

Emergenz und Interaktion

Frank Schweitzer

GMD - Institut für Autonome intelligente Systeme (AiS)
Schloß Birlinghoven, 53754 Sankt Augustin
e-mail: schweitzer@gmd.de, <http://ais.gmd.de/~frank/>

1 Übergänge

Huckelpuckel saß auf der Eck,
Huckelpuckel fiel in den Dreck.
Und auch der König mit seinem Heer
rettete Huckelpuckel nicht mehr.¹

Ja, das passiert nicht nur Weicheiern wie Huckelpuckel: ein zufälliger Windstoß, und schon wird das System aus seinem eben noch so sicheren Zustand herausgetrieben und in einen neuen, ganz anders gearteten Gleichgewichtszustand überführt. Und auch der König, Symbol der geballten Macht und Energie, vermag daran nichts mehr zu ändern.

Physikalisch gesprochen, erfolgt hier ein Übergang von einem (ehemals) stabilen Systemzustand in einen neuen; dieser Übergang ist an die Zufuhr eines gewissen Maßes an Energie gebunden, die dafür sorgt, daß das System aus seinem früheren stabilen Zustand herausgetrieben wird. Der neue Systemzustand besitzt andere Qualitäten als der frühere, es ist also Neues entstanden. Und in einigen Fällen ist dieser Übergang sogar irreversibel, wie uns das Ei auf dem Fußboden lehrt.

Aber ist *das* Emergenz? Historisch gesehen² ist der Emergenz-Begriff zwar mit der Entstehung von neuen Systemeigenschaften verknüpft, allerdings aufgrund einer irreduziblen Wechselwirkung von Untersystemen: "Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile." Diese Sichtweise impliziert mithin die Unterscheidung von "höheren" (System)-Ebenen und "niederen" (Untersystem)-Ebenen.

Folgt man einer solchen Emergenz-Auffassung, so ist der neue Systemzustand von Huckelpuckel keineswegs ein emergentes Phänomen - es sei denn, die einzelnen Bestandteile des Eies hätten infolge

¹ *Ping, pang, poch! Englische Kindergedichte*, Nachdichtung von Heinz Kahlau, Berlin: Der Kinderbuchverlag, 1967

² A. Stephan, "Emergence - A Systematic View on its Historical Facets", in: A. Beckermann, H. Flohr, J. Kim (eds.), *Emergence or Reduction? Essays on the Prospects of Nonreductive Physicalism*, Berlin, 1992, pp. 25

einer spezifischen Wechselwirkung untereinander selbst diesen unglücklichen Sturz verursacht. Der entscheidende Auslöser für den Transformationsprozeß ist hier die *Perturbation* von *außen*, nicht die Interaktion im Innern.³

Interessanterweise werden aber derartige, von außen induzierte Übergänge durchaus als Emergenzphänomene interpretiert, so daß es sinnvoll erscheint, sich zunächst mit diesen Auffassungen von Emergenz auseinanderzusetzen, bevor danach der Emergenzprozeß als Folge kollektiver Interaktion diskutiert wird.

2 Das Pendel

Bei Übergängen, die das Resultat einer äußeren Anregung sind, kann allgemeiner auch von *Phasenübergängen* gesprochen werden - ein physikalisches Konzept, das aus der Thermodynamik stammt und prinzipiell auch auf Nichtgleichgewichtssysteme anwendbar ist. Im Gleichgewichtsfall bestimmen die thermodynamischen Randbedingungen, also zum Beispiel Druck oder Temperatur, den thermodynamisch stabilen Zustand eines Stoffes, zum Beispiel des Wassers, das bei $T = 20^\circ\text{C}$ und Normaldruck als flüssige Phase vorliegt. Erhöht man die Temperatur z.B. auf über $T = 100^\circ\text{C}$, dann geht die flüssige in die gasförmige Phase über. Es sind die geänderten äußeren Randbedingungen, die dem Wasser diesen neuen Gleichgewichtszustand vorschreiben. In der Theorie der Nichtgleichgewichtsphasenübergängen werden diese Randbedingungen unter dem Begriff der *Kontrollparameter* verallgemeinert, die die globale Kopplung des Systems mit seiner Umgebung erfassen. Bei bestimmten kritischen Werten eines solchen Kontrollparameters kann das System in einen neuen dynamischen Zustand übergehen - wobei dieser Übergang freilich von außen induziert und "kontrolliert" wird.

Ähnliche Verhältnisse liegen auch bei getriebenen dynamischen Systemen vor. Betrachten wir zum Beispiel ein Pendel, das von außen durch eine periodische Kraft F_A angeregt wird. Ist $F_A = 0$, dann wird das Pendel sich aufgrund der Reibungskraft in Ruhelage befinden. Dies ist unter den gegebenen Bedingungen ein stabiler Zustand. Schaltet man nach einer bestimmten Zeit die periodische Kraft F_A mit nicht zu starker Amplitude hinzu, dann beginnt das Pendel unregelmäßig zu schwingen. Allerdings wird die Schwingung des Pendels schon nach kurzer Übergangszeit vollständig durch die Anregungsamplitude und die Frequenz der periodischen Kraft bestimmt. Diese sogenannte erzwungene Schwingung stellt unter den gegebenen Bedingungen wiederum einen stabilen Zustand dar. In Abhängigkeit davon, ob die äußere Kraft - die hier als Kontrollparameter wirkt - groß oder klein ist, lassen sich zwischen dem ersten und dem zweiten stabilen Zustand Übergänge durchführen. Besonders festzuhalten ist, daß die *gesamte* Dynamik des Pendels - sowohl für die beiden stabilen Regimes als auch für die Übergangsperiode - durch ein und dieselbe dynamische Gleichung be-

³Natürlich gibt es auch die Möglichkeit von Zufallsschwankungen im Innern, die zu überkritischen Fluktuationen werden können - aber dies stellt die weitere Diskussion hier nicht in Frage.

schrieben wird. Was sich im Verlauf der Zeit ändert, ist *nicht* die *Dynamik*, nach der das Pendel sich bewegt, sondern “lediglich” die Kraft F_A , die entweder $F_A \simeq 0$ oder $F_A \neq 0$ ist.

Wenn man für den eben beschriebenen Fall die Pendelauslenkung x als Funktion der Zeit t darstellt, dann würde sich ein Kurvenverlauf ergeben, wie er in Abb. 1 schematisch dargestellt ist. Diese Abbildung habe ich einer Arbeit von Völcker⁴ entnommen, wo vom Pendel freilich gar nicht die Rede. Vielmehr dient die Abbildung Völcker dazu, einen “Emergenzprozeß in dissipativen Systemen” zu illustrieren. Wie aus der Beschriftung ersichtlich ist, wird der Übergang zwischen den zwei unterschiedlichen Bewegungsformen als Emergenz interpretiert mit dem Hinweis darauf, daß das System nach der transienten Phase einer “neuen Dynamik” folgt.

