppe der für den jeweiligen Agenten geeigneten Gemeinden gezogen. Wenn innerhalb der Gemeindegruppe keine Flächen mehr verfügbar sind, sind die Grenzwerte während des Modelllaufs zu ändern.

Die räumliche Entwicklung der gesamte Region kann damit über die unterschiedliche Nachfrage-Wahrscheinlichkeiten im Modell differenziert werden. Siedlungserweiterung erfolgt entsprechend der Nachfrage aus der Zuwanderung: attraktive Gemeinden mit hohem Zuwanderungspotential, eher unattraktive Gemeinden haben geringen Nachfragedruck.

## 2.2 Zellulärer Automat (Task 3)

Die Landnutzungsallokation auf lokaler Ebene - die eigentliche Simulation zukünftiger Landnutzungsstrukturen erfolgt schließlich mithilfe eines Zellulären Automaten. Zelluläre Automaten basierend auf der Theorie der Selbstorganisation. Sie definieren einen 2-dimensionalen Raum als Matrix von Zellen, denen jeweils eine Eigenschaft oder ein Zustand (aus einer vorgegebenen Auswahl) zugewiesen wird. Die Änderung der Zustände erfolgt über Übergangs-Regeln (transition rules). Wesentlich für den CA ist dabei, dass solche Regeln sich auf die Nachbarschaft einer Zelle beziehen. Die Veränderung des Zustandes einer Zelle hängt damit von den Ausprägungen der Zelle selbst und der Nachbarzellen ab und unterliegen damit nicht den traditionellen Annahmen eines Zentrum-Peripherie-Gefälles, also großräumig wirksamer Entwicklungstrends. Entsprechend dieser Sichtweise können Städte für CA-Anwendungen in diskrete räumliche Einheiten im Sinne von Zellen zerlegt werden: Grundstücke, Baublocks, Gebäude oder auch regelmäßige Rasterfelder.

Ausgangspunkt der Modellierung sind somit die Nutzungsmuster, die in einem CA in einer Matrix von Zellen dargestellt werden. Jeder Zelle kann ein möglicher Zustand zugeordnet werden, wobei in unserem Fall die Zustände den verschiedenen Landnutzungsklassen entsprechen. Schematisch lässt sich somit die Stadtentwicklung als Zustandsänderung von Zellen (Bodennutzungsänderungen) über die Zeit wie folgt darstellen (Loibl, 2000):

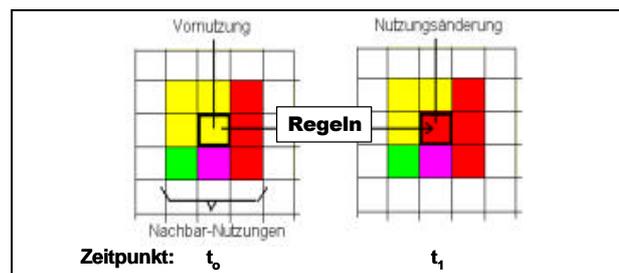


Abb. 4: Landnutzungsänderung und Nachbarschaftsbeziehungen

Die Siedlungsentwicklung ergibt sich somit primär aus dem Zusammenspiel nachbarschaftlicher Landnutzung in den angrenzenden Zellen und deren Veränderung über die Zeit. Die bereits häufig eingesetzte Methode ist im Detail u.a. bei Riedl (1999) unter Bezugnahme auf White et al (1997) beschrieben.

Landnutzungsänderung innerhalb der Gemeinden wird gelenkt durch lokal wirksame Attraktivitäten (Loibl & Tötzer 2001):

1. Landnutzung der Nachbarschaft
2. Bebauungsdichte
3. Flächenwidmung (Nutzung)

Die Definition und Parametrisierung der Regeln erfolgt anhand empirischer Analyseergebnisse. Als räumliche Datenbasis für die Analyse und Modellierung dienen hier digitale Rasterkarten der Landnutzung, die für die Modellregion mit Hilfe von Fernerkundungsdaten aus den Jahren 1968 und 1999 generiert wurden und in einer Auflösung von 100 x 100m Zellengröße vorliegen (vgl. Steinnocher et al. 2000, 2002). Die Landnutzungsklassen grenzen Wohnsiedlungsflächen, Gewerbe/Industrieauflächen, Verkehrsflächen und diverse Freiraumnutzungen (Acker, Weingarten, Grünland, Wald, Wasser...) ab.

