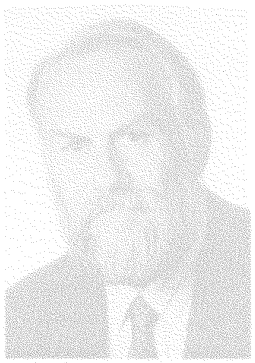
Hermann Haken und Axel Pelster

Über die Rolle der Symmetriebrechung bei der Selbstorganisation

In den vergangenen zwei Jahrzehnten hat die Synergetik eine Vielzahl universeller Gesetzmäßigkeiten entdeckt, die Systemen mit der Fähigkeit zur Selbstorganisation innewohnen. Unabhängig von den jeweiligen mikroskopischen Wechselwirkungen erfolgt die spontane Emergenz neuer makroskopischer Ordnungszustände häufig zusammen mit einer Veränderung der Symmetrie des gesamten Systems, was verkürzt auch als Symmetriebrechung bezeichnet wird. Eine solche Koinzidenz von Selbstorganisation und Symmetriebrechung wird von der Synergetik ausgenutzt, um durch Symmetriebetrachtungen mögliche Ordnungszustände und ihre spontane Entstehung qualitativ vorhersagen zu können.

Die Selbstorganisationstheorie der Synergetik

Die von einem von uns (Hermann Haken) im Jahre 1969 begründete interdisziplinäre Wissenschaft der Synergetik beschäftigt sich mit Systemen der belebten und unbelebten Natur, die sehr weit gefaßten Voraussetzungen genügen. Die betrachteten Systeme sollen auf der mikroskopischen Ebene aus vielen Untersystemen aufgebaut sein, die an sich schon eine nichtlineare Struktur aufweisen oder zwischen denen zumindest nichtlineare Wechselwirkungen vorliegen. Ferner wird



Prof. Dr. Dr. h.c. mult. **Hermann Haken**; geb. 1927 in Leipzig. Studium der Mathematik und Physik an den Universitäten Halle und Erlangen. In Erlangen 1951 Promotion in Mathematik und 1956 Habilitation in Physik. Ordentlicher Professor für Theoretische Physik an der Universität Stuttgart seit 1960. Gastprofessor an verschiedenen internationalen Universitäten. Ehrendoktorwürden der Universitäten Essen und Madrid sowie der Florida Atlanta University. Mitglied in zahlreichen nationalen und internationalen Akademien, 1984 Wahl in den Orden *Pour le mérite*. Neben zahlreichen Auszeichnungen ist er auch Träger der Max-Planck-Medaille der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. 1986 Verleihung des Großen Bundesverdienstkreuzes mit Stern. Arbeitsschwerpunkte: Mathematik, Lasertheorie und die von ihm begründete Synergetik.

Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Herman Haken, Institut für Theoretische Physik und Synergetik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart

vorausgesetzt, daß die Systeme eine Offenheit gegenüber der Umgebung aufweisen und somit beispielsweise Energie, Information oder Materie mit der Umgebung austauschen. Solche Systeme besitzen oft die Fähigkeit, im Makroskopischen räumliche, zeitliche oder auch raumzeitliche spontane Ordnungszustände auszubilden. Sie besitzen damit Eigenschaften, die unter dem Begriff Selbstorganisation subsumiert werden.

Obwohl die Synergetik ursprünglich aus Untersuchungen an physikalischen Systemen wie dem Laser hervorgegangen ist, so stellt sie dennoch keine physikalistische Theorie dar. Als eigenständige Wissenschaft hat sie vielmehr das Anliegen, für die Fülle der Selbstorganisationsphänomene in den unterschiedlichsten Disziplinen universelle Gesetzmäßigkeiten herauszuarbeiten und diese auf einheitliche mathematische Strukturen abzubilden. In diesem Sinne kann man die Synergetik als eine fächerübergreifende mathematische Strukturtheorie auffassen.

Das Ergebnis der synergetischen Forschung besteht darin, daß die Fähigkeit eines Systems zur Selbstorganisation auf dem kohärenten Zusammenwirken aller seiner Bestandteile beruht. Man spricht deshalb vereinfachend davon, daß das gesamte System mehr ist als die Summe seiner Teile. Dieser Umstand wurde bei der Namensgebung für diese neue interdisziplinäre Wissenschaft berücksichtigt, denn der aus dem Griechischen entlehnte Begriff Synergetik bedeutet die Lehre vom Zusammenwirken.

Axel Pelster, geb. 1966. Studium der Physik an der Universität Stuttgart. Stipendiat der Studienstiftung des Deutschen Volkes. Diplom in Physik 1992. Arbeitsschwerpunkte: Methode der Pfadintegrale in der Quantenmechanik und Statistik, Synergetik.



Axel Pelster, Institut für Theoretische Physik und Synergetik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart

Beispiele

Der interdisziplinäre Anspruch der Synergetik läßt sich durch eine Reihe eindrucksvoller Beispiele belegen, die sowohl den Natur- als auch den Sozialwissenschaften entlehnt sind. Abbildung 1 zeigt hierzu einige exemplarische Selbstorganisationsphänomene, die in den vergangenen zwei Jahrzehnten von der Synergetik untersucht worden sind:

Hierbei hat es sich gezeigt, daß die verschiedenartigen Selbstorganisationsprozesse einheitlich beschrieben werden können, wenn man den Begriff des Kontrollparameters zur Quantifizierung der Offenheit der Systeme gegenüber der Umgebung einführt. Im allgemeinen kann man davon ausgehen, daß sich die Systeme bei kleinen Werten dieses Kontrollparameters in einem stabilen Zustand befinden. Erhöht man dagegen den Kontrollparameter über einen spezifischen kritischen Wert, so kann dieser ursprüngliche Zustand instabil werden und das System veranlassen, spontan einen neuen stabileren Zustand einzunehmen.

