

Selbstorganisation in der urbanen Strukturbildung

Frank Schweitzer

Institut für Physik der Humboldt-Universität
Unter den Linden 6, 10099 Berlin
e-mail: frank@physik.hu-berlin.de

1 Einleitung

Die Herausbildung urbaner Strukturen, wie Siedlungen, Wegesysteme, Transport- und Versorgungsnetze, zeigt unter *strukturellen Gesichtspunkten* signifikante Analogien zu physikalischen Phasenübergängen, wie Clusterbildung, Aggregation und Perkolation, aber auch zu Selbstorganisationsprozessen, bei denen neue Systemeigenschaften durch dynamische Wechselwirkung von Unter-einheiten emergieren.

Gemeinhin wird die Überzeugung vertreten, daß die Entwicklung urbaner Lebensräume von zahlreichen schwer faßbaren Faktoren kultureller, soziologischer, ökonomischer, politischer, ökologischer Art bestimmt werden. Auf der anderen Seite zeigt sich aber, daß auf einer gewissen Abstraktionsebene zahlreiche Gemeinsamkeiten zwischen regional weit entfernten urbanen Strukturen einerseits, sowie zwischen urbanen und natürlichen Strukturen andererseits vorhanden sind [7, 4, 9, 15, 25]. Dies gilt nicht nur für die urbanen Aggregationen; auch bei Wegesystemen konnten strukturelle Analogien zwischen menschlichen und tierischen Wegesystemen, sowie zu natürlichen Transportsystemen, wie Blattaderungen, nachgewiesen werden [25]. Dazu sei an dieser Stelle auch ausdrücklich auf die Arbeiten des SFB 230 "Natürliche Konstruktionen" verwiesen [43, 42, 37],

Diese Untersuchungen legen die Hypothese nahe, daß eine gemeinsame Ebene für die Beschreibung dieser Strukturen existiert: Es ist die grundlegende Dynamik der Strukturbildung, die diese Gemeinsamkeiten trotz der Unterschiedlichkeit der jeweiligen Elemente hervorbringt, und die Selbstorganisationstheorie ermöglicht auch in den sozialen Bereichen einen quantitativen Zugang dazu [38, 31].

Im Vortrag wurden ausführlich zwei verschiedene Formen urbaner Strukturen diskutiert: (1) *urbane Aggregationen* und (2) *Wegesysteme*. Ich beschränke mich in diesen kurzen Ausführungen

auf die Darstellung des *ersten* Punktes, für die Selbstorganisation von Wegesystemen sei auf die erschienenen Publikationen verwiesen.

2 Urbane Aggregation

2.1 Analyse urbaner Aggregate

Von einem physikalischen Standpunkt aus lassen sich urbane Agglomerationen, wie Städte mit den sie umgebenden Satellitensiedlungen, Gewerbegürtel oder Ballungsgebiete, als eine besondere Art von *Clustern* auf einer zweidimensionalen Oberfläche interpretieren. In einer Schwarz-Weiß-Rasterung werden diese Cluster durch die bebaute Fläche abgebildet (schwarzer Pixel = bebaute Flächeneinheit, weißer Pixel = unbebaute Flächeneinheit), wobei die unterschiedliche Bebauung (ein Hochhaus im Gegensatz zu einer Garage) zunächst einmal unberücksichtigt bleibt. Aus derartigen "Schwarzplänen" werden dann einer quantitativen Analyse die strukturellen Eigenschaften der urbanen Cluster ermittelt.



Abbildung 1: Zwei Beispiele für urbane Aggregate: (links) Berlin, (rechts) Paris

Aufgrund der typischen zergliederten Morphologie (Abb. 1 a,b) [21] standen bisher sowohl bei der strukturellen Charakterisierung, als auch bei der Kinetik urbaner Cluster *fraktale Konzepte* im Vordergrund. So wurde gezeigt, daß die fraktale Dimension ein mögliches Maß zur Charakterisierung der urbanen Bebauungsdichte ist [6, 11, 12, 13]. Die Existenz fraktaler Eigenschaften über mehrere Größenordnungen ist zugleich ein Hinweis auf die hierarchische Gliederungsstruktur der Aggregate. Weiterhin wurde durch die quantitative Analyse von weltweit 60 Metropolen gezeigt, daß eine lineare Beziehung zwischen der Bebauungsfläche und dem Gesamtumfang existiert [14], die sich ebenfalls aus den fraktalen Eigenschaften herleiten läßt.