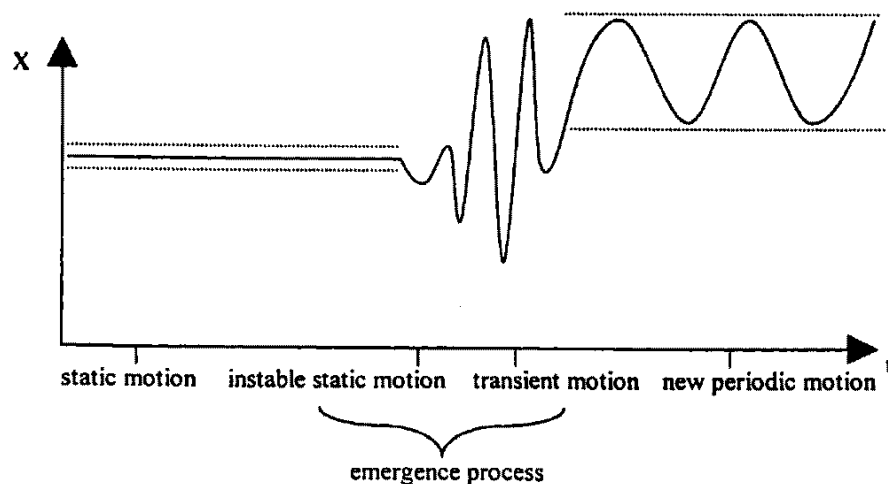


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Emergenzprozesses nach Völcker⁴

Hier stoßen wir auf ein Kernproblem innerhalb der Emergenz-Diskussion, nämlich auf die Frage, was denn “neue Dynamik” heißen soll. Ist eine Dynamik neu, wenn sie eine neue Bewegungsform - zum Beispiel eine erzwungene Schwingung - beschreibt? Oder kann nicht vielmehr diese neue Bewegungsform eine von vielen Realisierungen sein, die aus *ein und derselben* Dynamik hervorgehen? Möglicherweise hat sich gar nicht die Dynamik selbst geändert, sondern ein bestimmter Kontrollparameter hat einen kritischen Wert überschritten, wie das Beispiel des angeregten Pendels zeigt.

Diese Betrachtung kann selbst für Fälle gelten, in denen die Bewegungsformen sehr komplex werden. Beim Pendel ist dies dann der Fall, wenn die Amplitude der anregenden Kraft sehr groß wird. Oberhalb bestimmter kritischer Werte des Kontrollparameters beginnt das Pendel *chaotische Bewegungen* auszuführen (Überschlag, Rotationsregime), das heißt, kleinste Änderungen in

⁴W. Völcker, “Describing the Emergence of new dynamical structures in phase space”, Diskussionspapier des Workshops “Selbstorganisation in der Ökonomie”, Jena, Februar 1999

der Pendelbewegung werden innerhalb kürzester Zeit verstärkt, so daß die Vorhersagbarkeit für die Pendelauslenkung gegen Null geht. Es ändert sich hier wohlgerne nicht die Dynamik des Pendels, die immer noch durch dieselbe Gleichung gegeben ist - sondern es ändert sich die Möglichkeit, die Auslenkung des Pendels für eine bestimmte Zeit vorauszuberechnen. Wie bei anderen Beispielen für deterministisches Chaos führt auch hier der Weg ins Chaos über ein Periodenverdopplungs-Szenario, wobei für bestimmte Werte des Kontrollparameters auch "Fenster im Chaos" auftreten können.

Natürlich wird auch beim Pendel mit dem Übergang vom statischen in das periodische und das chaotische Regime "Neues" produziert. Dies gilt im trivialen Sinne für eine chaotische Trajektorie, deren Verlauf immer "neu" und unerwartet ist. Aber es gilt auch für die Entstehung neuer Attraktoren im Phasenraum. Der Phasenraum, der durch die Variablen des Systems aufgespannt wird, umfaßt alle Zustände, die ein dynamisches System im Verlaufe der Zeit einnehmen kann. Eine Trajektorie wäre dann eine bestimmte (zeitliche) Abfolge von Systemzuständen im Phasenraum. Unter bestimmten Umständen konzentrieren sich die Trajektorien nach einiger Zeit innerhalb bestimmter Gebiete des Phasenraumes. Diese werden dann als (stabile) Attraktoren bezeichnet - gewissermaßen eine Verallgemeinerung des Gleichgewichtszustandes für dynamische und Nichtgleichgewichtssysteme. Instabile Attraktoren werden dagegen als Repeller bezeichnet, da die zugehörigen Regionen alle Trajektorien abstoßen.

Im Falle des Pendels wären dann drei verschiedene Attraktoren zu unterscheiden:⁵ (a) der Punkt-Attraktor (oder Fixpunkt), der der Ruhelage des Pendels entspricht, (b) der Grenzzyklus, der der periodischen Bewegung des Pendels bei mäßiger äußerer Anregung entspricht, (c) der (deterministisch-)chaotische Attraktor,⁶ der der chaotischen Bewegung des Pendels bei großer äußerer Anregung entspricht. Solange die entsprechenden Attraktoren stabil sind, laufen alle Trajektorien im Verlaufe der Zeit auf die entsprechenden Regionen zu bzw. bleiben dort.

Bemerkenswerterweise unterscheiden sich die o.g. Attraktoren hinsichtlich ihres topologischen Geschlechts: der Punkt-Attraktor ist nulldimensional (ein *Punkt*), der Grenzzyklus eindimensional (eine *Linie*). Der deterministisch-chaotische Attraktor ist zwar nicht zweidimensional, stellt aber i.a. doch eine fraktale *Fläche* dar.

Nun haben Eisenhardt und Kurth⁷ einen emergenztheoretischen Ansatz vorgeschlagen, bei dem dieser (diskontinuierliche) Wechsel des topologischen Geschlechts als Indiz für einen Emergenz-Prozeß angesehen wird. Emergente Übergänge werden hier als nicht-strukturerhaltende Transformationen interpretiert, wie sie zum Beispiel beim Übergang vom nulldimensionalen zum eindimensionalen

⁵Da der Weg ins Chaos über ein Periodenverdopplungsszenario führt, könnte man zwischen den Attraktoren (b) und (c) auch noch den Torus-Attraktor als vierte Möglichkeit angeben.

⁶Im Gegensatz zum stochastisch-chaotischen Attraktor füllt der deterministisch-chaotische Attraktor, der auch als seltsamer Attraktor bezeichnet wird, nur einen Teil des Phasenraums aus.

