

Prozess und Struktur

Probleme der Selbstorganisation im Bereich der unbelebten Natur

H. Joachim Schlichting Universität GH Essen

*Das Sein muss sich in einer Form verfangen,
eine Zeitlang in ihr erscheinen, hier oder dort, so oder so.
Jedes Ding ist, solange es dauert, zu seiner Form verurteilt,
dazu, so zu sein, wie es ist, nicht mehr anders sein zu können.*

Luigi Pirandello

*...dass trotz der Flüssigkeit in der Substanz
eine Solidität in der Form erreicht wird.*

Italo Calvino

Neue Blicke durch die alten Löcher

Der Gegenstandsbereich der klassischen Physik wird durch Vorgänge und Strukturen beherrscht, die als reversibel und im thermodynamischen Gleichgewicht befindlich angesehen werden können. Ein typischer Vorgang ist eine harmonische Schwingung, eine typische Struktur ist ein Kristall. Starrheit, Unveränderlichkeit, "Zeitlosigkeit" sind Kennzeichen der klassischen Betrachtung.

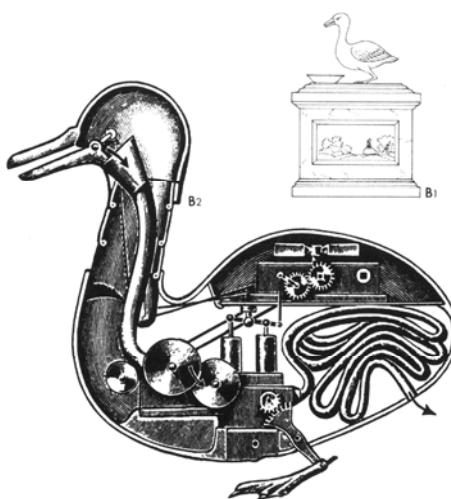


Bild 1: Die berühmte Ente von Jacques de Vaucanson. Mit dem aus über 1000 Teilen bestehenden Mechanismus wurde versucht, das Verhalten der mechanischen Ente dem einer lebenden möglichst naturgetreu nachzubilden.

Zwar ändert sich ein Pendel oder ein geworfener Ball insofern in der Zeit, als seine Amplitude oder Position verschiedene Werte durchläuft. Die Un-

veränderlichkeit besteht darin, dass der Ablauf von vornherein in Form eines mathematischen Ausdrucks, also beispielsweise der Sinusfunktion bekannt ist. Die Zeit spielt dabei lediglich die Rolle eines Parameters. Indem die Dynamik eines Systems in Form einer Bewegungsgleichung erfasst wird, ist seine Entwicklung vollständig in seinem gegenwärtigen Zustand (Anfangsbedingungen) enthalten: "Die Herrschaft über den Augenblick ist die Herrschaft über das Leben." Dieser Ausspruch Marie von Ebner- Eschenbach kann als Credo der klassischen Physik angesehen werden. Die Zeitlosigkeit des Verhaltens klassischer Systeme kommt insbesondere darin zum Ausdruck, dass trotz des Fortschreitens in der Zeit nichts Neues entsteht, das ewig Alte bestehen bleibt oder sich periodisch wiederholt.

Produkt und Metapher der klassischen Physik ist die Maschine. Als Produkt bestimmen Maschinen nicht nur die wissenschaftliche Forschung, sondern in Form der wissenschaftlichen Technik auch weitgehend unseren Alltag. Insofern ist die heutige Welt durch die klassische Physik geprägt. Als Metapher ist die Maschine als Grundlage des klassischen Weltbildes anzusehen. Planetensysteme funktionieren demnach wie Uhrwerke, Naturereignisse, beispielsweise Sonnenfinsternisse, sind in diesem Rahmen auf lange Zeit vorhersagbar. Es hat immer wieder Versuche gegeben, auch die Welt des Lebendigen durch ausgeklügelte Nachbildungen von Lebewesen wissenschaftlich zu erfassen. Was dabei herauskam, kann allenfalls als Karikatur einer Praxis angesehen werden, in der das Wesen

der Lebenserscheinungen auf das Abspulen mechanischer Vorgänge reduziert wird (Bild 1)¹.