Aus diesen Analysen lassen sich grundsätzliche Prinzipien in der Veränderung suburbaner Siedlungsstrukturen (zumindest für den Wiener Raum) ableiten (vgl. Abb.5):

Wohnbauwandzuwachs fand fast ausschließlich (zu 94%) im Anschluß an bestehendes Wohngebiet statt. Die Auswertung der Landnutzungsveränderungen zwischen 1968 und 1999 hat ergeben, dass Siedlungserweiterung mit größter Wahrscheinlichkeit am Siedlungsrand angrenzend an bestehende Wohnbebauung mit ausreichendem Freiflächenangebot und abseits von Industrieflächen zu erwarten ist. Industrieflächenwachstums fand hingegen nur zu 69% im Anschluss an Industrieflächenbestand statt, ca. 1/3 wurde unabhängig von unmittelbar angrenzenden Industrieflächen bebaut. Für Wohn- und Industrieflächen-Erweiterungen wurden zum Großteil landwirtschaftliche Flächen herangezogen. Aus der Analyse der Landnutzungsveränderungen zwischen 1968 und 1999 geht hervor, dass Wohnflächenenerweiterung großteils eingebettet in eine angrenzende Landnutzung von 75% Freilandnutzung (Agrar-, Grünland), und 25% Bauland stattgefunden hat. Diese - an sich trivialen - Aussagen konnte durch räumliche Analysen quantifiziert werden und liefern die Basis für die Formalisierung und Parameterisierung des CA-Regelwerks.

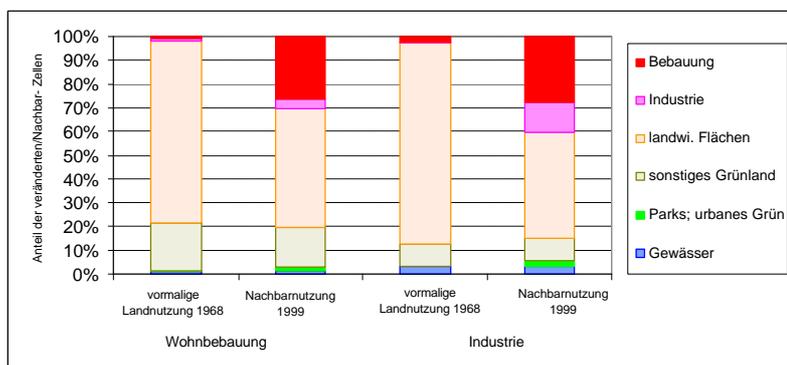


Abb. 5: Landnutzungsänderung im Umland von Wien zwischen 1986 und 1999: vormalige Nutzung der Zellen mit Nutzungsänderung, Nutzung der Nachbarzellen (eigene Berechnungen, ARCS - Landnutzungsklassifikationen 1968,1999)

Die starke Wechselwirkung zwischen Verkehrs- und Siedlungsentwicklung erfordert eine Einbeziehung der Verkehrsinfrastruktur in das Modell. Die Nähe zu Hauptstraßen stellt sich für beide Bebauungsarten als wesentlich heraus. Die unmittelbare Nähe zu Autobahnen stellt für neue Wohnbauflächen eine Attraktivitätsminderung dar: 2/3 aller zwischen 1968 und 1999 neu bebauten Wohnbauflächen wurden in mehr als 4km Entfernung zu Autobahnen errichtet. Der Anschluß an das Autobahnnetz hat für Industrie eine höhere Priorität: immerhin ¼ aller zwischen 1968 und 1999 bebauten Industrieflächen wurden in einer Entfernung von weniger als 1 km zu Autobahnen errichtet. 45 % der Industrie-Zuwachszellen liegen in einer Entfernung von über 4km zu Autobahnen.

