

Wege und Agenten: Reduktion und Konstruktion in der Selbstorganisationstheorie

Frank Schweitzer

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

1 Der Wille zur Theorie

Mannigfache Wege gehen die Menschen.

Wer sie verfolgt und vergleicht, wird wunderliche Figuren entstehen sehn; Figuren, die zu jener großen Chifferschrift zu gehören scheinen, die man überall, auf Flügeln, Eierschalen, in Wolken, im Schnee, in Kristallen und in Steinbildungen, auf gefrierenden Wassern, im Innern und Äußern der Gebirge, der Pflanzen, der Tiere, der Menschen, in den Lichtern des Himmels, auf berührten und gestrichenen Scheiben von Pech und Glas, in den Feilspänen um den Magnet her und sonderbaren Konjunktionen des Zufalls, erblickt.

In ihnen ahndet man den Schlüssel dieser Wunderschrift, die Sprachlehre derselben; allein die Ahnung will sich selbst in keine feste Formen fügen und scheint kein höherer Schlüssel werden zu wollen.

NOVALIS

Es sind keine wissenschaftlichen Theorien über die Gemeinsamkeiten der Strukturbildung in der belebten und der unbelebten Natur, sondern lediglich "Ahndungen" einer "großen Chifferschrift", von denen NOVALIS in seinen "Lehrlingen von Sais" spricht. Dahinter verbirgt sich die Sehnsucht, die verbindenden Elemente in einer Welt diverser Strukturen zu erkennen, die Gemeinsamkeiten hinter der unendlichen Vielfalt der Erscheinungen auszusprechen. Diese Sehnsucht ist nicht allein romantischen Ursprungs, sie gehört zu jenen Triebkräften, die die Wissenschaftler von jeher motiviert haben, auf die Frage nach der Einheit der Welt eine stets neue Antwort zu geben. So sieht es auch noch HEISENBERG in der Mitte unseres Jahrhunderts, wenn er schreibt: "Aber die Ahnung

eines großen Zusammenhangs, in den wir mit unseren Gedanken doch schließlich immer weiter eindringen können, bleibt auch für uns die treibende Kraft der Forschung.”¹

Der Faszination, die die Zeichen jener “Chifferschrift” dabei auf den Forscher ausüben, hat schon GOETHE in seinem “Faust” beredten Ausdruck gegeben:

War es ein Gott der diese Zeichen schrieb,
Die mir das innre Toben stillen,
Das arme Herz mit Freude füllen,
Und mit geheimnisvollem Trieb
Die Kräfte der Natur rings um mich her enthüllen? ²

Nicht anders ergeht es auch dem heutigen Wissenschaftler, der sich mit dem Problem der Strukturbildung beschäftigt: wie könnte er den Zauber der “wunderlichen Figuren” verleugnen, ganz zu schweigen von jener Magie der mathematischen Symbole, mit denen die Essenz dann schließlich in Formeln gebannt werden soll. Aber auf die Euphorie dieses Erkenntnisdranges folgt – nicht nur im “Faust” – alsbald die Ernüchterung: der Forscher, der sich den letzten Geheimnissen der Natur schon so nahe fühlte, wird unversehens auf sich selbst zurückgeworfen. Die Antwort des Erdgeistes: “Du gleichst dem Geist, den Du begreifst, / Nicht mir!”³ wirkt letztlich wie ein vorgehaltener Spiegel, in dem der nach objektiver Welterkenntnis strebende Naturforscher unversehens *sich selbst* erblickt.

Diese Rückwendung von der objektiven zur subjektiven Erkenntnis, die Faust, “zusammenstürzend”, erfährt, offenbart einen Zusammenhang, der in der modernen Naturwissenschaft inzwischen häufiger diskutiert wird: die Verbindung von quasi-objektivierter Naturerkenntnis auf der einen Seite und den “menschlichen” Voraussetzungen auf der anderen Seite, die die Konstitution dieser Erkenntnis erst ermöglichen und sich damit – *vice versa* – in ihr wiederfinden.⁴ C.F. WEIZSÄCKER, beispielsweise, schreibt: “So wie jede andere Lebensäußerung kann auch die naturwissenschaftliche Erkenntnis unwillkürlich etwas von dem ausdrücken, was im Menschen ist. Sie wird dann, zunächst unbewußt, vielleicht aber auch bewußt anerkannt, zum Symbol seines Wesens oder seines Zustandes.”⁵

Und die Theorien in den Naturwissenschaften sind dann vielleicht nicht nur “Übereilungen eines ungeduldigen Verstandes, der die Phänomene gern los sein möchte und an ihrer Stelle deswegen

¹ *Werner Heisenberg*, *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft*, Stuttgart: Hirzel, 1949, S. 88

² *Goethes Werke*. Weimarer Ausgabe, Weimar: Böhlau, 1887, I. Abt., Band 14, S. 30

³ *Goethe* (FN 2), S. 33

⁴ vgl. auch *Frank Schweitzer*, *Naturwissenschaft und Selbsterkenntnis*, in: *Goethe und die Verzeitlichung der Natur*. Hrsg. von Peter Matussek in Verbindung mit H. Böhme, K.R. Mandelkow, K.M. Meyer-Abich, München: C.H. Beck, 1997

⁵ *Carl Friedrich v. Weizsäcker*, *Zum Weltbild der Physik*, Stuttgart: Hirzel, 13. Aufl. 1990, S.122

Bilder, Begriffe, ja oft nur Worte einschleibt”⁶, wie es noch GOETHE formulierte, sie sind allgemeiner Ausdruck einer spezifisch menschlichen, geistigen Verfaßtheit. In diesem Sinne schrieb schon P. THEILHARD DE CHARDIN über die Situation der “Physiker und anderen Naturforscher”: “Wenn sie nun den letzten Schluß aus ihren Analysen ziehen, sind sie nicht mehr sicher, ob die endlich erreichte Struktur das Wesen der untersuchten Materie oder das Spiegelbild ihres eigenen Denkens darstellt.”⁷

Die “Physiker und anderen Naturforscher” freilich hören solche Einwände nicht gern, und sie räumen ihnen zumeist auch keine Geltung ein. Aber die Frage nach der menschlichen Konstruktion wissenschaftlicher Erkenntnisse, nach dem *Willen zur Theorie* als einer besonderen Form des Willens zur Macht, stellt sich gerade dann besonders nachdrücklich, wenn Theorien mit einem *universellen* Erklärungsanspruch auf den wissenschaftlichen Markt drängen. Dies ist heutzutage bei der Selbstorganisationstheorie der Fall, die euphorisch als eine “tiefgreifende Erneuerung unserer wissenschaftlichen Schau der Natur”⁸, gar als “eine wissenschaftliche Revolution”⁹ apostrophiert wird.

Mit der Etablierung der Selbstorganisationstheorie seit den 70er Jahren unseres Jahrhunderts wurde ein systematischer Zugang geschaffen, um innerhalb der Materie Potenzen der Selbststrukturierung aufzuzeigen, die zu qualitativ neuen Formen, zu Emergenzphänomenen führen. Damit wurde der Evolutionsgedanke, der im 19. Jahrhundert noch vornehmlich¹⁰ dem Verständnis der organischen Natur vorbehalten war, auf die Vorstellungen von anorganischer Materie erweitert, so daß sich letztlich ein umfassendes naturwissenschaftliches Szenario ergibt, welches die kosmische Evolution und die biologische Evolution gleichermaßen umfaßt.¹¹ An die Stelle einer definitorischen Unterscheidung von Wirklichkeitsbereichen, wie sie für das klassische Wissenschaftsverständnis typisch ist, tritt nunmehr erneut die Frage nach der Verbindung zwischen ihnen. Im Rahmen der “neuen Naturwissenschaft” (NICOLIS) erfolgt der Zugang zur Einheit der Wirklichkeit jedoch nicht mehr unter dem reduktionistischen Gesichtspunkt der Elementarteilchen oder einer alles bestimmenden Weltformel, sondern unter Wahrung der Komplexität der Systeme. Diese Einheit wird heute weniger in Bausteinen als vielmehr in den dynamischen Prozessen gesehen, die diese Komplexität

⁶ *Goethe*. Maximen und Reflexionen. Nach den Handschriften des Goethe- und Schiller-Archivs herausgegeben von Max Hecker (Schriften der Goethe-Gesellschaft, Bd. 21), Weimar: Verlag der Goethe-Gesellschaft, 1907, S. 88, Nr. 428

⁷ *Pierre Theilhard de Chardin*, *Der Mensch im Kosmos*, Berlin: Union Verlag 1966, S. 16

⁸ *Ilya Prigogine/Isabelle Stengers*, *Dialog mit der Natur. Neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens*, München: Piper, 1990, S. I – Vorwort zur fünften erweiterten Auflage

⁹ *Wolfgang Krohn/Günter Küppers (Hrsg.)*, *Selbstorganisation - Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution*, Braunschweig: Vieweg, 1990

¹⁰ Der Evolutionsgedanke des 19. Jahrhunderts beschränkte sich nicht allein auf die organische Evolution in der Natur, sondern faßte auch in sozial- und humanwissenschaftlichen Bereichen Fuß. Beispiele dafür sind MARX mit seiner Theorie der Gesellschaftsformationen, aber auch der Religionshistoriker WELHAUSEN, der als erster die Genese der Texte des Alten Testaments als evolutiven Prozeß beschrieb.

