

Ökonomische Geographie: Räumliche Selbstorganisation in der Standortverteilung

Frank Schweitzer

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

1 Einleitung: Selbstorganisation

“Selbstorganisation” ist keine grundsätzlich neue Entdeckung in den Wissenschaften, wie an zahlreichen Beispielen in der Wissenschaftsgeschichte gezeigt wurde.¹ Auch in den Wirtschaftswissenschaften haben, spätestens seit ADAM SMITH, Ökonomen versucht, die Wirtschaft als ein selbstorganisiertes System zu erklären.² Das Charakteristische des Selbstorganisationsansatzes liegt dabei vor allem in seiner spezifischen Sichtweise auf das jeweils erklärungsbedürftige Phänomen. Sie impliziert, daß bestimmte Eigenschaften aus dem Phänomen herausprojiziert und deshalb natürlich auch an ihm wahrgenommen werden - Eigenschaften, die vorher zwangsläufig gar nicht in den Blick der Wissenschaften geraten waren.³

¹siehe dazu zum Beispiel: *Wolfgang Krohn/Hans-Jürgen Krug/Günter Küppers (Hrsg.)*, Konzepte von Chaos und Selbstorganisation in der Geschichte der Wissenschaften, (*Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Bd. 3*), Duncker & Humblot, Berlin, 1992; *Rainer Paslack*, Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines Wissenschaftsparadigmas, (Reihe: Wissenschaftstheorie, Wissenschaft und Philosophie Bd. 32), Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1991

²vgl. dazu *Michael Hutter*, Organismus als Metapher in der deutschsprachigen Wirtschaftstheorie, in: *Krohn/Krug/Küppers* (FN 1), S. 87–112, *Heinz Rieter*, Mechanistische und organismische Ansätze in der Wirtschaftswissenschaft, in: *Krohn/Krug/Küppers* (FN 1), S. 51–85

³*Frank Schweitzer*, Wege und Agenten: Reduktion und Konstruktion in der Selbstorganisationstheorie, in: *Hans-Jürgen Krug/Ludwig Pohlmann (Hrsg.)*, Evolution und Irreversibilität, (*Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Band 8*), Duncker & Humblot, Berlin 1997, S. 113-135; *ders.*, Natur zwischen Ästhetik und Selbstorganisationstheorie, in: *Zum Naturbegriff der Gegenwart*, hrsg. von der Landeshauptstadt Stuttgart, Kulturstadt, Stuttgart: Frommann-Holzboog, 1994, Bd. 2, S. 93-119

Heute haben sich unter verschiedenen Namen, wie *Synergetik*, *Autopoiese*, *dissipative Strukturbildung*, *selbstreferentielle Systeme*, *Chaostheorie*, Konzepte etabliert, die die Herausbildung von Strukturen in der anorganischen und organischen Natur, in sozialen Systemen, bei Kognitionsprozessen oder komplexen künstlerischen Produktionen als Selbstorganisationsprozeß beschreiben. Die Breite der Anwendungen des Selbstorganisationsansatzes verdeutlicht, daß es sich dabei um einen fruchtbaren Zugang für das Verständnis komplexer dynamischer Systeme handelt. Auf der anderen Seite müssen wir aber ebenso feststellen, daß die Selbstorganisationstheorie trotz vielfältiger Bemühungen noch weit davon entfernt ist, bereits als einheitliches Paradigma für die Wissenschaft zu gelten. Dem steht bisher nicht nur der unterschiedliche Begriffsapparat, sondern auch die teilweise Inkompatibilität der verschiedenen Konzepte entgegen. Vielmehr sind die einzelnen Zweige innerhalb der Selbstorganisationstheorie erst noch dabei, gemeinsam zu einer Wissenschaft vom Komplexen zusammenzuwachsen.

In diesem Aufsatz soll der Begriff "Selbstorganisationstheorie" verwendet werden, um die genannten Konzepte unter einem Namen zusammenzufassen - ohne damit allerdings die zwischen ihnen bestehenden Unterschiede verwischen oder vereinheitlichen zu wollen. Der Schwerpunkt der weiteren Betrachtungen liegt dabei auf den naturwissenschaftlich orientierten Selbstorganisationskonzepten. Im interdisziplinären Diskurs ist man bislang auf einen "Arbeitsbegriff" von Selbstorganisation angewiesen, wie er etwa durch folgende heuristische Definition gegeben ist:

*"Als Selbstorganisation bezeichnet man die spontane Entstehung, Höherentwicklung und Ausdifferenzierung von komplexen Ordnungsstrukturen, die sich in nichtlinearen dynamischen Systemen über Rückkopplungsmechanismen zwischen den Systemelementen ausbilden, wenn sich die Systeme durch die Zufuhr von unspezifischer Energie, Materie oder Information jenseits eines kritischen Abstands vom statischen Gleichgewichtszustand befinden."*⁴

Definitionen dieser Art, selbst wenn sie nur als heuristisches Arbeitsinstrument gebraucht werden, werfen eine Fülle von Fragen auf, wenn sie aus einem naturwissenschaftlich streng definierten Kontext beispielsweise in die Sozialwissenschaften oder in die Ökonomie übertragen werden. Welche Systemelemente und welche Rückkopplungsmechanismen sind hier gemeint, was ist in solchen Systemen unter der Zufuhr unspezifischer Energie zu verstehen, und woraus bestimmt sich ein kritischer Abstand vom Gleichgewicht?

Zwar weiß man aus zahlreichen naturwissenschaftlichen Beispielen, etwa aus der physiko-chemischen Musterbildung, daß Ordnungszustände bei der dissipativen Strukturbildung nicht von außen vorgegeben, sondern von der Materie durch innersystemische Wechselwirkungen selbst hervorgebracht werden. Aber schon beim Übergang zu organischen Systemen haben wir zu unterscheiden zwischen

⁴Diese heuristische Definition wurde im Sonderforschungsbereich 230 "Natürliche Konstruktionen" (Stuttgart/Tübingen) vorgeschlagen, der von 1984 bis 1995 die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Architekten, Biologen, Ingenieuren, Physikern und Philosophen zu Problemen der Strukturbildung ermöglichte. (Klaus Teichmann/Joachim Wilke (Hrsg.), *Prozeß und Form natürlicher Konstruktionen*. Der Sonderforschungsbereich 230. Berlin: Ernst & Sohn, 1996)

Ordnungszuständen, die “lediglich” auf der Herausbildung von *kohärentem Verhalten* der Systemelemente beruhen,⁵ und solchen, die einhergehen mit einer *internen Differenzierung* der Elemente.⁶ Letzteres scheint gerade auch für ökonomische Systeme typisch zu sein, in denen individuelle Strategien der Agenten, Lernfähigkeit, Spezialisierung u.ä. einen besonderen Anteil an der ökonomischen Entwicklung haben. Diese Punkte spielen aber in den physikalisch orientierten Selbstorganisationstheorien nur eine untergeordnete Rolle, so daß sich die berechnete Frage stellt, ob denn ökonomisch oder soziologisch relevante Prozesse überhaupt mit derartigen vereinfachten, der Physik entlehnten Modellen beschrieben werden können.

Das dies durchaus möglich ist, zeigt die von HAKEN in den 70er Jahren als “Lehre vom Zusammenwirken” begründete *Synergetik*,⁷ die von einem vereinheitlichten Standpunkt aus eine Erklärung für die Entstehung von kollektiven Phänomenen zu geben versucht. Die in der Synergetik betrachteten Systeme sind offene Systeme, die in einem Austausch mit ihrer Umgebung stehen. Dieser Austausch kann durch sogenannte *Kontrollparameter* beschrieben werden, die die globale Kopplung des Systems mit seiner Umgebung erfassen. Die Systeme selbst sind aus vielen Untereinheiten bzw. Untersystemen zusammengesetzt, die miteinander über ganz unterschiedliche, systemspezifische Mechanismen wechselwirken. Durch die *nichtlineare* Wechselwirkung der Untersysteme können auf der Betrachtungsebene des Gesamtsystems neue Strukturen hervorgebracht werden. In physikochemischen Systemen bestehen diese geordneten Zustände beispielsweise in räumlichen, zeitlichen oder raum-zeitlichen Mustern, in biologischen Systemen können auch spezielle, hoch koordinierte Funktionsweisen des Systems das Resultat eines solchen Selbstorganisationsprozesses sein.

Voraussetzung für die Selbstorganisation ist die Instabilität des existierenden Systemzustandes gegenüber einem qualitativ neuen Zustand, der erst noch erreicht werden muß. Ob eine solche Instabilität vorliegt, wird vor allem durch die Kontrollparameter bestimmt, die die globalen Randbedingungen repräsentieren. Ein wesentliches Resultat der Synergetik besteht in der Einsicht, daß die Dynamik beim Übergang in den neuen Ordnungszustand in der Umgebung der Instabilitäten unabhängig von den mikroskopischen Daten der Untersysteme ist und nur durch wenige *kollektive Variable* beschrieben werden kann, die man als *Ordnungsparameter* bezeichnet.

Die Ordnungsparameter sind also nicht von außen vorgegeben, sondern werden vom System selbst

⁵Kohärenz bedeutet hier, daß das zeitlich-räumliche Verhalten der einzelnen Elemente korreliert ist, daß also eine Beziehung zwischen den Elementen existiert, ein *kollektiver Effekt* sich herausbildet. Ein bekanntes Beispiel aus der Physik ist die Herausbildung von Rollzellen bei überkritischer Wärmezufuhr, indem die Flüssigkeitsmoleküle anstelle ungerichteter Bewegung eine “gerichtete” Bewegung auszuführen beginnen.

⁶Dies ist zum Beispiel bei der biologische Gestaltbildung der Fall, wo zu den kollektiven Effekten auch noch eine interne Differenzierung (und Weiterentwicklung) der einzelnen Elemente kommt.

⁷*Hermann Haken, Synergetics. An Introduction. Nonequilibrium Phase Transitions in Physics, Chemistry and Biology*, Berlin: Springer, 2nd ed., 1978, *ders. Advanced Synergetics – Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices*; Berlin: Springer, 1983. Als gemeinverständliche Einführung: *ders., Erfolgsgeheimnisse der Natur. Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken*, Stuttgart: DVA, 1981. Den Erfolg der interdisziplinären Anwendung belegt die von HAKEN herausgegebene und inzwischen mehr als 100 Bände umfassende Reihe “Springer Series in Synergetics”.

generiert: Die Untersysteme erzeugen durch ihre Eigendynamik gemeinschaftlich einen (oder mehrere) Ordnungsparameter, der seinerseits auf diese Untersysteme zurückwirkt und zwar in einer Weise, die sein Überleben selbst wieder sichert. Dies ist eine verbale Darstellung des – wertfrei zu verstehenden – *Versklavungsprinzips* der Synergetik, das von HAKEN allgemein formuliert wurde. Es bedeutet lediglich, daß die agierenden Elemente durch die Art ihrer Wechselwirkung gemeinschaftlich einen Ordner konstituieren, der rückgekoppelt die weitere Entwicklung des Systems “versklavt”, indem er die “Freiheit” der Untersysteme koordiniert. Ein solcher Rückkopplungsmechanismus kann als *zirkuläre Kausalität* beschrieben werden.

Eine zusätzliche Rückkopplung existiert zwischen den Veränderungen des Systems und den Veränderungen in der Umgebung, die die weiteren Entwicklungsmöglichkeiten des Systems einschränken. Auf diese Weise läßt sich im Rahmen der Synergetik ein Szenario entwickeln, das die Selbstorganisation als Wechselspiel von lokalen Interaktionen und globalen Randbedingungen beschreibt.

Die Prinzipien der Synergetik werden mittlerweile auf viele andere Disziplinen, wie Biologie, Psychologie und Ökonomie angewandt.⁸ Dies geschieht unter der heuristischen Voraussetzung, daß die Dynamik bei der Entstehung des neuen Ordnungszustandes im wesentlichen unabhängig von der Art der betrachteten Untersysteme ist und deshalb einen universellen Charakter hat.⁹

Um die Wirkungsweise des Selbstorganisationsprozesses zu erläutern, will ich mich in diesem Aufsatz mit einem ökonomisch motivierten Modell der räumlichen Agglomeration von Produktionszentren befassen. Dieses Modell greift eine Problemstellung aus der ökonomischen Geographie auf, die zunächst diskutiert werden soll.