Mehrere Versuche, das Wachstum urbaner Cluster durch fraktale Aggregationsmechanismen zu modellieren, basieren auf dem DLA- und dem DBM-Modell (DLA - diffusionslimitierte Aggregation, DBM - Modell des dielektrischen Durchbruchs) [2, 3]. Allerdings sind die bisherigen Resultate mit DLA- und DBM-Modellen zum Teil unbefriedigend: DLA-Modelle liefern nur zusammenhängende Cluster, deren größtes Wachstumspotential an den Clusterspitzen, also weit entfernt vom Zentrum, ist. Außerdem weisen die entstehenden stark dendritischen Strukturen optisch nur eine geringe Ähnlichkeit mit urbanen Clustern auf. In DBM-Modellen kann zwar die Kompaktheit der Cluster über einen zusätzlichen Parameter in den Anlagerungswahrscheinlichkeiten variiert werden [2], allerdings wird hier nicht berücksichtigt, daß der Kompaktheitsgrad urbaner Cluster sich im Verlauf der Entwicklung verändert. Neuere Modelle verwenden zusätzliche langreichweitige Korrelationen zwischen existierenden Aggregaten und dem lokalen Wachstum und gelangen zu einer weitaus besseren Übereinstimmung mit empirischen Daten [23, 24, 35, 39].

Andere Ansätze zur kinetischen Modellierung urbaner Cluster basieren auf Zellulären Automaten [1, 5, 8, 10, 40, 41], allerdings steht hier zumeist eine Simulation der Nutzung ("urban land-use patterns") im Vordergrund. Entsprechend wird das Wachstum weniger durch physikalische Triebkräfte, als durch ökonomisch begründete Nutzensfunktionen bestimmt.

Im Rahmen unserer Arbeit wird vor allem die strukturelle Seite des urbanen Clusterwachstums und ihre Beziehung zu physikalischen Clusterbildungs- und Aggregationsphänomenen näher untersucht. Urbane Aggregate stellen in der Regel keine zusammenhängende Struktur dar, sondern werden aus sehr vielen einzelnen Clusern unterschiedlicher Größe gebildet. Durch eine Clusteranalyse ergibt sich die Möglichkeit, diese Zusammensetzung festzustellen. Anschließend werden die Cluster entsprechend ihrer Größe nach Rängen sortiert (der größte Cluster erhält Rang 1 usw.).

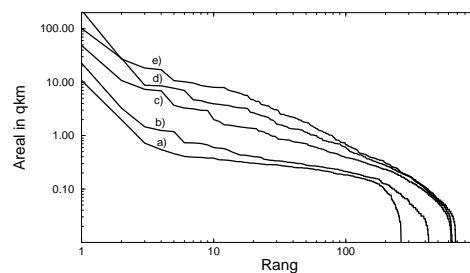


Abbildung 2: Zeitentwicklung der Rang-Größen-Verteilung zusammenhängender Bebauungsflächen in doppelt-logarithmischer Darstellung für Berlin (a: 1800, b: 1875, c: 1910, d: 1920, e: 1945)

Abb. 2 zeigt für die Entwicklung Berlins, daß sich die Rang-Größen-Verteilung mit der Zeit, also mit zunehmender Ausdifferenzierung des Stadtclusters, einem Potenzgesetz nähert [35, 36], das als Pareto-Zipf-Verteilung bekannt ist [16]:

$$\log n(q) = \log n(1) + \alpha \log q \quad \text{bzw.} \quad n(q) = n(1) q^\alpha; \quad \alpha < 0 \quad (1)$$

wobei $n(q)$ die Größe des Clusters mit dem Rang q und der Parameter α der Pareto-Exponent sind.

Wenn die Entwicklung urbaner Aggregate so erfolgt, daß sich ihre Clusterverteilung mit der Zeit einer Pareto-Verteilung annähert, dann kann das Erreichen dieser Verteilung als ein Maß für ein entwickeltes urbanes Aggregat angesehen werden - und im Gegenzug der Abstand von dieser Verteilung als ein Maß für die aus struktureller Sicht noch zur Verfügung stehenden Entwicklungspotenzen.

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, daß die Pareto-Exponenten für die Bebauungsflächen verschiedener Großstädte vergleichbare Werte haben [36]. Das heißt, der Pareto-Exponent könnte, im Rahmen gewisser Fehlerabschätzungen, neben der fraktalen Dimension als ein weiteres *universales Maß für entwickelte urbane Agglomerationen* angesehen werden.