Dieses Phänomen läßt sich durch ein anschauliches, leicht reproduzierbares Beispiel aus dem Bereich der

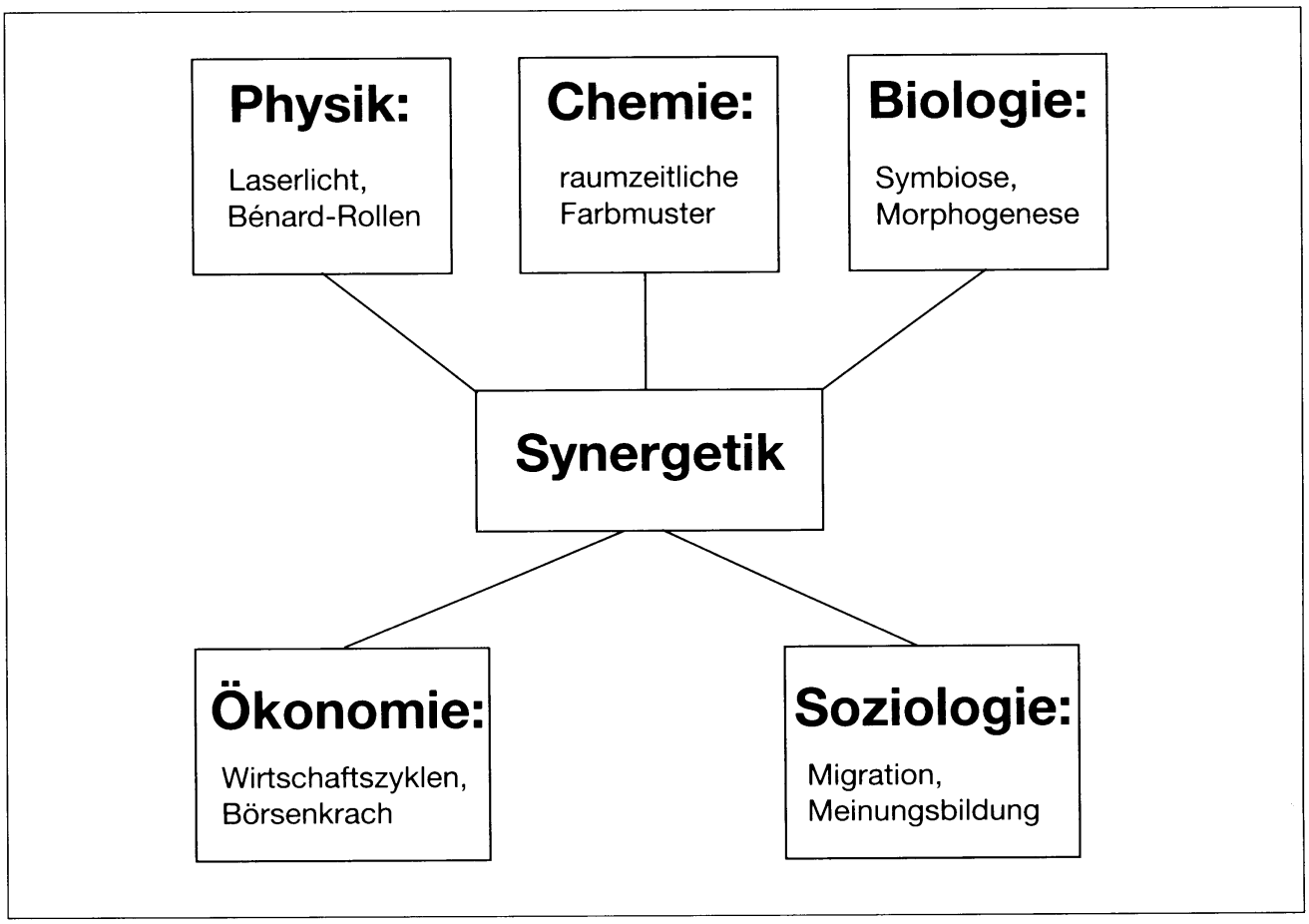


Abb. 1: Einige exemplarische Selbstorganisationsphänomene

Hydrodynamik illustrieren, das der Synergetik häufig als Paradigma dient. Beim Bénard-Experiment in Abbildung 2 wird eine von zwei planparallelen Glasplatten begrenzte Flüssigkeitsschicht von unten her erwärmt und oben auf konstanter Temperatur gehalten. Der Kontrollparameter dieses Systems kann mit der Temperaturdifferenz zwischen der unteren und der oberen Flüssigkeitsschicht identifiziert werden. Ist diese Temperaturdifferenz klein, so erfolgt der Wärmetransport im mikroskopischen Bereich durch Molekülstöße, während die Flüssigkeit als ganzes in Ruhe bleibt. Diesen ursprünglichen Zustand bezeichnet man als Wärmeleitung. Erreicht dagegen die Temperaturdifferenz einen bestimmten kritischen Wert, so reicht diese Wärmeleitung für den erforderlichen Wärmetransport nicht mehr aus und es kommt zur Konvektion. Es setzt eine regelmäßige makroskopische Bewegung der Flüssigkeit ein, bei der sich die charakteristischen Bénard-Rollen ausbilden. Die unteren wärmeren Flüssigkeitsschichten dehnen sich aus und steigen aufgrund ihrer geringeren Dichte gemäß dem Archimedischen Prinzip nach oben, während die oberen kälteren Flüssigkeitsschichten eine größere Dichte aufweisen und sich deshalb nach unten bewegen.

Im übertragenen Sinne läßt sich in diesem Zusammenhang auch die Problematik der Migration im Rahmen der Soziologie diskutieren. Unter normalen, zufriedenstellenden Lebensumständen neigt der Mensch zur Seßhaftigkeit und verändert nur spora-