2 Ökonomische Geographie

Unter dem Einfluß der Selbstorganisationstheorie hat auch die Diskussion um die ökonomische Geographie einen neuen Aufschwung erfahren. Offensichtlich wird die Entstehung und räumliche Verteilung ökonomischer Zentren, deren Wachstum oder Niedergang, stärker von einer *raum-zeitlichen Eigendynamik* bestimmt, als es in der bisherigen ökonomischen Standortlehre zum Ausdruck kommt.

Ein Blick zurück in die Geschichte zeigt, daß die Raumbezogenheit ökonomischer Vorgänge bereits

⁸vgl. auch *Frank Schweitzer (ed.), Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics*, London: Gordon and Breach, 1997

⁹Was als Untersystem – oder als mikroskopisches Element – betrachtet wird, hängt von dem jeweiligen Problem ab; auch die kollektiven Variablen, die Ordner, über die das koordinierte Verhalten des Systems entsteht, sind natürlich in jedem System verschieden und oftmals nicht ohne weiteres erkennbar. In vielen realen Systemen sind die Untersysteme bereits so komplex, daß die Ordnungsparameter nicht aus den mikroskopischen Gleichungen für die Untersysteme gewonnen werden können, sondern von einer phänomenologischen (makroskopischen) Ebene her erfaßt werden müssen.

Anfang des 19. Jahrhunderts von THÜNEN¹⁰ behandelt wurde. Daran anknüpfend, hatte WEBER¹¹ am Beginn unseres Jahrhunderts eine industrielle Standortlehre entwickelt, die bei der Frage nach optimalen Standortbedingungen für die Produktion ökonomische und räumliche Beziehungen gleichermaßen berücksichtigt. ENGLÄNDER¹² erweiterte diesen Ansatz, indem er die Abhängigkeit der Preise von Marktentfernungen und Transportkosten einbezog. Zu den wichtigsten Beiträgen in der Frage nach räumlichen Modellen der ökonomischen Standortverteilung zählen aber zweifellos CHRISTALLERS¹³ Klassiker über die zentralen Orte in Süddeutschland und die ökonomische Standortlehre von LÖSCH.¹⁴

In seinem Buch präsentiert CHRISTALLER sein berühmt gewordenes hexagonales Schema (Abb. 1), das *modellhaft* die räumliche Verteilung von Orten einer bestimmten ökonomischen Bedeutung beschreiben soll. Dabei ist die hexagonale Struktur, auch wenn sie sofort Assoziationen zu den BENARD-Zellen in der Physikochemie oder den Zellverbänden in organischen Strukturen weckt, eher aus Gründen einer gleichmäßigen Flächenerschließung gewählt worden.¹⁵ In unserem Zusammenhang bedeutsamer ist die Verteilung der zentralen Orte, die sich in diesem hexagonalen Schema widerspiegelt.

Danach besitzen zentrale Orte einer bestimmten ökonomischen Bedeutung¹⁶ einen charakteristischen Abstand voneinander, der von CHRISTALLER mit der "Reichweite der zentralen Güter" erklärt wird, die an diesem Ort lokalisiert sind und von dort aus bezogen werden: "Wir können daher das Prinzip, nach dem unser System aufgebaut ist, das Versorgungs- oder Marktprinzip nennen."¹⁷ Anders gewendet: jeder zentrale Ort hat ein der Reichweite seiner zentralen Güter entsprechendes Einzugsgebiet, von CHRISTALLER auch als "Ergänzungsgebiet" bezeichnet.

Die von CHRISTALLER formulierte Frage: "Gibt es Gesetze, die die Anzahl, Größe und Verteilung

¹⁰ Johann Heinrich von Thünen, *Der isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie*, Rostock 1826

¹¹ Alfred Weber, *Über den Standort der Industrien*, 1. Teil: Reine Theorie des Standortes, Tübingen 1909, (*ders.*), *Industrielle Standortlehre*, in: *Grundriß der Sozialökonomik*, 6. Abt., Tübingen 1914, S. 54 ff.

¹² Oskar Engländer, *Theorie der Volkswirtschaft*, 1. Teil: Preisbildung und Preisaufbau, Wien 1929

¹³ Walter Christaller, *Die zentralen Orte in Süddeutschland. Eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmäßigkeiten der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit städtischen Funktionen*, Jena: Fischer, 1933 (Neudruck: Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1968; englische Übersetzung von C. W. Baskin: *Central Places in Southern Germany*, London: Prentice Hall, 1966)

¹⁴ A. A. Lösch, *Die räumliche Ordnung der Wirtschaft*, Jena: Fischer, 1940 (englische Übersetzung von W. G. Woglom: *The Economics of Location*, New Haven, CT: Yale University Press, 1954)

¹⁵ "Wenn das Land durch ein vollkommen gleichmäßiges Netz von zentralen Orten bedient werden soll, so daß nicht zu viele und nicht zu wenige Orte dieser Art vorhanden sind, aber auch keine unbelieferten Landstriche übrigbleiben, so müssen zentrale Orte gleichen Abstand voneinander haben. Das ist aber nur dann gegeben, wenn sie auf den Ecken gleichseitiger Dreiecke liegen, die sich ohne weiteres zu Sechsecken gruppieren." (Christaller, FN (13), S. 69)

¹⁶ CHRISTALLER betont, daß diese Hierarchie nicht einfach durch die Einwohnerzahl ausdrückbar wäre, vielmehr geht es um die Berücksichtigung der konkreten Bevölkerungsverteilung und -struktur, der konkreten Verkehrsverhältnisse, usw.

¹⁷ Christaller, FN (13), S. 77

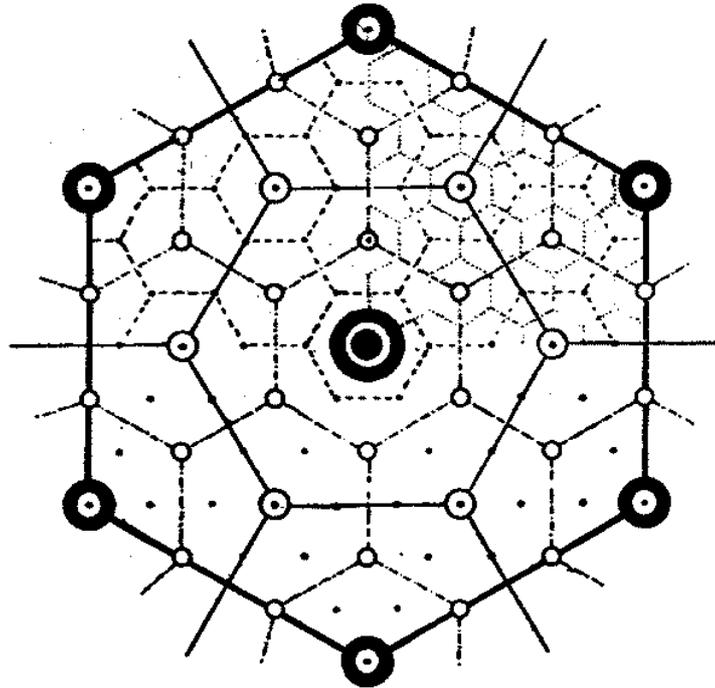


Abbildung 1: System der zentralen Orte nach CHRISTALLER (FN 13, S. 71). In dem Schema ist ein Ort der ersten (höchsten) Hierarchiestufe (*G-Ort*) in gewissem Abstand umgeben von Orten der zweiten Hierarchiestufe (*B-Ort*), die wiederum von Orten der dritten Hierarchiestufe (*K-Ort*) umgeben sind usw. Die Linien deuten jeweils die Grenzen der zugeordneten Ergänzungsgebiete der Orte bestimmter Hierarchie an.

der Städte bestimmen?“¹⁸ läßt sich in bezug auf das o.g. Schema in zwei Teilaspekte zerlegen: (i) die Frage nach der *hierarchischen* Struktur in der Standortverteilung, die sich aus der jeweiligen Bedeutung der Orte bestimmt, (ii) die Frage nach der *räumlichen* Struktur in der Standortverteilung, also der Konzentration bzw. Separation der Standorte. Die Antwort auf diese beiden Fragen kann nicht allein darin bestehen, solche Strukturen etwa anzuerkennen. Ein *evolutionäres* Verständnis wird nur dann erreicht, wenn einsichtig wird, welche *dynamischen Prinzipien* die Strukturierung der Standortverteilung in hierarchischer und räumlicher Hinsicht bewirken. Dabei haben sich interessanterweise die Untersuchungen in der jüngeren Vergangenheit zumeist auf die hierarchische Verteilung konzentriert, weniger dagegen auf die *räumliche Anordnung* der Standorte.

Daß sich, unabhängig von der räumlichen Verteilung, eine hierarchische Struktur bei Städten aufzeigen läßt, hat schon AUERBACH¹⁹ 1913 anhand von Einwohnerzahlen deutscher Städte gezeigt.²⁰

¹⁸ Christaller, FN (13), S. 11

¹⁹ Felix Auerbach, Das Gesetz der Bevölkerungskonzentration, *Petermanns Mitteilungen* 59 (1913) 74-76

²⁰ Eine Untersuchung, die übrigens von CHRISTALLER verlacht wurde.

Später haben GIBRAT²¹ und LOTKA²² ähnliche Untersuchungen für das französische bzw. amerikanische Städtesystem durchgeführt und eine überraschende Regelmäßigkeit der beobachteten Größenverteilung festgestellt. Die heute allgemein akzeptierte und empirisch bestätigte Form für die ranggeordnete Verteilung der Städte nach ihrer Einwohnerzahl folgt der Gleichung: $n_k = n_1 k^{-q}$, wobei n_k die Anzahl der Städte mit dem Rang k ist und q der sogenannte PARETO-Exponent.²³ In dieser Form wurde sie bereits von ZIPF²⁴ zur Beschreibung der Rang-Größen-Verteilung von Städten verwendet. Inzwischen ist die PARETO-ZIPF-Verteilung in vielfältigen Zusammenhängen (wieder)entdeckt worden und bildet heute in verallgemeinerter Form als *power law* zur Beschreibung langreichweitiger Korrelationen einen der Eckpfeiler in der Theorie komplexer hierarchischer Systeme.²⁵

Für unsere Diskussion ist interessant, daß ZIPF diese Verteilung aus seinem "Prinzip der Minimalisierung des Aufwandes" begründet. Danach drückt die hierarchische Verteilung einen Gleichgewichtszustand zwischen zwei entgegengesetzten Prinzipien aus, einer Tendenz zur Konzentration und einer Tendenz zur Diversifikation. Im Falle der Größenverteilung der Städte konkurrieren beide Prinzipien miteinander um die Minimierung von Transportkosten: Um diese möglichst gering zu halten, versucht der Produzent von Gütern sich einerseits möglichst nahe an den Ressourcen anzusiedeln, andererseits will er auch möglichst nahe am potentiellen Konsumenten der Güter sein. In Abhängigkeit von der Art der Güter (bzw. Dienstleistungen) kann dabei einmal die eher homogene Verteilung der Orte überwiegen, wie etwa bei der landwirtschaftlichen Produktion, oder die starke Konzentration, wie etwa bei höheren Verwaltungsaufgaben. Diese Argumentation wurde später immer wieder aufgenommen, bis hinein in die "new economic geography", auf die ich noch zu sprechen komme.

In den letzten Jahren wurden, insbesondere von HAAG und PUMAIN, stochastische Migrationsmodelle entwickelt, die es gestatten, die hierarchische Entwicklung eines Systems von Städten zu simulieren und anhand empirischer Daten zu validieren.²⁶ Dazu wird eine Verteilung von Orten

²¹ R. Gibrat, *Les Inégalités Économiques*, Paris: Sirey, 1931

²² Alfred J. Lotka, *The law of urban concentration*, *Science* **94** (1941). Dies ist nur ein Beispiel für Lotkas vielseitige und weitreichende Untersuchungen zu Evolutionsfragen; es sei an dieser Stelle auch ausdrücklich auf die Edition am Ende dieses Bandes verwiesen.

²³ PARETO hatte diese Verteilung als erster zur Beschreibung von hierarchisch strukturierten Einkommensverteilungen in Firmen in die Ökonomie eingeführt.