¹¹ vgl. *Werner Ebeling/Rainer Feistel*, *Chaos und Kosmos. Prinzipien der Evolution*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1994

in allen Bereichen hervorbringen und auf den verschiedenen Ebenen nach den gleichen Gesetzen ablaufen.

Im Gegensatz zur Auffassung von WELSCH, wonach auch die moderne Naturwissenschaft in der Tradition einer konsequenten Auflösung neuzeitlicher Einheitsvorstellungen steht¹², wird in der Selbstorganisationstheorie gerade der Versuch unternommen, die Komplexitätstheorie als "höheren Schlüssel" zu jener "großen Chifferschrift" auszuformen und mit ihrer Hilfe ein einigendes Band zwischen den diversen Erscheinungen der Lebenswelt zu konstruieren.

Was dabei jedoch nur unzureichend thematisiert wird, sind die Voraussetzungen einer solchen Vereinheitlichung. Der Anspruch der Selbstorganisationstheorie, die Emergenz neuer Systemeigenschaften und Ganzheiten aus der Wechselwirkung von Elementen zu erklären, setzt seinerseits bereits eine Projektion, eine *spezifische Sicht* auf die Elemente und ihre Wechselwirkung mit dem Systemganzen voraus. Dies gilt bereits für die Naturwissenschaften, ganz besonders jedoch für die Sozialwissenschaften, die sich mit kollektiven Phänomenen befassen. Die Ebene, auf der Selbstorganisation erfaßbar wird, wird in einem *Wechselspiel von Reduktion und Konstruktion* buchstäblich erst erzeugt. Im Rahmen einer allgemeinen Selbstorganisationstheorie muß daher auch nach dem Reduktionsprogramm gefragt werden, das die Elemente erst konstituiert, und nach dem Konstruktionsprogramm, das auf dieser Grundlage die Synthese des Systemganzen erst ermöglicht.

Wenn Selbstorganisationstheorie als ein neuer Zugang zur Einheit der Wirklichkeit gebührend gewürdigt werden soll, dann müssen wir uns also auch der Frage stellen, unter welchen heuristischen Voraussetzungen, vor welchem epistemologischen Hintergrund, ein Phänomen wie Selbstorganisation als solches überhaupt erst in den Blick kommt. Wir müssen uns gewissermaßen der "subjektiven" Seite dieser Theorie zuwenden, indem wir diskutieren, was wir in den Blick nehmen, wenn wir Phänomene unter dem Gesichtspunkt der Selbstorganisation und der Komplexität diskutieren, und was wir dabei gerade aus unserem Bild *ausblenden*. W. WELSCH hat in diesem Zusammenhang von einer "Kultur des blinden Flecks"¹³ gesprochen.

Die konsequente Diskussion dieser Fragen würde in der Tat eine neue Sicht auf den viel beschworenen Paradigmenwechsel bewirken. Wenn man die Idee der Selbstorganisation ernst nimmt, so stellt sich damit folgerichtig auch die Frage nach der *Selbstorganisation der Selbstorganisationstheorie*: der strukturellen Verküpfung der Begriffe untereinander, der rekursiven Geschlossenheit des Begriffssystems und der Randbildung nach außen. Eine solche Sicht auf die Selbstorganisationstheorie hätte neben ihrer einzelwissenschaftlichen auch eine wissenschaftsphilosophische Relevanz: als ein Konzept, das in der Lage ist, sich selbst zu transzendieren und damit seine eigenen Grenzen aufzuzeigen.

¹²vgl. *Wolfgang Welsch*, *Unsere postmoderne Moderne*, Weinheim, 1987

¹³*Wolfgang Welsch*, *Kreativität heute*, Universitas 6 (1991) S. 590

2 Aisthesis – Selbstorganisation als Wahrnehmungsproblem

Die Idee der “Selbstorganisation” ist keine grundsätzlich neue Entdeckung in den Wissenschaften, wie an zahlreichen Beispielen in der Wissenschaftsgeschichte gezeigt wurde.¹⁴ Das Charakteristische des Selbstorganisationsansatzes liegt vielmehr in seiner spezifischen Sichtweise auf das Phänomen, die impliziert, daß bestimmte Eigenschaften aus dem dem Phänomen herausprojiziert und deshalb natürlich auch an ihm wahrgenommen werden - Eigenschaften, die vorher zwangsläufig gar nicht in den Blick naturwissenschaftlicher Forschung geraten waren. Dieser Wandel in der wissenschaftlichen Wahrnehmung kann, einem konstruktivistischen Verständnis wissenschaftlicher Theoriebildung folgend, als ein Wandel in den “ästhetischen Grundfktionen” beschrieben werden.¹⁵

Warum “Grundfktionen”? Jedes Naturbild, auch das der Wissenschaft, bedarf bestimmter Axiome, Grundelemente, um überhaupt dargestellt werden zu können. Die Grundannahmen, auf denen jede Theoriebildung beruht, entziehen sich innerhalb dieser Theorie einer Letztbegründung, haben also - in bezug auf die jeweilige Beschreibungsebene - fiktionalen Charakter. Ihre Rechtfertigung ließe sich nur im Rahmen einer Metatheorie vollziehen - jede Physik hat ihre Meta-Physik, aber eine solche Einschachtelung führt vermutlich in den infiniten Regreß. Insofern halten wir an dem fiktionalen Charakter im Rahmen der jeweiligen Theorie fest, zumal der heuristische Wert dieser Grundannahmen dadurch keineswegs eingeschränkt wird.

Warum “ästhetische” Grundfktionen? Die Grundfktionen definieren gewissermaßen die Optik für unserer *Weltbild*, sie sind *aisthetische Manifeste*, programmatische Vorschriften für die Wahrnehmung von Wirklichkeit. Ich knüpfe hier an die Begriffsbestimmung der Ästhetik durch A. G. BAUMGARTEN an, der *aesthetica* als Wahrnehmungslehre einführte: der Begriff umfaßt sowohl das griechische *aisthetos* (wahrnehmbar) als auch *aisteticos* (der Wahrnehmung fähig). Wenn wir von “ästhetischen” Grundfktionen sprechen, dann ist hier also eine *epistemische* “Ästhetik” gemeint, die der sinnlichen Wahrnehmung des Untersuchungsgegenstandes (Formen, Strukturen, Muster, etc.) eine zentrale Bedeutung für den Erkenntnisprozeß zuerkennt. An dieses erweiterte Verständnis von Ästhetik knüpft auch die postmoderne Ästhetik-Diskussion an.¹⁶

Ästhetische Grundfktionen bestimmen also, was wir an einem Phänomen gerade wahrnehmen, wo wir sensibel sind und was wir aus unserer Wahrnehmung ausblenden. Insofern tragen ästhetische

¹⁴siehe 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

¹⁵*Frank Schweitzer*, 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

¹⁶vgl. dazu *Uwe Niedersen/Frank Schweitzer (Hrsg.)*, Ästhetik und Selbstorganisation, (*Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Bd. 4*), Duncker & Humblot, Berlin, 1993

Grundfiktionen zu einer Projektion von Phänomenen, zu einer Reduktion auf bestimmte Aspekte wissenschaftlicher Wahrnehmung, bei.¹⁷ Mit dem Wandel in den ästhetischen Grundfiktionen werden keineswegs naturwissenschaftliche Resultate *ad absurdum* geführt werden, sondern es ändert sich vornehmlich die Optik, unter der wir gegebene naturwissenschaftliche Sachverhalte betrachten, und damit auch der Kontext, in dem wir sie interpretieren.

Gerade für die Selbstorganisationstheorie läßt sich dieser Wandel in der Optik und die damit verbundene Kontextverschiebung deutlich aufzeigen. Anstelle einer detaillierten Diskussion¹⁸ will ich hier einige Charakteristika jener "Brille" zusammenfassen, durch die wir heute (in wissenschaftlicher Hinsicht) die Welt als selbstorganisiert sehen.