2.2 Simulation des Wachstums urbaner Agglomerationen

Um das Wachstum urbaner Agglomerationen mit physikalischen Methoden zu simulieren, führen wir eine Cluster-Größen-Verteilung \mathbf{n} ein: $\mathbf{n} = \{n_1, n_2, \dots, n_k, \dots, n_A\}$. Hierbei ist n_k die Größe (also die Zahl schwarzer Pixel) des Cluster mit der Nummer k , wobei insgesamt A Cluster vorhanden sind ($k = 1, \dots, A$). Die Gesamtzahl aller Pixel

$$N_{tot}(t) = \sum_{k=1}^A n_k \quad (2)$$

wird in einer sich entwickelnden urbanen Aggregation mit der Zeit anwachsen. Anhand der Analyse Berlins haben wir einen annähernd exponentiellen Zuwachs von der Gründerzeit (1875) bis 1945 festgestellt [35].

Die Clusterverteilung \mathbf{n} kann durch zwei elementare Prozesse verändert werden: (1) die Bildung neuer Cluster, (2) das Wachstum vorhandener Cluster. Prinzipiell müßten auch noch das Schrumpfen bzw. das Verschwinden bereits existierender Cluster berücksichtigt werden, allerdings ist die Wahrscheinlichkeit dieser Prozesse bei zunehmendem urbanen Wachstum relativ klein, so daß sie hier vernachlässigt werden.

Die Bildung neuer Cluster kann durch die symbolische Reaktion $A \xrightarrow{w_1} A + 1$ für die Gesamtzahl A der Cluster ausgedrückt werden. Die Wahrscheinlichkeit für diesen Prozeß, w_1 , wird prinzipiell vom Gesamtwachstum, $N_{tot}(t)$, der urbanen Agglomeration, abhängen:

$$w_1 = w(A + 1, t + 1 | A, t) = c(N_{tot}) \quad (3)$$

Im folgenden wollen wir allerdings eine konstante Wahrscheinlichkeit für die Neubildung annehmen: $c = const..$

Das Wachstum bereits vorhandener Cluster kann durch die symbolische Reaktion $n_k \xrightarrow{w_k} n_k + 1$ für die Größe n des Clusters k ausgedrückt werden. Die Wahrscheinlichkeit für diesen Prozeß, w_k , wird

von der bereits vorhandenen Größe des Clusters n_k und von der existierenden Clusterverteilung abhängen:

$$w_k = w(n_k + 1, t + 1 | n_k, t) = \gamma \frac{n_k}{N_{tot}}, \quad \gamma = 1 - c(N_{tot}) \quad (4)$$

Über die Abhängigkeit der Wachstumswahrscheinlichkeit von $N_{tot}(t)$ existiert eine *globale Kopplung*, das heißt, das Wachstum eines bestimmten Clusters ist nicht unabhängig von den anderen Clustern des urbanen Aggregates. Durch den Faktor γ wird das Verhältnis zwischen der Bildung neuer und dem Wachstum vorhandener Cluster bewichtet, das heißt, γ entscheidet darüber, ob sich das urbane Wachstum vorwiegend durch Bildung neuer Cluster oder durch Wachstum vorhandener Cluster vollziehen wird.

Da die Entwicklung der urbanen Agglomeration durch eine Vielzahl von Wachstums- und Neubildungsprozessen der Cluster bestimmt wird, die parallel ablaufen können, ist das Ergebnis der Entwicklung nicht eindeutig vorherstimmt. An die Stelle einer deterministischen Beschreibung muß daher eine *probabilistische* Beschreibung treten, die der Offenheit der Zukunft und der eingeschränkten Vorhersagbarkeit der Entwicklung Rechnung trägt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(\mathbf{n}, t) = P(n_1, n_2, \dots, n_k, \dots, n_A, t)$ gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine beliebige mögliche Verteilung $\{n_1, n_2, \dots, n_k, \dots, n_A\}$ nach einer bestimmten Zeit angetroffen wird. Die zeitliche Veränderung dieser Wahrscheinlichkeit wird durch eine *Master-Gleichung* beschrieben:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(\mathbf{n}, t)}{\partial t} = & - \sum_i w_k(n_k, t) P(n_1, \dots, n_k, \dots, t) \\ & + \sum_{i \neq 1} w_k(n_k - 1, t) P(n_1, \dots, n_k - 1, \dots, t) \\ & - w_1(A, t) P(n_1, \dots, n_A, t) \\ & + w_1(A - 1, t) P(n_1, \dots, n_{A-1}, t) \end{aligned} \quad (5)$$

