

## 2. Ergebnisgrößen im Fall mit Marktzutritt

Ab-Werkpreise und einheitliche Ortspreise für verschiedene  $K$ :

$K$	0,05	0,1	0,145	0,15	0,2	0,25	0,3
$\tau \in$	[-1,8;-1,65]	[-0,43;-0,31]	[0;0,13]	[0,04;0,12]	[0,28;0,34]	[0,41;0,47]	[0,52]
$\tau$	-1,7	-0,37	0,067	0,085	0,31	0,44	0,52
$c_T$	0,084	0,088	0,083	0,082	0,082	0,081	0,517
$S_T$	-0,015	-0,013	0,0049	0,0068	0,044	0,101	0,078
$\omega_T$	0,128	0,102	0,078	0,076	0,05	0,024	-0,00179
$R_T$	0,111	0,034	0,484	0,511	0,687	0,881	1,151
$c$	0,112	0,097	-	-	-	-	-
$\omega$	0,112	0,097	-	-	-	-	-
$R$	0,112	0,266	-	-	-	-	-

Preisdiskriminierung für verschiedene  $K$ :

$K$	0,05	0,1	0,145	0,15	0,2	0,25	0,3
$\tau \in$	[-1,97;-1,74]	[-0,50;-0,27]	[0,01;0,11]	[0,03;0,16]	[0,30;0,39]	[0,47;0,54]	[0,45]
$\tau$	-1,85	-0,38	0,06	0,09	0,34	0,5	0,45
$c_T$	0,075	0,078	0,109	0,079	0,081	0,084	0,646
$S_T$	-0,053	-0,022	0,045	0,008	0,038	0,07	0,072
$\omega_T$	0,128	0,099	0,064	0,071	0,043	0,015	-0,026
$R_T$	0,167	0,322	0,332	0,477	0,617	0,74	1,622
$c$	0,095	0,095	0,073	0,07	-	-	-
$\omega$	0,095	0,095	0,073	0,07	-	-	-
$R$	0,112	0,263	0,493	0,536	-	-	-

## Literatur

- Bröcker, J. (1998): *Welfare Effects of a Transport Subsidy in a Spatial Price Equilibrium*. Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr, Nr. 3/98, Dresden, 1998.
- Deutsche Bundesbank (2000), Monatsbericht 12/2000.
- Fritsch, M., Wein, T. und Evers, H.J. (1996), *Marktversagen und Wirtschaftspolitik: mikroökonomische Grundlagen staatlichen Handelns*, 2. Auflage, Vahlen, München.
- Schöler, K. (1988): *Räumliche Preistheorie – Eine partialmarktanalytische Untersuchung kontinuierlicher Wirtschaftsräume*, Duncker & Humblot, Berlin.

## ZELLULÄRE AUTOMATEN UND MULTIAGENTENSYSYME ZUR RÄUMLICHEN SIMULATION DER TOURISMUSENTWICKLUNG

Andreas Hocevar, Wien

## Kurzfassung

Im Kontext der Stadt- und Regionalforschung werden seit etwa 15 Jahren Simulationsmodelle auf Basis zellulärer Automaten (CA) zur Modellierung der Siedlungsentwicklung verwendet, Agentenmodelle kommen seit ca. fünf Jahren zum Einsatz. Für komplexere Aufgabenstellungen lassen sich beide Ansätze kombinieren. In der Tourismusplanung kamen Multiagentensysteme (MAS) erstmals 1997 zur Simulation von Besucherströmen in Nationalparks zum Einsatz. Die nun entstehende Dissertation soll eine theoretische Grundlage für den Einsatz kombinierter CA+MAS-Modelle mit zellulären Automaten und Agenten in der Tourismusforschung und -planung erarbeiten und deren Einsatz anhand einer konkreten Modellumsetzung aufzeigen. Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über die zu Grunde liegenden technischen und methodischen Grundlagen, die zu behandelnden Fragestellungen sowie Ideen zu einem Modell-Prototypen.