⁷P. Eisenhardt, D. Kurth, *Emergenz und Dynamik. Naturphilosophische Grundlagen einer Nichtstandard-Topologie*, Cuxhaven, 1993

Attraktor vorliegen. An dieser Emergenz-Auffassung hat sich auch Völcker⁸ orientiert und seine Charakterisierung eines Emergenz-Prozesses in Abb. 1 ist auch nur vor diesem Hintergrund zu verstehen.

Damit tut sich hier aber ein Dilemma auf, das uns auch in der folgenden Diskussion beschäftigen soll: Bei der Pendelbewegung mit äußerer Anregung wird *einerseits* von der Emergenz einer neuen Dynamik gesprochen, die an der Entstehung von neuen Attraktor-Formen festgemacht wird. *Andererseits* ist ebenso klar, daß die Bewegung des Pendels in allen Fällen durch ein und dieselbe dynamische Gleichung beschrieben wird. Aus dieser Perspektive hat sich also nicht die Dynamik geändert, sondern der Wert eines Kontrollparameters, mit dem zwischen verschiedenen Regimes hin- und her geschaltet werden kann.

Aus physikalischer Sicht würde man im letzteren Fall keineswegs von Emergenzprozessen sprechen, sondern vielleicht von einer "reichhaltigen" Dynamik, die in Abhängigkeit von bestimmten Randbedingungen bzw. Kontrollparametern verschiedene dynamische Realisierungen und damit *Übergänge* zwischen verschiedenen Regimes ermöglicht. Beispiele für eine solche reichhaltige Dynamik gibt es nicht nur in der Theorie dynamischer Systeme, wo die logistische Abbildung ein anderes Standardbeispiel darstellt, sondern auch in der Populationsdynamik oder in der chemischen Kinetik.

Das Charakteristikum all dieser Übergänge besteht darin, daß sie nicht aus der Interaktion von Untersystemen resultieren, sondern durch entsprechende äußere Parameter vorgegeben werden. Das bedeutet nicht, daß - wie im Beispiel des Wasserdampfes - der Übergang keinen Einfluß auf die Dynamik der Wassermoleküle hätte. Aber hier handelt es sich im gewissen Sinne um eine Adaptation der Moleküldynamik an der geänderten äußeren Umstände; es ist die *Reaktion* auf eine von außen vorgegebene Veränderung und nicht die *Ursache* der Änderung. Um dies genauer zu diskutieren und damit auch näher an die eingangs zitierte Emergenz-Auffassung zu kommen, werde ich im folgenden beginnen, die (makroskopische) System-Ebene in ihrem Verhältnis zur (mikroskopischen) Untersystem-Ebene zu betrachten.

3 Interaktion

Im vorherigen Abschnitt habe ich diskutiert, daß "Neues" auf vielerlei Weise entstehen kann, daß dieses "Neue" aber nicht immer klar als Emergenzphänomen zu charakterisieren ist. Im folgenden soll die Auffassung vertreten werden, daß Emergenzprozesse an die Interaktion von Systemkomponenten gebunden sind. Emergenz ist also ein *kollektives Phänomen* - das Resultat einer nichtlinearen, rückgekoppelten Dynamik von Untersystemen.

"Eine Schwalbe macht noch keinen Sommer", sagt ein deutsches Sprichwort, oder, um das Beispiel des Pendels noch einmal aufzugreifen, *ein* Pendel zeigt noch keine Emergenz, selbst wenn es

⁸W. Völcker, *Emergenz und komplexe Dynamik in dissipativen Marktsystemen*, Hamburg: Kovač, 1998

eine "reichhaltige" Dynamik mit verschiedenen dynamischen Regimes hat. Wohl aber kann ein System aus vielen Pendeln, die miteinander verkoppelt sind, emergente Eigenschaften aufweisen. Ein bekanntes Beispiel ist die Pendelkette, bei der jedes Pendel mit seinen beiden Nachbarn in harmonischer Wechselwirkung steht. Hier können sich im Grenzfall vieler Pendel und in Abhängigkeit von der Kopplungsstärke wellenartige Strukturen, sogenannte Solitonen, herausbilden – ein kollektives Phänomen mit neuen Systemeigenschaften.

Ein anderes Beispiel für Emergenz in physikalischen Systemen ist die Herausbildung metallischer Eigenschaften. Ein Quecksilberatom, beispielsweise, ist nichtmetallisch - ebenso ein Quecksilbercluster aus wenigen Atomen ($n < 13$). Man weiß aber aus Experimenten, daß in einem Größenbereich von 13 bis ca. 70 Atomen die Ausbildung der metallischen Eigenschaften erfolgt, die für die makroskopische Phase charakteristisch sind.⁹ In der statistischen Physik von Vielteilchensystemen wird mit mathematisch strengen Methoden gezeigt, daß ein großes, zusammengesetztes System im Vergleich zu den Untersystemen qualitativ neue Eigenschaften aufweisen kann, die für kleine Systeme gar nicht definiert sind.¹⁰

Bei der obigen Diskussion wird bereits vorausgesetzt, daß eine Unterscheidung zwischen der Systemebene und der Ebene der Untersysteme möglich ist. Emergenzeigenschaften werden nicht auf der Ebene der Untersysteme, sondern nur auf der Ebene des Gesamtsystems "sichtbar". Für *ein* Pendel existiert diese Unterscheidung nicht, folglich kann auch es in diesem Sinne auch keine Emergenzeigenschaften aufweisen. Damit stellt sich die Frage nach einer kritischen Zahl von Untersystemen, die notwendig ist, um eine Unterscheidung der Systemebene und damit einen Emergenzprozeß zu ermöglichen. Die Antwort hängt hier natürlich von der Art des Systems und von der betrachteten Qualität ab, so daß keine generelle Aussage formuliert werden kann.

Es zeigt sich aber zum Beispiel in der Spieltheorie, wo die Entstehung von Kooperation in Abhängigkeit von der Zahl der Spieler untersucht wird, ebenso wie beim Quecksilbercluster, daß es im allgemeinen einen Übergangsbereich gibt, dessen Breite u.a. von den Randbedingungen des Systems abhängt. Gemessen an der Zahl von Untersystemen in *makroskopischen* Systemen (die Größenordnung liegt zum Beispiel bei 10^{23} für ein Gas oder bei 10^6 für eine Ameisenpopulation), ist dieser Bereich allerdings sehr schmal, so daß das Auftreten emergenter Eigenschaften i.a. als abrupter Übergang betrachtet werden kann.