Ist dieses nicht ein Gleis, aus welchem wir erst heraus müssen? (Georg Christoph Lichtenberg)

Nicht zuletzt aufgrund der Erfolglosigkeit der herkömmlichen wissenschaftlichen Technik im Bereich der Gestaltung unseres Lebensraumes hat sich die physikalische Perspektive verschoben. Dadurch geraten bislang ignorierte oder zumindest vernachlässigte Phänomene in den Blick, die die Evolution, Strukturierung, Stabilisierung kurz: die Selbstorganisation von Systemen betreffen.

Mit einem vielzitierten Schlagwort Prigogines zu sprechen, hat sich das Interesse vom Sein zum Werden der Systeme verlagert. Damit ist insbesondere der Anspruch verknüpft, typische Merkmale lebender Systeme in den Blick zu bekommen.

Auf diese Weise wird die empirische Basis der Physik und Naturwissenschaften bis in Bereiche hinein erweitert, die aus klassischer Sicht eher der Philosophie und den Humanwissenschaften zuzurechnen sind. Die Grenze zwischen belebter und unbelebter Natur, der Welt des Geistes und der Materie wird durchlässig: Ideen, wie sie beispielsweise in der Naturphilosophie im Rahmen einer fundamentalen Kritik an der klassischen Physik und alternativer Beschreibungen entwickelt wurden, erweisen sich als äußerst fruchtbar bei der physikalischen Erfassung von Phänomenen der Selbstorganisation².

¹ Schon Leibniz bemerkte, daß ein prinzipieller Unterschied zwischen einer Maschine und einem Lebewesen besteht. Er versucht, diesen Unterschied in dem Bild der Maschinen- Maschinen zu fassen. Auch wenn seine Diktion dem Geiste des mechanistischen Denkens verhaftet ist, lassen sich unschwer Ideen ausmachen, die im Rahmen der Physik der Selbstorganisation wieder aktuelle werden: *Daher ist jeder organische Körper...eine Art von göttlicher Maschine oder natürlichem Automaten der alle künstlichen Automaten unendlich übertrifft. Eine durch menschliche Kunst verfertigte Maschine ist nämlich nicht in jedem ihrer Teile Maschine. So hat zum Beispiel der Zahn eines Messingrades Teile oder Bruchteile, die für uns nichts Künstliches mehr sind und die nichts mehr an sich haben, was in Bezug auf den Gebrauch, zu dem das Rad bestimmt war etwas Maschinenartiges verrät. Aber die Maschinen der Natur, d.h. die lebendigsten Körper, sind noch Maschinen in ihren kleinsten Teilen bis ins Unendliche. Das ist der Unterschied zwischen der Natur und der Technik, d.h. zwischen der Natur und der Technik, d.h. zwischen der göttlichen Kunstfertigkeit und der unsrigen [1].*

² Allgemein kann daher von einer "Konvergenz von Philosophie und Empirie" gesprochen werden, die sich vor allem darin äußert, daß die in das Studium der Grundlagenforschung eingetretenen Naturwissenschaften damit

Die nichtlineare Physik erfordert zwar "neue Blicke", also eine neue Art die Dinge zu sehen. Weil wir dabei jedoch auf die "alten Löcher" angewiesen sind und wir nicht von einem anspruchsvoller Sehvermögen ausgehen können, betrachten wir im folgenden sehr einfache, auch experimentell leicht zugängliche Modellsysteme. Sie sind allerdings auf eine andere Art (neue Blicke!) einfach, als man es aus klassischer Sicht gewohnt ist. Indem wir anschließend anhand dieser Systeme die wesentlichen Aspekte der Selbstorganisation diskutieren, entwickeln wir gleichzeitig einige der grundlegenden Konzepte der nichtlinearen Physik. Dabei bemühen wir uns, u.a. durch weitgehenden Verzicht auf mathematische Beschreibungen, ein qualitatives Verständnis für das dynamische Verhalten der Systeme anzubauen und auf diese Weise in die neue physikalische Sehweise einzuführen.