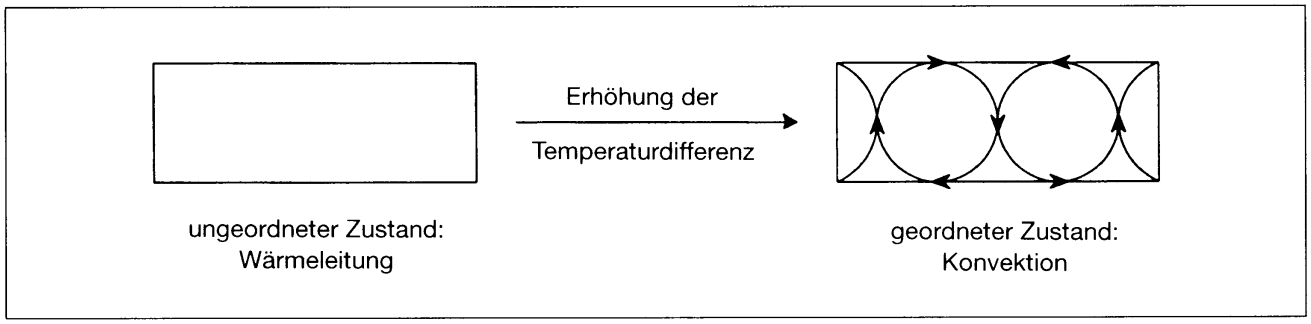


Abb. 2: Eine Erhöhung der Temperaturdifferenz führt zur Ausbildung eines Musters von Bénard-Rollen

disch seinen Wohnsitz. Diese Situation kann sich aber plötzlich verändern, wenn Naturkatastrophen, Kriege, staatliche Repressionen oder ein gesamtwirtschaftlicher Niedergang die individuellen Lebensumstände verschlechtern. Wenn der regionale Unterschied der Lebensumstände als Kontrollparameter einen kritischen Wert überschreitet, so kann es zu Migrationen größeren Ausmaßes kommen, die sich jeglicher menschlicher Kontrolle entziehen. Gerade in unserer Zeit lassen sich weltweit Migrationen beobachten, die zusammengenommen die Völkerwanderungen beim Zusammenbruch des Römischen Reiches übertreffen.

Moden

Aus praktischer Sicht ist man daran interessiert, solche verschiedenartigen Selbstorganisationsphänomene beeinflussen zu können. Hierzu muß man mit Hilfe einer universellen Strategie die möglichen Ordnungszustände eines Systems bestimmen und die jeweiligen spezifischen kritischen Werte der Kontrollparameter vorhersagen, bei denen diese Ordnungszustände spontan auftreten. Zur Realisierung dieser Zielsetzungen entwickelte die Synergetik die im vorherigen Abschnitt dargelegte einheitliche quantitative Beschreibung und eine darauf aufbauende mathematische Systemanalyse.

Die Arbeitsmethode der Synergetik erfordert zunächst ein approximatives Vorwissen darüber, wie das zu untersuchende System aus seinen Untersystemen aufgebaut ist und welche Wechselwirkungen zwischen diesen Untersystemen vorherrschen. Dieses Vorwissen dient dazu, auf der mikroskopischen Ebene die Dynamik der Untersysteme zu bestimmen. Im zweiten Schritt wird diese mikroskopische Betrachtungsweise des Systems durch eine makroskopische ersetzt. Anstatt die Dynamik jedes einzelnen Untersystems zu erfassen, untersucht man alle realisierbaren kollektiven Bewegungen der Untersysteme, die auch als Moden bezeichnet werden. Sie entsprechen den möglichen Ordnungszuständen, die sich auf der makroskopischen Ebene des gesamten Systems ausbilden können.

Dieser Wechsel der Betrachtungsweise läßt sich am Beispiel des Bénard-Experimentes veranschaulichen. Bei der mikroskopischen Beschreibung verfolgt man die zeitliche Änderung des Ortes und der Geschwindigkeit jedes einzelnen Flüssigkeitsmoleküls. Beim Übergang zur makroskopischen Beschreibung werden dage-

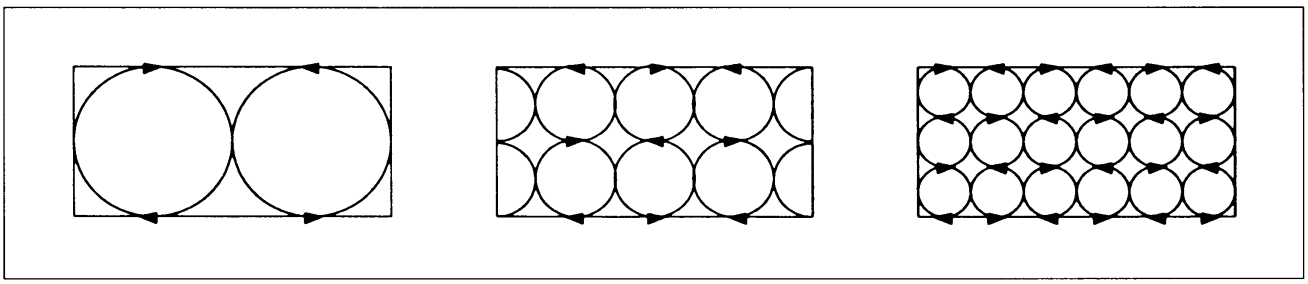


Abb. 3: Drei verschiedene Muster von Bénard-Rollen als mögliche Moden

gen alle möglichen Rollenmuster untersucht, die mit den Randbeschreibungen und den Bewegungsgleichungen der Hydrodynamik vereinbar sind. In Abbildung 3 sind beispielhaft drei solcher Moden dargestellt.

Zirkuläre Kausalkette

Eine detaillierte Analyse der Systemmoden ermöglicht eine tiefergehende, prinzipielle Einsicht, wie Selbstorganisationsphänomene durch das komplexe Zusammenspiel von Linearitäten und Nichtlinearitäten entstehen können. Linearitäten führen dazu, daß sich bei den kritischen Werten der Kontrollparameter eine Zeitskalenhierarchie ausbildet. Die erste Hierarchieebene besteht dabei aus wenigen, langsam veränderlichen Moden, während die zweite Hierarchieebene von vielen, schnell veränderlichen Moden gebildet wird. Nichtlinearitäten führen dagegen zu einer wechselseitigen Abhängigkeit zwischen beiden Hierarchieebenen, wie sie in Abbildung 4 illustriert ist. Das von uns (Hermann Haken) entdeckte Versklavungsprinzip der Synergetik besagt, daß die vielen, schnell veränderlichen Moden instantan solche Werte annehmen, die von den wenigen, langsam veränderlichen Moden vorgeschrieben werden. Umgekehrt bewirken aber auch nichtlineare Rückkoppelungen, daß die vielen, schnell veränderlichen Moden die Dynamik der wenigen, langsam veränderlichen Moden beeinflussen.