## Gliederung

1. Einführung
2. Technisch-methodische Grundlagen
  - 2.1 Zelluläre Automaten (CA)
  - 2.2 Agenten und Multiagentensysteme (MAS)
  - 2.3 Räumliche Simulationsmodelle mit CA und MAS
  - 2.4 Simulationssoftware
3. Überblick über das Dissertationsprojekt
  - 3.1 Hypothesen
  - 3.2 Arbeitsschwerpunkte
  - 3.3 Modell-Prototyp

## Literatur

## 1 EINFÜHRUNG

Auf dem Winterseminar 2003 der GfR habe ich mein Dissertationsprojekt vorgestellt, das sich mit dem Einsatz von zellulären Automaten und Multiagentensystemen zur räumlichen Simulation der Tourismusedwicklung beschäftigt.

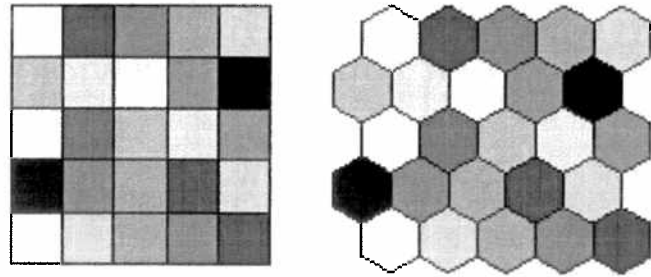


Abbildung 1: Mögliche Strukturen eines zellulären Automaten. Quelle: Riedl, 1999a

Im Zuge der steigenden Nachfrage nach Freizeitaktivitäten bei gleichzeitiger Verknappung dafür relevanter Ressourcen („unberührte“ Natur, Freiraum etc.) kommt der vorausschauenden Planung touristischer Einrichtungen entscheidende Bedeutung zu. Wesentliches Instrument dazu sind Simulationen, um die Auswirkungen einer Maßnahme bereits vor ihrer Verwirklichung mit Entscheidungsträgern und Betroffenen diskutieren zu können. In den letzten beiden Dekaden wurden interessante neue Ansätze zur Modellierung räumlicher Fragestellungen entwickelt, welche in der Tourismusforschung und -planung noch nicht die notwendige Beachtung gefunden haben.

Ziel dieses Dissertationsprojektes ist es, eine theoretische Grundlage für den Einsatz kombinierter Modelle mit zellulären Automaten und Multiagentensystemen in der Tourismusforschung und -planung zu erarbeiten und deren Einsatz anhand einer konkreten Modellumsetzung aufzuzeigen.

## 2 TECHNISCH-METHODISCHE GRUNDLAGEN

In diesem Abschnitt werden die Konzepte der zellulären Automaten und Multiagentensysteme vorgestellt. Weiters wird darauf eingegangen, wie diese Modellansätze kombiniert werden können und wie derartige Simulationsmodelle softwaretechnisch umgesetzt werden können.

### 2.1 Zelluläre Automaten (CA)

Bei zellulären Automaten handelt es sich um ein System regelmäßig angeordneter, nicht überlappender *Zellen* beispielsweise eine Gitterstruktur aus Quadraten oder regelmäßigen Sechsecken (siehe Abbildung 1).

Jede Zelle dieser Struktur hat einen *Zustand*  $z$  aus einer endlichen Zustandsmenge  $Z$ . Das bedeutet, dass sich mit zellulären Automaten auf der Ebene

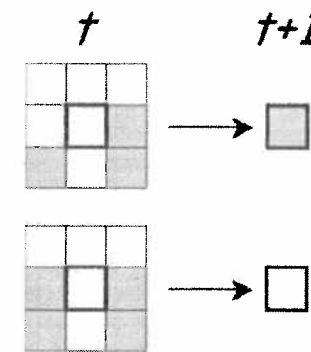


Abbildung 2: Nachbarschaft und Veränderung über die Zeit in zellulären Automaten am Beispiel des „Game of Life“. Quelle: Riedl, 1999a

der Zellen keine kontinuierlichen, sondern nur diskrete Sachverhalte abbilden lassen. Die Zellzustände sind in Abbildung 1 durch verschiedene Grautöne dargestellt.

Zum zellulären Automaten wird diese Zellenstruktur dadurch, dass sie sich verändert. Die Veränderung erfolgt über die *Zeit* durch *Regeln*. Über das ganze Zellen-system wird die gleiche Regel angewendet, welche eine definierte Nachbarschaft von Zellen berücksichtigt. Der Zustand jeder Zelle zum Zeitpunkt  $t + 1$  errechnet sich nach der definierten Regel aus dem Zustand der Zelle selbst sowie aus dem Zustand der Zellen in der Nachbarschaft zum Zeitpunkt  $t$  (siehe Abbildung 2).