Einfache Phänomene der Selbstorganisation

Bénardkonvektion

Der Blick auf den morgendlichen Milchkaffee offenbart dem aufmerksamen Beobachter zuweilen interessante Oberflächenstrukturen (Bild 2). Diese zellenartigen Muster lassen insofern tief blicken, als sie die sichtbare Spur einer ganzen Klasse von Vorgängen in der Natur darstellen, die unter dem Begriff der Bénardkonvektion subsummiert werden.

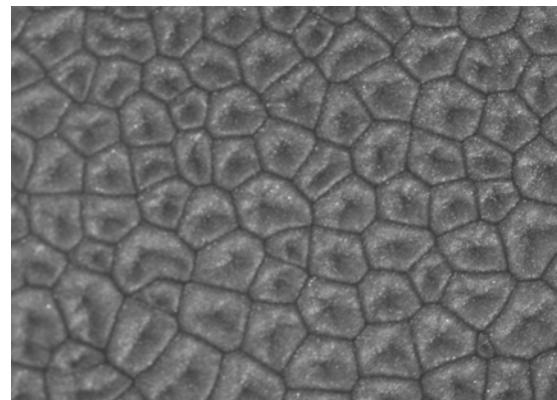


Bild 2: Zellenartige Muster offenbaren die innere Dynamik einer dissipativen Struktur.

Was passiert in der Tasse? Der Milchkaffee kühlt sich an der Oberfläche ab. Dadurch nimmt dort die Dichte der Flüssigkeitsschicht zu mit der Folge, dass sie absinkt und wärmerer Flüssigkeit erlaubt aufzusteigen. An der Oberfläche angekommen, ver-

beginnen, uralte philosophische Fragen mit empirischen Methoden zu behandeln und für die Deutung der relevanten Phänomene empirisch nachprüfbare Hypothesen zu entwickeln [2].

liert diese ihrerseits einen Teil der Wärme, sinkt ab und so weiter. Es stellt sich eine Konvektionsbewegung ein. Die Konvektion wird jedoch nicht durch einen einzigen Wirbel realisiert, sondern durch eine ganze Klasse kleinerer Wirbel, deren Größe und Anordnung durch die Eigenschaften der Flüssigkeit und der Form des Gefäßes (Randbedingungen) bestimmt wird. Die im Idealfall bienenwabenförmigen, in der Realität aber mehr oder weniger stark davon abweichenden Zellen auf der Oberfläche sind dabei nichts anderes als Milchteilchen, die den in der Mitte einer jeden Zelle aufsteigenden und am Rande der Zelle absinkenden Flüssigkeitsstrom sichtbar machen (Bild 3).

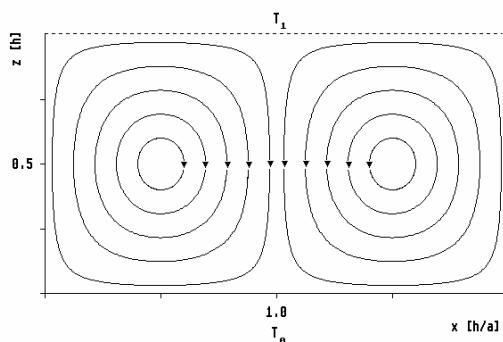


Bild 3: Mit Hilfe einer Computersimulation gewonnener Schnitt durch eine Bénardzelle. In der Mitte steigt die Flüssigkeit auf, an den Grenzen zu den Nachbarzellen sinkt die Flüssigkeit wieder hinab.