²⁴ G. K. Zipf, *Human Behavior and the Principle of Least Effort*, Reading, MA: Addison Wesley, 1949

²⁵ Manfred Schroeder, *Fractals, Chaos, Power Laws. Minutes from an Infinite Paradise*, New York: Freeman, 1991, Werner Ebeling/Jan Freund/Frank Schweitzer, *Komplexe Strukturen: Entropie und Information*, Stuttgart: Teubner, 1998

²⁶ G. Haag/D. S. Dendrinos, *Towards a stochastic theory of location: A nonlinear migration process*, *Geogr. Anal.* **15** (1983) 269-286, D. S. Dendrinos/G. Haag, *Towards a stochastic theory of location: Empirical evidence*, *Geogr. Anal.* **16** (1984) 287-300, Pierre Frankhauser, *Beschreibung der Evolution urbaner Systeme mit der Mastergleichung*, Dissertation, Universität Stuttgart, 1991, D. Pumain/G. Haag, *Urban and regional dynamics – Towards an integrated approach*, *Environment and Planning A* **23** (1991) 1301-1313, G. Haag, *The Rank-Size Distribution of Settlements as a Dynamic Multifractal Phenomenon*, *Chaos, Solitons & Fractals* **4** (1994) 519-534

betrachtet, deren Einwohnerzahl sich stochastisch durch verschiedene Prozesse ändern kann, z.B. durch Geburt/Tod, Zuzug aus dem "Hinterland", Abwanderung und vor allem durch Migration zwischen existierenden Städten. Die Migrationsrate wird dabei durch zwei Anteile bestimmt: (i) Eine Mobilitätsmatrix berücksichtigt die allgemeine "Beweglichkeit" und die räumliche Distanz zwischen Städten. Hier wurde empirisch festgestellt,²⁷ daß die Distanz oberhalb eines bestimmten kritischen Wertes keinen Einfluß auf das Migrationsverhalten hat. (ii) Eine Nutzensfunktion beschreibt die Attraktivität der jeweiligen Städte. In diese Nutzensfunktion können auch ökonomische Faktoren einfließen, vor allem aber ist die Attraktivität einer Stadt abhängig von ihrer Einwohnerzahl, wobei mit zunehmender Größe Sättigungseffekte eine Rolle spielen können. Anhand von Computersimulationen, in denen verschiedene Annahmen über die Attraktivität von Städten getestet wurden, konnte die Entwicklung eines Systems von Städten hin zu einer hierarchischen PARETO-ZIPF-Verteilung gezeigt werden. Dabei bedingen Unterschiede in der Attraktivität bzw. in der Bevorzugung von Städten zusammen mit den stochastischen Einflüssen bei den individuellen Migrationsentscheidungen, daß Städte einer Größenklasse sich durchaus unterschiedlich entwickeln und ihre Zugehörigkeit zu einem bestimmten Rang ändern können.

Auch wenn diese Migrationsmodelle das Problem der Hierarchisierung in der Verteilung der zentralen Orte sehr gut beschreiben, bleibt die Diskussion einiger Probleme offen: (i) In der Theorie zentraler Orte ist die (sozio-ökonomische) Bedeutung eines Ortes nicht zwangsläufig durch die Einwohnerzahl ausdrückbar, worauf schon CHRISTALLER hingewiesen hatte. (ii) Die Beschränkung auf die Rang-Größen-Verteilung ist eine Reduktion, in die räumlichen Aspekte, also die Lage der Orte zueinander, nicht mehr eingehen.²⁸ (iii) Die PARETO-ZIPF-Verteilung für die ranggeordnete Größenverteilung der Städte wird zwar empirisch bestätigt, jedoch gibt es eine Fülle dynamischer Modelle, die eine solche Verteilung als stabile Endverteilung enthalten, so daß die Evidenz der modellierten Dynamik praktisch schwer abzugrenzen ist.²⁹

Um die räumlichen Aspekte der Standortverteilung einzubeziehen, hat WEIDLICH eine Verbindung

²⁷ G. Haag/M. Munz/D. Pumain/L. Sanders/Th. Saint-Julien, Interurban migration and the dynamics of a system of cities: 1. The stochastic framework with an application to the French urban system, *Environment and Planning A* **24** (1992) 181-198

²⁸ PUMAIN fordert zurecht, daß die geographischen Besonderheiten eines Systems von Städten in den mathematischen Modellen berücksichtigt werden müssen - eine Forderung, die schon CHRISTALLER erhob und mit dem "III. Regionalen Teil" seines Buches auch umzusetzen versuchte. (D. Pumain, Geography, physics and synergetics, in: G. Haag/U. Mueller/K.G. Troitzsch (eds.), Economic evolution and demographic change, *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems* **395** (1993) 157-175)

²⁹ Haag (1994) (FN 26) diskutiert allein für sein Migrationsmodell drei verschiedene Annahmen für die Nutzensfunktion, die unter jeweils unterschiedlichen Bedingungen zu einer PARETO-Verteilung führen.

HENDERSON kommentiert die geteilte Freude über die gefundenen Rang-Größen-Verteilungen lapidar: "Nonetheless, a general power law provides an excellent fit for the data. This power law may be derived from a variety of models, including the urban systems models. But most people feel it is a common statistical artifact, with no special meaning, suggesting neither random processes nor some fundamental law of nature." (J. Vernon Henderson, Ways to Think about Urban Concentration: Neoclassical Urban Systems versus the New Economic Geography, *International Regional Science Review* **19** (1996) 31-36).

des stochastischen Migrationsmodells mit einem ökonomischen Modell untersucht, das (räumlich verteilte) Produktion, Konsumption, Transport, sowie verschiedene interagierende Populationen (produktive Populationen: "Handwerker", "Landwirte", Dienstleistungspopulationen: "Landbesitzer", "Transporteure") berücksichtigt.³⁰ Computersimulationen dieses komplexen Modells zeigen, daß sich die "Handwerker" in "Städten" konzentrieren, um die herum die "Landwirte" homogen verteilt sind. Werden fixe Kosten für die Produktion berücksichtigt, dann konzentrieren sich die "Handwerker" nicht mehr nur in einer Stadt, sondern in mehreren Städten.³¹ Werden darüber hinaus Transportkosten berücksichtigt, dann begünstigt dies die weitere Konzentration der Produktion. Unter bestimmten Annahmen bilden sich Regionen mit mehreren benachbarten Städten heraus. Die Konzentration macht sich auch bei den "Landwirten" bemerkbar, die nun bevorzugt in der Nähe der "Städte" anzutreffen sind.

Dieses Makromodell der Regionalentwicklung wurde in den letzten Jahren durch ein Mikromodell für innerurbane Strukturierung ergänzt.³² Damit schließt es an frühere Arbeiten zur mikroskopischen Modellierung (sub)urbaner Differenzierungsprozesse an, die von ALLEN,³³ PUMAIN,³⁴ WILSON³⁵ und anderen durchgeführt wurden.³⁶

Interessanterweise ist die Diskussion um die "new economic geography", die in den letzten Jahren vornehmlich in den U.S.A. entfacht ist, von all diesen Arbeiten weitgehend unberührt geblieben.³⁷ Dabei zielen die Fragestellungen, die anhand von "new trade theories" und "new growth theories" erörtert werden, durchaus in die gleiche Richtung: es geht um die *räumliche* Verteilung ökonomischer Aktivitäten, um den Einfluß von freiem Handel und Transportkosten auf die ökonomische

³⁰ Wolfgang Weidlich/Martin Munz, Settlement formation, I. A dynamic theory; *Annals of Regional Science* **24** (1990) 83-106, Martin Munz/Wolfgang Weidlich, Settlement formation, II. Numerical Simulation; *Annals of Regional Science* **24** (1990) 177-196, siehe auch: Wolfgang Weidlich, Physics and Social Science - the Approach of Synergetics, *Physics Reports* **204** (1991) 1-163, ders., Settlement formation at the meso-scale, *Chaos, Solitons & Fractals* **4** (1994) 507-518

³¹Tatsächlich wird in diesem Modell ein Einheitsrhombus modelliert, der in 12×12 Boxen unterteilt ist. Unter der Annahme periodischer Randbedingungen wiederholen sich die im Einheitsrhombus gefundenen Strukturen in der Nachbarschaft. Die Angaben über die Zahl der Städte beziehen sich deshalb auf den Einheitsrhombus.

³²vgl. Wolfgang Weidlich, From Fast to Slow Processes in the Evolution of Urban and Regional Settlement Structures, in: Schweitzer (ed.) (FN 8), pp. 475-488, ders., Sociodynamics Applied to the Evolution of Urban and Regional Structures, *Discrete Dynamics in Nature and Society* **1** (1997) 85-98

³³P. Allen/M. Sanglier, A dynamic model of growth in a central place system, *Geogr. Anal.* **11/3** (1979) 256-272, dies., Urban evolution, self-organisation and decision making; *Environment and Planning A* **13** (1981) 167, P. Allen/M. Sanglier/G. Engelen/F. Boon Evolutionary spatial models of urban and regional systems; *Sistemi Urbani* **1** (1984) 25

³⁴D. Pumain/T. Saint-Julien/L. Sanders, Applications of a dynamic urban model, *Geogr. Anal.* **1** (1987) 152-168, D. Pumain/L. Sanders/T. Saint-Julien, Villes et Auto-Organisation, Paris: Economica, 1989

³⁵H. C. W. L. Williams/A. G. Wilson, Some comments on the theoretical and analytical structure of urban and regional models, *Sistemi Urbani* **2/3** (1980) 203, M. Clarke/A. G. Wilson, The dynamics of urban spatial structure: progress and problems, *Journal of Regional Science* **23** (1983) 1-18

³⁶Die Unterschiede zu den genannten Arbeiten werden u.a. in Weidlich (1994) (FN 30) diskutiert.

³⁷Zumindest werden die o.g. Arbeiten nicht zitiert.

Konzentration bzw. Dezentralisierung. Maßgeblich, wenn auch mit sehr unterschiedlicher Akzeptanz, hat sich hier KRUGMAN engagiert.³⁸ Er kritisiert die Vernachlässigung räumlicher Faktoren in ökonomischen Modellen: “countries as dimensionless points within which factors of production can be instantly and costlessly moved from one activity to another”³⁹ - eine Kritik, mit der 40 Jahre früher schon ISARD⁴⁰ seine ökonomische Geographie einleitete (die er allerdings als “Regionalwissenschaft” bezeichnete). In der Tat haben in den vergangenen Jahrzehnten “urban economists” zahlreiche quantitative Modelle zur urbanen und ökonomischen Konzentration entwickelt und zu einer Theorie ausgebaut,⁴¹ so daß auf viele von KRUGMANS Einsichten zur “new economic geography” das bekannte Diktum von dem Neuen, was nicht gut, und dem Guten, was nicht neu ist, zuzutreffen scheint.⁴²

Ausgangspunkt in KRUGMANS Überlegungen zur ökonomischen Geographie ist die neoklassische Theorie urbaner Systeme.⁴³ Hier werden urbane/ökonomische Agglomerationen – in Analogie zu ZIPF (FN 24) – als Resultat zweier widerstrebender Kräfte erklärt: die zentripetalen (auf das Zentrum hin gerichteten) Kräfte beschreiben den Zwang zur Konzentration der ökonomischen Aktivitäten als Folge von Konkurrenz. Die zentrifugalen (vom Zentrum weg gerichteten) Kräfte berücksichtigen dagegen, daß bei wachsender Größe der Agglomeration, u.a. durch die steigenden Grundstückspreise, ökonomische Aktivitäten an die Peripherie verlagert werden, was andererseits größere Wege zum Zentrum zur Folge hat. Im Wechselspiel dieser beiden Kräfte stellt sich dann eine “optimale” Größe für die Agglomeration ein.