Konrad Lorenz hat aus diesem Grunde statt von Emergenz auch von *Fulguration* (lat. *fulgur* - der Blitz) gesprochen. Dies bezieht sich zum einen auf den kurzen Zeitraum des Übergangs, zum anderen auf die *relative* Nichtvorhersagbarkeit. Anders als beim Pendel, wo der *Übergang* in das chaotische Regime in Abhängigkeit vom Kontrollparameter definitiv bestimmt ist (wenngleich die chaotische Trajektorie selbst nicht vorhersagbar ist), kann bei Systemen, die aus wechselwirkenden Elementen

⁹Vgl. u.a. U. Kreibitz, M. Vollmer, *Optical properties of metal clusters*, Berlin: Springer, 1995

¹⁰In *diesem* Sinne kann man die statistische Physik sogar als ersten Entwurf einer Theorie komplexer Systeme bezeichnen. Vgl. W. Ebeling, J. Freund, F. Schweitzer, *Komplexe Strukturen: Entropie und Information*, Stuttgart: Teubner, 1998

bestehen, schon aus statistischen Gründen immer nur ein bestimmtes Übergangsintervall ermittelt werden. Hier spielen die konkreten Realisierungen, wie etwa Pfadabhängigkeiten, eine entscheidende Rolle.

4 Mesoskopie

Ein weiteres Problem bei der Unterscheidung von System- und Untersystem-Ebenen besteht darin, daß die Emergenzeigenschaften der "höheren" Ebene als Resultat von Wechselwirkungen auf der "niederen" Ebene aufgefaßt werden, wobei die Eigenschaften der Untersysteme selbst, die ja auch ihre Wechselwirkungen begründen, als gegeben betrachtet werden. Eine logische Fortsetzung dieser Ebenen-Beschreibung würde allerdings zu einer hierarchischen Struktur von Emergenzen führen, die sich nicht ohne weiteres auf eine unterste Ebene zurückführen ließe. Bei Emergenzen zweiter und dritter Ordnung kann man i.a. weder voraussetzen noch genau unterscheiden, inwieweit Eigenschaften einer höheren Ebene nur durch die Untersysteme der jeweils niederen Ebene bedingt sind. Hier muß die Beschreibung den netzwerkartigen Charakter von Kausalitäten berücksichtigen.

Um die Emergenz von neuen Qualitäten in einem konkreten System zu modellieren, wird man zwangsläufig das Dilemma des infiniten Regresses ebenso vermeiden müssen wie das der unauflösliehen Verkopplung *aller* Systemelemente auf den unterschiedlichsten Ebenen. Eine geeignete Beschreibungsebene für den Emergenzprozeß muß daher den Konflikt zwischen zwei widerstreitenden Anforderungen bewältigen: auf der einen Seite muß sie systemspezifisch sein, ohne in mikroskopischen Einzelheiten steckenzubleiben; auf der anderen Seite muß sie eine Systemdynamik ermöglichen, die komplex genug ist, um Vielfalt, Strukturbildung, Entstehung von Neuem zu beschreiben. Mit *mikroskopischen* Verfahren, die stets auf die kleinsten verfügbaren Einheiten fokussieren, ist eine solche Ebene nicht zu finden - hier löst sich die Komplexität in ihre Bestandteile auf. Auf der *makroskopischen* Ebene des Systemganzen wiederum treten uns die Strukturen schon als Entitäten entgegen, ohne daß ihre Entstehung aus den sie konstituierenden Subsystemen noch erfaßt werden könnte.

Das Problem, wie aus den Interaktionen von Untersystemen die makroskopischen (globalen) Eigenschaften des Gesamtsystems entstehen, ist auch eine der Kernfragen der *Selbstorganisationstheorie*. Hier wird das Problem der geeigneten Beschreibungsebene so gelöst, daß diese für den Emergenz- und Strukturbildungsprozeß maßgebliche Ebene *konstruiert* wird.

HAKEN¹¹ hat mit seiner Erklärung des Lasers bereits in den 60er Jahren ein paradigmatisches Beispiel für die Konstruktion einer solchen Ebene gegeben: Auf der mikroskopischen Ebene erfolgt die unkorrelierten Emission von Lichtwellen durch einzelne Atome, die im Rahmen der Physik gut beschrieben werden kann. Die Selbstorganisation des Laserlichtes als kohärente Lichtwelle findet statt,

¹¹H. Haken, *Advanced Synergetics – Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices*, Berlin: Springer, 1983

indem die Schwingungsmoden der Lichtwellen gemeinsam eine “mittlere Ebene”, den “Ordner”, generieren, der diese anfangs ungeordneten Schwingungen versklavt und damit die Emergenz eines neuen Ordnungszustandes herbeiführt. Dieser Vorgang läßt sich analytisch mit Methoden der theoretischen Physik beschreiben, die als adiabatische Eliminierung von schnellen Prozessen bekannt sind. Das Neue und Paradigmatische dieser Beschreibung besteht darin, daß sie exakt zeigen kann, wie die Ebene konstruiert wird, auf der wir dann den Übergang zur Ordnung “beobachten” können – hier in Form des sich mit der Zeit ändernden Ordnungsparameters. Damit kann im Rahmen eines dynamischen Modells genau gezeigt werden, *wie* die Emergenz einer neuen Systemqualität – hier das kohärente Licht – als Resultat von interagierenden Untersystemen zustande kommt.

Dieses Beispiel zeigt sehr klar, daß der Emergenzprozeß erst als solcher wahrnehmbar wird, wenn wir unsere Wahrnehmung auf eine entsprechende Ebene fokussieren - ähnlich der Scharfeinstellung beim Mikroskop. Den für die Selbstorganisation charakteristischen Wahrnehmungsprozeß möchte ich mit dem Begriff *Mesoskopie* bezeichnen.¹² Das griechische *meso* heißt “mittel”, und *skopos* meint den Zweck, das Augenmerk. In der Physik ist diese mesoskopische Ebene definiert durch eine bestimmte Zeitskala, die die Unterscheidung von schnellen und langsamen Prozessen erlaubt, und durch eine bestimmte Längenskala, die in der Größenordnung der räumlichen Korrelationen liegt. “Unterhalb” oder “oberhalb” dieser Ebene sehen wir entweder nur die ungeordneten Atome oder die makroskopischen Muster (die dann natürlich noch einer “langsamen” makroskopischen Eigendynamik genügen können).