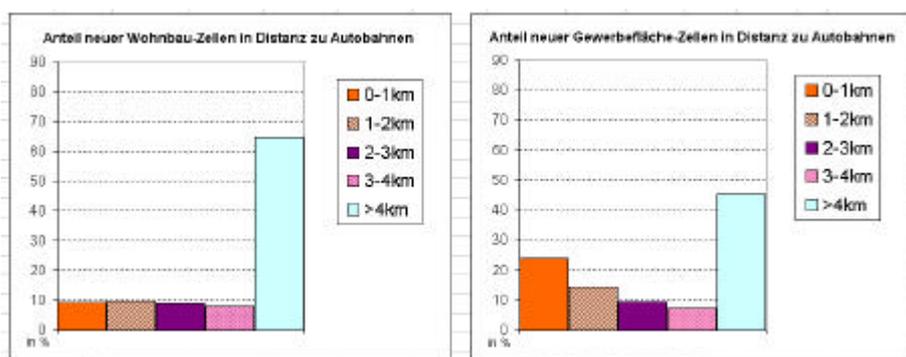


Abb. 6: Wohnbau- und Gewerbeflächen, die zwischen 1968 und 1999 bebaut wurden, in Abhängigkeit von deren Entfernung zu Autobahnen (eigene Berechnungen, ARCS - Landnutzungsklassifikationen 1968,1999, Straßennetz)

Die Bebauungsdichte ist ein weiteres wesentliches Element zur Beurteilung der Attraktivität und Eignung für weitere Zuwanderung. Wir verwenden hier keine konkreten Bebauungsdichten im Sinne der Bauordnung, da derartige Zahlen in dem Modellmaßstab - für 100 x 100 m Rasterfelder - nicht verfügbar sind. Die Bebauungsdichte wird hier deshalb über die Einwohner innerhalb des jeweiligen Zählspiegels, bezogen auf die bebaute Wohnsiedlungsfläche, definiert. Diese Bebauungsdichten wurden GIS-basiert durch Verschneiden der Zählspiegeln mit den Wohnsiedlungsflächen aus den Landnutzungskarten 1986 und 1999 und der Wohnbevölkerung je Zählspiegel abgeleitet (Steinnocher et al. 2002). Darüber hinaus wurden ausgehend von den aktuellen Bebauungsdichten mögliche künftige Bebauungsdichten modelliert, wobei bereits dicht bebaute Flächen als Nukei für eine Ausweitung der Zonen höherer Dichte herangezogen wurden. Für noch unbebautes aber als Wohnbauland gewidmete Flächen wurden für die Prognose-Modellläufe vorerst Ziel-Dichten vorgegeben, die den derzeit offen verbauten Wohnsiedlungsflächen mit moderater Dichte (2-geschoßige Bebauung) entsprechen. Anhand der Bebauungsdichten der Nachbarschaft bzw. möglicher künftiger Bebauungsdichten wird hier über den CA beurteilt, ob eine Erhöhung der Dichte möglich/gewünscht und damit eine Zuwanderung aus den entsprechenden Agentengruppen realisiert wird.

### 3. WIE FUNKTIONIERT DAS MODELL KONKRET?

#### 3.1 Programmsystem und Modelldatenbasis

Der CA Ansatz wurde anfangs mit einem konventionellen Desktop-GIS umgesetzt (Loibl 2000). Nachdem dies durch Einbezug des Agenten-Ansatzes schließlich nicht mehr möglich war, wurde das Modell neu in Visual Basic programmiert. Die räumlichen Daten liegen als Arc/Info-Ascii-Grids vor. Die Attraktivitätsdaten und Wanderungswahrscheinlichkeiten je Gemeinde werden, ebenso wie die potentiellen Wanderersummen für die Region, aus einer Access-Datenbank eingelesen. Die jeweils verwendeten Datensätze werden über eine für jeden Modellauf individuell gestaltbare Steuerdatei abgerufen.