Insgesamt gesehen entsteht durch das Zusammenwirken aller Systembestandteile eine Koexistenz beider Hierarchieebenen in Form einer zirkulären Kausalkette. Wie beim Henne-Ei-Problem sind beide Hierarchieebenen aufeinander angewiesen. Eine solche zirkuläre Kausalkette ist dabei grundsätzlich von einer linearen Kausalkette zu unterscheiden, die oft unseren Denkgewohnheiten innezuwohnen scheint. Bei einer zirkulären Kausalkette wie in Abbildung 4 lassen sich Ursache und Wirkung nicht definitiv gegeneinander abgrenzen, sondern sie verschmelzen vielmehr zu einer sich wechselseitig bedingenden Einheit. Dieser komplexe Sachverhalt ist auch in M.C. Eschers Lithographie „Zeichen" thematisiert worden, die zwei sich gegenseitig zeichnende Hände zeigt. Hierin ist die übliche Trennung von Ursache und Wirkung in der Kunst, nämlich zu zeichnen oder gezeichnet zu werden, zugunsten einer höheren Einheit außer Kraft gesetzt.

Die universelle Gültigkeit des Versklavungsprinzips bei den kritischen Werten der Kontrollparameter hat noch eine andere Konsequenz. Da die vielen, schnell veränderlichen Moden instantan solche Werte annehmen, die

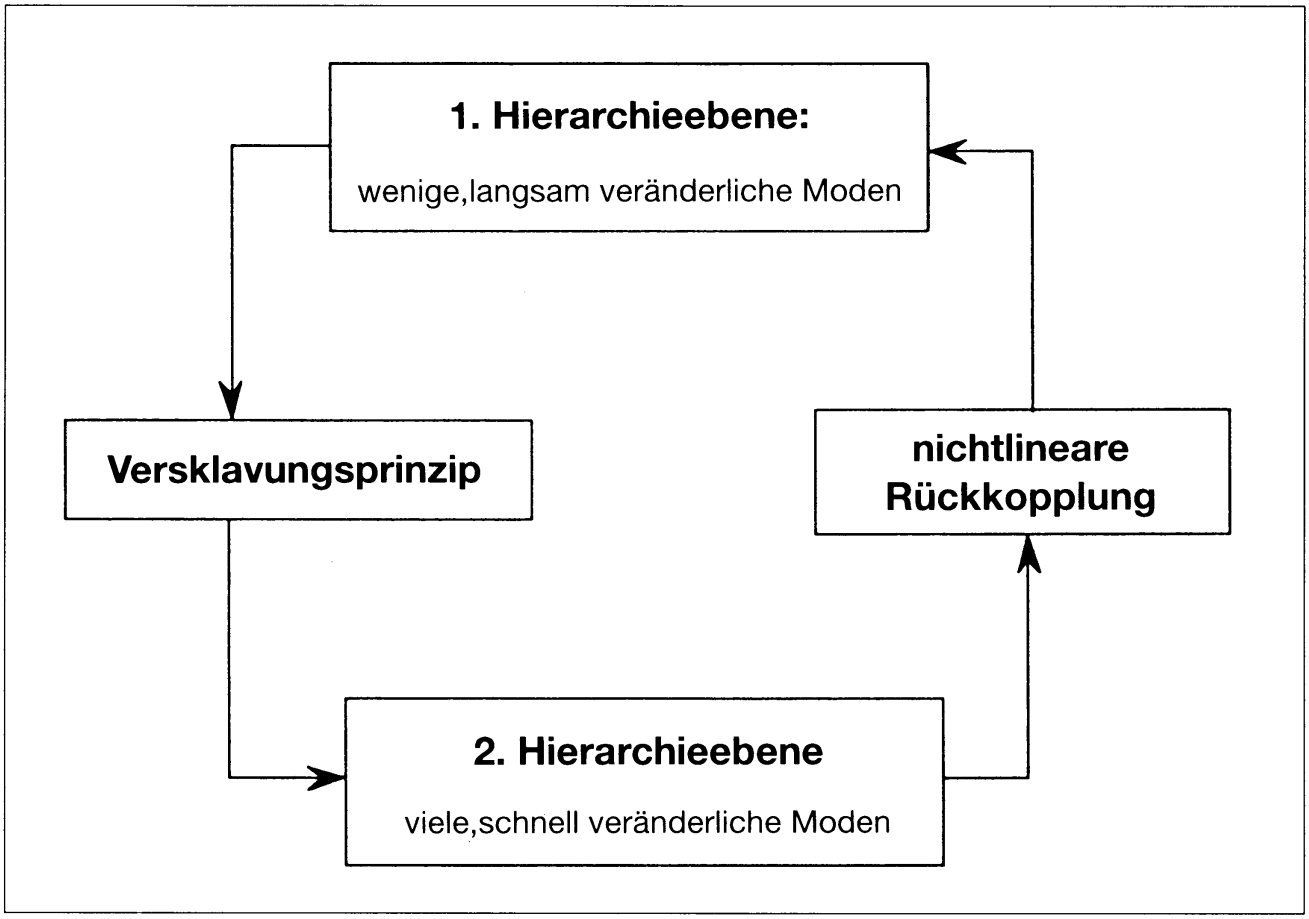


Abb. 4: Wechselseitige Abhängigkeit zwischen der 1. Hierarchieebene der wenigen, langsam veränderlichen Moden und der 2. Hierarchieebene der vielen, schnell veränderlichen Moden

von den wenigen, langsam veränderlichen Moden vorgeschrieben werden, hängt die Dynamik eines sich selbst organisierenden Systems eigentlich nur von den letzteren ab. Deshalb ist es für die Untersuchung der makroskopischen Ordnungszustände eines Systems ausreichend, die vielen, schnell veränderlichen Moden approximativ aus der Beschreibung zu eliminieren und sich auf die Diskussion der wenigen, langsam veränderlichen Moden zu konzentieren. Dieser Umstand hat dazu geführt, daß man die wenigen, langsam veränderlichen Moden auch als Ordnungsparameter bezeichnet. Das Versklavungsprinzip der Synergetik führt damit zu einer vereinfachten, reduzierten Beschreibung sich selbst organisierender Systeme.