Im Gegensatz zur Mikroskopie fokussiert die Mesoskopie die wissenschaftliche Wahrnehmung nicht mehr auf die kleinsten Einheiten, sondern auf Einheiten, die komplex genug sind, um die Emergenz von neuen Eigenschaften auf der Systemebene zu ermöglichen. Die Frage, was “komplex genug” heißen soll, läßt sich nur am Einzelfall erläutern. Betrachten wir zum Beispiel eine der “weißen Mäuse” in der physiko-chemischen Strukturbildung, die BELOUSOV-ZHABOTINSKY-Reaktion, dann sind diese Einheiten die daran beteiligten Ionen, etwa Br^- oder Ce^{4+} , die selbstverständlich noch eine Substruktur der Elektronenschale oder des Atomkerns aufweisen. Der Zugang zur Komplexität der BZ-Reaktion ist jedoch nicht die quantenmechanische Beschreibung dieser Substrukturen, sondern die chemischen Reaktionen der Ionen, die in raum-zeitlich veränderlicher Konzentration vorliegen.¹³

In der Autopoiese-Theorie, die die Selbstorganisation in biologischen und sozialen Systemen behandelt, werden die Elemente als “autopoietische Einheiten” bezeichnet.¹⁴ Diese Einheiten sind keine

¹²F. Schweitzer, “Wege und Agenten: Reduktion und Konstruktion in der Selbstorganisationstheorie”, in: H.-J. Krug, L. Pohlmann (Hrsg.), *Evolution und Irreversibilität (Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur- Sozial- und Geisteswissenschaften, Bd. 8)*, Berlin: Duncker & Humblot, 1997, S. 113-135

¹³Die Konzentrationen stellen auf der Ebene des Reaktionsnetzwerkes der BZ-Reaktion die *langsamen* und damit dynamikbestimmenden Variablen dar, die via adiabatische Elimination (BODENSTEIN-Prinzip in der Chemie) von der Dynamik einer Vielzahl von kurzlebigen Zwischenprodukten abgekoppelt wurden.

¹⁴H. R. Maturana, F. J. Varela, *Der Baum der Erkenntnis. Die biologischen Wurzeln des menschlichen Erkennens*, Bern/München: Scherz, 1987

“biologischen Atome”, sondern sie sind komplex genug, um eine gewisse *Aktivität* zu repräsentieren: zum Beispiel können sie strukturelle Kopplungen eingehen oder sich reproduzieren. Da der Zusammenschluß autopoietischer Einheiten zu Einheiten 2. Ordnung führen kann, sind verschiedene Ebenen denkbar, auf denen auch unterschiedliche Emergenzprozesse beobachtet werden können.

5 Agenten

Die Reduktion gerade auf Elemente, die selbst noch komplex genug sind, um einen Emergenzprozeß auf “höherer” Ebene zu ermöglichen, zeigt sich besonders deutlich in den zahlreichen “Artificial Agents”-Modellen, mit denen ganz verschiedene Selbstorganisationsphänomene beschrieben werden können. Bei diesen Modellen können wir prinzipiell zwei verschiedene Richtungen unterscheiden. Auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz werden verhaltensbasierte oder wissensbasierte Agenten konstruiert, die selbst eine sehr komplexe interne Struktur aufweisen können, die es ihnen ermöglicht, bestimmte Aufgaben *autonom* zu lösen. Die sogenannten BDI-Modelle (“Belief-Desire-Interaction”) verwenden zum Beispiel Agenten, die spezielle Absichten, Wünsche, Ziele usw. haben und ein Spektrum von Handlungsmöglichkeiten aufweisen, aus denen sie situativ auswählen können. Diese Möglichkeiten können beim einzelnen Agenten durch Lernen oder bei der Agentenpopulation durch “genetische” Evolution weiterentwickelt werden.

Dem stehen Agentenmodelle gegenüber, 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 autonome Handeln als um die kollektive Interaktion der Agenten. Die Mesoskopie fokussiert hier auf *die* Ebene minimaler Komplexität für die Einheiten, durch die eine makroskopische Komplexität noch erzeugt werden kann.

Für die Wechselwirkung der Untersysteme untereinander werden zumeist sehr einfache Annahmen getroffen, die nur lokal, also für den jeweiligen Agenten am gegenwärtigen Ort gelten und sich nicht auf das System als Ganzes beziehen. Um ein konkretes Beispiel zu diskutieren, will ich im folgenden ein einfaches, an der Physik orientiertes Modell¹⁵ betrachten, in dem eine Anzahl von Agenten miteinander in indirekter Wechselwirkung steht. Diese Agenten bewegen sich plan- und ziellos auf einer Oberfläche. Allerdings generiert jeder Agent bei jedem Schritt Information, indem er lokal eine Markierung setzt. Die Markierung codiert also Information auf materieller Grundlage

¹⁵F. Schweitzer, L. Schimansky-Geier, “Clustering of Active Walkers in a Two-Component System”, in: *Physica A* **206** (1994) 359-379, L. Schimansky-Geier, F. Schweitzer, M. Mieth, “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, F. Schweitzer, “Active Brownian Particles: Artificial Agents in Physics”, in: L. Schimansky-Geier, T. Pöschel (eds.), *Stochastic Dynamics*, Berlin: Springer, 1997, pp. 358-371

und kann deshalb als *strukturelle Information*¹⁶ bezeichnet werden. Da die Markierungen auf der Oberfläche gespeichert sind, ist die strukturelle Information auf diese Weise unabhängig von den Agenten.

Die Markierungen selbst unterliegen dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Sie haben eine Eigen-dynamik, sie können verblassen und damit langsam wieder verschwinden, wenn sie nicht ständig erneuert werden. Wenn andererseits ein Platz (von einem oder verschiedenen Agenten) mehrmals aufgesucht wird, nimmt die Stärke der Markierung wieder zu; die Information kann also lokal akku-muliert werden. Außerdem kann die Information sich eigenständig ausbreiten (hier durch Diffusion der Markierungen). Die Oberfläche ist damit charakterisiert durch eine Informationsdichte $h(r, t)$, die angibt wie stark die Markierung an einem bestimmten Ort r zu einer gegebenen Zeit t ist.

In unserem Modell nehmen wir an, daß die Agenten gedächtnislos sind, das heißt, sie können *intern* keine Information akkumulieren, aber sie verfügen über *funktionelle Information*, die die Aufgabe hat, die strukturelle Information im Hinblick auf den Rezipienten zu interpretieren.¹⁷ Im konkreten Fall ist die funktionale Information ein Algorithmus, der die Agenten befähigt, die strukturelle In-formation, also die Markierungen zu lesen, wenn sie sich im direkten Umkreis ihres Platzes befindet. Bei einer Realisierung auf einem Gitter bedeutet dies, daß der Agent genau die nächsten Nachbar-plätze erkennen kann, nicht aber Gitterplätze, die mehr als einen Schritt entfernt sind. Werden Markierungen in der unmittelbaren Umgebung entdeckt, dann können sie die Bewegungsrichtung des Agenten beeinflussen: der Agent wird mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit der stärksten Mar-kierung folgen. Da das Modell probabilistisch ist, existiert allerdings stets auch die Möglichkeit, daß der Agent eine zufällige Richtung einschlägt, obwohl er eine Markierung gefunden hat.