#### 3.2 Modellablauf

Die Attraktivität einer Zielgemeinde führt – aus Agenten-spezifischer Sicht – zu einer häufigeren Wahl der betreffenden Gemeinde als Wanderungsziel. Die in 2.1 angesprochenen Regressionsanalysen erlauben die Ableitung von Wahrscheinlichkeiten der Wahl einer Gemeinde als Wanderungsziel. Bei 100.000 Personen im Zeitraum in die Region zugewandert sind, heißt dies, bedeuten 1000 Zuwanderer für Gemeinde A und 5000 Zuwanderer für Gemeinde B, dass Gemeinde A (aufgrund ihrer regionalen Attraktivität) mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 % auch in Zukunft von potentiellen Zuwanderern als Wanderungsziel gewählt werden wird, Gemeinde B mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 %. Bei der agentenbasierten Simulation wird damit (bei 100.000

Zuwanderungsbewegungen) jeder 100. Wanderer Gemeinde A und jeder 20. Wanderer Gemeinde B als Wanderungsziel nachfragen. Die Wahrscheinlichkeiten in der Nachfrage ändern sich für die Zukunft, wenn sich die Attraktivitäten ändern: wenn sich die Erreichbarkeit für Gemeinde A wesentlich verbessert, ergibt sich für Gemeinde A eine höhere Wahrscheinlichkeit als Wanderungsziel gewählt zu werden. Gemeinde A wird dann häufiger, z.B. von 2 % aller potentiellen Wanderer, nachgefragt. Bei z.B. 50.000 Zuwanderern wird im Schnitt dann jeder 50. Wanderer ( $50.000/50 = 1000 \rightarrow 2\%$ ) Gemeinde A wählen.

Die Agenten für die Simulation der Wanderung sind hier wandernde Haushalte. Das Agenten-“Reservoir” ergibt sich für die Simulation der vergangenen Entwicklung aus den Wanderungsbilanzen 1971-1991/2001, für die Zukunft aus den Bevölkerungsprognosen. Die Agentengruppen nach sozioökonomischen Kriterien kommen entsprechend ihrer Anteile an der Wanderersumme der Vergangenheit jeweils abwechselnd zum Zug (z.B.: 1x “die Wohlhabenden”, 2x “der Mittelstand”, 1x “die Wohlhabenden im Geschoßwohnbau”, 4x “der Mittelstand im Geschoßwohnbau” u.s.f.). Für die einzelnen Agentengruppen wurden weiters Grenzwerte für die wesentlichen Auswahlkriterien des Wanderungsziels – etwa Wien-Erreichbarkeit, Bodenpreise u.a. - festgelegt. Die Auswahl der jeweiligen Zielgemeinde erfolgt somit nach den Wahrscheinlichkeiten der Nachfrage, sowie nach den (unterschiedlichen) Grenzwerten der Attraktivitätskriterien für die jeweilige Agentengruppe. (Wohlhabende Haushalte tolerieren etwa nur eine Fahrtzeit nach Wien von weniger als 40 min.). Nach Wahl der Zielgemeinde suchen die Agenten/Haushalte einen geeigneten Wohnstandort zuerst durch “Ansteuern” der Koordinaten des Siedlungsschwerpunktes der Zielgemeinde. Anschließend wird im Umkreis um diesen Schwerpunkt stochastisch ein potentieller Wohnstandort gewählt und überprüft ob die lokale Attraktivität dort ausreichend gegeben ist, eine Nutzungsänderung oder eine Verdichtung wahrscheinlich ist und damit eine Ansiedlung möglich ist.