Die Nachbarschaft kann beispielsweise alle angrenzenden Zellen umfassen (8 Zellen), oder die entlang der Kanten angrenzenden 4 Zellen, oder aber eine über eine Entfernung definierte Anzahl von Zellen. Wenn etwa die Zellzustände Arten einer Flächennutzung auf einem 50x50 m großen Ausschnitt der Erdoberfläche repräsentieren (vgl. Loibl et al., 2002), könnte die Nachbarschaft über alle Zellen in einem Umkreis von 500 Metern definiert sein.

Eines der bekanntesten Beispiele für zelluläre Automaten ist das Game of Life des britischen Mathematikers John Conway (Gardner, 1970). Anhand dieses Beispiels wird die Funktionsweise eines zellulären Automaten rasch deutlich:

- Es gibt die Zellzustände „leblos“ und „lebend“ ( $Z = \{\text{leblos}\}, \{\text{lebend}\}$ )
- 8-Zellen-Nachbarschaft (angrenzende Zellen)
- Übergangsregeln (siehe Abbildung 2):
  - Eine lebende Zelle wird zu einer leblosen Zelle, außer sie hat zwei oder drei Nachbarn (Abbildung, 2 unten).

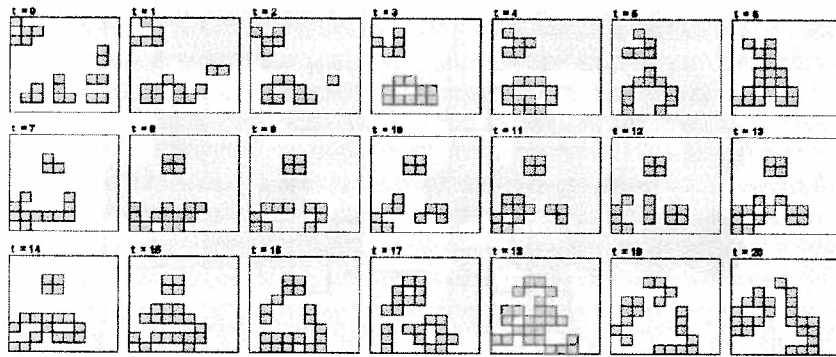


Abbildung 3: Nachbarschaft und Veränderung über die Zeit in zellulären Automaten am Beispiel des „Game of Life“. Quelle: Riedl, 1999a

- Aus einer leblosen Zelle mit genau drei Nachbarn wird eine lebende Zelle (Abbildung 2 oben).

In Abbildung 3 sind 20 Zeiteinheiten aus einem „Game of Life“ dargestellt. Wie zu erkennen ist, entwickeln sich selbstreproduzierende Strukturen und statische Strukturen (Riedl, 1999). Die selbstreproduzierende 5-zellige Struktur, welche in der Literatur „Glider“ genannt wird, „wandert“ von den Zeitpunkten  $t = 0$  bis  $t = 6$  von links oben in die Mitte der Zellenanordnung. Die statische 4-zellige Struktur in der Mitte des zellulären Automaten bleibt vom Zeitpunkt  $t = 8$  bis  $t = 16$  unverändert.

Zu beachten ist, dass einfache Beispiele zellulärer Automaten meist als Torus ausgeführt sind, d.h. auch Zellen am Rand des zellulären Automaten haben die volle Nachbarschaft. Bei einer 8-Zellen-Nachbarschaft hat beispielsweise eine Zelle am linken Rand des Rasters fünf direkt angrenzende Nachbarn sowie drei Nachbarn am rechten Rand. In räumlichen Modellen eines begrenzten Ausschnittes der Erdoberfläche sind Randbereiche daher bei der Regelfestlegung besonders zu berücksichtigen.<sup>1</sup>

## 2.2 Agenten und Multiagentensysteme (MAS)

Agenten sind zu verstehen als Programme, die ihre Umgebung wahrnehmen und in dieser agieren. Dabei handeln sie selbstständig (*proaktiv*), verfolgen aktiv Ziele (*proaktiv*), nehmen ihre Umgebung wahr, reagieren auf diese (*reaktiv*) und kommunizieren mit anderen Agenten. Auf diese Weise wurden z.B. Systeme

<sup>1</sup>Ich danke Ulrich Willier für diesen Hinweis im Rahmen des GfR-Winterseminars 2003.