Unter der Annahme: $1 \ll A \ll N_{tot}$ kann die globale Kopplung, ausgedrückt durch Gl. (2), vernachlässigt werden, was im wesentlichen eine Einschränkung für die Wahrscheinlichkeit der Neubildung von Clustern bedeutet, die klein genug sein muß. In diesem Fall läßt sich die Mastergleichung zerlegen,

$$P(n_1, \dots, n_k, \dots, t) \approx \prod_{k=1}^A P(n_k, t) \quad (6)$$

und man kann die mittlere Clustergröße eines Clusters k , $\langle n_k(t) \rangle = n_k P(n_k, t)$, zu einer bestimmten Zeit berechnen. Das Resultat [16]:

$$\langle n_k(t) \rangle \sim N_{tot} k^{-(1-c)} \quad (7)$$

entspricht der Pareto-Zipf-Verteilung, Gl. (1), wobei der Pareto-Exponent α hier $\alpha = c - 1 < 0$ ist. Das heißt, die Clusterverteilung, deren Änderung durch die Mastergleichung (5) beschrieben

wird, entwickelt sich im Mittel so, daß Cluster aller Größen vorkommen, die das urbane Aggregat hierarchisch zusammensetzen.

Dabei wird die Steilheit der Pareto-Zipf-Verteilung wesentlich von der Wahrscheinlichkeit für die Neubildung von Clustern bestimmt. Je kleiner c ist, um so steiler wird die Verteilung, was auf eine stärkere Hierarchisierung schließen läßt, wobei das Wachstum des größten Clusters die Hauptrolle spielen wird.

2.3 Resultate der stochastischen Simulationen

Die Mastergleichung (5) wird durch eine stochastische Simulation des urbanen Wachstums gelöst. Während der Simulation müssen, zusätzlich zu den globalen Kopplungen, auch lokale Wechselwirkungen zwischen den Clustern berücksichtigt werden; das heißt, die Cluster können mit Nachbarclustern zusammenwachsen. Dieser Koagulations-Effekt kann im Spätstadium der urbanen Entwicklung sehr schnell zu einem vollkommen zusammenhängenden Cluster führen (Perkolation), falls sich das Wachstum *aller* Cluster ungehindert nach Gl. (4) vollzieht.

Eine solche Entwicklung urbaner Aggregate ist aber empirisch kaum festgestellt worden. Statt dessen findet man selbst bei großen Agglomerationen immer noch separate Cluster, das heißt, daß in unserem Modell die angegebenen Wachstumswahrscheinlichkeiten im Spätstadium der Entwicklung zumindest für Cluster mit niedrigen Rängen modifiziert werden müssen.

Unsere Computersimulationen haben gezeigt, daß zwei unterschiedliche kinetische Regimes für die Entwicklung urbaner Agglomerationen existieren: (i) ein Frühstadium, in dem die Wachstums- und Neubildungsprozesse aller Cluster entsprechend Gl. (3, 4) ablaufen, (ii) ein Spätstadium, in dem das eigenständige Wachstum des größten Clusters (Rang 1) ausgebremst wird und statt dessen Koagulationsprozesse dominieren. Kleinere Cluster wachsen allerdings weiter entsprechend Gl. (4).

Als reales Beispiel wurde die Entwicklung der Rang-Größen-Verteilung einer urbanen Agglomeration im Spätstadium simuliert [35, 36]. Als Ausgangszustand diente uns der urbane Cluster Berlin (1910). Simuliert wurde die Entwicklung Berlins von 1910 bis 1945. Unsere Simulationen (Abb. 3) zeigen, daß die Pareto-Verteilung für den Ballungsraum Berlin tatsächlich reproduziert werden, wenn man annimmt, daß der Cluster vom Rang 1 nicht mehr selbst wächst, sondern nur noch durch Koagulation mit anderen Clustern, während die Cluster ab Rang 2 proportional ihrer bisherigen Größe wachsen.

Die Übereinstimmung zwischen der Computersimulation und der realen Rang-Größen-Verteilung besagt, daß die Entwicklung der Größenverteilung der verschiedenen Cluster richtig beschrieben wurde. Damit ist allerdings nur eine Aussage darüber gegeben, um welchen Betrag ein Cluster einer bestimmten Größe während dieses Zeitintervalls wächst, unabhängig von seinem konkreten Platz im realen urbanen Aggregat. Diese Simulation ist nicht in der Lage, die reale räumliche