Die klassische Physik, die ihre Konzepte an der "toten Materie" entwickelt hat, ist auf zwei Ebenen kompetent: auf der mikroskopischen Ebene der Bausteine der Materie und der makroskopischen Ebene der ausgedehnten Körper. Mit dem Universalitätsanspruch der Selbstorganisationstheorie gerät aber zunehmend die *Lebenswelt* in den Mittelpunkt des naturwissenschaftlichen Interesses. So schreiben PRIGOGINE und STENGERS programmatisch: "Die Fragestellungen der von uns bewohnten Welt zeigen sich als ebenso reich an Überraschungen und an theoretischen Gesichtspunkten, wie das unendlich Große und das unendlich Kleine."¹⁹ Diese Präferenz wird auch mit ästhetischen Argumenten untermauert: Die neue Sicht auf die Natur bedeutet nun nicht mehr, "von außen einen entzauberten Blick auf eine mondartige Wüste zu werfen, sondern vielmehr, eine komplexe und vielfältige Natur an Ort und Stelle nach ausgewählten Gesichtspunkte zu erforschen."²⁰ Was die Naturwissenschaft früherer Jahrhunderte an Erkenntnissen zutage förderte, ist keineswegs obsolet, aber eine Brille, die nur "einen entzauberten Blick auf eine mondartige Wüste" ermöglicht, ist nicht mehr zeitgemäß. Die Phänomene sollen nicht mehr einem atomaren Reduktionismus geopfert werden, statt dessen werden Komplexität und Vielfalt wichtig.

Das Naturverständnis der Selbstorganisation unterscheidet sich damit vom kausal-mechanistischen Naturverständnis der neuzeitlichen Naturwissenschaft auch durch seinen ausgeprägt "ästhetischen" Blickwinkel. Das Schöpferische der Natur gerät wieder neu in den Blickpunkt, und die Naturwissenschaft hat Teil an diesem Schöpfungsprozeß, indem sie ihn versteht und theoretisch wie experimentell nachvollziehen kann: "Das Wissenschaftliche ist heute nicht mehr das Entdecken toter Formen, so wie man es früher gesehen hat: es hat nun Teil an der Schaffung der Welt."²¹

Mit der Grundfiktion einer "toten Materie" kann die Kreativität der Natur allerdings nicht verstan-

¹⁷Die allgegenwärtige *Fraktalität* der Natur ist nur ein Beispiel für die Wirkungsweise von ästhetischen Grundfiktionen in der wissenschaftlichen Wahrnehmung. Man darf sich durchaus an die *Hexenküche* im Faust-Drama erinnern fühlen, wo Mephistopheles dem Faust prophezeit: "Du siehst, mit diesem Trank im Leibe, / Bald Helenen in jedem Weibe" (Goethe (FN 2), S. 127)

¹⁸vgl. dazu Schweitzer, FN (15)

¹⁹Prigogine / Stengers, (FN 8), S. III

²⁰Prigogine/Stengers, (FN 8), S. 16

²¹Ilya Prigogine/Serge Pahaut, Die Zeit wiederentdecken, in: M. Baudson (Hrsg.), Zeit. Die vierte Dimension der Kunst, Weinheim: Acta humaniora, 1985, S. 32

den werden, vielmehr müssen dazu schöpferische Potenzen der Materie entdeckt, das heißt *wissenschaftlich wahrgenommen* werden. Die *Produktivität der Materie* erweist sich als eine der zentralen Grundfktionen der Selbstorganisationstheorie. Die Materie - ob organisch oder unorganisch - kann zu "aktiver" Strukturbildung²² befähigt werden, indem sie hochwertige Energie aufnimmt, diese in niederwertige Energie umwandelt und dabei Entropie *produziert*. Analog zum Import von "Energie" steht der Export von "Entropie", wobei die Energiebilanz ausgeglichen ist. Die "aktive" Materie ist somit technisch einem Durchflußreaktor vergleichbar; in philosophischer Hinsicht steht sie in der Tradition der neuplatonischen Emanationslehre.²³

Bestandteil der Grundfktion einer aktiven Materie ist auch ihr *dynamischer* Charakter. Die *statische* Materie ist zugleich auch die "tote" Materie. Stabilität muß nun nicht mehr notwendig mit Gleichgewicht gleichgesetzt werden, auch fern vom (thermodynamischen) Gleichgewicht ist Stabilität möglich, wenn die Materie sich *selbst* organisiert. Dazu bedarf es allerdings interner und externer Wechselwirkungen, und zeitweise Instabilität und damit verbundene Indeterminiertheit der Materie sind die Voraussetzung dafür, daß diese innersystemischen Wechselwirkungen ihre erzeugende Funktion überhaupt ausführen können.

Damit sind gewissermaßen die Eckpunkte eines heuristischen Programms²⁴ genannt, das sich hinsichtlich seiner Wahrnehmung von Materie grundsätzlich von den "klassischen" Wahrnehmungsvorschriften für "tote Materie" unterscheidet. Die Selbstorganisationstheorien stehen sämtlichst auf dem Boden dieser gewandelten Materiekonzeption, die heuristisch an den schöpferischen Urstoff des THALES anschließt.²⁵

Im Vergleich mit den klassischen Wissenschaften hat sich also nicht das Referenzobjekt geändert, sondern vornehmlich die Sichtweise auf den Gegenstand. Nach wie vor ist die Bestimmung des Materiellen ein Hauptgegenstand naturwissenschaftlicher Forschung und wird beim Übergang zur "aktiven" Materie auch nicht aufgegeben. Um ein Beispiel zu nennen: Ein lange erforschtes Phänomen der "toten" Materie ist die Existenz von verschiedenen (thermodynamischen) Phasen - und die dazwischen sich vollziehenden Phasenübergänge. Dieses Konzept wurde mit dem Wandel der ästhetischen Grundfktionen hin zu einer "aktiven" Materie keinesfalls fallengelassen, sondern es wurde so modifiziert, daß es sich auch bei einem gewandelten Materieverständnis weiter bewährt -

²²Mit dem Begriff "aktiv" soll die *dissipative* Strukturbildung von der *konservativen* Strukturbildung abgegrenzt werden, die z.B. dann abläuft, wenn Systeme in ihren thermodynamischen Gleichgewichtszustand relaxieren. Ein Beispiel für dissipative Strukturbildung sind die Rollzellen in einer Flüssigkeit, deren Existenz an die überkritische Zufuhr von Wärmeenergie geknüpft ist, ein Beispiel für konservative Strukturbildung sind die Schneeflocken.

²³Gerade dieser metaphysische Hintergrund ist eine der Ursachen dafür, daß moderne Selbstorganisationstheorien überhaupt für eine philosophisch-religiöse Ausdeutung, wie etwa bei der New-Age-Bewegung, in Anspruch genommen werden können.

²⁴Frank Schweitzer, Die aktive Materie: heuristisches Programm der Selbstorganisationstheorie (zur Publikation vorgesehen)

²⁵Norbert Bischof, Ordnung und Organisation als heuristische Prinzipien des reduktiven Denkens, Nova Acta Leopoldina NF 63, Nr. 272 (1990), S. 285-312

nämlich als Theorie der Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge, die einen Zweig der physikalischen Selbstorganisationstheorie bildet.

Durch die Betonung der *Kreativität* der Natur vollzieht sich auch eine Kontextverschiebung von etablierten Begriffen, wie etwa beim *Chaos*, das nun nicht mehr als bedrohlicher *Abgrund*, sondern als fruchtbarer *Urgrund* erscheint. Der Begriff der *Ordnung*, jahrhundertlang *das* heuristische Leitmotiv naturwissenschaftlicher Forschung, wird nunmehr in seiner statischen Begrenztheit wahrgenommen, statt dessen verschiebt sich der Schwerpunkt des naturwissenschaftlichen Interesses auf die *Übergänge*, auf die Dynamik, die an der Grenze zwischen Chaos und Ordnung abläuft. Im gleichen Zusammenhang wird auch ein neues Verhältnis zur Irregularität der Wirklichkeit entwickelt, sie wird nicht mehr als Ausnahme von den Naturgesetzen, sondern als Charakteristikum des Natürlichen schlechthin angesehen. Und Instabilitäten sind keine Bedrohung, sondern die Voraussetzung dafür, daß sich die schöpferischen Potenzen der Natur entfalten können und Neues entsteht.