Rückblickend wirft dies nun die Frage auf, welche der ursprünglich vielen Moden die Funktion eines Ordnungsparameters übernehmen und damit die makroskopische Dynamik maßgeblich beeinflussen. Da bei diesem Wettbewerb diejenigen Moden gewinnen, die den Systembedingungen am besten angepaßt sind, drängt sich eine Analogie zur Darwinschen Evolutionstheorie auf. Mutation und Selektion entsprechen bei einem solchen Vergleich Zufall und Notwendigkeit in der synergetischen Modellierung von sich selbst organisierenden Systemen. Hierbei rührt der Zufall von vernachlässigten mikroskopischen Freiheitsgraden her und wirkt in Form von Fluktuationen auf die Dynamik der Moden ein. Die Not-

wendigkeit und damit der Selektionsdruck entsteht durch den vorgegebenen Einfluß der Umgebung auf das System und wird durch die Einführung der Kontrollparameter berücksichtigt. In diesem Sinne kann man davon sprechen, daß die Synergetik den ursprünglich im Bereich der Biologie entwickelten Darwinschen Evolutionsgedanken auf die spontane Entstehung makroskopischer Ordnungszustände in sich selbst organisierenden Systemen überträgt.

Der Symmetriebegriff in der Synergetik

Aus der heutigen Naturbeschreibung ist der fundamentale Begriff der Symmetrie nicht mehr wegzudenken. Sowohl in der unbelebten als auch in der belebten Natur gibt es eine Fülle von Beispielen, bei denen sich räumliche Strukturen, Bewegungsabläufe oder aber auch mathematische Formulierungen von Naturgesetzen nicht verändern, wenn an ihnen bestimmte Transformationen durchgeführt werden. Damit stellen Symmetrien keine statischen Eigenschaften dar, sondern sie sind unmittelbar mit einer Tätigkeit verknüpft, die das betrachtete Objekt nach wohldefinierten Vorschriften reproduzieren.

Auch in offenen Systemen mit der Fähigkeit zur Selbstorganisation spielen Symmetrien eine wichtige Rolle. Erreicht der Kontrollparameter einen kritischen Wert, bei dem das System spontan von einem ursprünglichen in einen neuen stabileren Zustand übergeht, so ist dies häufig mit einer Änderung der Systemsymmetrie verbunden. Verkürzt spricht man davon, daß die Symmetrie des ursprünglichen Zustandes gebrochen wird. Die Synergetik nutzt dazu eine solche Koinzidenz von Selbstorganisation und Symmetriebrechung aus, um durch Symmetriebetrachtungen mögliche Ordnungszustände und ihre spontane Entstehung qualitativ vorhersagen zu können.

Ursprung der Symmetrie

Die vielfältigen Symmetrien, die bei sich selbst organisierenden Systemen auftreten, besitzen zwei voneinander unabhängige Ursachen. Zunächst führt die äußere Form des betrachteten Systems dazu, daß eine geometrische Symmetrie vorliegen kann. Darüber hinaus kann aber auch den Bewegungsgleichungen, die der raumzeitlichen Evolution des Systems zugrunde liegen, eine dynamische Symmetrie innewohnen. Bei der Bestimmung aller realisierbarer Moden des Systems sieht man dann, daß das komplexe Zusammenspiel von geometrischer und dynamischer Symmetrie dafür verantwortlich ist, daß auch die einzelnen Moden gewisse Symmetrien aufweisen können. Dabei besitzt die dynamische Symmetrie einen einschränkenden Einfluß, so daß die Modensymmetrie im allgemeinen geringer ist als die geometrische Symmetrie.

Das anschauliche Bénard-Experiment soll auch hier wieder zur Illustration verwendet werden. Die geometrische Symmetrie dieses Systems besteht aus zwei verschiedenen Bestandteilen. Seine äußere Form wird durch

- kontinuierliche Translationen parallel zu den beiden Glasplatten; und

■ eine Spiegelung an einer fiktiven Ebene, die in der Mitte der Flüssigkeit parallel zu den Glasplatten verläuft,

in sich selber überführt. Durch das Zusammenspiel dieser geometrischen Symmetrie mit einer hier nicht näher zu spezifizierenden dynamischen Symmetrie der hydrodynamischen Bewegungsgleichungen entsteht dann die geringere Symmetrie der Moden in Abbildung 3. Jede einzelne Mode ist noch unter einer diskreten Translation um das 2, 4, 6, ...-fache ihres Rollendurchmessers invariant, während die Spiegelsymmetrie überhaupt nicht mehr auftritt.

Symmetriebrechung

Erreicht der Kontrollparameter einen kritischen Wert, so kommt es zu einem Wettbewerb zwischen den einzelnen Moden und damit zwischen den entsprechenden Modensymmetrien. Diejenige Mode, die diesen Wettbewerb gewinnt und als Ordnungsparameter das Verhalten des gesamten Systems dominiert, prägt ihre eigene Symmetrie dem System auf. Dadurch wird die ursprüngliche geometrische Symmetrie des Systems gebrochen und durch die Symmetrie des Ordnungsparameters ersetzt. Da nun aber eine Modensymmetrie im allgemeinen geringer ist als die geometrische Symmetrie des Systems, führt eine Zunahme an Ordnung durch einen Selbstorganisationsprozeß zu einer Reduktion der Systemsymmetrie.

Dieses Phänomen der Symmetriebrechung läßt sich am Beispiel des Bénard-Experimentes von Abbildung 2 im Detail diskutieren. Der ursprünglich ungeordnete, wärmeleitende Zustand besitzt die geometrische Symmetrie des Systems. Wie schon erwähnt wurde, ist er sowohl unter kontinuierlichen Translationen als auch unter der Spiegelung an einer Ebene invariant. Durch eine Erhöhung der Temperaturdifferenz entsteht ein Wettbewerb zwischen den einzelnen Moden, von denen einige in Abbildung 3 dargestellt sind. Die meisten Moden können sich dabei nur unzureichend den vorgegebenen Randbedingungen anpassen.