Basierend auf diesem Schema, hat KRUGMAN verschiedene Varianten eines räumlichen Modells der urbanen/ökonomischen Konzentration aufgestellt,⁴⁴ bei dem die Transportkosten eine zentrale Rolle spielen. Da in diesem Aufsatz ein alternatives Modell vorgestellt wird, sollen KRUGMANS

³⁸Paul Krugman, *Geography and Trade*, Cambridge, MA: MIT Press, 1991, *ders.*, Increasing returns and economic geography, *Journal of Political Economy* **99** (1991) 483–499, *ders.*, First Nature, Second Nature, and metropolitan location, *Journal of Regional Science* **33** (1993) 129–144

³⁹Krugman, *Geography and Trade* (FN 38), p. 2

⁴⁰Walter Isard, *Location and Space-Economy*, Cambridge, MA: MIT Press, 1956

⁴¹vgl. als Überblick J. Vernon Henderson, *Economic Theory and the Cities*, New York: Academic Press, 1977, *ders.*, *Urban Development. Theory, Fact, and Illusion*, Oxford: Oxford University Press, 1988, M. Fujita, *Urban Economic Theory*, Cambridge: Cambridge University Press, 1989, siehe auch Henderson (FN 29)

⁴²KRUGMAN hat dies bereits lernen müssen: “I am having a terrible time with my current work on economic geography; referees tell me that it’s obvious, it’s wrong, and anyway they said it years ago” (in J. S. Gans/G. B. Shepherd, *How are the mighty fallen: Rejected classic articles by leading economists*, *Journal of Economic Perspectives* **8** (1994) 165–179, p. 178), vgl. auch Andrew M. Isserman, “It’s Obvious, It’s Wrong, and Anyway They Said It Years Ago”? Paul Krugman on Large Cities, *International Regional Science Review* **19** (1996) 37–48. Immerhin will ISSERMAN die Wiederbelebung der Diskussion anerkennen: “Even if some of Krugman’s conclusions are wrong, other obvious, and non virginal, his article focuses our inquiry, raises stimulating questions, and makes us appreciate the limits of our modeling capabilities and our knowledge.”

⁴³siehe Henderson (FN 41)

⁴⁴Paul Krugman, *A dynamic spatial model*, Cambridge, MA: *National Bureau of Economic Research Working Paper* No. 4219, 1992, *ders.*, Urban Concentration: The role of increasing returns and transportation costs, *International Regional Science Review* **19** (1996) 5–30, *ders.*, *The Self-Organizing Economy*, Oxford: Blackwell, 1996

Überlegungen im folgenden etwas ausführlicher diskutiert werden. In einer Variante des Modells betrachtet KRUGMAN eine Population von Arbeitern an verschiedenen räumlich getrennten Orten unterschiedlicher Größe,⁴⁵ an denen Güter produziert, exportiert und importiert werden. Je weiter ein Arbeiter vom Zentrum seines jeweiligen Ortes entfernt wohnt, um so mehr muß er für seine Fahrtkosten aufwenden, was als effektive Einkommensminderung gewertet wird. Andererseits muß der Arbeiter näher am Zentrum mehr Geld für Miete ausgeben, was ebenfalls einer effektiven Einkommensminderung gleichkommt. Es wird angenommen, daß diese Einkommensminderung linear mit der Populationsgröße anwächst. Der Transport von Gütern zwischen den Orten wird durch eine effektive Erhöhung von Preisen beschrieben. Damit läßt sich ein reales Nettoeinkommen für jeden Ort angeben, der von der jeweiligen Einkommensminderung und dem realen Preisindex abhängt.

Ein (instabiles) Gleichgewicht zwischen den Orten wird erreicht, wenn alle Arbeiter an allen Orten dasselbe Realeinkommen erhalten. Anderenfalls wird angenommen, daß schon bei kleinen Unterschieden eine Migration von Arbeitern hin zu Orten mit einem höheren Realeinkommen einsetzt. Für diese Dynamik wird eine EIGEN-FISCHER-Gleichung postuliert, wie sie für Konkurrenz- und Selektionsprozesse in vielen Bereichen der belebten und unbelebten Natur⁴⁶ und auch in der Ökonomie weithin bekannt ist.⁴⁷ Danach migrieren Arbeiter hin zu einem Ort mit überdurchschnittlichen Realeinkommen, wenn ihr Realeinkommen unterhalb des durchschnittlichen Einkommens liegt, wobei die Zu/Abwanderung proportional zur Differenz zwischen dem jeweiligen Realeinkommen und dem Durchschnitt ist.

In einer anderen Variante des Modells wird eine Ökonomie aus zwei Sektoren betrachtet: ein immobililer "agriculture"-Sector und ein mobiler "manufacturing"-Sector, wobei letzter wiederum durch eine EIGEN-FISCHER-Dynamik beschrieben wird. Als Ergebnis dieser Dynamik findet KRUGMAN bei Simulationen seines 12-Regionen-Modells, daß von einer anfänglichen Verteilung mit willkürlichen Produktionsanteilen in den zwölf Regionen nur zwei produktive Regionen übrigbleiben, die zumeist den maximal möglichen Abstand zueinander und exakt den gleichen Anteil an der Gesamtproduktion haben.⁴⁸ Unabhängig von der Frage nach der ökonomischen Relevanz der Ergebnisse, bleibt die Frage nach "multiple agglomerations" unterschiedlicher Größe weiter offen, ebenso das Problem einer Hierarchisierung in der Verteilung der Orte.⁴⁹ Darüber hinaus wirft auch die postu-

⁴⁵Die Simulationen wurden zumeist für 12 Orte ("linear cities") durchgeführt, die hintereinander auf einem Kreis angeordnet sind.

⁴⁶vgl. zum Beispiel *Werner Ebeling/Rainer Feistel*, Physik der Selbstorganisation und Evolution, Berlin: Akademie-Verlag, 1982, *dies.*, Chaos und Kosmos. Prinzipien der Evolution, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1994

⁴⁷KRUGMAN führt sie unter der Bezeichnung "simple Marshallian adjustment mechanism" (*Krugman*, Urban concentration (FN 44), p. 28) oder "law of motion of the economy" (*Krugman*, A dynamic spatial model (FN 44), p. 14).

⁴⁸KRUGMAN findet unter bestimmten Bedingungen lediglich *zwei identische* Orte. Eine leichte Variation der Parameter führt statt dessen nach KRUGMANS (1992) (FN 44) eigenen Angaben immer zu einer *einzigsten* Agglomeration.

⁴⁹"By introducing space, the new economic geography has been unable to model a system or hierarchy of cities in which cities are of different sizes (...) This inability limits sharply the application of the model to questions of urban concentration (...) And so far the introduction of national space has been at a very elementary level." *Henderson*

lierte Dynamik für die Migration der Arbeiter Fragen auf:⁵⁰ Zum einen setzt KRUGMAN in seinen Modellen Vollbeschäftigung voraus, zum anderen muß der Prozeß der Migration und der Wiedereinstellung mit unendlicher Geschwindigkeit ablaufen, da beschäftigte Arbeiter in der Regel nicht migrieren. Ferner bleibt in KRUGMANS Modell ungeklärt, woher die Arbeiter jeweils die vollständige Information über alle Realeinkommen an den verschiedenen Orten bzw. über das durchschnittliche Realeinkommen erhalten.

Ich werde in den folgenden Abschnitten ein dynamisches Modell diskutieren, daß einige dieser Kritikpunkte beseitigt, auch wenn es keine weitreichenden ökonomischen Implikationen berücksichtigt. Dieses Modell beschreibt ebenfalls die Herausbildung räumlich getrennter ökonomischer Zentren - deren Konzentration und Dezentralisierung. Allerdings wird hier u. a. neben der Beschäftigung auch die Arbeitslosigkeit diskutiert, außerdem wird der Prozeß der Migration und Einstellung von Arbeitern in Abhängigkeit von den lokalen ökonomischen Bedingungen *explizit* modelliert.

3 Räumliche Selbstorganisation von minimalistischen Agenten

Nimmt man die These der Selbstorganisationstheorie ernst, dann sollte es durchaus möglich sein, die Komplexität von Strukturen in sehr unterschiedlichen Bereichen aus den gleichen dynamischen Grundprinzipien zu erklären. Unter solchen Gesichtspunkten ergäben sich dann auch Analogien zwischen der ökonomischen Konzentration und Disaggregation und räumlichen Strukturbildungsprozessen, wie sie in der anorganischen und organischen Natur zu finden sind – wobei freilich die wechselwirkenden Untersysteme ganz verschieden sind.

In den Modellen zur ökonomischen Geographie, die im vorherigen Kapitel diskutiert wurden, werden als Untersysteme Individuen betrachtet, die in Abhängigkeit von einer Output-Größe zu bestimmten Orten migrieren und sich dort ansiedeln: Individuen, die in Städte größerer "Attraktivität" ziehen, "Handwerker" und "Landwirte", die sich konzentrieren, um ihre Transportkosten zu senken, oder Arbeiter, die Orte mit höherem Realeinkommen bevorzugen. Die Bestimmung der jeweiligen Output-Funktion mag im Einzelfall sehr komplex sein, da hier eine Vielzahl von soziologischen und ökonomischen Annahmen eingeht. Demgegenüber ist die Dynamik der Individuen im Prinzip relativ einfach: sie reagieren auf räumliche Unterschiede in der Output-Funktion dergestalt, daß sie den jeweils besseren Wert bevorzugen und ihre Migrationsentscheidung danach richten.⁵¹

Von einem physikalischen Standpunkt aus betrachtet, ähnelt das Verhalten dieser Individuen in gewisser Hinsicht physikalischen Teilchen, die sich in ihrer Bewegung ebenfalls nach räumlichen Gradienten von Potentialen richten können. Hier allerdings gibt es den wesentlichen Unterschied, daß

(FN 29, p. 32)

⁵⁰vgl. *Frank Schweitzer*, Modelling Migration and Economic Agglomeration with Active Brownian Particles, *Advances in Complex Systems* 1/1 (1998) 11-37

⁵¹Dabei kann die Mobilität der Individuen im konkreten Fall selbst auch eine komplexe Funktion sein, die von Entfernungen oder ökonomischen Faktoren abhängt.

physikalische Teilchen *lokalen* Gradienten folgen, während die Individuen bei ihrer Migrationsentscheidung offensichtlich *globale* Informationen zugrundelegen: im Idealfall kennen sie den Wert der Output-Funktion an *allen* Orten innerhalb ihres Systems bzw. den globalen *Mittelwert* der Output-Funktion, wie etwa das mittlere Realeinkommen im Fall der Migrationsdynamik der Arbeiter in KRUGMANS Modell. Die dort postulierte EIGEN-FISCHER-Dynamik impliziert eine vollständige Verkopplung der Untersysteme, zum Beispiel hinsichtlich des Informationsaustausches – anderenfalls gäbe es keine vollständige Konkurrenz (“perfect competition”).

Woher die Migranten diese vollständige Information haben, wird in diesen Modellen nicht erklärt - *de facto* wird damit ein unendlich schneller Informationsaustausch im System angenommen, bei dem jede lokale Veränderung der Output-Größe instantan dem gesamten System mitgeteilt wird. In dieser Situation ähneln die Individuen den *rationalen Agenten* der neoklassischen Ökonomie:⁵² hier verfügt nicht nur jeder Agent über ein vollständiges Wissen bezüglich des Ausgangs seiner Aktionen (zum Beispiel der Migrationsentscheidung), sondern alle Agenten verfügen über dasselbe Wissen.

Rationale Agenten sind in der Regel *komplexe* Agenten: autonome Einheiten, die aufgrund von verhaltensbasierten oder wissensbasierten Regeln agieren und durch Lernen oder genetische Evolution Spezialisierungen erreichen können. Dem stehen Agentenmodelle gegenüber,⁵³ die einen minimalistischen Ansatz verfolgen. Hier wird der Agent nicht möglichst komplex konstruiert, sondern es wird nach den *minimalen Eigenschaften* (Regeln, Verhaltensweisen, Aktivitäten usw.) gesucht, die notwendig sind, um einen kollektiven Selbstorganisationsprozeß noch zu ermöglichen. Es geht also weniger um das spezialisierte, autonome Handeln, als um die kollektive Interaktion der Agenten. Für die Wechselwirkung der Einheiten untereinander werden zumeist sehr einfache Annahmen getroffen, die nur von *lokalen* Größen abhängen, also für den jeweiligen Agenten am gegenwärtigen Ort gelten und sich nicht auf das System als Ganzes beziehen oder davon abhängen. Damit sind die *minimalistischen Agenten* durchaus verschieden von Agententypen, die in der ökonomischen Theorie diskutiert werden⁵⁴ – und es stellt sich die Frage, ob die Aggregations- und Disaggregationsphänomene der ökonomischen Geographie nicht auch beschrieben werden können, indem man rein lokale Annahmen über das Migrationsverhalten der Individuen verwendet, anstatt globale Verkopplungen zu postulieren.