Basierend auf dieser neuen Wahrnehmung der Natur etabliert sich die Selbstorganisationstheorie nicht nur als "neue Naturwissenschaft", sondern als Theorie mit universellem Erklärungsanspruch: "Heute können wir in gewisser Vereinfachung sagen, daß unser Interesse sich von der Substanz auf die Beziehungen, auf die Kommunikation, auf die Zeit verlagert. Diese neuere Entwicklung der Wissenschaft bietet uns die einzigartige Gelegenheit, die Stellung der Wissenschaft innerhalb der allgemeinen Kultur neu zu bestimmen. (...) es scheint, daß die Wissenschaft eine *universalere Botschaft* enthält, eine Botschaft, bei der es um die Wechselwirkung zwischen Mensch und Natur und um die Wechselwirkung zwischen Mensch und Mensch geht."²⁶

Die "Wiederentdeckung der Zeit", insbesondere der Begriff der *Irreversibilität*, wird dabei zu einem Schlüssel, der den verschütteten Zugang zur Lebenswelt öffnen soll: "der Graben zwischen der 'leeren' Raum-Zeit der Physik und der aktiven Raum-Zeit des Lebens und der Erfahrung schließt sich langsam. Vor allem aber beginnen wir, die schöpferische Rolle der Zeit wieder anzuerkennen: Die Irreversibilität baut auf."²⁷

Auf diese Weise wird sukzessive eine Optik konstruiert, durch die die Welt in einem neuen Licht erscheint. Die Barrieren zwischen den "zwei Kulturen", die in den letzten einhundertfünfzig Jahren eine so divergierende Entwicklung genommen haben, beginnen zu verschwinden – nicht *de facto*, sondern aufgrund einer besonderen Wahrnehmung der Wirklichkeit, die eine *neue Einheit im Komplexen* suggeriert, von der auch die bildene Kunst nicht ausgenommen wird.²⁸ Möglich wird diese neue Einheit, wie ich versucht habe zu zeigen, durch eine interessen geleitete Selektion in der (wissenschaftlichen) Wahrnehmung. Die entsprechenden Wahrnehmungsvorschriften – hier als ästhetische Grundfiktionen bezeichnet – begründen ihr eigenes Reduktionsprogramm; insofern ist

²⁶ Prigogine/Stengers (FN 8), S. 12f. (Hervorhebung von den Autoren)

²⁷ Prigogine/Pahaut (FN 21), S. 27)

²⁸ Friedrich Cramer/Wolfgang Kaempfer, Die Natur der Schönheit. Zur Dynamik der schönen Formen, Frankfurt a.M.: Insel, 1992, und Friedrich Cramer, Schönheit als dynamisches Grenzphänomen zwischen Chaos und Ordnung - ein Neuer Laokoon, in: *Niedersen/Schweitzer (Hrsg.)* (FN 16), vgl. auch *Schweitzer* (FN 15)

die Selbstorganisationstheorie ebenfalls reduktionistisch, allerdings steht, gemessen an der "klassischen" Naturwissenschaft, ein grundsätzlich anderes Reduktionsprogramm im Mittelpunkt.

3 Mesoskopie

Die gerade beschriebene neue Sicht auf "Materie" ist nur ein Beispiel für das Walten von ästhetischen Grundfiktionen: Was jetzt - auch wissenschaftlich - an der Materie wahrgenommen wird, ist (unter anderem) gerade ihre "Energetik", ihre "Dynamik", ihre "Produktivität", letztlich ihre Aktivität. Es wurde schon angedeutet, daß zur Beschreibung einer "aktiven" Materie prinzipiell kein neuer Typ von Wissenschaft gebraucht wird. Wenn die Physik – unter Beibehaltung ihrer konzeptionellen und methodologischen Grundlagen – nunmehr ihre Kompetenz auch auf die "aktive Materie" ausdehnen will, muß sie allerdings ihre formalen Konzepte mit den gewandelten ästhetischen Grundfiktionen in Übereinstimmung bringen; Atomkräfte erklären nun einmal keine Selbstorganisation.²⁹ Damit stellt sich zwangsläufig die Frage nach einer neuen Beschreibungsebene, auf der sich die "Aktivität" der Materie mit der Methodik der Physik widerspruchsfrei verbinden läßt.

An diese Beschreibungsebene werden zwei Forderungen gestellt: 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. Der Ausweg, der innerhalb der Selbstorganisationstheorie beschränkt wird, besteht darin, diese für den Strukturbildungsprozeß maßgebliche Beschreibungsebene *zu konstruieren*.

H. HAKEN 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 unkorrelierte Emission von Lichtwellen durch einzelne Atome, die im Rahmen der Physik gut beschrieben werden kann. Die Selbstorganisation des Laserlichtes als kohärente Lichtwelle findet statt, indem die Schwingungsmoden der Lichtwellen gemeinsam eine "mittlere Ebene", den "Ordnung", generieren, der diese anfangs ungeordneten Schwingungen versklavt und einen Übergang zur Ordnung 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

²⁹Allerdings können die strukturbildenden Kräfte bei den dissipativen Nanostrukturen, die man in der letzten Zeit auf der Oberfläche von Katalysatoren gefunden hat, bereits nahe an den molekularen Bereich herangehen.

konstruiert wird, auf der wir dann den Übergang zur Ordnung "beobachten" können – hier in Form des sich mit der Zeit ändernden Ordnungsparameters.

Dieses Beispiel zeigt sehr klar, daß ein Selbstorganisations- oder Selbststrukturierungsprozeß für uns nur 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. 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 eine Strukturbildung 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.³⁰ In der Autopoiese-Theorie, die die Selbstorganisation in biologischen und sozialen Systemen behandelt, werden die Elemente als "autopoietische Einheiten" bezeichnet.³¹ Diese Einheiten sind keine "biologischen Atome", sondern sie sind komplex genug, um eine gewisse *Aktivität* zu repräsentieren: zum Beispiel können sie strukturelle Kopplungen eingehen oder sich reproduzieren.³² Da der Zusammenschluß autopoietischer Einheiten zu Einheiten 2. Ordnung führen kann, sind verschiedene Ebenen denkbar, auf denen auch unterschiedliche Selbstorganisationsprozesse beobachtet werden können. Insofern entscheidet der Fokus unserer wissenschaftlichen Wahrnehmung darüber, auf welcher Ebene wir die Strukturbildung in den Blick bekommen: dies kann die gesellschaftliche Strukturbildung sein - mit Individuen als Einheiten, es kann aber auch die zelluläre Organisation sein - mit Zellbestandteilen als Einheiten.

Die Reduktion gerade auf Elemente, die selbst noch komplex genug sind, um den Forderungen

³⁰Die 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.

³¹*Humberto R. Maturana/Francisco J. Varela*, Der Baum der Erkenntnis. Die biologischen Wurzeln des menschlichen Erkennens, Scherz, Bern/München, 1987

³²siehe auch: *Frank Schweitzer*, Goethes Morphologie-Konzept und die heutige Selbstorganisations-Theorie, in: Krohn/Krug/Küppers (Hrsg.) (FN 14), S.167-193

einer "aktiven Materie" zu genügen, 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.³³

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 Einheiten 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. Damit stellt sich die Frage, wie aus diesen lokalen Interaktionen der Agenten die makroskopischen (globalen) Eigenschaften des Gesamtsystems entstehen. Ein solcher Zugang zur Selbstorganisation wird auch als "bottom up"-Beschreibung bezeichnet. 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.

Die holistische Interpretation der Selbstorganisation orientiert sich gerade an der These, daß das Ganze (die Eigenschaften des Systems) mehr ist als die Summe seiner Teile (die Eigenschaften der Elemente) - daß also hier *Emergenzphänomene*, der qualitative Sprung zu Neuem die entscheidende Rolle spielen. Emergenz allein ist allerdings nicht ausreichend, um einen Prozeß als Selbstorganisationsprozeß zu charakterisieren. Ein sprunghafter Wechsel der Qualität läßt sich ohne weiteres auch

³³Da ich diese Modelle nicht weiter diskutieren werde, seien aus der Fülle der Literatur stellvertretend einige neuere Bücher zitiert: Jörg P. Müller/Michael J. Wooldridge/Nicholas R. Jennings (eds.), *Intelligent agents III : agent theories, architectures, and languages*, Berlin: Springer, 1997; Luc Steels (ed.), *The biology and technology of intelligent autonomous agents*, Berlin: Springer, 1995; Cristiano Castelfranchi/Jean-Pierre Muller (eds.), *From reaction to cognition: 5th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World*, Berlin: Springer, 1995; Pattie Maes (ed.), *Designing autonomous agents : theory and practice from biology to engineering and back*, Cambridge, Mass.: MIT Press, 1990.

in klassischen Systemen aus Atomen mit einfachen Wechselwirkungen beobachten³⁴, zum Beispiel bei thermodynamischen Phasenübergängen. Ein anderes Beispiel ist die “Emergenz” makroskopischer Eigenschaften in einem Cluster.³⁵ In Analogie zur *konservativen* Strukturbildung möchte ich diese Art von emergenten Eigenschaften unter dem Begriff “konservative Emergenz” zusammenfassen, denn sie sind nicht an die “aktiven” Eigenschaften der Materie gebunden, die notwendig sind, um einen Strukturbildungsprozeß als Selbstorganisationsprozeß zu charakterisieren.

Im folgenden Abschnitt soll anhand eines Beispiels aus der “Lebenswelt” illustriert werden, wie eine spezifische Art der wissenschaftlichen Wahrnehmung uns ermöglicht, den Selbstorganisationscharakter von Phänomenen zu “entdecken”.

4 Wegesysteme als Selbstorganisationsphänomen

Das NOVALIS-Zitat am Beginn dieses Beitrages erwähnt bereits die tieferen Zusammenhänge zwischen Wegestrukturen und anderen Strukturbildungen, ohne daß die “Sprachlehre derselben” sich bereits in feste Formen fügen ließ. Im Anschluß an die obigen Ausführungen möchte ich hier zeigen, wie unter dem Blickwinkel der Selbstorganisation, im Zusammenspiel von Reduktion und Konstruktion, diese Gemeinsamkeiten herausprojiziert werden können.