Die funktionale Information existiert im vorliegenden Modell als ein Satz von einfachen Regeln, nach denen ein Agent verfährt - also durch das kleine Programm, das er fortlaufend abarbeitet:

1. der Agent prüft lokal, ob sich in seiner unmittelbaren Umgebung Markierungen befinden,
2. der Agent fällt eine Entscheidung über die Richtung des nächsten Schrittes in Abhängigkeit von der Stärke der lokalen Markierungen,
3. der Agent setzt an seinen jetzigen Platz eine Markierung,
4. der Agent bewegt sich auf seinen neuen Platz und wiederholt dann (1).

Mit den Regeln (1) bis (4) ist vorgegeben, was der Agent an Wirk-Information aus der vorhandenen strukturellen Information herauslesen kann. Das heißt, die *funktionale Information* ermöglicht den

¹⁶F. Schweitzer, "Structural and functional information - an evolutionary approach to pragmatic information", in: *World Futures: The Journal of General Evolution* **50** (1997) 533-550, vgl. auch W. Ebeling, J. Freund, F. Schweitzer (1998).

¹⁷Ebd.

Übergang von der *strukturellen* zur *pragmatischen Information*,¹⁸ die die weitere Bewegung des Agenten bestimmt. Dabei zeigt sich, daß strukturelle und funktionale Information durchaus unterschiedlichen Charakter haben: im betrachteten Beispiel ist die strukturelle Information einfach ein skalares Feld, während die funktionale Information einen Algorithmus darstellt, durch den aus diesem Feld pragmatische Information gewonnen werden kann.

Dieser Algorithmus kann in der Tat von sehr simplen, gedächtnislosen Agenten abgearbeitet werden, da es keinerlei interner Informationsspeicherung bedarf – physikalisch gesehen, bewegen sich die Agenten fortlaufend in die Richtung des größten lokalen Gradienten eines Potentials, das sie selbst verändern können. Diese *nichtlineare* und *indirekte* Wechselwirkung der Agenten untereinander kann durch die in Abb. 2 gezeigte *feedback*-Schleife veranschaulicht werden.

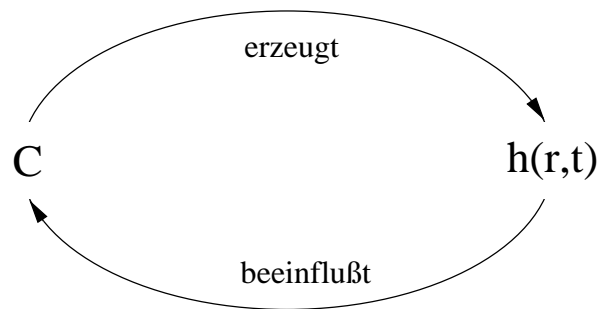


Abbildung 2: Nichtlineare Rückkopplung zwischen den Agenten (C) und dem von ihnen erzeugten/veränderten Feld $h(r,t)$.

Über das Feld $h(r,t)$ sind also die Agenten des Systems miteinander verkoppelt. Diese Art von Wechselwirkung kann als *indirekte Kommunikation*¹⁹ 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 Standortes. Natürlich kann sich im vorliegenden Modell die mit $h(r,t)$ verbundene Information durch Diffusionsprozesse ausbreiten. 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.

Es ist anzumerken, daß die einfache Art der nichtlinearen Rückkopplung in Abb. 2 komplexere Formen annehmen kann, wenn man verschiedene Gruppen von Agenten betrachtet, die von der mit

¹⁸Ebd.

¹⁹F. Schweitzer, "Selbstorganisation und Information", in: H. Krapp, T. Wägenbaur (Hrsg.), *Komplexität und Selbstorganisation - Chaos in Natur- und Kulturwissenschaften*, München: Fink, 1997, S. 109-143

$h(r, t)$ verbundenen Information unterschiedlich beeinflusst werden.²⁰

6 Lokale Aggregation

In seiner hier nur kurz umrissenen Form simuliert das Agenten-Modell einen Aggregationsprozeß auf der Grundlage chemotaktischer Kommunikation, wie er für viele biologische Spezies, insbesondere für Insekten, typisch ist. Beispielsweise sammeln sich die Larven des Borkenkäfers *Dendroctonus micans* (Coleoptera: Scolytidae) nach dem Schlüpfen an bestimmten Plätzen, um dort gemeinsam zu fressen.²¹ Da die Larven an ganz unterschiedlichen Stellen schlüpfen und keinen gemeinsamen "Treffpunkt" kennen, kommunizieren sie untereinander, indem sie eine chemische Substanz absondern, die diffundieren kann und auf diese Weise die Information über ihre Existenz verbreitet. Gleichzeitig reagieren die Larven auf diese Substanz, indem sie sich in Richtung der lokalen Konzentrationsmaxima zu bewegen versuchen. Das Resultat dieser Wechselwirkung ist die Herausbildung eines Clusters, also eines relativ kompakten Aggregates von Larven mit spezifischen Cluster-Eigenschaften. Damit ist eine neue Qualität entstanden, die auf der Ebene der Larven keine Entsprechung hat.

Um einen solchen Emergenzprozeß zu beschreiben, bedarf es keiner "Theorie der Borkenkäferlarven", sondern einer spezifischen Sichtweise auf das Phänomen. Hier wird auf eine Untersystem-Ebene fokussiert, wo die Elemente noch komplex genug sind, um in der beschriebenen Weise miteinander zu interagieren, *ohne* daß diese Beschreibungsebene in mikroskopische Einzelheiten aufgelöst wird. Auf der anderen Seite ist diese Beschreibung nicht-finalistisch, da sie keine Hinweise auf die globale Struktur enthält, die infolge der Interaktion erst noch entsteht. *Wo* sich der Cluster letztlich herausbildet, wird durch zufällige Einflüsse während des Prozesses beeinflusst, insofern ist auch die *Genese* der Struktur von Bedeutung.