Das Problem, wie aus den lokalen Interaktionen der Systemelemente die makroskopischen (globalen) Eigenschaften des Gesamtsystems entstehen, ist eines der Kernfragen der Selbstorganisationstheo-

⁵²vgl. zum Beispiel *Gerald Silverberg/Bart Verspagen*, Collective Learning, Innovation and Growth in a Boundedly Rational, Evolutionary World, *Journal of Evolutionary Economics* 4 (1994) 207-226

⁵³vgl. *Schweitzer*, Wege und Agenten (FN 3)

⁵⁴vgl. zum Beispiel *Hans Föllmer*, Random economies with many interacting agents, *Journal of Mathematical Economics* 1 (1974) 51-62, *J. Holland/J. Miller*, Adaptive Agents in Economic Theory, *American Economic Review Papers and Proceedings* 81, (1991) 365–370, *W. Brian Arthur*, On Designing Economic Agents that Behave Like Human Agents, *Journal of Evolutionary Economics* 3, (1993) 1–22, *Alan Kirman*, Ants, Rationality, and Recruitment, *The Quarterly Journal of Economics*, 108 (1993) 37-155

rie. Wenn die globalen Eigenschaften nicht schon von Anfang an in den Wechselwirkungen der Agenten enthalten waren (wenn auch vielleicht an verborgener Stelle), so müssen sie im Verlauf der Evolution des Systems durch Selbstorganisation entstanden sein. Das System als Ganzes besitzt dann Eigenschaften, die die Elemente für sich genommen nicht haben - und es muß einen Qualitätssprung geben, bei dem diese neue Systemeigenschaft erscheint.

In der ökonomischen Geographie ist diese neue Qualität durch die räumliche Konzentration der ökonomischen Aktivitäten und die hierarchische Organisation der verschiedenen Orte gegeben, die sich im Verlaufe der Entwicklung durch Selbstorganisation herausbildet. Um diesen Prozeß raum-zeitlich zu simulieren, will ich hier ein Modell zur Diskussion stellen, das ursprünglich in einem physikalischen Kontext, zur Beschreibung räumlicher Strukturbildungsprozesse, entwickelt wurde.⁵⁵ Dementsprechend sind die ökonomischen Agenten dieses Modells physikalischen Teilchen nicht unähnlich. Sie sind minimalistische Agenten in dem oben beschriebenen Sinne, insbesondere besitzen sie keinen eigenen Entscheidungsfreiraum und entwickeln keine eigenen Lösungsstrategien. Im Grunde reagieren sie auf eine relativ einfache Weise auf Veränderungen ihrer *lokalen* Umwelt, zum Beispiel, indem sie versuchen, das jeweilige Maximum einer ökonomisch relevanten Größe zu erreichen. Das kann, wie im kommenden Beispiel, das lokale Maximum eines einkommensabhängigen Wohlstands sein; aber auch räumliche Verteilungen der sozialen Wohlfahrt oder der Akzeptanz innerhalb des sozialen Umfeldes sind denkbare Zielfunktionen.

Auf der anderen Seite hängt der gegenwärtige Wert dieser Zielfunktionen selbst wiederum unmittelbar von den Agenten ab: Wohlstand muß erarbeitet, Wohlfahrt finanziert werden, usw. Diese nichtlineare Rückkopplung zwischen den Agenten und dem Feld $h(r, t)$, das den zeitlich und räumlich veränderlichen Wert der jeweiligen Zielfunktion beschreiben soll, läßt sich durch die in Abb. 2 gezeigte *feedback*-Schleife veranschaulichen.

Über das Feld $h(r, t)$ sind also die Agenten des Systems miteinander verkoppelt. Diese Art von Wechselwirkung kann als *indirekte Kommunikation*⁵⁶ der Agenten beschrieben werden, wobei das Feld als Kommunikationsmedium wirkt, das dem jeweiligen Agenten etwas über den gegenwärtigen Zustand des Systems und die Aktivitäten anderer Agenten mitteilt. Wichtig dabei ist, daß die Agenten durch das Feld nur eine *lokale Information* erhalten; sie kennen nicht den Zustand des Systems - den Wert von $h(r, t)$ - an *jedem* Orte r , sondern nur in der Umgebung ihres eigenen

⁵⁵Frank Schweitzer/Lutz Schimansky-Geier, Clustering of Active Walkers in a Two-Component System, *Physica A* **206** (1994) 359-379, Lutz Schimansky-Geier/Michaela Mieth/Helge Rosé/Horst Malchow, Structure Formation by Active Brownian Particles, *Physics Letters A* **207** (1995) 140-146, Lutz Schimansky-Geier/Frank Schweitzer/Michaela Mieth, Interactive Structure Formation with Brownian Particles, in: Schweitzer (ed.) (FN 8), pp. 101-118, Frank Schweitzer, Active Brownian Particles: Artificial Agents in Physics, in: Lutz Schimansky-Geier/Thorsten Pöschel (eds.), Stochastic Dynamics, Berlin: Springer, 1997, pp. 358-371

⁵⁶Frank Schweitzer, Structural and functional information - an evolutionary approach to pragmatic information, *World Futures: The Journal of General Evolution* **50** (1997) 533-550, ders., Selbstorganisation und Information, in: Holger Krapp/Thomas Wägenbaur (Hrsg.), Komplexität und Selbstorganisation - Chaos in Natur- und Kulturwissenschaften, München: Fink, 1997, S. 109-143

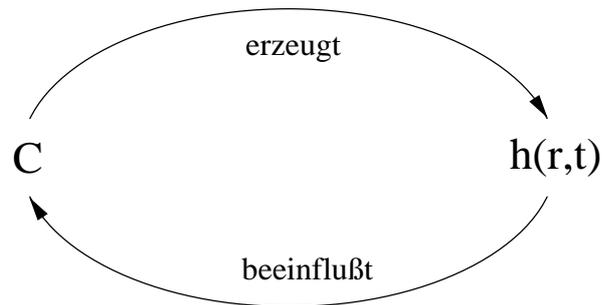


Abbildung 2: Nichtlineare Rückkopplung zwischen den Agenten (C) und dem von ihnen erzeugten/veränderten Feld $h(r,t)$.

Standortes. Natürlich können wir Fälle betrachten, in denen die mit $h(r,t)$ verbundene Information sich unabhängig ausbreiten kann, etwa durch Diffusionsprozesse, die den Einfluß von (globalen) Kommunikationsformen beschreiben.⁵⁷ Aber der Agent soll jeweils nur über diejenige Information verfügen, die durch den Wert von $h(r,t)$ an seinem gegenwärtigen Standort gegeben ist, unabhängig davon, wie diese Information zu ihm gelangt ist.

Die einfache Art der nichtlinearen Rückkopplung in Abb. 2 kann komplexere Formen annehmen, wenn wir verschiedene Gruppen von Agenten betrachten, die von der mit $h(r,t)$ verbundenen Information unterschiedlich beeinflusst werden.⁵⁸ Um im folgenden ein konkretes ökonomisches Beispiel zu diskutieren, will ich zwei Gruppen von Agenten einführen: die Beschäftigten (C_0) und die Arbeitslosen (C_1). Von den Arbeitslosen wird angenommen, daß sie migrieren können, etwa um eine neue Arbeit zu finden, während Beschäftigte an ihrem Ort bleiben. Ferner erhalten die Beschäftigten für ihre Arbeit ein Einkommen, das lokal verschieden sein kann und anstelle von $h(r,t)$ mit $\omega(r,t)$ beschrieben wird.⁵⁹ Die Arbeitslosen (die kein Einkommen erhalten) werden bei ihrer lokalen Migrationsentscheidung davon beeinflusst, wo in ihrer näheren Umgebung das Einkommen am größten ist.⁶⁰ Diese Annahme ließe sich zum Beispiel dadurch begründen, daß Regionen mit hohem

⁵⁷vgl. zum Beispiel *Frank Schweitzer/Janusz Hohyst*, Modeling Collective Opinion Formation by Means of Active Brownian Particles, *Journal of Statistical Physics* (1998, submitted for publication)

⁵⁸Zu verschiedenen Möglichkeiten der nichtlinearen Rückkopplung und Anwendungen auf biologische und urbane Systeme siehe *Frank Schweitzer/Kenneth Lao/Fereydoon Family*, Active Random Walkers Simulate Trunk Trail Formation by Ants, *BioSystems* **41** (1997) 153-166, *Frank Schweitzer/Jens Steinbrink*, Urban Cluster Growth: Analysis and Computer Simulation of Urban Aggregations, in: *Schweitzer (ed.)* (FN 8), pp. 501-518, *Angela Stevens/Frank Schweitzer*, Aggregation Induced by Diffusing and Nondiffusing Media, in: *W. Alt/A. Deutsch/G. Dunn (eds.)*, Dynamics of Cell and Tissue Motion, Basel: Birkhäuser, 1997, pp. 183-192, *Dirk Helbing/Frank Schweitzer/Joachim Keltsch/Peter Molnár*, Active Walker Model for the Formation of Human and Animal Trail Systems, *Physical Review E* **56/3** (1997) 2527-2539

⁵⁹Hier wird angenommen, daß an einem Ort r alle Beschäftigten dasselbe Produkt herstellen und entsprechend dasselbe Einkommen erhalten.

⁶⁰Um hier noch einmal auf die Unterschiede zu KRUGMANS Modell hinzuweisen: Es migrieren nicht Beschäftigte, sondern Arbeitslose - eine Vollbeschäftigung wird nicht angenommen. Außerdem "kennen" die Migranten nur die

Einkommen in der Regel auch Regionen mit hoher Produktivität sind und daß deshalb die Chance, Arbeit und Wohlstand zu finden, dort größer ist als in ärmeren Gebieten. Zusätzlich wollen wir annehmen, daß Arbeitslose in Abhängigkeit von den regionalen ökonomischen Bedingungen eingestellt werden können; umgekehrt können aber auch Beschäftigte arbeitslos werden. Unter diesen Annahmen muß das Schema der nichtlinearen Rückkopplung zu der in Abb. 3 dargestellten Form erweitert werden.

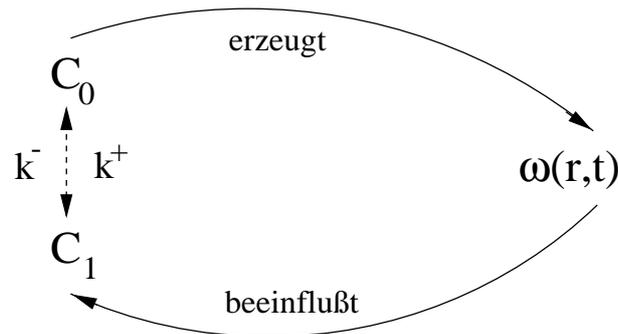


Abbildung 3: Nichtlineare Rückkopplung zwischen den Agenten und dem von ihnen erzeugten/veränderten Feld im Falle von zwei verschiedenen Gruppen von Agenten: die Beschäftigten (C_0) erzeugen ein Feld $\omega(r, t)$, das zum Beispiel ihr Einkommen repräsentiert und die Arbeitslosen (C_1) auf ihrer Suche nach Arbeit beeinflusst. Zusätzlich werden Umwandlungen der Agenten berücksichtigt: Arbeitslose können zu Beschäftigten werden (k^+), während Beschäftigte arbeitslos werden können (k^-).