Beim kritischen Wert der Temperaturdifferenz gibt es entsprechend Ab-

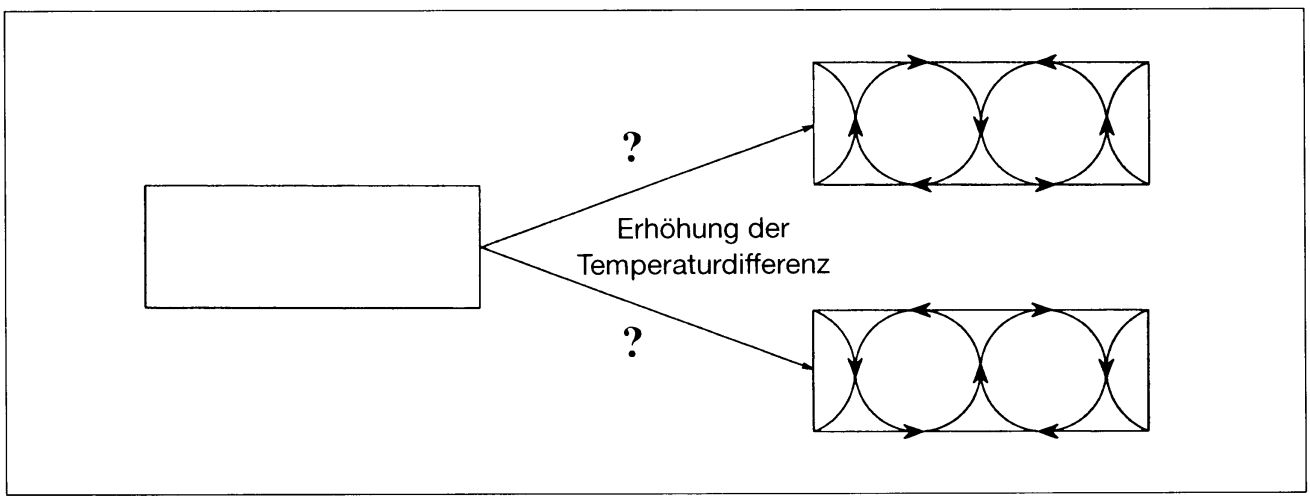


Abb. 5: Bei der Erhöhung der Temperaturdifferenz kann eines dieser beiden gleichberechtigten Rollenmuster den Modenwettbewerb gewinnen.

bildung 5 genau zwei gleichberechtigte Rollenmuster, die diesen Wettbewerb gewinnen können. Beide möglichen Moden unterscheiden sich nur in der Bewegungsrichtung der einzelnen Flüssigkeitsmoleküle. Dort wo die Flüssigkeitsmoleküle bei der einen Mode nach oben steigen, sinken sie bei der anderen nach unten und umgekehrt. Erst wenn der Zufall in Form von Fluktuationen auf der mikroskopischen Ebene eine Entscheidung zwischen diesen beiden Moden von Abbildung 5 herbeiführt, entsteht schließlich die Situation von Abbildung 2. Der Gewinner des Modenwettbewerbes übernimmt die Funktion des Ordnungsparameters und prägt dem System seine Symmetrie auf. Deshalb besitzt der spontan entstehende, konvektive Zustand nur noch eine Invarianz unter diskreten Translationen. Insgesamt gesehen wird durch den Selbstorganisationsprozeß beim Bénard-Experiment sowohl die Symmetrie der kontinuierlichen Translationen als auch die Symmetrie der Spiegelung gebrochen.

Das Modell des Potentialgebirges

Symmetrien und deren Verletzung können aber auch bei einer abstrakten Beschreibung von sich selbst organisierenden Systemen beobachtet werden. Hierzu bedient man sich einer schon oben angeführten Konsequenz des Versklavungsprinzips der Synergetik. Danach ist es zur Untersuchung makroskopischer Ordnungszustände approximativ gerechtfertigt, sich auf die einfache Dynamik der wenigen Ordnungsparameter zu beschränken. Im Rahmen eines abstrakten Modells kann man diese Dynamik der Ordnungsparameter als die gedämpfte Bewegung einer Kugel in einem fiktiven Potentialgebirge deuten. Der Einfluß der Kontrollparameter besteht in diesem Modell darin, daß sie die konkrete Gestalt des Potentialgebirges festlegen.

Beim Bénard-Experiment kann der Ordnungsparameter mit der vertikalen Geschwindigkeit der Flüssigkeit an einer bestimmten Stelle identifiziert werden. Im Modell des Potentialgebirges trägt man nun das Potential V der Kugel über diesen Ordnungsparameter q auf. Für verschiedene Werte des Kontrollparameters, der durch die Temperaturdifferenz ΔT zwischen den unteren wärmeren und den oberen kälteren Flüssigkeitsschichten gegeben ist, entstehen dann die in Abbildung 6 dargestellten Situationen. Das Potentialgebirge weist dabei insofern eine Symmetrie auf, als es für alle Werte des Kontrollparameters ΔT durch eine Spiegelung an der Ordinate in sich selber überführt wird. Diese Symmetrie des abstrakten Potentialgebirges rührt letztendlich daher, daß die Flüssigkeit als Ganzes unter der Spiegelung an einer Ebene in der Mitte zwischen beiden planparallelen Glasplatten invariant ist.