Eine der wichtigsten Erscheinungen in der Natur, die durch derartige Bénardkonvektionen dominiert wird, ist das Wettergeschehen. Hier sind es - direkt oder indirekt von der Sonne erwärmte und infolgedessen aufsteigende Luftmassen, die durch kühлere Luft ersetzt werden. Sie kühlen sich in den kälteren höheren Schichten der Atmosphäre ab, sinken wieder und bilden auf diese Weise einen Kreislauf. Sichtbar werden die Konvektionsbewegungen zuweilen durch charakteristische Wolkenformationen, die dadurch entstehen, dass mit dem aufsteigenden Luftstrom Wasserdampf transportiert wird, der am oberen Umkehrpunkt der Wolken auskondensiert und in Form von Wolken zurückbleibt. Diese bilden dann je nach den herrschenden Windbedingungen ganze Wolkenstraßen (Bild 4) oder charakteristische Polygone. In Wüstengebieten können derartige Konvektionswirbel so mächtig sein, dass sie auch am unteren Umkehrpunkt Spuren im Sand hinterlassen und zwar in Form von langen parallelen oder auch polygonartigen Sanddünen (Bild 5).

Um die Vorgänge in der rotierenden Flüssigkeit etwas genauer zu betrachten und insbesondere die für die Entstehung der Wirbel entscheidende Temperaturdifferenz zwischen oben und unten kontrolliert verändern zu können, erwärmen wir auf einer elektrischen Herdplatte in einer flachen Schale eine

dünne Silikonölschicht, die wir zur Sichtbarmachung der Dynamik vorher mit etwas Aluminiumpulver versetzt haben.

Betreibt man die Herdplatte zunächst bei geringer Leistung, so bleibt die Flüssigkeitsschicht in Ruhe. Der Wärmeaustausch zwischen unten und oben erfolgt durch Wärmeleitung. Erst wenn die Leistung und damit die Temperaturdifferenz einen kritischen Wert überschreitet, setzt plötzlich das Konvektionsgeschehen ein und findet sich nach einiger Zeit in einen stationären Gleichgewichtszustand ein, der durch ein weitgehend gleichbleibendes Zellenmuster zum Ausdruck kommt. Dieses Muster ist umso stabiler und bleibt umso länger erhalten, je mehr es gelingt, konstante Versuchsbedingungen einzuhalten.

Erhöht man die Leistung der Heizplatte weiter, so tritt plötzlich wiederum bei einer bestimmten Temperaturdifferenz eine drastische Verhaltensänderung ein: Das Konvektionsgeschehen gestaltet sich äußerst turbulent. Es kommt nicht mehr zur Ausbildung langlebiger Konvektionszellen, sondern zu einem irregulären Geschehen. Diesen Bereich des Bénardsystems nennt man daher chaotisch.

Die Entdeckung eines solchen chaotischen Verhaltens im Bereich des Wettergeschehens durch den Meteorologen Edward Lorenz im Jahre 1963 spielte übrigens bei der Initialisierung der Chaosforschung eine wesentliche Rolle. Man erkannte, dass sich ein durch Differentialgleichungen eindeutig beschriebenes und damit deterministisches System in der Praxis unvorhersagbar verhalten kann.

Solche Konvektionserscheinungen sind natürlich seit langem bekannt. Während man sie aber bislang als Wärmetransportvorgang ansah, richtet man das Augenmerk nunmehr auf das rotierende Fluid, das unter Ausnutzung von thermischer Energie ein eigenständiges hoch koordiniertes Verhalten an den Tag legt. Diesen Perspektivenwechsel zu erkennen, ist wesentlich für das Verständnis der Selbstorganisation.

Strukturen im Sand

Jeder Staub kann ein organisches Wesen sein
G. Chr. Lichtenberg

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass durch konvektionsbedingte Winde in Wüsten Dünenstrukturen entstehen können. Schaut man sich diese Dünen genauer an, so entdeckt man über mehrere Größenordnungen hinweg Substrukturen, von denen die kleinsten als Sandrippel bekannt sind (Bild 6). Ähnliche Rippel lassen sich auch auf dem Grund