Dieses Modell läßt sich im Rahmen eines stochastischen Zugangs formalisieren. Dazu betrachten wir N Agenten auf einer Fläche der Größe A . Nur die Gesamtzahl der Agenten sei konstant, die Zahl der Beschäftigten und Arbeitslosen kann sich dagegen ständig ändern. Die Migration eines einzelnen Arbeitslosen (C_1) läßt sich durch folgende dynamische Gleichung beschreiben:

$$\frac{dr_i}{dt} = f(r_i) + \sqrt{2\varepsilon} \xi_i(t) \quad (1)$$

Die Ortsveränderung des Arbeitslosen, dr_i/dt , wird hier durch zwei Kräfte beeinflusst: eine deterministische Kraft $f(r_i)$, die etwa die Attraktivität bestimmter Regionen in seiner Nachbarschaft erfaßt, und eine stochastische Kraft der Stärke ε , die Zufallseinflüsse beschreibt. Diese Kraft ist ungerichtet (ihre Wirkung ist im Mittel Null), sie repräsentiert die Fluktationen. Sind diese klein und die richtungsbestimmende Kraft $f(r_i)$ ist groß, dann wird der Agent in vorhersagbarer Weise migrieren, im anderen Fall ist er eher einem *random walker* vergleichbar.

Die räumliche Dichte der Beschäftigten, $l(r, t)$, kann unserem Modell zufolge nur durch zwei Prozesse geändert werden: Einstellung von Arbeitslosen mit der Rate k^+ (*hiring rate*) und Kündigung von

räumliche Einkommensverteilung ihrer näheren Umgebung und nicht die des Gesamtsystems.

Beschäftigten mit der Rate k^- (*firing rate*). Dies läßt sich in der folgenden Reaktionsgleichung zusammenfassen:

$$\frac{\partial}{\partial t} l(r, t) = k^+ n(r, t) - k^- l(r, t) \quad (2)$$

Die räumliche Dichte der Arbeitslosen, $n(r, t)$, wird dagegen zusätzlich noch durch Migrationsprozesse geändert. Dies führt, unter Berücksichtigung von Gl. (1), zu folgender Gleichung:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} n(r, t) = & - \frac{\partial}{\partial r} f(r, t) n(r, t) + D_n \frac{\partial^2}{\partial r^2} n(r, t) \\ & - k^+ n(r, t) + k^- l(r, t) \end{aligned} \quad (3)$$

Der erste Term beschreibt hier die Response der Arbeitslosen auf die deterministische Kraft $f(r, t)$, der zweite Term beschreibt die Migration als einen Diffusionsprozeß mit dem Diffusionskoeffizienten $D_n = \varepsilon$, der dritte und der vierte Term folgen aus der Einstellung bzw. Kündigung von Agenten mit den Raten k^+ , k^- .

Damit ist die grundlegende Dynamik dieses Agentenmodells vorgegeben - allerdings sind bisher diejenigen Funktionen unspezifiziert, die die *ökonomischen* Annahmen dieses Modells beinhalten: (a) die deterministische Kraft $f(r)$, die lokal die Migration der Arbeitslosen beeinflusst, (b) die Raten k^+ und k^- für die Einstellung von Arbeitslosen bzw. die Kündigung von Beschäftigten, die ebenfalls von der lokalen ökonomischen Situation abhängen werden. Die Bestimmung dieser Funktionen würde im Prinzip eine adäquate ökonomische Theorie voraussetzen, die ich im Rahmen dieses Aufsatzes nicht liefern kann und will. Statt dessen werde ich mich mit einigen einfachen Annahmen begnügen - um so wichtiger ist es mir aber zu betonen, daß hier die Diskussion zwischen Physikern und Ökonomen ansetzen könnte.

4 Konzentration und Disaggregation in einem ökonomischen Modell

Bereits im letzten Kapitel habe ich die Annahme eingeführt, daß die Migration der Arbeitslosen von einer Art "Wohlstandsgefälle" beeinflusst wird, das sich in dem lokalen Wert des Feldes $\omega(r, t)$ ausdrückt, wobei ω das Einkommen ist. Entsprechend wird die deterministische Kraft $f(r)$ von lokalen Gradienten des Einkommens bestimmt:

$$f(r, t) = \frac{\partial}{\partial r} \omega(r, t) \quad (4)$$

Damit ergibt sich das Problem, neben der Bestimmung für die Übergangsraten einen Ausdruck für das Einkommen, $\omega(r, t)$, zu finden, das natürlich von der lokalen Produktivität abhängen wird.

Im folgenden soll vorausgesetzt werden, daß die ökonomische Situation einer Region sich vereinfacht durch eine *Produktionsfunktion* $Y(r, t) = A(r, t) g(r, t)$ beschreiben läßt. Hierbei erfaßt $A(r, t)$ das

Produktionsniveau, während $g(r, t)$ eine Funktion sein soll, die von der lokalen Beschäftigungsdichte abhängt. Wir wollen uns darauf beschränken, den Output $Y(r, t)$ nur als Funktion eines Inputs, der Arbeitskraft, zu beschreiben. Andere Formen des Inputs, wie Kapital, natürliche Ressourcen etc., sollen im Vorfaktor A subsummiert werden, dessen *explizite* Zeit- und Ortsabhängigkeit wir ebenfalls nicht diskutieren wollen. Damit vereinfacht sich die Produktionsfunktion zu:

$$Y\{l(r, t)\} = A l^\beta(r, t) \quad (5)$$

Der Output ist damit explizit nur noch von der lokalen Beschäftigungsdichte $l(r, t)$ abhängig. Der Exponent β beschreibt, wie sich der durchschnittliche Aufwand der Produktion mit dem Umfang der Produktion verändert; hier werden die Fälle $\beta > 1$ (*increasing returns*) und $\beta < 1$ (*decreasing returns to scale*) unterschieden. Ohne weitere Diskussion nehmen wir im folgenden $\beta < 1$ für alle Regionen an.

Der Vorfaktor A , der die ökonomischen Details des Produktionsniveaus erfaßt, soll in unserem Modell insbesondere Effekte berücksichtigen, die durch *Kooperation*, durch wechselseitige Stimulation/Unterstützung unter den Beschäftigten entstehen können und die positive Auswirkungen auf die Produktivität haben. Ist die Zahl der Beschäftigten zu klein, so werden sich diese Synergieeffekte nicht einstellen, ist die Zahl der Beschäftigten dagegen sehr groß, so werden die positiven Effekte der Kooperation vermutlich von den Nachteilen des Massenbetriebs kompensiert. Deshalb werden kooperative Effekte vor allem in mittleren Größenordnungen der Produktion eine Rolle spielen. Dies wird in folgendem Ansatz für die Produktionsfunktion zusammengefaßt:⁶¹

$$Y(l) = \frac{\bar{A}}{2} \left[1 + \exp(a_1 l + a_2 l^2) \right] l^\beta \quad (6)$$

Hier ist \bar{A} eine Konstante, die alle nicht explizit genannten Einflüsse auf die Produktivität zusammenfaßt, während das Verhältnis der Konstanten $a_1 > 0$ und $a_2 < 0$ darüber entscheidet, in welchem Bereich von l kooperative Effekte zu einer Erhöhung des Outputs führen. Abb. 4 zeigt einen typischen Verlauf der Produktionsfunktion.

Mit Hilfe der Produktionsfunktion, Gl. (6), sollen die noch unbekanntenen Größen, $\omega(r, t)$, k^+ und k^- , folgendermaßen bestimmt werden: Das Arbeitseinkommen eines potentiellen Beschäftigten soll dem marginalen Produkt seiner Arbeit entsprechen, also dem Produktionszuwachs, der durch seine Arbeit erzielt wird:⁶²

$$w(r, t) = w\{l(r, t)\} = \frac{dY(l)}{dl} \quad (7)$$

Legt man eine Produktionsfunktion der Form $Y \sim l^\beta$ zugrunde, dann wird bei $\beta < 1$ dieser Produktionszuwachs für jeden neuen Beschäftigten kleiner ausfallen. Nimmt man an, daß es einen

⁶¹*Schweitzer* (FN 50)

⁶²Diese einfachen Annahmen basieren auf dem Standardmodell der "perfectly competitive industry", das hier nicht weiter diskutiert werden soll (vgl. dazu zum Beispiel *Karl E. Case / Ray C. Fair, Principles of Economics*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1992, pp. 278 ff.). Eine allgemein akzeptierte Theorie der Löhne außerhalb von Gleichgewichtssituationen gibt es nicht.

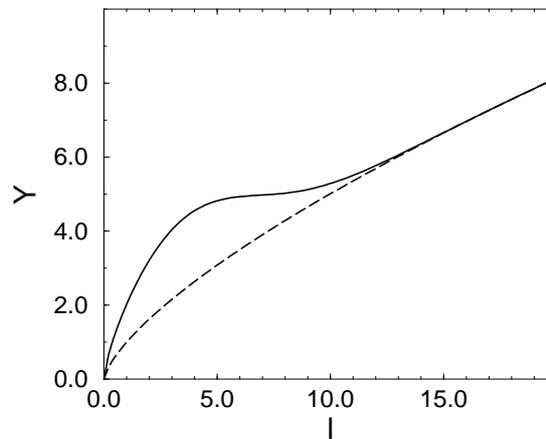


Abbildung 4: Produktionsfunktion $Y(l)$ über der Beschäftigungsdichte l . Die ausgezogene Linie resultiert aus Gl. (6) (Parameter: $\bar{A} = 2$, $a_1 = 0.06$, $a_2 = -0.035$, $\beta = 0.7$), während die gestrichelte Linie die Produktionsfunktion *ohne* kooperative Effekte zeigt ($a_1 = a_2 = 0$).

Minimallohn ω^* gibt (der zum Beispiel gesetzlich vereinbart sein kann), dann wird eine Firma nur solange Neueinstellungen vornehmen, wie $\omega > \omega^*$ gilt. Damit folgt für die Einstellungsrate:

$$k^+ = k^+\{l(r, t)\} = \alpha \exp[\omega\{l(r, t)\} - \omega^*] \quad (8)$$

Die Einstellungsrate ist also über die implizite Abhängigkeit von der Beschäftigtendichte eine Funktion der lokalen ökonomischen Situation, die natürlich raum-zeitlichen Veränderungen unterworfen ist. Der Vorfaktor α beschreibt hierbei die Zeitskala für den Übergang zwischen Beschäftigung und Arbeitslosigkeit.

Für die Kündigung von Beschäftigten und die Bestimmung von k^- können wir im Prinzip dieselbe Argumentation wie bei k^+ heranziehen, d.h. Beschäftigte werden entlassen, falls lokal $dY/dl < \omega^*$ gilt. Damit würde aber die für Migrationsprozesse sehr wesentliche Tatsache vernachlässigt werden, daß Beschäftigte auch *von sich aus* einen Job aufgeben, wenn sie anderswo eine besser bezahlte Anstellung finden können. Eine realistische Annahme für die “firing rate” sollte also neben externen Entlassungsgründen, die durch die lokale ökonomische Situation gegeben sind, auch interne Gründe für die Kündigung berücksichtigen.⁶³ Im Modell ist bereits enthalten, daß Arbeitslose sich bei ihrer Migration nach dem *lokalen* Einkommensgefälle richten. Deshalb wollen wir annehmen, daß auch Beschäftigten dieselbe lokale Information zur Verfügung steht. Damit ergibt sich für die

⁶³Anderenfalls könnte das Modell, vor allem in ökonomischen Wachstumsphasen, sehr schnell eine “dead-lock” Situation produzieren, in der Firmen zwar Beschäftigte mit höherem Einkommen einstellen würden, aber niemand kommt, weil keiner seinen bestehenden Arbeitsvertrag aufheben kann.

Kündigungsrates:

$$k^- = k^- \{l(r, t)\} = \alpha \exp \left[\omega^* - \omega \{l(r, t)\} + q \nabla \omega \right] \quad (9)$$

Der Parameter q kann verwendet werden, um den Einfluß des lokalen Einkommensgefälles auf den Beschäftigten zu bewichten. Ist der Gradient $\nabla \omega$ klein, dann ist die Motivation für den Beschäftigten, seinen Job von sich aus aufzugeben und eine besser bezahlte Anstellung zu suchen, ohnehin gering.

Damit sind die für das dynamische Modell der ökonomischen Aggregation benötigten Funktionen, $f(r)$, k^+ , k^- , unter Verwendung einer Produktionsfunktion, Gl. (6), bestimmt worden. Ich möchte betonen, daß hier der dynamische Prozeß:

Beschäftigung \rightarrow *Arbeitslosigkeit* \rightarrow *Migration* \rightarrow *Wiederbeschäftigung*

explizit modelliert wird. Im Unterschied zu KRUGMANS Modell gibt es keine Annahme, daß dieser Prozeß mit unendlicher Geschwindigkeit abläuft, und es gibt auch keine Garantie für Wiederbeschäftigung.