Die Überprüfung auf Eignung und die endgültige Entscheidung über die Landnutzungsänderung erfolgt mittels des CA anhand der digitalen Landnutzungskarte über entsprechende Regeln, die den Einfluss der lokalen Nutzungsstruktur in der Nachbarschaft lenken (vgl. 2.2). Ein Haushalt der offene Bebauung bevorzugt, muss seine Suche nach einem geeigneten Wohnstandort in einer anderen Gemeinde fortsetzen, wenn (nach 500 Such-Versuchen in der potentiellen Zielgemeinde) aus der Bebauungsdichte bzw. aus der Flächennutzung hervorgeht, dass keine Freiflächen verfügbar sind. Die in der Gemeinde unbefriedigte Nachfrage wird über die Modellrekursion – durch Rücksprung in das Agenten-Suchmodell – wieder neu verteilt. Ist die Suche erfolgreich, dann wird die erste geeignete Zelle in der betreffenden Gemeinde gewählt. Wenn in der gewählten Gemeinde die jeweils letzte Suche nach einem Wohnstandort erfolgreich war, wird die Koordinate des Wohnstandorts gespeichert und potentielle künftige Wanderer, die später wieder diese Gemeinde wählen, suchen sofort im Umkreis weiter und wählen den nächst-geeigneten Standort, solange bis dort keine Möglichkeit mehr für eine Änderung der Flächennutzung (oder Bebauungsdichte) gefunden wurde. Dann wird in der Gemeinde wieder ein anderer Wohnstandort gesucht.

Für Haushalte, die Geschoßwohnbau akzeptieren bzw. bevorzugen, wird in bereits dichter bebauten Zonen mit weiterem Verdichtungspotential gesucht. Wenn keine Verdichtung mehr zulässig ist, muss eine anderer Gemeinde gewählt werden – auch hier sind bis zu 500 Such-Iterationen innerhalb einer Gemeinde möglich.

### 3.3 Bisherige Ergebnisse

Das Modell wurde anhand der vergangenen Entwicklung (Landnutzungskarten 1968 und 1999, Wohnbevölkerung 1971-2001, Wanderer 1971-1991) kalibriert. Die folgende Abbildung 7 zeigt die grafische Oberfläche des Modells, die simulierte Landnutzung und den Zuwachs an Bauland je Gemeinde als Säulendiagramm und ein Agentensteuer- und Monitoring-Panel.

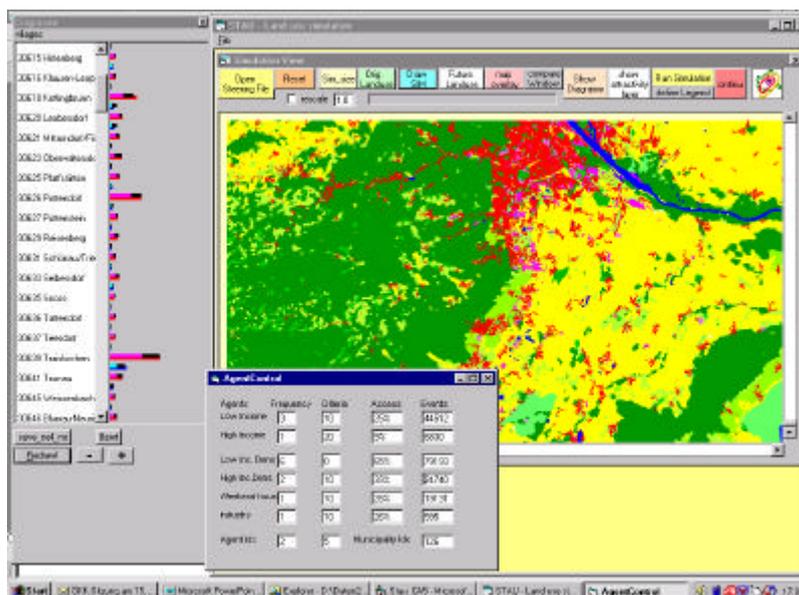


Abb. 7: Modelloberfläche: Ergebnis als Karte und Säulen - Diagramm, Agenten - Steuer- und Monitoring - Panel