Wegesysteme zählen zu den dauerhaftesten Strukturen, die der Mensch im Verlauf der kulturellen Entwicklung hervorgebracht hat. Alte Handelsstraßen und Verbindungswege lassen sich zum Teil heute noch wiederfinden, ausgebaut als Autobahnen oder Eisenbahnverbindungen. Die Herausbildung von Wegen ist zugleich ein Phänomen, das bei vielen biologischen Spezies gefunden wird. Die Beispiele reichen von den Schleimspuren der Myxobakterien, über die hochorganisierten Wegenetze von Ameisen, die Verbindungswege innerhalb einer Mäusekolonie, bis hin zu den Trampelpfaden der Huftiere.

Um Wegesysteme als Selbstorganisationssysteme zu beschreiben, bedarf es keiner “Theorie der Ameise” oder des Fußgängers, sondern einer spezifischen Sichtweise auf das Phänomen, die einer Reduktion auf ganz bestimmte Eigenschaften entspricht. Gemäß dem Paradigma der Selbstorganisation ist es der dynamische Prozeß, der die Einheit zwischen den (an sich völlig unterschiedlichen) Wegesystemen hervorbringt, deshalb wird in einem ersten Schritt von den verschiedenen biologi-

³⁴In 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. In *diesem* Sinne kann man die statistische Physik sogar als ersten Entwurf einer Theorie komplexer Systeme bezeichnen. vgl. *Werner Ebeling/Jan Freund/Frank Schweitzer*, Komplexe Strukturen: Entropie und Information, Stuttgart: Teubner, 1997

³⁵Ein Quecksilbercluster aus wenigen Atomen ($n < 13$) ist zum Beispiel nichtmetallisch - aber in einem Größenbereich von 13 bis ca. 70 Atomen erfolgt die Ausbildung der metallischen Eigenschaften, die für die makroskopische Phase charakteristisch sind. vgl. u.a. *Uwe Kreibitz/Michael Vollmer*, Optical properties of metal clusters, Berlin: Springer, 1995

schen Spezies abstrahiert. An ihre Stelle tritt ein künstlicher Agent, der mit einer entsprechenden Aktivität ausgestattet ist, die noch genauer spezifiziert werden wird.

Das Wegesystem kann man als eine zweidimensionale Struktur auffassen, die sich auf einer Oberfläche herausbildet. Wege existieren in Form von Markierungen: dies können beispielsweise Fußspuren sein (bei Menschen, die das Gras niedertreten oder bei Tieren, die eine Bresche ins Unterholz schlagen) oder chemische Duftstoffe (bei futtersuchenden Ameisen), aber auch sehr dauerhafte Markierungen, wie Beton oder Asphalt, die die menschlichen Straßen kennzeichnen. Alle diese Markierungen haben eine *endliche* Lebensdauer, so daß Wege im Prinzip wieder verschwinden können. Von einem Wegesystem wollen wir aber nur dann sprechen, wenn die Struktur über einen längeren Zeitraum hinweg relativ stabil existiert und von den Agenten während ihrer Bewegung auf der Oberfläche auch "benutzt" wird.

Im Rahmen unserer Überlegungen suchen wir nach einem Minimalmodell, das die Herausbildung von Wegenetzen beschreibt.³⁶ Dazu betrachten wir das Wegesystem als eine *ungeplante Struktur*, die durch einen Selbstorganisationsprozeß entsteht (im anderen Fall würde man die Entstehung als Planungsprozeß zu beschreiben haben). Das heißt, es gibt keine zentrale Vorgabe, wo der Weg entlang zu gehen hat und es gibt auch keine "höhere Instanz", die den Agenten mitteilt, welche Wege sie benutzen müssen. Vielmehr ist es die gemeinsame Aufgabe der Agenten, diese Wege selbst hervorzubringen, ihre Existenz durch ständige Nutzung zu sichern und die Wege gegebenenfalls zu verändern, falls sich neue Anforderungen ergeben. Daß diese Aufgabe auch ohne vorherige Abstimmung der Agenten untereinander lösbar ist, zeigt zum Beispiel die Lebensdauer und die Flexibilität von ungeplanten Trampelpfaden in neu erschlossenen Wohnsiedlungen.

Für unsere Modellierung nehmen wir an, daß die Bewegungsrichtung des Agenten durch zwei Kräfte beeinflusst wird:³⁷ (a) eine Kraft, die in Richtung des Ziels weist, falls der Agent einem Ziel zustrebt, (b) eine Kraft, die in Richtung des nächstgelegenen Weges weist, falls ein solcher für den Agenten erkennbar ist. Die biologische Spezifikation wird damit auf zwei Fragen reduziert: zum einen, ob der Agent bewußt ein entferntes Ziel ansteuert (was zum Beispiel bei Fußgängern, nicht aber bei Ameisen der Fall ist), zum anderen, welche Möglichkeiten der Agent hat, um einen Weg wahrzunehmen. Während Fußgänger ihre Wege selbst über eine bestimmte Distanz hin sehen, existieren die Wege der Ameisen als Konzentration von Duftstoffen (Pheromonen), die von den Ameisen nur *lokal* (innerhalb eines von den Antennen bestimmten Winkels) wahrgenommen werden können.

Der Agent muß also, wenn er seine aktuelle Bewegungsrichtung festlegt, einen *Kompromiß* zwischen

³⁶ Frank Schweitzer, Selbstorganisation von Wege- und Transportsystemen, in: Klaus Teichmann/Joachim Wilke (Hrsg.), Prozeß und Form natürlicher Konstruktionen, Berlin: Ernst & Sohn, 1996, S. 163-169, ders., Wegenetze organisieren sich selbst, OIKODROM Stadtpläne, Wien, Heft 1/97, S.45-48

³⁷ Dirk Helbing/Frank Schweitzer/Joachim Keltsch/Peter Molnar, Active Walker Model for the Formation of Human and Animal Trail Systems, Phys. Rev. E (1997, im Druck), Dirk Helbing/Peter Molnar/Frank Schweitzer, Computer Simulations of Pedestrian Dynamics and Trail Formation, in: Evolution of Natural Structures, Proceedings of the 3rd International Symposium of the SFB 230, Stuttgart, 1994, pp. 229-234

diesen zwei Kräften finden. Dabei wird impliziert, daß existierende Wege, sofern sie wahrgenommen werden, eine anziehende Wirkung auf die Agenten ausüben, daß es also für den Agenten (aus artspezifischen oder energetischen Gründen) günstiger ist, einen schon vorhandenen Weg zu benutzen, als einen eigenen Weg zu bahnen. Weiterhin nehmen wir an, daß der Agent, während er sich bewegt, selbst Markierungen setzt: der Fußgänger hinterläßt Fußspuren, die Ameise produziert Pheromone mit den entsprechenden Drüsen. Das bedeutet, daß der Agent einen Weg verstärkt, indem er ihn benutzt.

Die Aktivität, die bei dem Agenten vorausgesetzt wird, läßt sich also in Form eines simplen Algorithmus (eines Satzes von Regeln) beschreiben, den der Agent fortlaufend abarbeitet:

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

Die Abb. 1 und 2 zeigen stochastische Computersimulationen von Wegesystemen auf der Basis von Agentenmodellen.³⁸ Das Wegesystem in Abb. 1 ist *ungerichtet*, das heißt, es verbindet keine Ziele miteinander. Aber es verdeutlicht, daß die Agenten sich tatsächlich auf den Wegen bewegen, die sie gemeinschaftlich hervorgebracht haben.

Das *gerichtete* Wegesystem in Abb. 2 dagegen verbindet ein Zentrum mit verschiedenen Zielen, die den Agenten anfänglich unbekannt sind (es gibt also keine Kraft, die die Agenten zu den Zielen oder zurück zu ihrem Ausgangspunkt leitet - weshalb die Wege auch nicht einfach als gerade Linien erscheinen). Wenn Anfangs- oder Zielpunkte im Verlauf der Entwicklung des Wegenetzes ihre Bedeutung verlieren und der Weg damit nutzlos geworden ist, verschwindet er nach einer gewissen Zeit wieder, da er nicht mehr erneuert wird. Wenn auf der anderen Seite neue Zielpunkte an das bereits vorhandene Wegenetz angeschlossen werden sollen, so ist auch dies ohne weiteres im Rahmen eines Selbstorganisationsprozesses möglich, wenn genügend Agenten vorhanden sind, um einen Weg dorthin aufzubauen und zu unterhalten. Das auf diese Weise entstandene Wegesystem zeichnet sich also durch eine große Flexibilität aus.