In Abbildung 6 ist zunächst der Fall dargestellt, daß die Temperaturdifferenz ΔT den kritischen Wert ΔT_c unterschreitet. Das parabelförmige Potentialgebirge weist dann ein einziges Minimum auf, in dem die gedämpfte Bewegung der Kugel nach einer gewissen Zeit zur Ruhe kommt. Dieses Minimum mit einem verschwindenden Ordnungsparameter entspricht dem ungeordneten, wärmeleitenden Zustand von Abbildung 2. Nähert sich die Temperaturdifferenz ΔT dem kritischen Wert ΔT_c, so wird das Potentialgebirge um dieses Minimum ge-

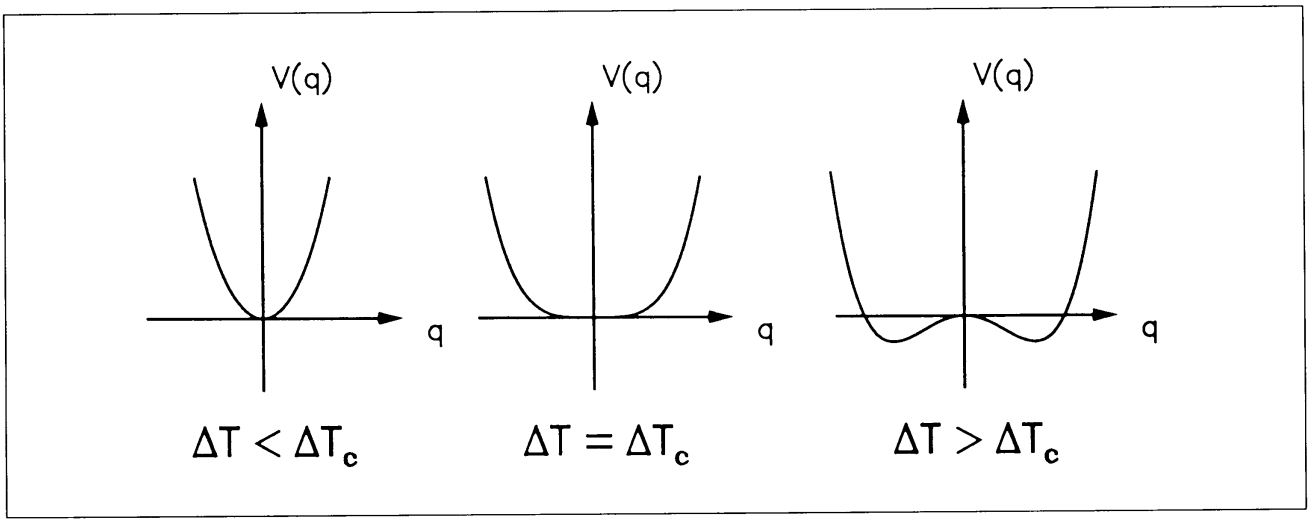


Abb. 6: Die Gestalt des Potentialgebirges für verschiedene Werte der Temperaturdifferenz ΔT

mäß der Mitte von Abbildung 6 immer flacher. Das bedeutet, daß die Kugel eine immer größere Zeit benötigt, bis sie durch eine gedämpfte Bewegung in diesem Minimum zur Ruhe kommt. Deshalb bezeichnet man das Phänomen auch als kritisches Langsamwerden. In diesen beiden Fällen von Abbildung 6 besitzt der Endzustand der Kugelbewegung, nämlich das Minimum bei verschwindendem Ordnungsparameter, dieselbe Symmetrie wie das Potentialgebirge als Ganzes. Der Endzustand wird durch eine Spiegelung an der Ordinate in sich selber überführt.

Überschreitet die Temperaturdifferenz ΔT den kritischen Wert ΔT_c, so entspricht dem nach Abbildung 6 eine grundlegende Deformation des Potentialgebirges. Die gedämpfte Bewegung der Kugel kann nun nicht mehr bei verschwindendem Ordnungsparameter zur Ruhe kommen, da sich genau an dieser Stelle ein lokales Maximum des Potentialgebirges herausgebildet hat. Statt dessen muß die Kugel im Laufe ihrer gedämpften Bewegung in einem der beiden neu entstandenen Minima zur Ruhe kommen. Da diese Minima bei einem von Null verschiedenen Wert des Ordnungsparameters auftreten, lassen sie sich mit den beiden gleichberechtigten Rollenmustern identifizieren, die nach Abbildung 5 den Modenwettbewerb bei größeren Temperaturdifferenzen gewinnen können. Die beiden möglichen Endzustände der Kugelbewegung werden nun aber gemäß Abbildung 6 nicht mehr durch eine Spiegelung an der Ordinate in sich selber überführt. Damit läßt sich zusammenfassend festhalten, daß die möglichen Endzustände der Kugelbewegung durch die Erhöhung der Temperaturdifferenz von $\Delta T < \Delta T_c$ auf $\Delta T > \Delta T_c$ diejenige Symmetrie verlieren, die dem Potentialgebirge als Ganzes innewohnt.

Das Modell des Potentialgebirges läßt sich auch auf das komplexe System des menschlichen Gehirns anwenden, um beispielsweise Symmetriebrechungen beim visuellen Wahrnehmungsprozeß zu veranschaulichen. Betrachtet man unvoreingenommen die rechte Figur in Abbildung 7, so kann man zunächst keine charakteristischen Formen erkennen. Dies liegt daran, daß die Figur in einem abstrakten Sinne hochsymmetrisch ist. Konzentriert man nämlich

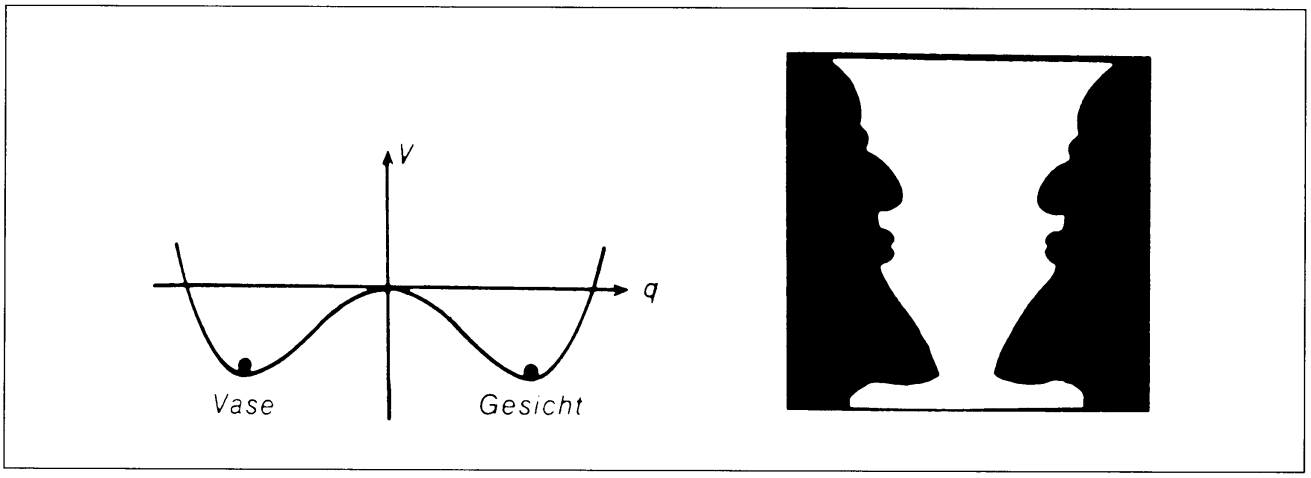


Abb. 7: Vase oder Gesicht?