Im folgenden soll die Dynamik dieses Modells anhand von Computersimulationen diskutiert werden. Das vorgestellte Agentenmodell ist ein teilchenbasiertes Modell, bei dem die Migration des einzelnen Agenten explizit simuliert wird. Die eingeführte Produktionsfunktion basiert dagegen auf einer Dichte, $l(r, t)$ - ein einzelner Beschäftigter definiert keine Produktion. Um diese Dichten zu berechnen, wird das räumlich ausgedehnte System in Boxen einer Größe $(\Delta s)^2$ eingeteilt. Die Zahl der Agenten (C_0 , C_1) innerhalb einer Box bestimmt dann die jeweilige Dichte, $l(r, t)$, $n(r, t)$.⁶⁴

Die Abb. 5, 6 und 7 zeigen, wie sich die Verteilung der Arbeitslosen und der Beschäftigten im Verlaufe der Zeit ändert,⁶⁵ während Abb. 8 den Output der Produktion darstellt. Für die Simulation wurden 500 Agenten verwendet, deren Status (Arbeitsloser - C_1 oder Beschäftigter - C_0) und deren Aufenthaltsort r_i zu Beginn zufällig festgelegt wurden. Insofern entspricht der Ausgangszustand annähernd einer Gleichverteilung. Um so deutlicher zeigen die Abb. 5, 6 und 8 die Herausbildung räumlicher ökonomischer Zentren im Verlauf der Entwicklung. Abb. 7 bringt die zugehörige Entwicklung der Gesamtbeschäftigung bzw. Gesamtarbeitslosigkeit in der Simulation.

Die Simulation zeigt, daß sich die raum-zeitliche ökonomische Entwicklung in zwei Etappen vollzieht:

(i) Während der ersten Etappe, in der Simulation etwa für $t < 1.000$, finden wir einen gegenüber der anfänglichen Gleichverteilung signifikant höheren Anteil an Beschäftigten (ca. 70 Prozent der Agenten). Diese arbeiten in relativ kleinen Produktionsstätten, die räumlich im gesamten System verteilt sind. Für die Herausbildung der vielen kleinen Produktionszentren spielen die kooperativen

⁶⁴Es ist anzumerken, daß die Boxlänge Δs groß gegen die mittlere Migrationslänge *pro Zeitschritt* ist. Das heißt, die Bewegung eines Migranten wird tatsächlich als echte raum-zeitliche Bewegung und nicht nur als ein *hopping* zwischen benachbarten Boxen beschrieben. Für die technischen Details verweise ich auf *Schweitzer*, FN (50).

⁶⁵vgl. *Schweitzer*, FN (50)

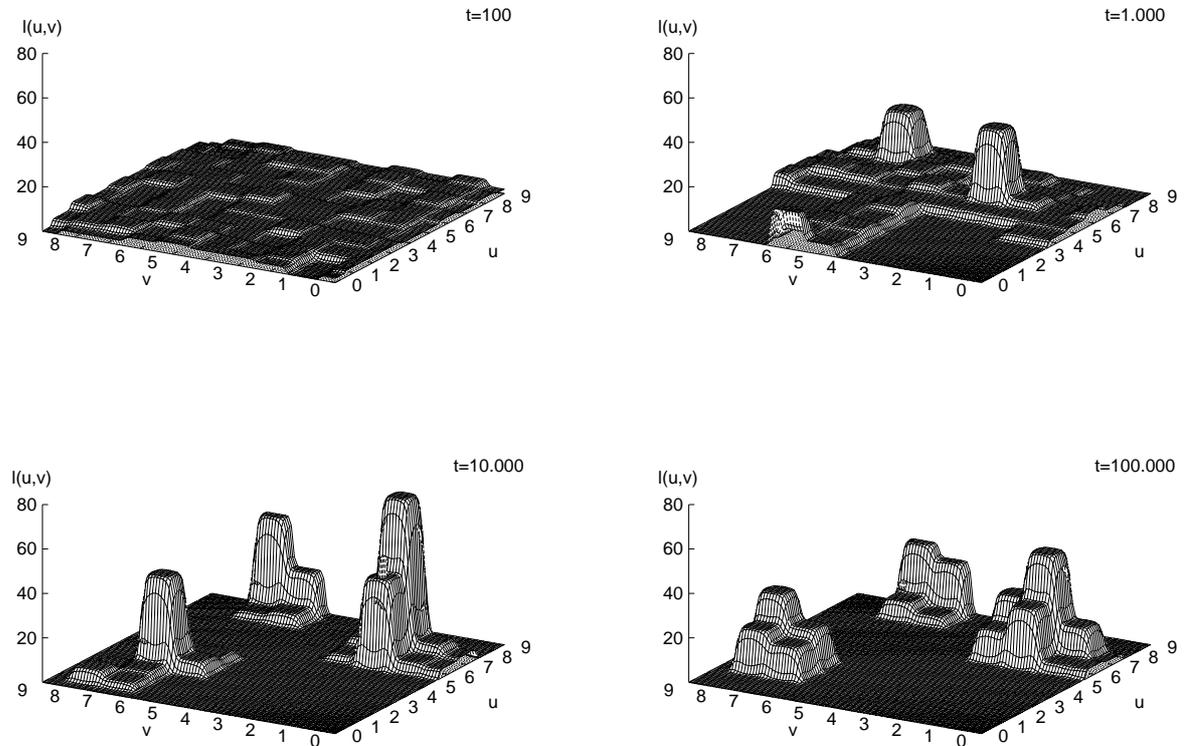


Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der räumlichen Verteilung der Beschäftigten in einem System aus 10×10 Boxen.

Effekte zwischen den Beschäftigten eine große Rolle, denn sie erlauben - verglichen mit dem Modell ohne Berücksichtigung kooperativer Effekte - einen relativ schnellen Anstieg der Produktion.

Diese ökonomische Strategie allein ist jedoch nicht ausreichend, um eine Produktion in größerem Umfang zu etablieren; der anfangs erzielte Produktionszuwachs läßt sich bei einer größeren Zahl von Beschäftigten zunächst nicht in derselben Weise aufrechterhalten.⁶⁶ Dies bedeutet, daß das Wachstum der kleinen Produktionszentren bei einer bestimmten kritischen Beschäftigungsdichte stagniert. Damit ist die erste Etappe durch die relativ stabile (*metastabile*) Koexistenz einer Vielzahl kleiner und eng benachbarter Produktionszentren charakterisiert. Um die großskalige Produktion zu erreichen, bedarf es - physikalisch gesprochen - eines *Phasenübergangs*, eines qualitativen Sprunges,

⁶⁶Die vielfältigen Ursachen betriebswirtschaftlicher Art, wie etwa der Anstieg von Verwaltungskosten, die zur Begründung dieses Effektes herangezogen werden können, will ich hier nicht diskutieren.

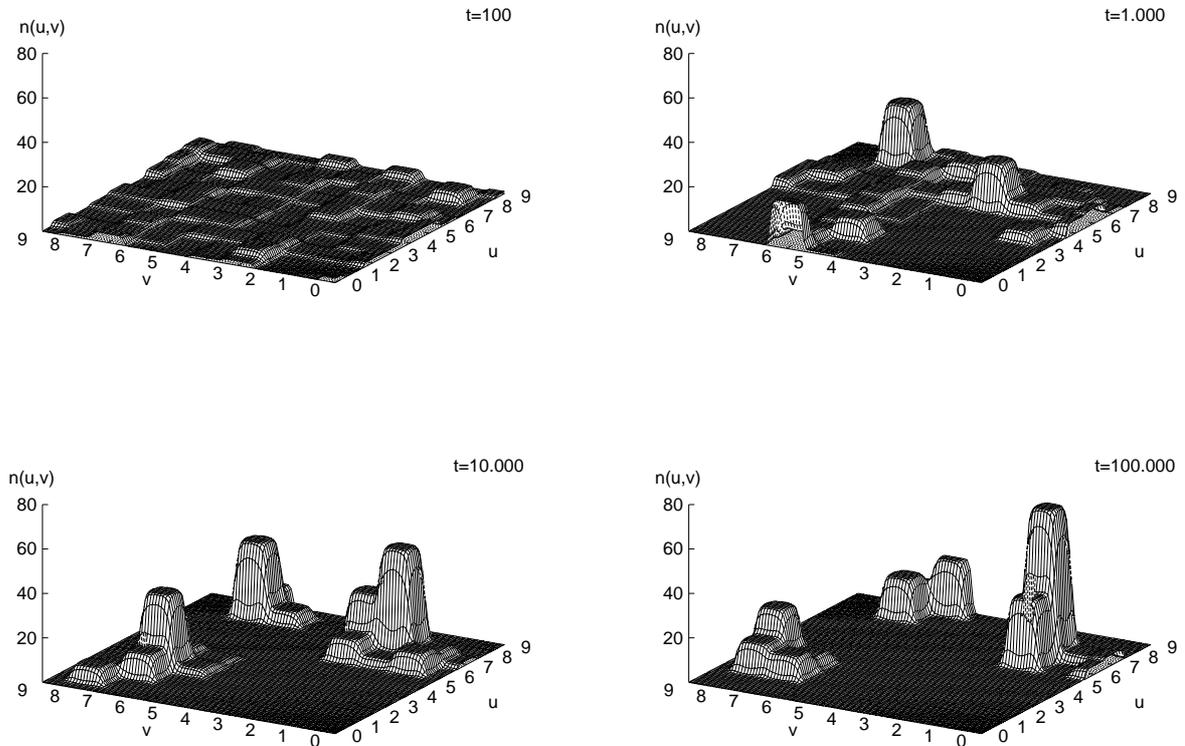


Abbildung 6: Zeitliche Entwicklung der räumlichen Verteilung der Arbeitslosen in der Simulation von Abb. 5.

der mit dem Übergang zur zweiten Etappe vollzogen wird.

(ii) Während der zweiten und sehr viel längeren Etappe, in der Simulation etwa für $t > 1.000$, schaffen es einige der Produktionszentren, den ökonomischen Engpaß ("Flaschenhals-Prinzip") zu überwinden, was ihnen ein weiteres Wachstum ermöglicht. Dieser Übergang, der sich in der Simulation zwischen $t = 500$ und $t = 800$ vollzieht, wird im vorliegenden Modell durch Fluktuationen der Beschäftigungszahl induziert (da wir nur eine variable Input-Größe, die Arbeitskraft, betrachten). Dies bedeutet, daß ein *zufälliger* Anstieg der Beschäftigung unter Umständen dazu führen kann, daß der kritische Zustand überwunden und infolge der danach wieder einsetzenden *positiven* Rückkopplung ein weiteres Wachstum ermöglicht wird.

Dieses ökonomische Wachstum beeinflusst die Migration der Arbeitslosen. Während sie vorher annähernd gleichmäßig verteilt waren, beginnen sie nun, sich um die Wachstumszentren zu kon-

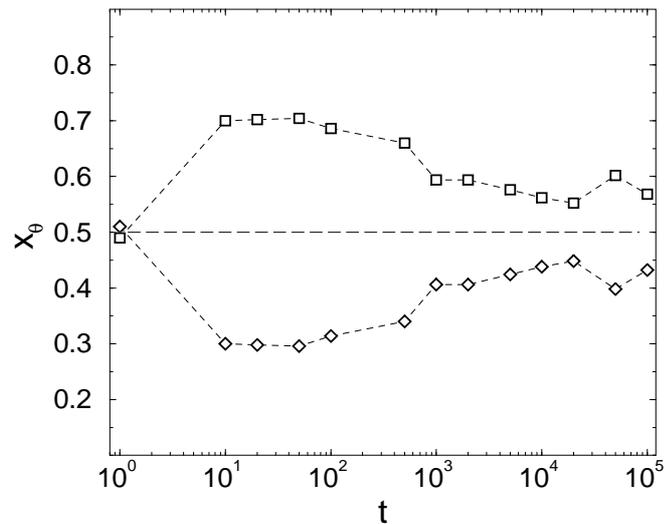


Abbildung 7: Gesamtanteil x_θ der Beschäftigten ($\theta = 0$: □) und der Arbeitslosen ($\theta = 1$: ◇) über der Zeit t (logarithmische Achse). Die Marken bezeichnen Daten der Simulation, die in Abb. 5 und 6 wiedergegeben ist.

zentrieren.⁶⁷ Dies ist rückgekoppelt wichtig für das weitere Wachstum dieser Zentren, das in dem vorliegenden Modell nur durch die Neueinstellung von Arbeitslosen erzielt werden kann. Die Herausbildung von deutlichen Einkommensgradienten beeinflusst außerdem die Beschäftigten, die sich in der Nähe der Wachstumszentren befinden. Für sie steigt die Wahrscheinlichkeit, zugunsten besserer Verdienstmöglichkeiten ihren Job in einer kleinen Firma aufzugeben und ihr Glück in den neuen Wachstumszentren zu versuchen.