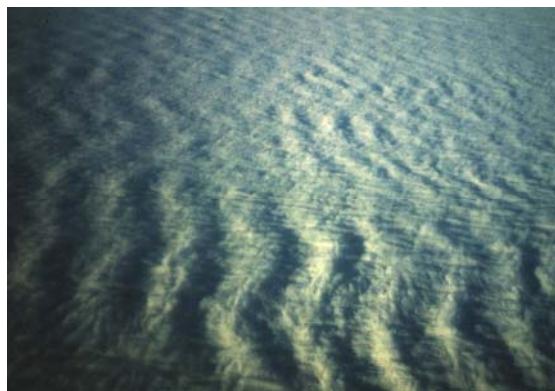


Bild 4: Wolkenstraßen, wie sie aufgrund aufsteigender warmer und absinkender kalter Luft entstehen können.



Bild 5: In Wüstengebieten entstehen durch den vom Wind transportierten Sand ausgedehnte Strukturen.



Bild 6: Die Oberflächen von Sanddünen sind von Rippeln strukturiert.



Bild 7: Auf dem Grund von Gewässern können ripplartige Sandstrukturen entstehen.

bewegter Gewässer entdecken (Bild 7). Die Rippelmuster sind gewissermaßen die toten Zeugen von dynamischen Prozessen, in denen von Wind oder Wasser bewegte Sandkörner ein kollektives und strukturiertes Verhalten zeigten. Wie im Falle der Bénardkonvektion, bei der thermische Energie zur Bildung subtiler dynamischer Vorgänge und Muster ausgenutzt wird, bringt hier die Bewegungsenergie des Windes in vergleichbar kreativer Weise Strukturen hervor.

Benutzt man statt des Sandes ein feineres, staubförmiges Granulat von geringerer Dichte, z.B. Bär-lappasamen, so reicht ein handelsüblicher Lautsprecher mit einer schwingungsfähig montierten Platte als Vibrator aus, derartige Strukturbildungsvorgänge unter kontrollierten Bedingungen hervorzurufen. Dazu streut man etwas Granulat auf die Platte und bringt sie bei geeigneter Frequenz in Schwingung.

Betreibt man den Vibrator zunächst bei kleiner Amplitude, so beobachtet man erwartungsgemäß, dass kleine Haufen zugunsten einer Gleichverteilung des Granulats auf der Platte auseinanderlaufen. Durch die Schwingungen wird die Hafteinwirkungskraft, die die Teilchen zusammenhält, periodisch vermindert, so dass sie unter dem Einfluss der Schwerkraft die Böschung des jeweiligen Haufens hinabrollen können.

Erhöht man allmählich die Amplitude der Schwingung, so beobachtet man bei einem bestimmten kritischen Wert ein völlig neues Phänomen, man möchte sagen, genau das Gegenteil dessen, was bisher passierte: Plötzlich zieht sich die weitgehend gleichmäßige Granulatschicht zu einzelnen auffällig regelmäßigen, in ihrer Größe und ihrem Ort auf der Platte aber statistisch verteilten linsenförmigen Häufchen zusammen. Da die Platte nicht nur als ganzes schwingt, sondern auch in sich, sind die einzelnen Häufchen in der Regel einer Driftbewegung zu den Schwingungsknoten der Platte ausgesetzt. Dieser Einfluss ist allerdings umso geringer, je größer die Haufen und je näher sie dem Zentrum der Platte sind.

Bei genauer Betrachtung, zeigt ein solcher Haufen außer der Bewegung als ganzes eine wohlkoordinierte innere Dynamik: Die Ränder böschen sich unter ständiger Umwälzung auf und geben ihm das Aussehen eines kleinen Tafelberges. Die Tendenz zur Aufbösichung der Ränder nimmt zunächst mit zunehmender Amplitude zu, bis sie bei einer bestimmten kritischen Amplitude als ganzes wohlkoordinierte ondulierende Bewegungen zeigen. Das globale Bewegungsmuster erinnert an die oben beschriebenen Bénardschen Konvektionszellen und zeigt bei näherem Hinsehen (z.B. mit einer Lupe) auch dieselbe Dynamik (Bild 8).