Abbildung 8 zeigt das Ergebnisses einer solchen Simulation: den Flächenzuwachs bezogen auf die Gemeinden des Bezirkes Mödling im Detail. Anhand des Säulendiagramms kann die regionale Verteilung der neu bebauten Wohnsiedlungsflächen im Bezirk überprüft werden. Die Wohnsiedlungsfläche jeder Gemeinde wird im Diagramm für 2 Zeitpunkte mit 2 Balken dargestellt, welche die Zahl der bebauten 100 x 100 m Rasterzellen zeigen: der obere (rote) Balken zeigt die Zahl der Wohnbaulandzellen 1999, der untere (rosa) Balken zeigt die Wohnbaulandzellen 1968 je Gemeinde. In schwarz ist beim unteren Balken der simulierte Wohnbaulandzuwachs je

Gemeinde seit 1968 aufgetragen. Wenn die beiden unteren Balken je Gemeinde gemeinsam (= Bestand 1968 plus simulierter Zuwachs) etwa die Länge des roten Balkens (= realer Bestand 1999) erreichen, entspricht die Simulation der realen Entwicklung. Die Ergebnisse zeigen, dass die hier gewählten Parameter und Regeln eine gute räumliche Differenzierung der Simulation sichern.

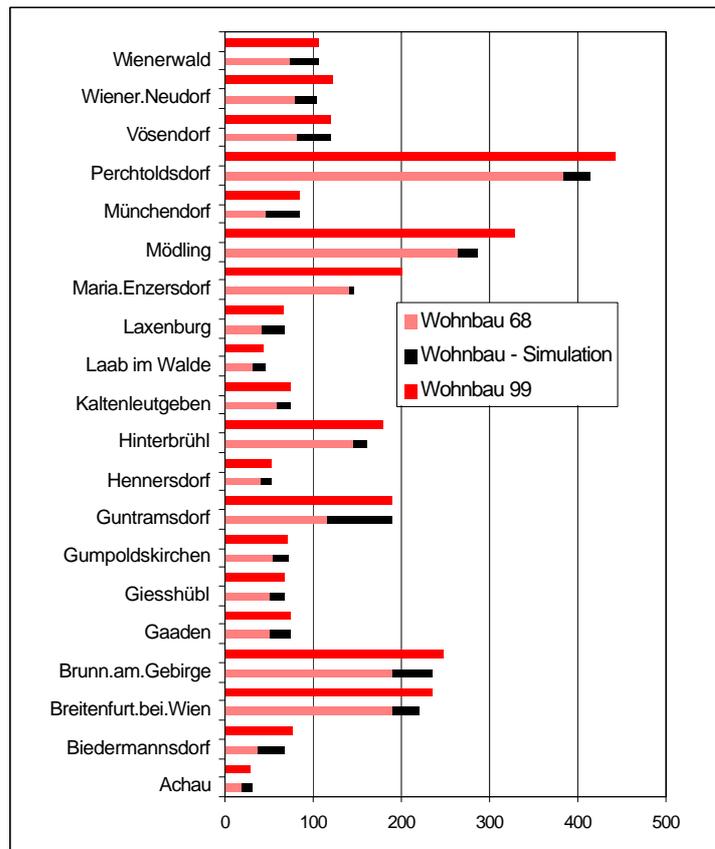


Abb. 8: Wohnsiedlungsfläche 1968 (rot) und 1999 (rosa) sowie Simulation der nach 1968 bebauten Wohnsiedlungsflächen (schwarz) in den Gemeinden des Bezirks Mödling (jeweils Zahl der 100 x 100 m Rasterzellen)