Abb. 3²² zeigt das Resultat einer Computersimulation der oben beschriebenen Interaktion minimalistischer Agenten zu zwei verschiedenen Zeiten. Die Bilder erlauben es, die Dynamik des Emergenzprozesses genauer zu diskutieren. Als Ausgangssituation wurde eine zufällige Verteilung der Agenten auf der Oberfläche gewählt, das heißt, daß die Agenten bei genügend großer Anzahl im

²⁰Zu verschiedenen Möglichkeiten der nichtlinearen Rückkopplung und Anwendungen auf biologische und urbane Systeme siehe: F. Schweitzer, K. Lao, F. Family, "Active Random Walkers Simulate Trunk Trail Formation by Ants", in: *BioSystems* **41** (1997) 153-166, F. Schweitzer, J. Steinbrink, "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, A. Stevens, F. 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, D. Helbing, F. Schweitzer, J. Keltsch, P. Molnár, "Active Walker Model for the Formation of Human and Animal Trail Systems", in: *Physical Review E* **56/3** (1997) 2527-2539

²¹J. L. Deneubourg, J. C. Gregoire, E. Le Fort, "Kinetics of Larval Gregarious Behavior in the Bark Beetle *Dendroctonus micans* (Coleoptera: Scolytidae)", in: *J. Insect Behavior* **3/2** (1990), 169-182.

²²F. Schweitzer, L. Schimansky-Geier (1994, 1996)

Mittel gleichverteilt sind. Ob eine solche homogene Verteilung bei der angenommenen Interaktion der Agenten stabil ist oder nicht, wird durch den eingangs bereits erwähnten Kontrollparameter bestimmt. Dies ist im vorliegenden Fall eine Größe, die in kompakter Form die Produktions- und Zerfallsrate für die Markierungen sowie die Zahl der Agenten pro Systemfläche berücksichtigt. Sind zu wenig Agenten vorhanden oder ist die von ihnen pro Zeitschritt erzeugte Markierung zu schwach oder deren Lebensdauer zu gering, dann greift der beschriebene Kommunikationsprozeß nicht und es kommt zu keiner Aggregatbildung.

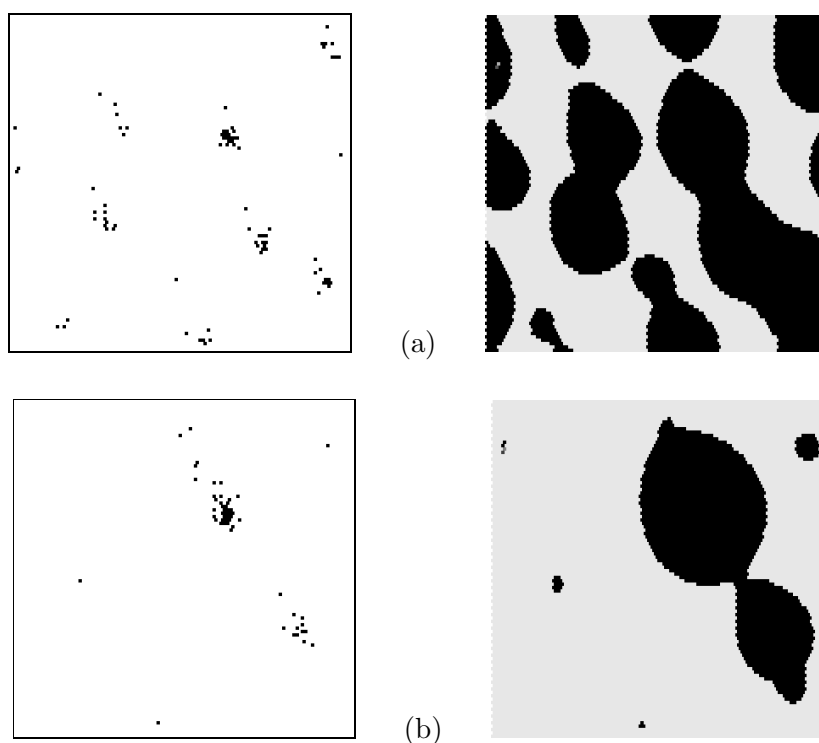


Abbildung 3: (links) Momentaufnahme der Position von 100 Agenten, die sich auf einer Oberfläche (Größe $A = 100 \times 100$, periodische Randbedingungen) bewegen. (rechts) Räumliche Verteilung der Übersättigung $\sigma(r, t, \eta)$ zur gleichen Zeit. (schwarz): $\sigma > 0$, (grau) $\sigma < 0$. Zeit in Simulationsschritten: (a) $t = 5.000$, (b) $t = 50.000$

Das heißt, der Kontrollparameter bestimmt, wie bei den bereits diskutierten Phasenübergängen, *ob* eine gegebene Ausgangssituation instabil ist und ob damit *prinzipiell* die Möglichkeit eines Phasenübergangs oder eines Strukturbildungsprozesses vorliegt. Er bestimmt *nicht*, in welcher Form dieser Prozeß abläuft und welche möglichen neuen Qualitäten des Gesamtsystems dabei entstehen – dies ist das Resultat der Interaktion der Untersysteme, in diesem Fall der Agenten.

Im vorliegenden Beispiel produzieren die Agenten Markierungen - und solange sie nur vereinzelt

existieren, wird der lokale Wert $h(r, t)$ klein sein. Kommen aber mehrere Agenten an einem Ort zusammen, dann kann der Wert $h(r, t)$ einen bestimmten kritischen Wert $h_{eq}(\eta)$ überschreiten, dessen Größe durch den Kontrollparameter η bestimmt wird. Falls das homogene System stabil wäre, würde der Wert von h_{eq} so groß sein, daß er durch die Produktion von Markierungen nicht überschritten werden könnte. In diesem Fall käme es zu keiner Clusterbildung. Ist das homogene System aber instabil, dann kann lokal $h(r, t) > h_{eq}$ werden. Dies gilt für die in Abb. 3 schwarz dargestellten Bereiche. In Analogie zur Theorie der Phasenübergänge kann das Verhältnis $\sigma(r, t, \eta) = [h(r, t)/h_{eq}(\eta)] - 1$ als *Übersättigung* bezeichnet werden.²³ In übersättigten Bereichen ($\sigma > 0$) kann es lokal zu *Phasenübergängen* kommen, das heißt, es kann sich lokal eine Clusterbildung vollziehen, wie es an den Momentaufnahmen der Agentenpositionen in Abb. 3 auch deutlich wird.

Wesentlich ist aber, daß es in diesem Fall die Agenten *selbst* sind, die diesen Phasenübergang herbeigeführt haben. Ihre lokalen Aktionen treiben das System aus seiner lokalen Stabilität ($\sigma < 0$) in die lokale Instabilität ($\sigma > 0$). Wann und wo die lokale Instabilität und damit die Clusterbildung auftritt, hängt, wie bereits bemerkt, von der jeweiligen konkreten Entwicklung des Systems ab. Der Kontrollparameter legt lediglich fest, *ob* eine solche Instabilität prinzipiell auftreten kann oder nicht.