Die Wegeysteme in Abb. 1 und 2 sind ungeplant, es gibt keinerlei Vorgaben, wo ein Weg entlangzugehen hat. Natürlich wird mit den Ausgangs- und Zielpunkten, die der Weg verbinden soll, eine

³⁸Frank Schweitzer/Kenneth Lao/Fereydoon Family, Active Random Walkers Simulate Trunk Trail Formation by Ants, *BioSystems* 41 (1997) 153-166, Frank Schweitzer, Self-Organization of Trail Networks Using Active Brownian Particles, in: R. Hofestädt/T. Lengauer/M. Löffler/D. Schomburg (eds.), *Computer Science and Biology*, Leipzig, 1997, pp. 299-301

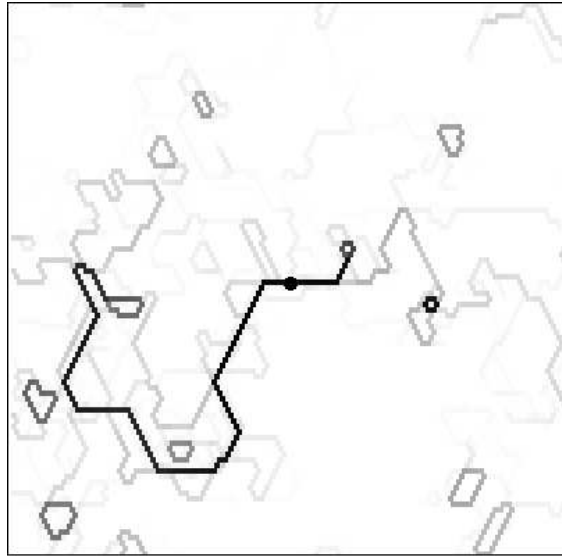


Abbildung 1: Ungerichtetes Wegesystem (100 Agenten, 10.000 Zeitschritte). Die Agenten sind zur Zeit $t=0$ vom Zentrum aus in jeweils zufälliger Richtung gestartet. Sie bewegen sich auf einem Dreiecksgitter, bestehend aus 100×100 Gitterpunkten, mit periodischen Randbedingungen (das heißt, Agenten, die links (oben) aus dem Gitter herauslaufen, kommen rechts (unten) wieder herein und umgekehrt). Die Graustufen zeigen die Benutzungshäufigkeit der Wege an. Wir erkennen deutlich eine Hauptstraße (schwarz), die von einem Netz seltener benutzter Nebenstraßen umgeben ist, was zeigt, daß die Agenten sich zumeist auf den von ihnen selbst hervorgebrachten Straßen bewegen und nicht das ganze Feld mit unkorrelierten Individualwegen überdecken.

gewisse topologische Grundstruktur vorgegeben. Welches der möglichen Wegesysteme, die diese Topologie erfüllen, aber letztlich entsteht, wird durch einen Selbstorganisationsprozeß bestimmt. Das heißt, die Strukturen entstehen durch ein Wechselspiel von Selbstverstärkung und Selektion, das durch die lokale Wechselwirkung zwischen den Agenten vermittelt wird.

Die Entstehung von ungeplanten Wegesystemen ist ein Beispiel für *interaktive Strukturbildung*, die auf einer indirekten Wechselwirkung zwischen den strukturerzeugenden Elementen, in diesem Fall den Agenten, beruht.³⁹ Wie wir an dem Beispiel der Wegesysteme sehen, ist eine spezifische Wahrnehmung des Phänomens die Voraussetzung dafür, um die Entstehung als Selbstorganisationsprozeß zu beschreiben. Dazu gehört die Reduktion auf bestimmte Eigenschaften der beteiligten Elemente. Es bedarf einer gewissen *Aktivität* und einer *minimalen Komplexität* der Agenten, um einen

³⁹Frank Schweitzer, Active Brownian Particles: Artificial Agents in Physics, in: Lutz Schimansky-Geier, Thorsten Pöschel (eds.), Lectures on Stochastic Dynamics, Berlin: Springer, 1997, pp. 339-352; Lutz Schimansky-Geier/Frank Schweitzer/Michaela Mieth, Interactive Structure Formation with Brownian Particles, in: Frank Schweitzer (ed.), Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics, London: Gordon and Breach, 1997, pp. 101-118

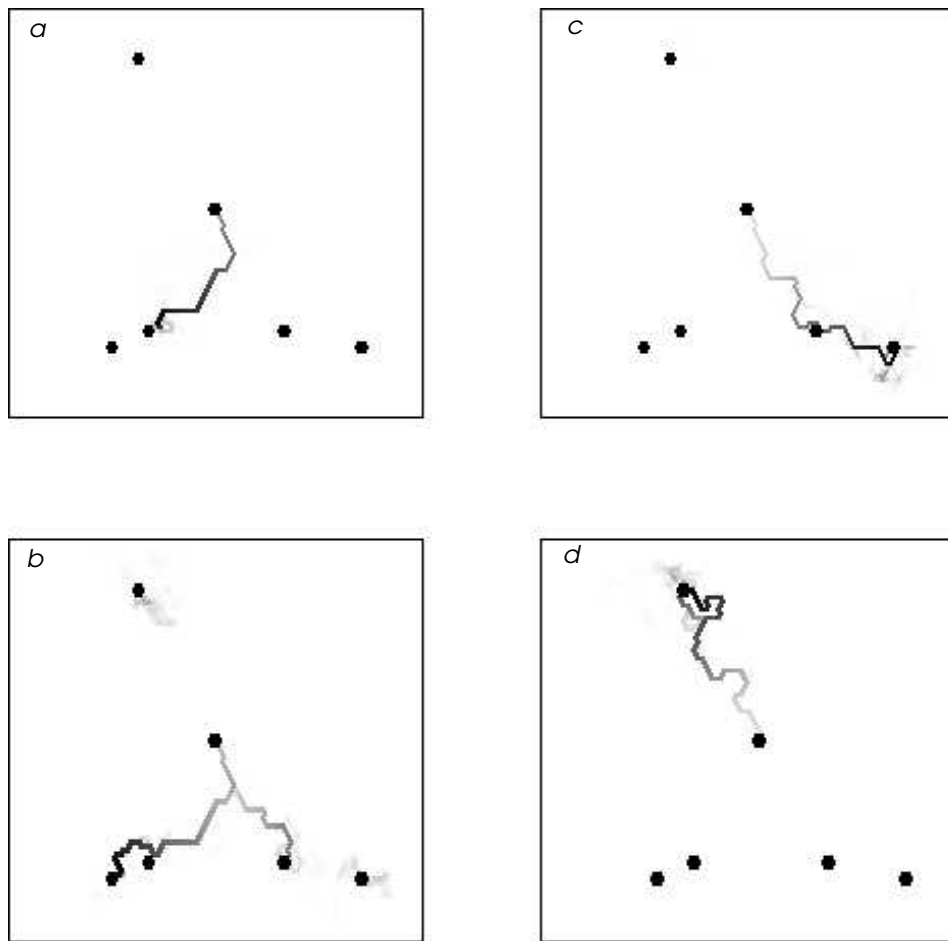


Abbildung 2: Gerichtetes Wegesystem (zu den Randbedingungen siehe Abb. 1). Die Agenten sind zur Zeit $t=0$ vom Zentrum aus gestartet und bauen nacheinander Wege zu 5 interessanten Plätzen (Futterplätzen) aus, die sie zufällig entdecken. Das Futter an den entsprechenden Plätzen wird aufgezehrt, wodurch der Platz wieder unattraktiv ist. Gezeigt werden die vorhandenen Wege zu vier verschiedenen Zeiten, wobei die Graustufen die Benutzungshäufigkeit der Wege anzeigen: (a) 2.000, (b) 4.000, (c) 8.500, (d) 15.000 Zeitschritte.

Selbstorganisationsprozeß zu ermöglichen, gleichzeitig werden aber alle spezifischen Eigenschaften weitgehend ausgeblendet.

Das entstehenden Wegesystem ist ein echtes Emergenzphänomen, das eine neue Systemqualität repräsentiert, für die es auf der Ebene der Agenten keine Entsprechung gibt. Es genügt allen Anforderungen, die im heuristischen Programm der aktiven Materie aufgestellt wurden und weist insofern die bereits erwähnten Gemeinsamkeiten mit anderen Selbstorganisationsprozessen auf:

Nichtgleichgewicht: Wegenetze sind Nichtgleichgewichtsstrukturen, die zu ihrem Erhalt einer ständigen Zufuhr von Energie und Materie (in Form von Bewegungsenergie und Markierungen) bedürfen. Dies geschieht, indem die Wege benutzt und damit ständig erneuert werden. Da Wege, die nicht mehr benutzt werden, mit der Zeit wieder verschwinden, existieren stabile Wegesysteme nur dann, wenn die Erneuerungsrate und die Verschwindensrate der Markierungen sich lokal kompensieren.

Nichtlineare Rückkopplung: Wegesysteme sind kollektive Strukturen, die durch nichtlineare Wechselwirkung zwischen den Elementen erzeugt werden. Da jeder Agent seinen eigenen Weg markieren kann, sind die Markierungen anfangs praktisch im gesamten Gebiet verteilt. Wegesysteme entstehen erst durch eine Bündelung von Trajektorien der einzelnen Agenten, was impliziert, daß die existierenden Markierungen eine anziehende Wirkung auf die Agenten ausüben. Da mit der Benutzung des Weges wiederum eine Verstärkung der Markierung erfolgt, wird auf diese Weise eine positive Rückkopplung zwischen den bereits vorhandenen Markierungen und dem weiteren Ausbau des Weges geschaffen.