Die umseitige Abbildung 9 erlaubt einen Vergleich zwischen dem realen und dem modellierten Baulandzuwachs für Teile der Bezirke Baden und Mödling. Hier ist die Landnutzung 1968 und 1999 dem Modellergebnis – der simulierten Landnutzungsänderung unten – gegenübergestellt. In rot sind die Wohnbauflächen zu sehen, die Industrie- und Gewerbeflächen sind in magenta dargestellt, Weingartenflächen sind hellgrün, Ackerflächen sind in gelb und Wasserflächen in blau dargestellt. Die schwarzen (bzw. in den oberen Fenstern blassgrauen) Linien zeigen die Gemeiddegrenzen. Aus dem Säulendiagramm ging bereits hervor, dass der Flächenzuwachs für die einzelnen Gemeinden gut simuliert werden konnte. Was Lage und Ausdehnung des Flächenzuwachses von Wohnbau und Industrie- und Gewerbeflächen in den einzelnen Gemeinden betrifft, zeigt ein Vergleich des rechten oberen Fensters mit dem unteren Hauptfenster, dass die Verortung des Baulandzuwachses gut getroffen wurde. Durch Optimierung der Agenten-Entscheidungsregeln bei der Wohnstandort-Suche sowie bei den CA-Übergangsregeln soll künftig eine noch größere Übereinstimmung zwischen Modellergebnis und Realität erzielt werden.

#### 4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das hier vorgestellte Modell – eine Kombination aus räumlichem Agentenmodell und Zellulärem Automaten – bildet eine differenzierte, polyzentrische Siedlungsentwicklung im suburbanen Raum gut ab. Die Reaktion auf die Driving Forces von Siedlungserweiterung in Form von Zuwanderung konnte mittels räumlicher Agenten gut nachvollzogen werden. Der gewählte Ansatz hat sich als gute Lösung für eine realitätsnahe Modellierung komplexer räumlicher Entwicklung bewährt. Es zeigte sich, dass regionale Attraktivitäten durch ausgewählte räumliche Parameter gut repräsentiert werden können und die Einflüsse auf Stadt-Umlandwanderung gut widerspiegeln. Die Regeln für den zellularen Automaten zur Simulation der lokalen Landnutzungsänderung können einfach gehalten werden, da sie auf die kleinräumige, lokale Attraktivität und die lokale Eignung für Landnutzungsänderung konzentriert bleiben, während der unterschiedliche Einfluss der regionalen Attraktivität auf die Wanderung der einzelnen Agentengruppen innerhalb des agentenbasierten Modells ausreichend berücksichtigt wird.

Insgesamt können durch die Modellkombination vielschichtige Informationen in das Modell integriert werden, die in ihrer Wechselwirkung und ihrem Zusammenspiel komplexe raumzeitlich-dynamische Strukturen gut abzubilden vermögen. Da gegenseitige Beeinflussungen der in das Modell einfließenden Variablen mitberücksichtigt werden, können Auswirkungen von raumstrukturellen Eingriffen auf die Siedlungsentwicklung – wie z.B. der Bau einer Autobahn – abschätzbar gemacht werden. Die Möglichkeit, mit dem Modell die Entwicklung zukünftiger Nutzungsstrukturen regionaler wie auf lokaler Ebene zu simulieren, stellt besonders für politische Entscheidungen ein wichtiges Hilfsmittel dar.

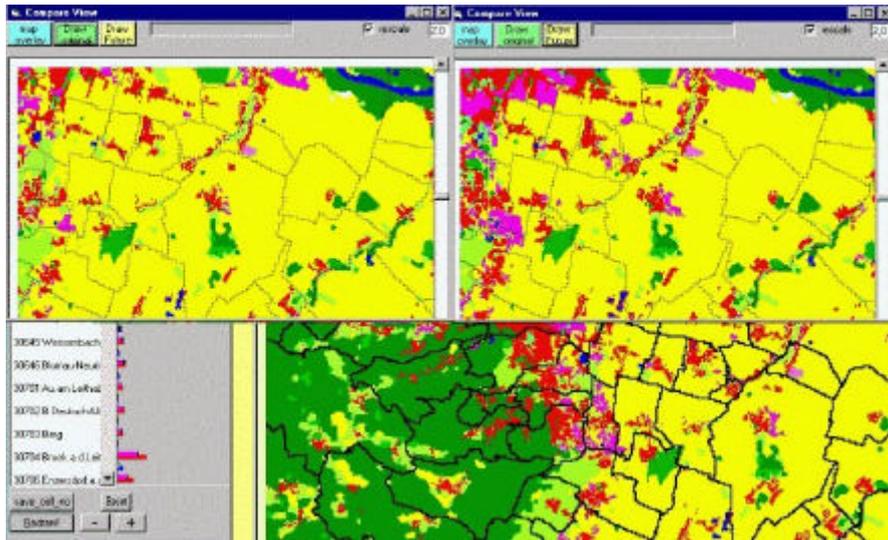


Abb. 9: Ausgangssituation 1968 und aktuelle Landnutzung 1999 (oben), Simulationsergebnis 1999 (unten)