In Abb. 3 kann man ferner bemerken, daß die schwarzen Bereiche, in denen Clusterbildung aufgrund lokaler Übersättigung möglich ist, im Verlaufe der Zeit abnehmen. Im Endzustand (der hier nicht gezeigt ist), bleibt jeweils nur ein Bereich übrig, in dem alle Agenten versammelt sind. Dies ist verständlich durch die Dynamik des Feldes $h(r, t)$, mit dessen Hilfe die lokalen *Aktionen* der Agenten erst zu *Interaktionen* werden. Das Feld, das die Verkopplung der Agenten untereinander realisiert, kann sich im vorliegenden Fall durch Diffusion ausbreiten und damit sukzessive alle Systembereiche und damit alle Agenten erfassen. Da das Feld aufgrund der Zersetzung der Markierungen auch lokal wieder abgebaut werden kann, wird auf diese Weise ein Konkurrenz- und Selektionsprozeß in Gang gesetzt - auf den ich hier aber nicht weiter eingehen will.²⁴ Diese Selektion sorgt letztlich dafür, daß nur ein kleiner Bereich lokaler Übersättigung übrig bleibt, in dem das Feld $h(r, t)$ besonders groß ist und in dem schließlich alle Agenten versammelt sind.

Die nichtlineare Rückkopplung zwischen dem Feld und den Agenten wird durch das *Versklavungsprinzip* adäquat beschrieben: Die Agenten schaffen durch die Produktion von Markierungen gemeinsam eine Informationsebene, über die sie miteinander kommunizieren. Wenn diese Ebene einmal existiert und ihr Einfluß durch eine ausreichende Informationsdichte $h(r, t)$ überkritisch geworden ist, dann beginnt sie, das weitere Verhalten der Agenten zu versklaven, indem aus der ehemals freien Bewegung der Agenten auf der Oberfläche mit der Zeit eine gebundene Bewegung wird, bei der die Agenten Teil der jeweiligen Cluster werden. Allerdings können sich durch die Rückkopplung zwischen der Ebene der Agenten und der Ebene des Feldes beide nur gleichzeitig, also im Sinne ei-

²³Ebd.

²⁴F. Schweitzer, L. Schimansky-Geier (1994)

ner *Ko-Evolution*, entwickeln - die sich dabei vollziehende Ausdifferenzierung der Strukturen erfolgt also selbstreferentiell und nicht durch Steuerung von außen.

Um hier noch einmal die Diskussion um die geänderte Dynamik aufzugreifen, die am Anfang dieses Beitrages angesprochen wurde: die Dynamik der Agenten selbst hat sich in keiner Weise geändert, sie wird nach wie vor durch die einfachen Regeln vorgegeben, nach denen sich die Agenten bewegen. Der Emergenzprozeß, das heißt die für das Gesamtsystem entscheidende Herausbildung von letztlich einem Cluster, vollzieht sich auf einer Ebene, die von den Agenten zwar erst konstituiert wurde, die *ihnen* aber gleichwohl nicht "sichtbar" ist, sondern nur dem Beobachter, der gewissermaßen von "oben" auf das System blickt.

Literaturverzeichnis

- J. L. Deneubourg, J. C. Gregoire, E. Le Fort, "Kinetics of Larval Gregarious Behavior in the Bark Beetle *Dendroctonus micans* (Coleoptera: Scolytidae)", in: *J. Insect Behavior* **3/2** (1990), 169-182
- W. Ebeling, J. Freund, F. Schweitzer, *Komplexe Strukturen: Entropie und Information*, Stuttgart: Teubner, 1998
- P. Eisenhardt, D. Kurth, *Emergenz und Dynamik. Naturphilosophische Grundlagen einer Nichtstandard-Topologie*, Cuxhaven, 1993
- H. Haken, *Advanced Synergetics – Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices*, Berlin: Springer, 1983
- D. Helbing, F. Schweitzer, J. Keltsch, P. Molnár, "Active Walker Model for the Formation of Human and Animal Trail Systems", in: *Physical Review E* **56/3** (1997) 2527-2539
- U. Kreibitz, M. Vollmer, *Optical properties of metal clusters*, Berlin: Springer, 1995
- H. R. Maturana, F. J. Varela, *Der Baum der Erkenntnis. Die biologischen Wurzeln des menschlichen Erkennens*, Bern/München: Scherz, 1987
- L. Schimansky-Geier, F. Schweitzer, M. Mieth, "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
- F. Schweitzer, "Wege und Agenten: Reduktion und Konstruktion in der Selbstorganisationstheorie", in: H.-J. Krug, L. Pohlmann (Hrsg.), *Evolution und Irreversibilität (Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur- Sozial- und Geisteswissenschaften, Bd. 8)*, Berlin: Duncker & Humblot, 1997, S. 113-135

- F. Schweitzer, "Active Brownian Particles: Artificial Agents in Physics", in: L. Schimansky-Geier, T. Pöschel (eds.), *Stochastic Dynamics*, Berlin: Springer, 1997, pp. 358-371
- F. Schweitzer, "Structural and functional information - an evolutionary approach to pragmatic information", in: *World Futures: The Journal of General Evolution* **50** (1997) 533-550
- F. Schweitzer, "Selbstorganisation und Information", in: H. Krapp, T. Wägenbaur (Hrsg.), *Komplexität und Selbstorganisation - Chaos in Natur- und Kulturwissenschaften*, München: Fink, 1997, S. 109-143
- F. Schweitzer, K. Lao, F. Family, "Active Random Walkers Simulate Trunk Trail Formation by Ants", in: *BioSystems* **41** (1997) 153-166
- F. Schweitzer, L. Schimansky-Geier, "Clustering of Active Walkers in a Two-Component System", in: *Physica A* **206** (1994) 359-379
- F. Schweitzer, L. Schimansky-Geier, "Clustering of Active Walkers: Phase Transitions from Local Interactions", in: M. Millonas (ed.): *Fluctuations and Order: The New Synthesis*, New York: Springer, 1996, pp. 293-305
- F. Schweitzer, J. Steinbrink, "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
- A. Stephan, "Emergence - A Systematic View on its Historical Facets", in: A. Beckermann, H. Flohr, J. Kim (eds.), *Emergence or Reduction? Essays on the Prospects of Nonreductive Physicalism*, Berlin, 1992, pp. 25
- A. Stevens, F. 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
- W. Völcker, *Emergenz und komplexe Dynamik in dissipativen Marktsystemen*, Hamburg: Kovač, 1998
- W. Völcker, "Describing the Emergence of new dynamical structures in phase space, Diskussionspapier des Workshops "Selbstorganisation in der Ökonomie", Jena, Februar 1999
- Ping, pang, poch! Englische Kindergedichte*, Nachdichtung von Heinz Kahlau, Berlin: Der Kinderbuchverlag, 1967