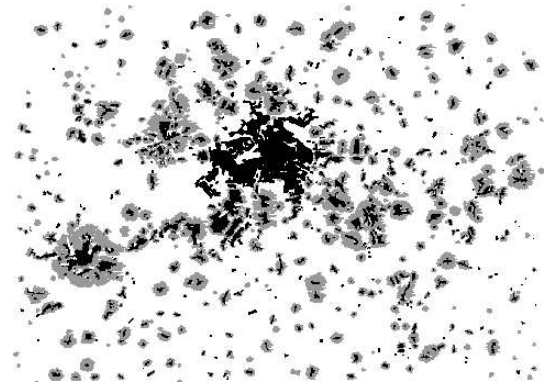
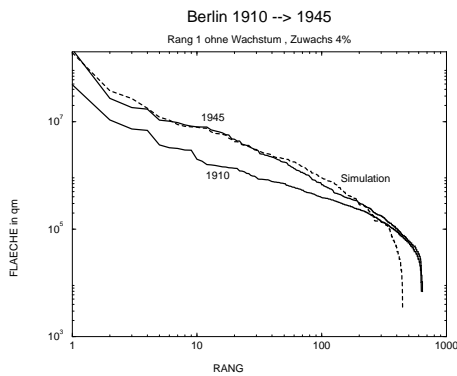


Abbildung 3: links: Simulation der Rang-Größen-Verteilung der Cluster (Berlin 1910 - 1945), rechts: Simulierte räumliche Verteilung der Cluster (Berlin 1945), schwarz: Ausgangszustand (Berlin 1910), grau: Simulierte Zuwachsflächen

Verteilung der Cluster für den Raum Berlin zu reproduzieren, weil in die kinetischen Annahmen keine Ortskoordinaten eingehen.

Das vorgestellte Modell erlaubt es auch, Zukunftsprognosen für die Entwicklung urbaner Agglomerate aufzustellen, Als ein Beispiel (Abb. 4) haben wir die Entwicklung der koreanischen Großstadt Daegu von 1988 bis 2010 simuliert [36].

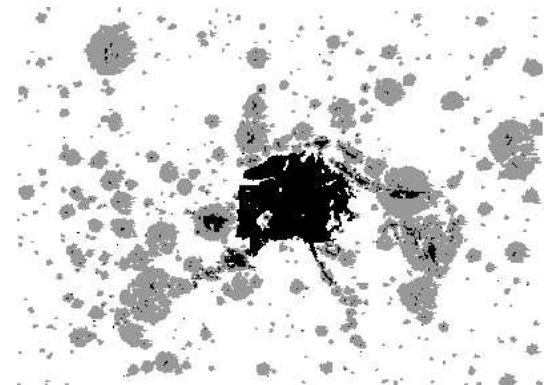
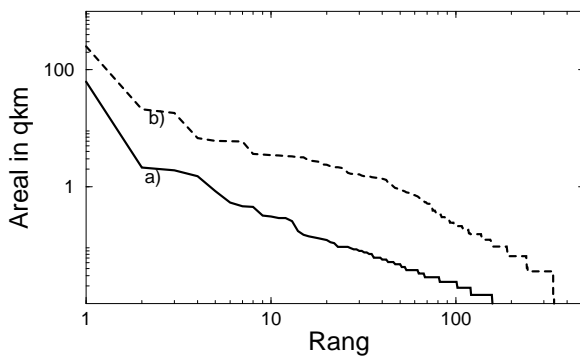


Abbildung 4: links: Simulation der Rang-Größen-Verteilung der Cluster (Daegu 1988 - 2010), rechts: Simulierte räumliche Verteilung der Cluster (Daegu 2010), schwarz: Ausgangszustand (Daegu 1988), grau: Simulierte Zuwachsflächen

Die Simulation der Rang-Größen-Verteilung zeigt auch für das Beispiel Daegu sehr deutlich, daß sich in Zukunft eine Annäherung an die charakteristische Pareto-Verteilung vollziehen könnte. Diese Entwicklung geht auf der räumlichen Ebene einher mit einem im Vergleich zum Zentralcluster

überproportionalen Ausbau der bisher unterentwickelten Vorstädte in der Region Daegu, wodurch die Hierarchie der verschiedenen Cluster aufgefüllt wird.

2.4 Verlagerung von Wachstumszonen

Die Simulation der Rang-Größen-Verteilung der Cluster im urbanen Aggregat Berlin basierte auf der Annahme, daß der größte Cluster (Rang 1) nur noch durch Koagulation mit kleinen Nachbarclustern wächst. Allerdings wurde im Rahmen des obigen Modells keine Aussage darüber gegeben, *warum* und *wann* der größte Cluster sein eigenständiges Wachstum ausbremst; wann also der Übergang zwischen Stadium (i) und (ii) erfolgt.