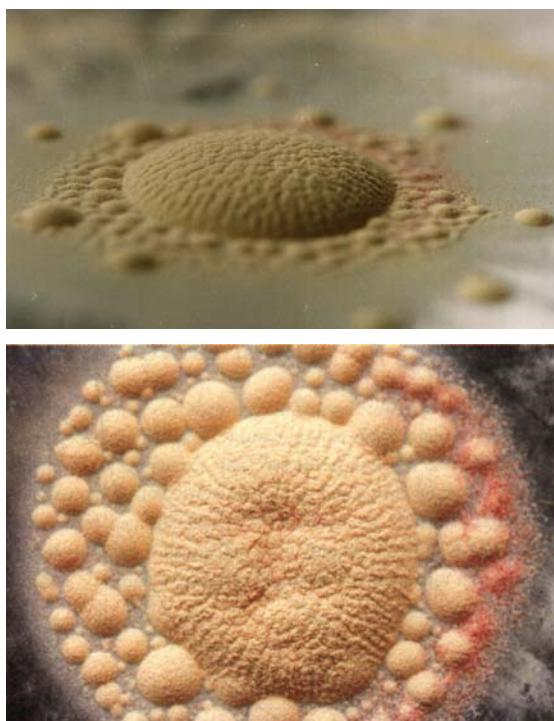


Bild 8: Schräg von der Seite (oben) und von oben (unten) fotografierte Strukturen von Bärlappsporen. Deutlich zu erkennen die gerippte Oberfläche der Häufchen.

Es erscheint einleuchtend, dass die Bewegung der vibrierenden Platte den unteren Schichten der Staubhäufchen stärker mitgeteilt wird als den oberen Schichten. Die stärker bewegten Teilchen brechen an bestimmten Stellen durch die oberen Schichten durch. Aus Kontinuitätsgründen "fallen" in gleichem Maße schwerkraftsbedingt weniger bewegte und daher energieärmere Teilchen in die entstehenden Lücken, so dass es insgesamt zu einer konvektiven Umwälzung des Granulats kommt.

Bei sehr großer Amplitude gehen die Konvektionen in den Haufen - wiederum in Analogie zur Bénardkonvektion - in einer Flüssigkeit plötzlich in eine irreguläre Bewegung über: Die in einem zellulären Muster angeordneten Konvektionen des Haufens geraten in Turbulenz. Dabei kommt es gelegentlich

zu regelrechten Eruptionen, bei denen Granulatjets aus dem Haufen herausgeschossen werden [3].

Die Flamme einer Kerze

Zwischen Sein und Nicht- Sein gespannte Feuerbrücke

Roger Asselinea

Führt man dem wachsgetränkten Docht einer Kerze thermische Energie bei relativ niedriger Temperatur zu, so erreicht man allenfalls, dass das Wachs weich wird und schmilzt. Erhöht man die Temperatur, so erreicht man einen kritischen Punkt, die Entzündungstemperatur. Jetzt passiert etwas ganz Neues. Die Kerze beginnt zu brennen und ruft in Gestalt einer Flamme ein System ins Leben, das sich ähnlich wie ein Lebewesen durch einen veritablen Stoffwechsel unterhält: Die Kerze "atmet" Sauerstoff ein und Kohlenstoffdioxid aus. Gleichzeitig nimmt sie "Nahrung" in Form von Wachs zu sich und gibt Abbauprodukte in Form von Wasser und Gasen an die Umgebung ab. Interessant ist dabei, dass die Flamme diesen ihren "Lebensprozess" so steuert, dass sie normalerweise eine gleichbleibende Gestalt, die typische Gestalt einer Flamme aufrechterhält (Bild 9).