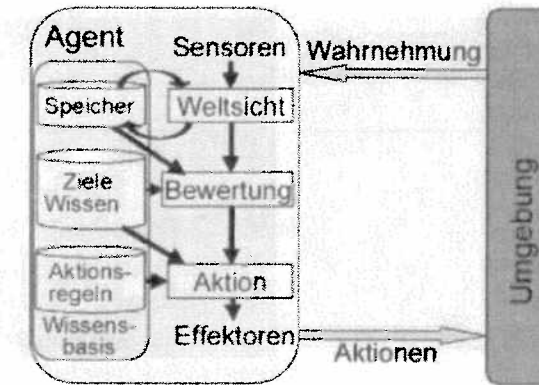


Abbildung 4: Schema eines Agenten. Quelle: SCHNEEBERGER, 2003

entwickelt, die Rechercheaufgaben im Internet automatisiert erledigen (z.B. Suche des günstigsten Anbieters eines bestimmten Produktes).

Abbildung 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Agenten. Wesentliche Elemente sind *Wissensbasis*, *Sensoren* und *Effektoren*. Ereignisse in der Umgebung, die der Agent über Sensoren wahrnimmt, werden anhand gespeicherter Daten und vorgegebener Ziele bewertet und führen zu einer Aktion, die über Effektoren an der Umgebung ausgeübt wird.

Ein Multiagentensystem zeichnet sich dadurch aus, dass mehrere Agenten im gleichen System agieren, wobei es sich nicht zwangsläufig um ein räumliches System handeln muss. Ein Beispiel für ein einfaches Multiagentensystem ohne Raumbezug wäre die Iterationsvariante von Robert Axelrods Prisoners Dilemma (vgl. Axelrod, 1987).

Ein Beispiel für ein Multiagentensystem mit Raumbezug ist das Termiten-Modell aus der NetLogo Models Library (siehe Abschnitt 2.4). Das Modell bildet die Verhaltensweise von Termiten nach, Holzstückchen zu Häufen zusammentragen. Die Agenten (Termiten) brauchen weder Speicher noch Wissen, nur zwei einfache Regeln, damit tatsächlich ein Haufen aus Holzstücken entsteht:

- Wandere durch die Umgebung; sobald du an ein Holzstück stößt, nimm es auf.
- Wandere mit dem Holzstück weiter; wenn du an ein weiteres Holzstück stößt, lege dein eigenes an einer freien Stelle neben dem anderen ab.

In jedem Zeitschritt („Tick“) des Modells befolgt jeder Agent eine der beiden Regeln. In Abbildung 5 links ist die Umgebung (schwarz) mit den Holzstücken

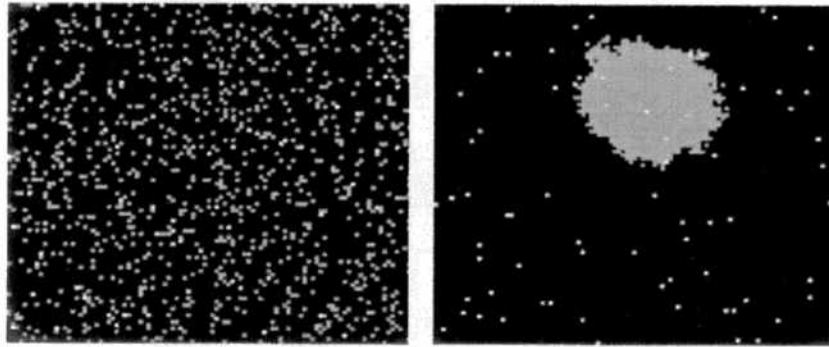


Abbildung 5: Multiagentensystem „Termiten“. Quelle: eigene Darstellung.

(grau) und den Termiten (weiß) dargestellt. Nach einiger Zeit entsteht ein Haufen, wie er in Abbildung 5 rechts dargestellt ist. Warum? Zunächst entstehen viele kleine Häufen mit einigen wenigen Holzstücken. Je größer ein Haufen wird, um so größer wird die Wahrscheinlichkeit, dass ein Agent auf diesen Haufen trifft. So werden allmählich kleinere Häufen abgetragen und größere aufgehäuft, bis nur noch ein Haufen übrig bleibt.