Als Resultat dieses rückgekoppelten Selbstverstärkungsprozesses finden wir also die Konzentration von Beschäftigten *und* Arbeitslosen in *denselben* Regionen - während andere Regionen, die früher vorwiegend durch kleine Produktionszentren charakterisiert waren, mit der Zeit aufgegeben werden.⁶⁸ Die lokale Konzentration der Arbeitskraft in den Wachstumszentren erfolgt also letztendlich auf Kosten der früheren kleinen Produktionszentren, die in einem Konkurrenzprozeß mit

⁶⁷Aus anthropomorpher Perspektive erscheint dieses "Verhalten" einsichtig, da die Wachstumszentren neue Arbeit und Wohlstand verheißen. Deshalb ist es mir wichtig, nochmals zu betonen, daß die Agenten dieses Modells *keinerlei* (psychologisch oder ökonomisch motivierte) Intentionen oder Strategien verfolgen. Es ist die grundlegende Dynamik des Systems - die Selbstorganisation, die derartige Effekte hervorbringt.

⁶⁸Die Tatsache, daß in den nicht mehr produzierenden Regionen auch die Arbeitslosigkeit verschwindet, scheint nicht mit den realen ökonomischen Erfahrungen übereinzustimmen, wonach gerade für solche Regionen eine besonders hohe Arbeitslosigkeit existiert. Dabei ist zu bedenken, daß in der Realität die Migration von Arbeitslosen durch vielfältige Faktoren unterbunden wird (zum Beispiel durch soziale Sicherungssysteme, die weiterhin einen minimalen Lebensstandard garantieren, durch vorhandenes Wohneigentum, durch sprachliche und kulturelle Barrieren u.ä.). In dem vorliegenden Modell dagegen migrieren die Arbeitslosen instantan und ohne derartige "Hemmschwellen".

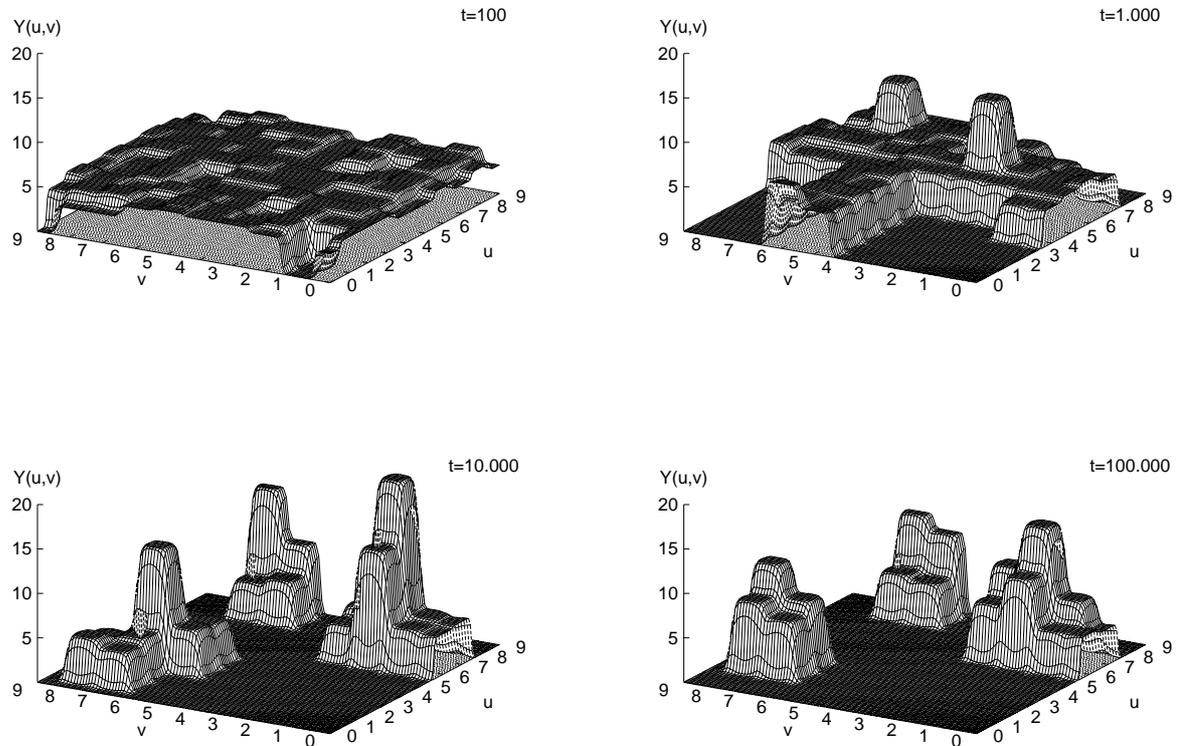


Abbildung 8: Zeitliche Entwicklung der räumlichen Verteilung der Produktion in der Simulation von Abb. 5.

den Wachstumszentren unterliegen. Interessanterweise ist dieser Konzentrationsprozeß mit einem *effektiven Anstieg* der Arbeitslosenrate verbunden. Während in den vielen kleinen Produktionszentren etwa 70 Prozent der Agenten beschäftigt waren, finden in den neuen Zentren, die zwar größer, aber zahlenmäßig geringer sind, nur noch etwa 60 Prozent der Agenten eine Anstellung, wie Abb. 7 zeigt.⁶⁹ Dieser Wert ist aber für die gewählten Modellparameter stabil, wie die Simulation selbst für große Zeiten zeigt. Zwar gibt es immer wieder Schwankungen, die durch stochastische Einflüsse bedingt sind, aber im Mittel bleibt die Arbeitslosenrate während der zweiten Etappe der ökonomischen Konzentration annähernd konstant.

Betrachtet man die räumliche Verteilung, dann führt der ökonomische Konzentrationsprozeß im

⁶⁹Eine Arbeitslosenrate von 40 Prozent wird in der Realität natürlich (noch) nicht erreicht - die konkreten Zahlen sind hier durch die Modellparameter bedingt, der aufgezeigte Trend jedoch gilt allgemein.

Verläufe der Zeit zur Herausbildung von verschiedenen bedeutenden ökonomischen Regionen, die relativ ausgedehnt sind (also mehrere Boxen umfassen) und mehrere Subregionen mit unterschiedlicher Produktivität einschließen. Die Dynamik dieser ausgedehnten Regionen zeigt im Langzeitverhalten (bis $t = 100.000$) einige bemerkenswerte Eigenschaften:

- (a) eine *stabile Koexistenz* der großen ökonomischen Regionen, indem sie eine bestimmte kritische Distanz zueinander aufweisen. Dieser *kritische Abstand* - durchaus ein Selbstorganisationsphänomen, das sich in den Simulationen ohne äußeres Zutun einstellt - verhindert, daß sich die ökonomischen Zentren gegenseitig Konkurrenz machen. Statt dessen hat jedes Zentrum das ihm zukommende "Einzugsgebiet" herausgebildet – ein Ergebnis, das Annahmen der Theorie zentraler Orte *dynamisch* begründet. Die Langzeitsimulationen haben deutlich gezeigt, daß diese Koexistenz von räumlich separierten Zentren tatsächlich stabil ist.
- (b) ein *quasi-stationäres Nichtgleichgewicht* innerhalb der großen ökonomischen Regionen. Wie gerade die Computersimulationen deutlich machen, erreichen die lokalen Werte für die Beschäftigten oder die Arbeitslosen auch im Langzeitlimit keineswegs einen fixen Wert, wie er in deterministischen Modellen oder in der Gleichgewichtstheorie erzielt wird.⁷⁰ Statt dessen haben diese ökonomischen Regionen weiterhin eine *Eigendynamik*, die durch die Basisprozesse Migration, Einstellung und Kündigung von Agenten bestimmt wird.

5 Ausblick

Wie die beiden Etappen der Computersimulation gezeigt haben, wird mit dem hier vorgestellten ökonomischen Aggregationsmodell ein für Evolutionsprozesse typischer Zyklus von

... *Stabilität* → *Instabilität* → *Stabilität* ...

abgebildet, wobei die vor und nach der Instabilität existierenden stabilen Systemzustände jeweils ganz unterschiedliche Strukturen aufweisen können. Im vorliegenden Fall ist die anfängliche Systemstruktur durch eine breit verteilte Kleinproduktion gekennzeichnet. Gegenüber dem qualitativ neuen Zustand, der konzentrierten Großproduktion, der im Verlaufe der Entwicklung erst noch erreicht werden muß, ist dieser Ausgangszustand allerdings instabil. Die treibende Kraft dieses Überganges ist letztlich die Produktion, die im Falle der Großproduktion ein höheres Einkommen ermöglicht - wengleich für insgesamt weniger Arbeiter. Die Berücksichtigung räumlicher Entfernungen ermöglicht es, daß mehrere solcher ökonomischen Zentren miteinander koexistieren, da sie, aufgrund eines überkritischen Abstandes voneinander, sich letztlich gegenseitig keine Konkurrenz mehr machen.

In dieser Hinsicht reproduziert das Modell – als Ergebnis einer "bottom-up"-Beschreibung – Aussagen der Theorie der zentralen Orte, wo Einzugsgebiete eine wichtige Rolle spielen. Was in diesem

⁷⁰Im Unterschied dazu vgl. zum Beispiel KRUGMANS Modell: "start the economy with a random allocation of manufacturing workers across locations, and then let it evolve until it converges" (*Krugman, 1992 (FN 44), p. 35*)

räumlichen Selbstorganisationsmodell bisher noch fehlt, ist die Reproduktion einer *Hierarchie* von Standorten unterschiedlicher Bedeutung. Dies ist dadurch verursacht, daß wir bisher auch nur die Produktion *eines* Gutes berücksichtigt haben. Eine komplexere Produktionsfunktion, die unterschiedliche Größenordnungen für die Produktion verschiedener Güter berücksichtigt, könnte statt dessen auch zu unterschiedlichen Verteilungen kleiner und großer Produktionszentren und zu einer räumlichen Koexistenz von Standorten unterschiedlicher Größe führen.

Es stellt sich am Ende die Frage, welchen Wert dynamische Modelle, wie das im vorherigen Kapitel dargestellte, für ein evolutionäres Verständnis der Ökonomie haben können. Dem Ökonomen mögen einige der hier verwendeten ökonomischen Annahmen zu simpel erscheinen. Dem steht die große Flexibilität des Modells gegenüber, das nur in zwei bzw. drei Funktionen von direkten ökonomischen Annahmen abhängt, die im Einzelfall beliebig komplex gestaltet werden können. Damit existiert eine relativ einfache Möglichkeit, um zu überprüfen, welche ökonomischen Faktoren tatsächlich die Standortverteilung beeinflussen und welche zwar theoretisch interessant, für die Dynamik aber letztlich irrelevant sind.

Da das Modell eine *raum-zeitliche* Simulation der dynamischen Vorgänge erlaubt, kann auch die Ko-Evolution von Standorten untersucht werden. Bereits in der vereinfachten Variante, der Produktion *eines* Gutes, zeigt die Simulation, wie ökonomisches Wachstum und ökonomischer Niedergang gleichzeitig, wenn auch an räumlich verschiedenen Orten ablaufen, was zu interessanten raum-zeitlichen Strukturen führt. Indem zusätzliche wechselseitige Abhängigkeiten in der Produktion, zum Beispiel durch Zulieferung, eingeführt werden, lassen sich auch komplexere Zusammenhänge bei der Standortentwicklung simulieren.