Die Flamme erscheint als kohärentes Gebilde, das keinen Veränderungen unterliegt. Daher wird eine Flamme manchmal mit einer Pflanze verglichen: Der Stengel der Flamme ist so gerade, so zart, dass die Flamme eine Blume ist. (Gaston Bachelard). Und doch ist sie permanenten Veränderungen unterworfen. Man möchte sagen, sie ist ganz Veränderung. Indem die Flamme von einem ständigen Stoff- und Energiestrom durchsetzt wird, leuchten in jedem Augenblick neue Luftteilchen in jeweils derselben Farbe, wie ihre Vorgänger es taten. Aufgrund einer äußerst subtilen inneren Dynamik vermag die Flamme diesen stationären Zustand einzuhalten.



Bild 9: Die Naturgeschichte einer Kerze von Michael Faraday könnte um ein Kapitel über die Selbstorganisation der Kerzenflamme ergänzt werden. Rechts: "Flammenzungen", wie sie beispielsweise entstehen, wenn das Energie- Luft- Verhältnis nicht stimmt.

regeln und auch - in Grenzen - gegen äußere Störungen zu stabilisieren.

Ähnlich wie bei den Sand- und Wasserstrukturen nimmt auch die "Luftstruktur" der Flamme ein irreguläres Verhalten an, wenn die Energiezufuhr einen kritischen Wert überschreitet. Erhöht man bei einem Gasbrenner die Gaszufuhr und verhindert eine entsprechende Luftzufuhr, so verbrennt bei relativ kleiner Flamme eine größere Gasmenge auf kleinem Raum. Die Flamme rauscht und bringt durch dieses Geräusch den schnellen irregulären Wechsel zwischen Aufbau und Abbau einzelner Flammenzungen zum Ausdruck, durch den das Umfeld nach Sauerstoff abgetastet wird. Vermutlich spielt die räumlich und zeitlich aufgefächerte, fraktale Struktur der Flamme bei der Sauerstoffbeschaffung eine wichtige Rolle³.

Die Flamme einer Kerze ist vor allem im Bereich der Poesie wiederholt als Metapher für das Leben angesehen worden [4]. Die Beziehungen zwischen Flamme und Lebensvorgängen sind, wie bereits oben angedeutet, aus der Sicht der Selbstorganisation sehr viel tieferliegender.2

Dissipative Strukturen

*Les choses en particulier se corrompent
et se changent a chaque instant:
il ne les voit qu' en passant.*

Blaise Pascal

So verschieden die drei skizzierten Systeme sowohl aufgrund der äußeren Erscheinung als auch im Hinblick auf das stoffliche Substrat auch sein mögen, aus der Sicht der Physik der Selbstorganisation bestehen zahlreiche Gemeinsamkeiten. Anhand dieser Gemeinsamkeiten lassen sich einige wesentliche Merkmale sich selbst organisierender Systeme erkennen.

"Dauer im Wechsel"

Mit diesem Wort aus einem Gedicht Goethes wird der folgende Sachverhalt auf poetische Weise auf den Punkt gebracht: Der - in gewissen Grenzen - dauerhaften Struktur der oben beschriebenen Systeme entspricht eine energetische und - im Falle der Flamme - stoffliche Konstanz des jeweiligen Systems. Anders als bei Systemen im thermischen Gleichgewicht, z.B. einem auf dem Boden liegenden Stein, bei denen Energie und Stoff ebenfalls konstant sind, laufen in dynamischen Systemen ständig mit Energiedissipation und Stoffumsätzen

³ Übrigens wird am Beispiel der Kerzenflamme außerdem deutlich, inwiefern die physikalische Beschreibung selbst Altbekanntes zu einer neuen Realität werden lässt, indem sie aus vertrauter – physikalischer – Perspektive in nie erlebter Weise sichtbar macht.

verbundene Vorgänge ab, was rein äußerlich durch die Abgabe von Wärme und verbrauchten Stoffen an die Umgebung zum Ausdruck kommt. Daher müssen diese Systeme ständig in gleichem Maße mit hochwertiger Energie und Stoffen versorgt werden, um diese Verluste zu kompensieren. Bei der Bénardkonvektion geschieht das durch Aufnahme von thermischer Energie bei relativ hoher Temperatur. Der vibrierende Sand nimmt hochwertige mechanische Energie und die Kerzenflamme hochwertige chemische Energie auf.