### 2.3 Räumliche Simulationsmodelle mit CA und MAS

Sowohl zelluläre Automaten als auch Multiagentensysteme ermöglichen Simulationsmodelle nach dem Bottom-up Ansatz, d.h. es werden die Verhaltensweisen der kleinsten Akteurseinheiten modelliert; das Gesamtsystem entsteht durch Wachstum und Entwicklung über die Zeit.

Zelluläre Automaten mit ihren an die Rasterzelle gebundenen Übergangsregeln sind besonders für Fragestellungen geeignet, wo Entwicklungen in der Nachbarschaft die Entwicklung einer räumlichen Einheit beeinflussen. Multiagentensysteme, in denen sich Agenten im Raum bewegen und untereinander kommunizieren können, eignen sich zur Abbildung der Verhaltensweisen von Individuen. Die Umgebung kann sich dabei ebenfalls verändern, und zwar auf Grund der Auswirkungen von Entscheidungen einzelner Agenten.

Bei Sachverhalten, wo räumliche Entwicklungen aus den Entscheidungen von Individuen und von Nachbarschaftsbeziehungen abhängen, bietet sich die Kombination von zellulären Automaten und Multiagentensystemen an. Individuen werden dabei als Agenten abgebildet, der Raum als zellulärer Automat. Die Interaktion der Agenten findet unter Einbeziehung des Raumes statt. In solchen kombinierten Modellen können die kumulativen Wirkungen individueller Ver-

haltensweisen auf die Umgebung untersucht werden. Das STAU-Modell (Loibl et al., 2002) beispielsweise implementiert die wohnungssuchenden Haushalte als Agenten und die Landnutzung als zellulären Automaten.

### 2.4 Simulationssoftware

Für Simulationen mit zellulären Automaten und Agenten stehen aus dem Open-Source-Bereich bzw. für Forschungszwecke frei benutzbar verschiedene Software-Pakete bzw. Klassenbibliotheken zur Verfügung. Aus einer Aufstellung von Torrens (2003) erscheinen vor allem *NetLogo* und *RePast*<sup>2</sup> geeignet, um ein kombiniertes CA+MAS-Modell zu realisieren.

*NetLogo* (<http://ccl.sesp.northwestern.edu/netlogo/>) wurde auf der Northwestern University in Illinois, USA, entwickelt. Es ist für Forschungszwecke kostenlos verfügbar, basiert auf der einfachen Programmiersprache LOGO. *NetLogo* eignet sich zur schnellen Entwicklung von Modell-Prototypen mit Agenten („Turtles“) und zellulären Automaten (bestehend aus „Patches“). Die Grenzen liegen in der langsamen Geschwindigkeit bei großen Zellenrastern und in der fehlenden Möglichkeit, Daten mit GIS-Systemen auszutauschen.

*RePast* (<http://repast.sourceforge.net/>) stammt von der University of Chicago und ist eine Java-Klassenbibliothek zur Programmierung agentenbasierter Simulationen. Eine rasterbasierte Zellenstruktur ist ebenfalls Bestandteil von *RePast*, wodurch auch zelluläre Automaten programmiert werden können. Darüber hinaus bietet *RePast* die Möglichkeit, Daten mit GIS-Systemen auszutauschen. Somit ist *RePast* auch für Simulationen mit größeren Zellenrastern geeignet. Der Nachteil ist, dass die Programmierung in Java relativ aufwändig ist und der Entwickler mehr Zeit mit der Umsetzung des Modells als mit dessen Konzeption verbringen muss.

## 3 ÜBERBLICK ÜBER DAS DISSERTATIONSPROJEKT

### 3.1 Hypothesen

Dem Projekt liegt die Hypothese zu Grunde, dass sich die räumliche Tourismusentwicklung in Analogie zu aktuellen Simulationsmodellen der Siedlungsentwicklung („Geosimulation“) mit zellulären Automaten und Multiagentensystemen simulieren lässt. Es wird davon ausgegangen, dass die Ortswahl für einen Urlaub aufgrund ähnlich strukturierter Entscheidungen erfolgt wie die Wohnstandortwahl. Die Angebotsveränderung an touristischer Infrastruktur ergibt sich durch ähnliche Rahmenbedingungen wie die Änderung der Landnutzung.

<sup>2</sup>Ich danke Wolfgang Loibl für diesen Hinweis im Rahmen des GfR-Winterseminars 2003.