Konkurrenz und Selektion: Damit Wege erhalten bleiben, bedarf es einer bestimmten Benutzungshäufigkeit. Die positive Rückkopplung allein reicht nicht aus, um einen Weg tatsächlich dauerhaft zu etablieren, denn bei einer begrenzten Zahl von Agenten pro Flächeneinheit kann nicht jede Spur fortlaufend verstärkt werden - was bedeutet, daß die Verstärkung eines bestimmten Weges zwangsläufig die Nicht-Verstärkung, also das Verschwinden eines anderen Weges zur Folge hat. Dies führt zu einem Konkurrenzprozeß unter den sich herausbildenden Wegen. Worum konkurrieren sie? Um die Agenten, die durch das Setzen der Markierungen die Existenz der Wege erst möglich machen. Das heißt, die Wege, die von den meisten Agenten benutzt werden, setzen sich mit der Zeit gegenüber den anderen Wegen durch - die aufgrund einer zu kleinen Erneuerungsrate wieder verschwinden. Dieser Selektionsprozeß ist charakteristisch für Evolutionsprozesse, die bei begrenzten Ressourcen ablaufen.

Frühe Symmetriebrechung: Von besonderer Bedeutung bei der Entstehung von Wegenetzen sind diejenigen Markierungen, die ganz am Anfang der Entwicklung gesetzt werden, denn dadurch erhält das System seine frühe Prägung. Dieser Vorgang wird in der Physik als Symmetriebrechung bezeichnet - ebenfalls ein charakteristisches Merkmal von Evolutionsprozessen: Bevor überhaupt Markierungen gesetzt wurden, ist die Symmetrie des Systems noch erhalten - das heißt, es gibt keine Unterscheidung zwischen markierten und nicht markierten Plätzen. Mit dem Setzen von Markierungen aber wird diese Unterscheidung existent, und die Symmetrie des Systems ist gebrochen. Natürlich sind die Markierungen, die zuerst gesetzt wurden, selbst längst verblaßt - der frühere Weg wäre also längst verschwunden, wenn er nicht im Verlauf der Evolution ständig "aufgefrischt" und damit - durch Benutzung - der Nachwelt erhalten geblieben wurde.⁴⁰ Auf diese Weise "ver-

⁴⁰Beispiele für den Einfluß solcher frühen Symmetriebrechungen lassen sich bei der Entwicklung von Wegen immer wieder finden: Tierpfade von durchziehenden Herden wurden von Indianern weiter benutzt, während die alten Indianerpfade später von weißen Siedlern übernommen und heute zu Fernverkehrsstraßen ausgebaut worden sind. Auch die römischen Heeresstraßen lassen sich heute in Form von Autobahnen wiederfinden.

sklaven" die frühen Markierungen die weitere Entwicklung eines Systems, sofern sie erneuert und verstärkt wurden.

Irreversibilität und Fluktuationen: Das Wegesystem, das durch die interaktive Strukturbildung entsteht, ist jeweils historisch einmalig, bedingt durch die anfängliche Symmetriebrechung, die das Wegesystem frühzeitig prägt, und durch die Fluktuationen, die der Neubildung von Wegen und der Änderung vorhandener Wege stets eine bestimmte Wahrscheinlichkeit einräumen. Natürlich ist auch das Verschwinden nicht mehr benutzter Wege möglich, allerdings "erinnert" sich das System noch über einen gewissen Zeitraum, der von der Lebendauer der Markierungen bestimmt wird, an deren Existenz. Die Historizität bleibt also auf einer bestimmten Zeitskala erhalten, auch wenn die Irreversibilität nicht vollständig ist.

5 Kollektives Gedächtnis

Wie wundervoll sind diese Wesen,
Die, was nicht deutbar, dennoch deuten,
Was nie geschrieben wurde, lesen,
Verworrenenes beherrschend binden
Und Wege noch im Ewig-Dunkeln finden.

HOFMANNSTHAL

Bei der Diskussion um die Herausbildung von Wegesystemen fällt unwillkürlich auf, daß Wege nicht nur Strukturen sind, die bestimmte biologische Spezies für ihre Migration benutzen, sondern Wege stehen in bestimmter Weise als Metapher für unsere individuelle, wie kulturelle Entwicklung. Dazu muß man nicht an HEIDEGGERS "Holzwege" erinnern, schon die Alltagssprache gibt uns zahlreiche Hinweise auf die tiefere Bedeutung von Wegen. Der "rechte Weg" ist eine Metapher für moralische Norm, und auch der achtgliedrige Pfad des Buddhismus bezeichnet einen inneren Weg, der zur Erleuchtung führt. "Einen Weg zu finden" ist unsere Lebensaufgabe, und wir haben "einen Weg zu gehen", wenn uns das Schicksal dazu auffordert. An einem "Kreuzweg stehen" wir, wenn wir eine Entscheidung treffen müssen, und aus einer festgefahrenen Situation müssen wir einen "Ausweg finden".

Das Beschreiten neuer Wege steht also nicht nur unserer physischen, sondern auch unserer geistigen Fortbewegung offen - aber die existierenden Wege schränken uns oftmals in unserer Wahl ein. Im letzten Abschnitt dieses Beitrages möchte ich die metaphorische Bedeutung von Wegen nutzen, um

Es ist allerdings anzumerken, daß der Fall der reinen Symmetriebrechung durch Fluktuationen bei Wegesystemen nur selten zu finden ist, da immer auch geographische Randbedingungen (Flüsse, Gebirge, Bodenbeschaffenheit usw.) für den weiteren Ausbau der Wege mitbestimmend sind. Neue Autobahnen vermeiden zudem schon aus ökologischen Gründen die alten Trassen und werden über das freie Feld gebaut. Auch sind die Bedürfnisse bei der Anlage von Verkehrswegen starken historischen Veränderungen unterworfen.

eben diesen "Versklavungseffekt" durch die einmal existierenden Wege zu diskutieren. Dazu werde ich die Herausbildung von Wegen zunächst unter einem informationstheoretischen Gesichtspunkt beschreiben.

In dem vorliegenden Selbstorganisationsmodell existieren zwei verschiedene Arten von Information: strukturelle und funktionale Information.⁴¹ Die *strukturelle* Information erfaßt den Informationsgehalt, wie er auf materieller Grundlage codiert ist. In unserem Beispiel ist sie gegeben durch die räumliche Verteilung der Markierungen, die von den Agenten gesetzt werden. Die Oberfläche ist damit charakterisiert durch eine Informationsdichte $b(r, t)$, die angibt wie stark die Markierung an einem bestimmten Ort r zu einer gegebenen Zeit t ist. Da die Markierungen auf der Oberfläche gespeichert werden, ist die strukturelle Information auf diese Weise unabhängig von den Agenten.

Die *funktionale* Information ist von anderer Art; sie hat die Aufgabe, die strukturelle Information, die einen Sachverhalt auf "materieller" Grundlage codiert, zu aktivieren bzw. zu interpretieren - zu "deuten". In unserem Beispiel ist die funktionale Information gegeben durch den Algorithmus, über den der Agent verfügt und den er fortlaufend abarbeitet. Unter Benutzung der Terminologie, die sich im Anschluß an die Autopoiese-Theorie etabliert hat, können wir auch sagen: die strukturelle Information repräsentiert die *strukturelle Determiniertheit* des Informationssystems, während die funktionale Information die *Selbstreferentialität*, die *operationale Geschlossenheit* des Informationssystems beschreibt.

Bei der Modellierung des Wegesystems haben wir anhand eines einfachen Modells gesehen, wie sich eine Anzahl von Agenten über die Erzeugung und Verwertung von strukturierter Information räumlich organisiert und dabei gemeinschaftlich Strukturen aufbaut. Während des ablaufenden Selbstorganisationsprozesses wird mit Hilfe von funktionaler Information ständig aus vorhandener strukturierter Information *pragmatische* Information gewonnen, also Information, die eine bestimmte Wirkung erzeugt. Im konkreten Fall beeinflußt die pragmatische Information die Bewegung der Agenten und hat dadurch auch einen Einfluß auf die *weitere Erzeugung* strukturierter Information.