Eine Erklärung dafür liefert ein Modell, das auf rückgekoppelten Reaktions-Diffusions-Gleichungen basiert und das die Kinetik der urbanen Entwicklung detaillierter beschreiben kann [35]. Dieses sogenannte A-B-C-Modell, das hier nicht im Detail erläutert werden soll, berücksichtigt zwei für das Wachstum urbaner Aggregate charakteristische Bedingungen: (i) urbanes Wachstum erfolgt bevorzugt an attraktiven Plätzen, wobei die Attraktivität wesentlich durch die bereits existierende Bebauung bestimmt wird, (ii) urbanes Wachstum bedingt das "Aufzehren" von freiem Platz für weitere Bebauung und damit die Entstehung von Verarmungszonen in der Nähe großer Cluster, die zu einem lokale Ausbremsen dieses Wachstums führen. Damit ist gewissermaßen eine frustrierte Situation beschrieben, denn die aktuellen Wachstumsplätze ergeben sich aus einem Kompromiß zwischen möglichst großer lokaler Attraktivität und noch verfügbarem freien Platz.

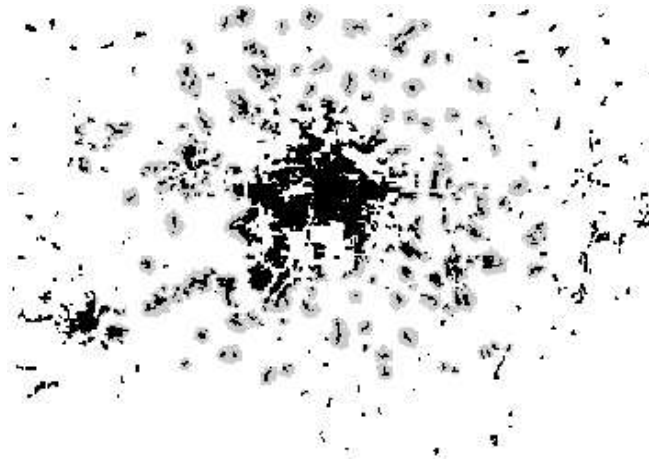


Abbildung 5: Simuliertes Wachstum von Berlin, 1910 - 1920. schwarz: Bebauungsfläche 1910, grau: simulierte Zuwachsflächen. Die Verschiebung der Wachstumszonen zu den zentrumnahen Vororten, die auch historisch stattgefunden hat, ist deutlich zu sehen.

Das heißt, zusätzlich zu den globalen Kopplungen beim urbanen Wachstum werden lokale Kopp-

lungen eingeführt, die durch die bereits vorhandenen urbanen Cluster verursacht werden. Diese Kopplungen lassen sich in Form eines selbstkonsistenten Feldes beschreiben, das von den existierenden Clustern erzeugt wird und die lokalen Anlagerungswahrscheinlichkeiten beeinflusst und auf diese Weise Rückwirkungen auf das weitere Clusterwachstum hat. Die Kinetik dieses Strukturbildungsprozesses wird im Rahmen eines teilchenbasierten Zugangs mit *aktiven Brownscher Teilchen* [26, 27, 32] modelliert, die im Falle der urbanen Aggregation Wachstumseinheiten darstellen, die den oben beschriebenen Kompromiß im Rahmen eines Selbstorganisationsprozesses finden.

Die Computersimulationen dieses Modells [35] (Abb. 5) zeigen in der Tat, daß die Wachstumszonen sich in die äußeren Regionen des urbanen Aggregates verlagern, wobei in Abhängigkeit von der Entwicklung der Verarmungszonen und der sich aufbauenden Attraktivität großer Cluster sowohl das Zusammenwachsen benachbarter urbaner Cluster, als auch die Koexistenz urbaner Cluster beobachtet werden.

3 Selbstorganisation von Wegesystemen

Das gerade erwähnte Modell aktiver Brownscher Teilchen (oder “Active Walkers” [22, 34] in der räumlich diskretisierten Formulierung) kann auch dazu verwendet werden, die Entstehung anderer urbaner Strukturen, wie etwa Wegesysteme, zu modellieren. Aus physikalischer Sicht kann man ein Wegesystem als eine zweidimensionale Struktur auffassen, die sich auf einer Oberfläche herausbildet [29]. Diese Struktur sollte relativ stabil über einen längeren Zeitraum hinweg existieren, und die aktiven Walker, die sich auf der Oberfläche bewegen, sollten vorwiegend entlang der Wegestruktur zu finden sein.

Das Wegesystem, wie wir es hier betrachten, ist eine ungeplante Struktur; es gibt keine zentrale Vorgabe, wo der Weg entlang zu gehen hat und es gibt auch keine “höhere Instanz”, die den Walkern mitteilt, welche Wege sie benutzen müssen. Vielmehr ist es die gemeinsame Aufgabe der Walker, diese Wege selbst hervorzubringen, ihre Existenz durch ständige Nutzung zu sichern und die Wege gegebenenfalls zu verändern, falls sich neue Anforderungen ergeben. Daß diese Aufgabe auch ohne vorherige Abstimmung der Teilchen untereinander lösbar ist, zeigt zum Beispiel die Lebensdauer und die Flexibilität von ungeplanten Trampelpfaden in neu erschlossenen Siedlungen.