Es soll daher die räumliche Tourismusentwicklung mit einem Geosimulationsmodell simuliert werden.

Geosimulationsmodelle (Torrens, 2003) unterscheiden sich von traditionellen Modellen durch folgende Charakteristika:

- *Räumliche Einheit*: keine Aggregate, sondern diskrete Objekte der Mikroebene (Personen, Grundstücke etc.)
- *Räumliche Beziehung*: Regeln für interaktives Verhalten der elementaren Einheiten statt Abbildung der Interaktion der Aggregate
- *Zeitfaktor*: Dynamische Simulation statt Zeit-Proxies
- *Ziel der Simulation*: Keine Vorhersage, sondern „tools to think with“.

Der Unterschied zwischen diesen Modellansätzen wird am besten dadurch deutlich, dass man sich die zu Grunde liegende Fragestellung vor Augen hält (Epstein u. Axtell, 1996). Traditionelle Modelle wollen die Gesamtheit einer Entwicklung erklären, die Frage lautet daher „Can you explain it?“. Geosimulationsmodelle hingegen versuchen, die individuellen Entscheidungen nachzubilden, aufgrund derer sich etwas entwickelt. Die Frage lautet daher „Can you grow it?“

### 3.2 Arbeitsschwerpunkte

Für die Dissertation ist folgender Inhalt geplant:

- Erarbeitung der theoretischen Grundlagen
- Überblick über räumliche Simulationsmodelle mit zellulären Automaten und Multiagentensystemen
- Konzeption und Programmierung eines Modell-Prototypen
- Statistische Auswertung der Simulationsergebnisse
- Ausblick hinsichtlich Einsatzmöglichkeiten

### 3.3 Modell-Prototyp

Derzeit ist für den Prototyp ein 3-Ebenen-Modell geplant. In diesem Modell wird die touristische Infrastruktur als zellulärer Automat abgebildet, ein Multiagentensystem beinhaltet Agenten des Typs „Bereitsteller touristischer Superstruktur“ (Hotel etc.) und „Tourist“. Quasi als 4. Ebene liegt dem Modell ein Raster zu Grunde, das den Naturraum in den Dimensionen „Belastbarkeit/Kapazität“ und „Topographie“ beinhaltet.

Auf jeder Ebene des Modells wirken sich nicht nur die eigenen Entscheidungen, sondern auch Einflüsse der anderen Ebenen auf die Entwicklung aus. Die

genauen Regeln des zellulären Automaten sowie der Agenten werden im Zuge der Modellumsetzung im Sommer/Herbst 2003 festgelegt, wobei verschiedene Varianten durch Modellläufe hinsichtlich ihrer Plausibilität geprüft werden.

### Literatur

- Axelrod, R. (1987): „The Evolution of Strategies in the Iterated Prisoner's Dilemma“, <http://www-personal.umich.edu/~axe/research/Evolving.pdf>
- Epstein, J.M., R. Axtell (1996): „Growing Artificial Societies Social Science from the Bottom Up“, MIT Press, Cambridge, 1996
- Gardner, M. (1970): „Mathematical games The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game ‚life‘“, in: Scientific American 223, October 1970, pp 120-123.
- Loibl, W., R. Giffinger, S. Sedlacek, E. Buchinger (Hrsg.) (2002): „STAU-Wien“ Stadt-Umlandbeziehungen in der Region Wien: Siedlungsentwicklung, Interaktionen und Stoffflüsse; Endbericht Teil B: Daten, Theorie, Methoden und Ergebnisse; ARC Seibersdorf research Report, ARCS 0181, BV, 211 pp., September 2002.
- Riedl, L. (1999): „POSSIBLE CITIES Simulation von Siedlungsentwicklung mit zellulären Automaten“ veröffentlicht in: Schrenk M. (Hrsg.): Beiträge zum CORP-Symposium Wien 1999.
- Riedl, L. (1999a): „POSSIBLE CITIES Simulation von Siedlungsentwicklung mit zellulären Automaten“, Präsentationsunterlagen zum CORP-Symposium 1999 (unveröffentlicht).
- Schneeberger, J. (2003): „IT-Kompaktkurs Software-Agenten I“, FH Deggendorf, <http://www.bw.fh-deggendorf.de/kurse/ws/skripten/skript12.pdf>.
- Torrens, P.M. (2003): „Geosimulation : innovative spatial simulation research“ <http://www.geosimulation.org/>.