die Aufmerksamkeit auf das helle Zentrum und faßt es als Vordergrund eines Bildes auf, so erkennt man plötzlich eine Vase, während man im umgekehrten Fall zwei Gesichter wahrnimmt. Dies kann man so interpretieren, daß es durch die individuelle Voreingenommenheit des Betrachters zu einer Symmetriebrechung kommt. Erst im Laufe des subjektiven Wahrnehmungsprozesses wird das an sich zweideutige Bild plötzlich eindeutig. Im Modell des Potentialgebirges läßt sich dieser Sachverhalt in einem bistabilen Potential darstellen, das in der linken Figur von Abbildung 7 wiedergegeben ist. Die Potentialminima entsprechen dabei den beiden möglichen Wahrnehmungsobjekten Vase oder Gesicht.

Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde der sogenannte bottom-up-approach der Synergetik vorgestellt, mit dem sich viele Selbstorganisationsphänomene in der Natur erfolgreich untersuchen lassen. Man geht davon aus, daß man über ein hinreichend genaues Vorwissen verfügt, wie das betrachtete System aus seinen Untersystemen aufgebaut ist und welche Wechselwirkungen zwischen diesen Untersystemen vorherrschen. Dann kann man mittels des universellen Algorithmus der Synergetik aus den vielen mikroskopischen Bewegungsgleichungen die wenigen Ordnungsparameter und deren Dynamik extrahieren, die für die spontane Entstehung makroskopischer Ordnungszustände relevant sind. Wie am Beispiele des Bénard-Experimentes ausführlich diskutiert werden konnte, ist dabei der Selbstorganisationsprozeß inhärent mit einer Änderung der Systemsymmetrie, der Symmetriebrechung verbunden.

Viele Systeme aus dem Bereich der Biologie oder der Sozialwissenschaften sind nun aber so komplex, daß man diesen bottom-up-approach noch nicht einmal ansatzweise durchführen kann. Dies liegt daran, daß man nicht in der Lage ist, die vielfältigen mikroskopischen Wechselwirkungen zu identifizieren oder zu quantifizieren. Deshalb wurde ein weiterer Zweig der Synergetik entwickelt, der die Vorgehensweise des bottom-up-approaches gewissermaßen umkehrt. Bei diesem top-down-approach analysiert man zunächst die räumlichen, zeitlichen oder auch raumzeitlichen

Ordnungszustände. In einem zweiten Schritt versucht man dann mit Hilfe von Symmetrieüberlegungen, die relevanten Ordnungsparameter zu identifizieren und deren Dynamik zu bestimmen. Die Koinzidenz von Selbstorganisation und Symmetriebrechung wird damit beim top-down-approach zur Systemanalyse und für Prognosen ausgenutzt. Weitere Einzelheiten zum top-down-approach finden sich in der Literatur, die im folgenden angegeben ist.

Literatur

Haken H.: Erfolgsgeheimnisse der Natur – Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken. Frankfurt/M., Berlin, Wien 1981.
Das erste populärwissenschaftliche Buch zur Synergetik führt auf allgemeinverständliche Weise in den neuen Denkansatz dieser jungen Theorie der Selbstorganisation ein. Anhand einer Fülle von Beispielen werden verblüffende Gemeinsamkeiten von Ordnungsstrukturen in der belebten und unbelebten Natur diskutiert.
Haken, H. und Wunderlin, A.: Die Selbststrukturierung der Materie – Synergetik in der unbelebten Welt. Braunschweig 1991.
Das Sachbuch für Naturwissenschaftler und naturwissenschaftlich vorgebildete Laien beschäftigt sich mit den Anwendungen der Synergetik in der Physik und der Chemie. Hierbei werden insbesondere solche Systeme ausführlich diskutiert, die der Synergetik aufgrund ihrer Überschaubarkeit und ihrer experimentellen Reproduzierbarkeit immer wieder als Paradigma dienen.
Haken, H. und Haken-Krell, M.: Entstehung von biologischer Information und Ordnung. In: W. Nagl und F.M. Wuketits (Hrsg.): Dimensionen der modernen Biologie. Band 3. Darmstadt 1989.
Anhand einer Vielzahl von Beispielen wird gezeigt, wie sich synergetische Konzepte erfolgreich auf biologische Systeme übertragen lassen. Dabei wird der Bogen von der biomolekularen Ebene bis zu Tierpopulationen gespannt.
Haken, H. und Haken-Krell, M.: Erfolgsgeheimnisse der Wahrnehmung – Synergetik als Schlüssel zum Gehirn. Stuttgart 1992.
Der Ansatz, das Gehirn als ein sich selbst organisierendes System aufzufassen, führt die Autoren zu einem neuartigen Verständnis von Gehirnfunktionen, die bei der menschlichen Wahrnehmung auftreten. Diese Erkenntnisse setzen sie dann in die Architektur eines neuen Computers um, der auf synergetischen Konzepten basierend so komplexe Funktionen wie die Mustererkennung ausüben soll.
Haken, H.: Synergetik, eine Einführung – Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie. Berlin/Heidelberg/New York/London/Paris/Tokyo ^{3}1990.
In dieser Monographie werden die Prinzipien und die Arbeitsmethoden der Synergetik dargelegt. Im Mittelpunkt steht eine präzise mathematische Formulierung der beiden notwendigen Voraussetzungen für Selbstorganisation, nämlich Zufall und Notwendigkeit.