Dieser Prozeß kann als ein indirekter Kommunikationsprozeß zwischen den Agenten charakterisiert werden. Das heißt, die Agenten kommunizieren miteinander über das Medium (die Oberfläche), auf dem sie ihre Markierungen setzen. Der indirekte Kommunikationsprozeß läßt sich durch drei Elemente beschreiben: (a) "Schreiben": jeder Agent "schreibt" Markierungen, während er sich auf der Oberfläche bewegt, (b) "Lesen": jeder Agenten kann Markierungen erkennen, wenn sie sich in seiner Umgebung befinden, (c) "Handeln": aufgrund der vorhandenen Markierungen fällt der

⁴¹ Frank Schweitzer, Selbstorganisation und Information, in: Holger Krapp/Thomas Wägenbaur (Hrsg.), Komplexität und Selbstorganisation. "Chaos" in Natur- und Kulturwissenschaften, München: Fink, 1997, S. 99-129, (ders.), Strukturelle, funktionale und pragmatische Information - zur Kontextabhängigkeit und Evolution der Information, in: Norbert Fenzl/Wolfgang Hofkirchner/Gottfried Stockinger (Hrsg.), Information und Selbstorganisation. Annäherungen an eine vereinheitlichte Theorie der Information, Innsbruck: Studienverlag, 1998, S. 341-364, (ders.) Structural and functional information - an evolutionary approach to pragmatic information, World Futures: The Journal of General Evolution 50 (1997) 533-549, vgl. auch Ebeling/Freund/Schweitzer (FN 34)

Agent eine Entscheidung und bewegt sich in die gewählte Richtung. Auf diese Weise wird die Wegestruktur gemeinschaftlich von allen Agenten hervorgebracht und durch kollektive Benutzung weiter ausgebaut.

Interpretiert man diesen Vorgang, dann ist in dieser Struktur praktisch die Geschichte der Agenten-Community festgeschrieben: die Struktur ist historisch durch das gemeinschaftliche Handeln aller Agenten entstanden, und sie hat alle Aktionen der Agenten hinsichtlich der dabei generierten (strukturellen) Information gespeichert, wobei diese Information mit der Zeit auch wieder verblassen kann. Für die Agenten, die selbst kein Gedächtnis haben, repräsentiert diese Struktur eine Art *kollektives Gedächtnis*, in dem durch die Informationsdichte $b(r, t)$ genau die Information angegeben wird, die nach einer bestimmten Zeit noch im System *verfügbar* ist. Verfügbarkeit bedeutet hier, daß diese Information (als strukturelle Information) tatsächlich noch durch funktionale Information aktiviert und damit als pragmatische Information *wirksam* werden kann.

In dieses kollektive Gedächtnis gehen die Informationen, die zu unterschiedlichen Zeiten generiert wurden, gewichtet ein. Dieser Prozeß ist aber durch die nichtlineare Rückkopplung durchaus differenziert zu betrachten: natürlich ist die Information, die in den frühen Stadien der Entwicklung generiert wurde, längst verblaßt - auf der anderen Seite waren die ersten Markierungen, die von den Agenten gesetzt wurden, auch diejenigen, durch die das System seine frühe Prägung erhalten hat - ein Vorgang, den wir unter dem Begriff der Symmetriebrechung schon diskutiert haben. Die frühe Information kann im Verlauf der Evolution des Systems durch "Verwertung" verstärkt werden; wird sie ständig "aufgefrischt", dann steht sie auf diese Weise auch noch zu späteren Zeiten zur Verfügung. Wird sie aber nicht laufend verstärkt, dann verblaßt sie mit der Zeit und hat auf die spätere Entwicklung des Systems keinen entscheidenden Einfluß mehr.

Auf diese Weise repräsentiert die Wegestruktur, die hier als Beispiel diskutiert wird, tatsächlich ein kollektives Gedächtnis für die Agenten. Nur diejenigen Wege, die wirklich ständig benutzt und damit aufgefrischt werden, bleiben im Verlauf der Entwicklung erhalten. Daneben können zu allen Zeiten auch stets neue Markierungen gesetzt werden: die Agenten sind nicht gezwungen, sich stets auf alten, eingefahrenen Wegen zu bewegen, sondern sie haben (im Rahmen eines probabilistischen Modells) auch die Möglichkeit, "Neuland zu betreten" und dort Markierungen zu setzen. Die Frage ist aber, ob der auf diese Weise generierte Weg im Verlauf der Evolution auch weiter verstärkt und als neuer "Aus-Weg" akzeptiert wird, sich also in einem Konkurrenzprozeß durchsetzen kann, oder ob er mit der Zeit wieder vergessen wird.

Hier wird der "Versklavungseffekt" durch die einmal hervorgebrachten Wege deutlich: je stärker bereits Wege ausgebaut sind, um so schwerer ist es, daß sich zu einem späteren Zeitpunkt neue Wege etablieren. Die bereits vorhandenen Wege verkörpern die bisherige Entwicklung des Systems und können in ihrer Existenz nicht einfach ignoriert werden. Das kollektive Gedächtnis versklavt die Agenten, indem es sie bevorzugt auf vorhandene Wege einschränkt - da aber andererseits dieses kollektive Gedächtnis erst durch die Agenten hervorgebracht wurde, werden die Agenten letztlich von ihrer eigenen Geschichte versklavt, die ihre Gegenwart mitbestimmt.

Wir haben in den Computersimulationen gesehen, daß die entstandene Informationsstruktur, das kollektive Gedächtnis, sich nach einer gewissen Einschwingphase in einem quasistationären Zustand bzw. einem homöostatischen Gleichgewicht befindet. Dieses Gleichgewicht ist dadurch gekennzeichnet, daß der Zuwachs an neu generierter Information und das Verschwinden von vorhandener Information sich auf der globalen Ebene gerade die Waage halten. Dabei ist zu beachten, daß die neu generierte strukturelle Information im wesentlichen ein Auffrischen, ein Verstärken der schon vorhandenen Information bedeutet - nur im Einzelfall wird tatsächlich etwas Neues generiert, ein Ausweg gefunden.

Wir stellen also, zumindest im Rahmen des diskutierten Modells, im Langzeit-Limit kein Wachstum der kollektiven Information fest, sondern eine *Substitution von Information*: für das, was wir dazugewinnen, verlieren wir gleichzeitig alte Anteile. Auf diese Weise ändert sich das kollektive Gedächtnis auf einer sehr langsamen Zeitskala. Ein "Fortschritt", der sich quantitativ messen ließe, kann aus diesem Prozeß nicht abgeleitet werden, vielmehr geht es um die *Erhaltung der Anpassung* des kollektiven Gedächtnisses bei den fortlaufenden Aktionen der Agenten.

Wie wir in diesem Modell sehen, läuft die Entstehung von Information auf zwei verschiedenen Ebenen ab: Zum einen wird Information *lokal* von den Agenten generiert; zum anderen wird auf der Ebene des Gesamtsystems eine neue Art von *globaler* oder *kollektiver Information* erzeugt, die von dem einzelnen Agenten nicht als Ganzes wahrgenommen werden kann, gleichwohl aber dessen Aktion beeinflusst. Diese Ebene spielt in der Synergetik die Rolle des Ordners, der, von den Agenten gemeinschaftlich kriert, auf deren Bewegung zurückwirkt und diese verklavt. Durch die Rückkopplung zwischen der Ebene der Agenten und der Ebene des kollektiven Gedächtnisses können sich beide nur gleichzeitig, also im Sinne einer *Ko-Evolution*, entwickeln - die sich dabei vollziehende Ausdifferenzierung der *Informationslandschaft* erfolgt also selbstreferentiell und nicht durch Steuerung von außen.

Auf der Ebene der Agenten, die aus dieser Informationslandschaft pragmatische Information (Hinweise für ihr eigenes Handeln) gewinnen, stellt sich dieser Prozeß dar als als eine Komplementarität von Fragen (funktionaler Information) und Antworten (aus der strukturellen Information gewonnene pragmatische Information). Was der Agent also als Information aus dem Informationsfeld gewinnen kann, entspricht genau den *Möglichkeiten seines Fragens* und der zur Verfügung stehenden strukturellen Information.

Vielleicht ist es zu gewagt, von diesem simplen Modell aus Verallgemeinerungen auf die Wissenschaftsentwicklung zu ziehen. Aber die Versuchung ist doch groß, an dieser Stelle wieder an den Anfang dieses Beitrags zurückzukehren und die Frage nach dem Verhältnis von subjektiven Voraussetzungen und "objektiven" Erkenntnissen erneut aufzugreifen. Auch in der Naturwissenschaft sind es die Möglichkeiten unseres Fragens, gebrochen an der kollektiven Tradition des Wissenschaftsverständnisses, die uns den Blick auf das Phänomen bestimmen - oder verstellen. Das, was uns, den Agenten, als wissenschaftlicher Fortschritt erscheint, ist vielleicht auf der Ebene kollektiver Information Teil eines kontinuierlichen Substitutionsprozesses, der "lediglich" der Erhaltung der

Anpassung dient. Diese Einsicht mag durchaus geeignet sein, um die unkritische Euphorie bei der Etablierung einer "neuen Naturwissenschaft" zu dämpfen. Aber vielleicht kann die Selbstorganisationstheorie ihren besten Beitrag in der Wissenschaftstheorie gerade dadurch leisten, daß sie uns diese Komplementarität von Fragen und Antworten, von Wahrnehmen und Ausblenden, von Reduktion und Konstruktion in der Naturwissenschaft verdeutlicht und uns somit der "Kultur des blinden Flecks" einen Schritt näher bringt.