Im Rahmen unserer Modellierung fragen wir nach den physikalischen Bedingungen, die zur Herausbildung von Wegenetzen führen [28, 29, 30], und versuchen, ein Minimalmodell aufzustellen, das derartige Wegestrukturen simuliert [33]. Durch eine Kombination dieser Ansätze mit Modellen, die Fußgängerverhalten beschreiben [18, 19], sind wir gegenwärtig auch in der Lage, die Entstehung von menschlichen Wegesystemen realitätsnah zu modellieren [17, 20]. Für die Details sei auf die zitierte Literatur verwiesen.

Dank

Der Autor möchte sich bei den Initiatoren des Workshops für die freundliche Einladung zu diesem Gastvortrag und bei allen Teilnehmern für die sehr interessanten Diskussionen bedanken.

Literatur

- [1] Bäck, T.; Doernemann, H.; Hammel, U.; Frankhauser, P. (1996): Modeling Urban Growth by Cellular Automata, in: H.-M. Voigt, W. Ebeling, I. Rechenberg, H.-P. Schwefel (eds.): *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN IV*, Berlin: Springer, pp. 636.
- [2] Batty, M. (1991): Generating urban forms from diffusive growth, *Environment and Planning A* 23, 511-544.
- [3] Batty, M. (1991): Cities as Fractals: Simulating Growth and Form, in: A.J. Crilly, R.A. Earnshaw, H. Jones (eds.): *Fractals and Chaos*, New York: Springer, pp. 43-69.
- [4] Batty, M. (1995): New Ways of looking at cities, *Nature* 377, 574.
- [5] Batty, M.; Couclelis, H.; Eichen, M. (1997): Urban systems as cellular automata, *Environment and planning B* 24/2, 159.
- [6] Batty, M.; Longley, P.A. (1987): Fractal-based description of urban form, *Environment and Planning B* 14, 123-134.
- [7] Batty, M.; Longley, P.A. (1994): *Fractal Cities*, London: Academic Press.
- [8] Batty, M.; Xie, Y. (1997): Possible urban automata, *Environment and planning B* 24/2, 175.
- [9] Becker, S.; Brenner, K.; Frankhauser, P.; Humpert, K.; Kull, U.; Schaur, E. (1994): Selbstorganisation urbaner Strukturen, *ARCH+* 121, 57-68.
- [10] Deadman, P.; Brown, R.; Gimblet, R. (1993): Modelling Rural Residential Settlement Patterns With Cellular Automata *J. Environmental Management* 37, 147-160.
- [11] Frankhauser, P. (1991): Fraktales Stadtwachstum, *ARCH+* 109/110, 84-89.
- [12] Frankhauser, P. (1992): Fractal Properties of Settlement Structures, *Proc. 1st Intern. Seminar on Structural Morphology, Montpellier-La Grande Motte*, pp. 357-368.
- [13] Frankhauser, P. (1994): *La Fractalité des Structures urbaines*, Paris: Anthropos.
- [14] Frankhauser, P.; Sadler, R. (1992): Fractal Analysis of Urban Structures, in: *Natural Structures - Principles, Strategies and Models in Architecture and Nature*, Proc. Internat. Sympos. SFB 230, Stuttgart, vol. II, p. 57-65.
- [15] Goodchild, M.; Mark, D.M. (1987): The Fractal Nature of Geographical Phenomena, *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 77, 265-178.
- [16] Günther, R.; Shapiro, B.; Wagner, P. (1992): Physical Complexity and Zipf's Law, *J. Theor. Phys.* 31, 525-543.
- [17] Helbing, D.; Keltsch, P.; Molnar, P. (1997): Modelling the evolution of human trail systems, *Nature* 388, 47-50.
- [18] Helbing, D.; Molnar, P. (1995): Social force model for pedestrian dynamics, *Phs. Rev. E* 51/5, 4282-4286.