## DANKSAGUNG

Das hier beschriebene Modell wurde im Rahmen des Projektes "STAU-Wien: Stadt-Umlandbeziehungen in der Region Wien: Siedlungsentwicklung, Interaktionen und Stoffflüsse" entwickelt, welches im Rahmen des Kulturlandschaftsforschungs-Programmes vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur gefördert wurde.

## LITERATUR

- Alonso W. (1964): Location and Land Use. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1964.
- Batty M., Couclelis H. & Eichen M. (1997): Urban systems as cellular automata. In: Environment and Planning B, Planning and Design 24(2), pp.159-164, 1997.
- Couclelis H. (1985): Cellular Worlds: A Framework for Modeling Micro-Macro Dynamics. In Environment and Planning A 17, pp. 585-596, 1985.
- 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), pp.165-174, 1997.
- Forrester J.W. (1996): Urban Dynamics. MIT-Press Cambridge, Mass., 1996.
- Franklin S., A. Graesser (1996): Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents. Proceedings of the 3rd Int. Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages, Springer-Verlag, 1996.
- Loibl W. (2000): Modellierung der Siedlungsdynamik mit einem GIS-basierten Zellularen Automaten - Konzeption, GIS-Integration und erste Ergebnisse. In Strobl J. et al.(eds). Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp 297-306, 2000.
- Loibl W., Kramar H. (2001): Standortattraktivität und deren Einfluss auf Wanderung und Siedlungsentwicklung In Strobl J. et al.(eds). Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XIII, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp 309-315, 2001.
- Loibl W., Tötzer T. (2001): Simulation of sub-urban growth with a combined Spatial Agent - Cellular Automaton approach - applied for the Greater Vienna Region. In: Proceedings of the ISESS 2001, International Society of Environmental Software Systems, Banff/Canada, 2001.
- Lowry I. S. (1964): A Model of Metropolis. Rand Corporation, 1964.
- Portugali J. (1999): Self -Organization and the City. Springer, 1999.
- Riedl L. (1999): Possible Cities, Simulation von Siedlungsentwicklung mit zellularen Automaten. CORP 1999-Proceedings, TU-Wien., <http://www.corp.at/corp99/Programm/programm.html>, 1999.
- Steinnocher K., Kressler F. & Köstl M. (2000): Erstellung einer Siedlungsmaske aus Fernerkundungsdaten und Integration zusätzlicher Information aus Zensusdaten. In (J. Strobl, T. Blaschke Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp 481-488, 2000.
- Steinnocher K., Köstl M. (2002): Verdichtung oder Zersiedelung? Eine Analyse des Flächenverbrauchs im Umland von Wien. CORP-2002 Proceedings, TU-Wien, 2002.
- Torrens P.M. (2000): How cellular models of urban systems work. (1. Theory). <http://www.casa.ucl.ac.uk/paper28.pdf>, 2000.
- Torrens P.M. (2001): Can geocomputation save urban simulation? Throw some agents into the mixture, simmer, and wait... <http://www.casa.ucl.ac.uk/paper32.pdf>, 2001.
- Wegener M., Spiekermann K. (1997): The Potential of Microsimulation for Urban Modelling. In: Proceedings of the International Workshop on Application of Computers in Urban Planning, Kobe University, Kobe, Japan, pp. 129-143. 1997.
- White R., Engelen G. & Uljee I. (1997): The use of constraint cellular automata for high resolution modelling of urban land-use dynamics. In Environment and Planning B., Planning and Design 24(2), pp. 323-343, 1997.