- [19] Helbing, D.; Molnar, P.; Schweitzer, F. (1994): Computer Simulations of Pedestrian Dynamics and Trail Formation, *in: Evolution of Natural Structures*, Proc. 3rd Intern. Symp. SFB 230, Stuttgart, pp. 229-234.
- [20] Helbing, D.; Schweitzer, F.; Keltsch, J.; Molnar, P. (1997): Active Walker Model for the Formation of Human and Animal Trail Systems, *Phys. Rev. E* 56/3, 2527-2539.
- [21] Humpert, K.; Brenner, K. (1992): Das Phänomen der Stadt als fraktale Struktur, *in: Das Phänomen der Stadt. Berichte aus Forschung und Lehre*, Städtebauliches Institut, Universität Stuttgart, pp. 223-269.
- [22] Lam, L. (1995): Active Walker Models for Complex Systems, *Chaos, Solitons & Fractals* 6, 267-285.
- [23] Makse, H.; Havlin, S.; Stanley, H.E. (1995): Modelling urban growth patterns, *Nature* 377, 608-612.
- [24] Makse, H.; Havlin, S.; Stanley, H.E.; Schwartz, M. (1995): Novel method for generating long-range correlations, *Chaos, Solitons & Fractals* 6, 295-303.
- [25] Schaur, E. (1991): *Non-Planned Settlements: Characteristic Features - Path Systems, Surface Subdivision*, IL 39, Universität Stuttgart.
- [26] Schimansky-Geier, L.; Mieth, M.; Rosé, H.; Malchow, H. (1995): Structure Formation by Active Brownian Particles, *Physics Letters A* 207, 140-.
- [27] Schimansky-Geier, L.; Schweitzer, F.; Mieth, M. (1997): Interactive Structure Formation with Brownian Particles, *in: F. Schweitzer (ed.): Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics*, London: Gordon and Breach, pp. 101-118.
- [28] Schweitzer, F. (1996): Self-Organization of Trail Networks Using Active Brownian Particles, *in: R. Hofestädt, T. Lengauer, M. Löffler, D. Schomburg (Eds.): Computer Science and Biology*, IMISE Report No. 1, Leipzig, pp. 299-301.
- [29] Schweitzer, F. (1996): Selbstorganisation von Wege- und Transportsystemen, *in: K. Teichmann, J. Wilke (Hrsg.): Prozeß und Form natürlicher Konstruktionen*, Berlin: Ernst & Sohn, S. 163-169.
- [30] Schweitzer, F. (1997): Wegenetze organisieren sich selbst, *OIKODROM Stadtpläne Wien*, Heft 1/97, S.45-48.
- [31] Schweitzer, F. (ed.) (1997): *Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics*, part 1: Evolution of Complexity and Evolutionary Optimization, part 2: Biological and Ecological Dynamics, Socio-Economic Processes, Urban Structure Formation and Traffic Dynamics, London: Gordon and Breach.
- [32] Schweitzer, F. (1997): Active Brownian Particles: Artificial Agents in Physics, *in: L. Schimansky-Geier, T. Pöschel (eds.): Stochastic Dynamics*, Berlin: Springer, pp. 358-371.
- [33] Schweitzer, F.; Lao, K.; Family, F. (1997): Active Random Walkers Simulate Trunk Trail Formation by Ants, *BioSystems* 41, 153-166.
- [34] Schweitzer, F.; Schimansky-Geier, L. (1994): Clustering of Active Walkers in a Two-Component System, *Physica A* 206, 359-379.
- [35] Schweitzer, F.; Steinbrink, J. (1997): Urban Cluster Growth: Analysis and Computer Simulation of Urban Aggregations, *in: F. Schweitzer (ed.): Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics*, London: Gordon and Breach, pp. 501-518.
- [36] Schweitzer, F.; Steinbrink, J. (1997): Estimation of Megacity Growth: Simple Rules Versus Complex Phenomena, *Applied Geography* (in press).

- [37] Teichmann, K.; Wilke, J. (Hrsg.) (1996): *Prozeß und Form natürlicher Konstruktionen. Der SFB 230*, Berlin: Ernst & Sohn, S. 163-169.
- [38] Weidlich, W. (1991): Physics and Social Science - the Approach of Synergetics, *Physics Reports* 204, 1-163.
- [39] Weidlich, W. (1994): Settlement formation at the meso-scale, *Chaos, Solitons & Fractals* 4, 507-518.
- [40] White, R.; Engelen, G. (1993): Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns, *Environment and Planning A* 25, 1175-1199.
- [41] White, R.; Engelen, G. (1994): Urban System Dynamics and Cellular Automata: Fractal Structures between Order and Chaos, *Chaos, Solitons & Fractals* 4/4, 563-583.
- [42] *Die Architektur des Komplexen*, ARCH+ 121 (März 1994) S. 24-89
- [43] *Evolution of Natural Structures. Principles, Strategies and Models in Architecture and Nature*, Proc. 3rd Intern. Symp. SFB 230, Stuttgart 1994