Dass die energetische und stoffliche Entsorgung für die Aufrechterhaltung der Systemstruktur genauso wichtig ist, lässt sich etwa am Beispiel der Kerze recht eindrucksvoll dadurch demonstrieren, dass man die Abgabe der Verbrennungsrückstände verhindert. Die Flamme erstickt, und das System fällt ins thermische Gleichgewicht zurück.

Da die Energie eines dynamischen Systems in etwa unverändert bleibt, besteht die einzige Veränderung in der Dissipation bzw. Entwertung von Energie. Es liegt daher nahe - so paradox es klingen mag - in der Energiedissipation eine Art Antrieb des Systems zu sehen [5]. Aus diesem Grund nennt man solche Systeme nach Prigogine auch dissipative Strukturen [6].⁴

Die Bedeutung des Prozesshaften kommt darin zum Ausdruck, dass dissipative Strukturen nicht erschaffen werden, um zu dauern. Sie dauern so lange, wie sie erschaffen werden. Sie erschaffen sich selbst.

Strukturbildung

Jede von der Bewegung geschaffene Gestalt erhält sich mit der Bewegung.
Leonardo da Vinci

Solange der von einem bestimmten Stoff aufgenommene Energiestrom unterhalb einer bestimmten Schwelle bleibt, kommt es allenfalls zu einer unkoordinierten Anregung der einzelnen Teilchen:

- Sandkörner werden in Bewegung versetzt und einer Gleichverteilung nähergebracht.
- Die Teilchen eines von unten erwärmten Fluids behalten ihre mittlere Position bei, weil die durch die Erwärmung bedingte Auftriebskraft nicht ausreicht, die zwischen den Teilchen wirkende innere

⁴ An dieser Stelle erkennt man auf eindrucksvolle Weise die konstruktive Rolle der Dissipation. Die Dissipation, die Reibung, die Tendenz zum Ausgleich von Intensitäten, bzw. das Bestreben sich selbst überlassener Systeme, ins thermische Gleichgewicht überzugehen, erweist sich als konstitutiv für die Entstehung und Aufrechterhaltung einer dissipativen Struktur.

Reibung zu überwinden. Die Energie wird durch Wärmeleitung zur Oberfläche des Fluids transportiert und dort an die Umgebung abgegeben.

- Der erwärmte Docht einer Kerze bleibt bis auf ein eventuelles Schmelzen des Wachses unverändert, weil die Temperatur nicht ausreicht, die chemische Reaktion der Verbrennung einzuleiten.

Sobald der Energiestrom einen bestimmten kritischen Wert erreicht, gelangt das System in einen Zustand, in dem es über alle Grenzen zu wachsen vermag, in dem - mathematisch gesprochen - in endlicher Zeit unendliche Zustandsgrößen auftreten. In dieser Situation sind die Mikroteilchen des Systems in die Lage, ihre Verhaltensmöglichkeiten abzutasten und dementsprechend in einem selbstverstärkenden Akt durch Fluktuationen bedingte zufällige Kooperationen zwischen einzelnen Teilchen über alle Grenzen hinaus wachsen zu lassen und schließlich das ganze Agglomerat zu erfassen. Wie auf ein Kommando geht aus dem mikroskopischen Chaos der zunächst individuell agierenden Teilchen ein kohärentes Ganzes hervor: Eine dissipative Struktur grenzt sich aus dem strukturlosen Einerlei des thermischen Gleichgewichts aus. Die Symmetrie wird gebrochen.

Der den Fluktuationen anhaftende Zufall entscheidet wie bei einem auf dem Kopf stehenden Pendel, ob im Falle der Bénardkonvektion an einer bestimmten Stelle in der Flüssigkeit ein links- oder rechtsdrehender Wirbel, oder ob in der vibrierenden Sandschicht an dieser oder einer anderen Stelle ein dynamischer Haufen entsteht und welche individuelle Größe er annimmt. Der Zufall wird in dem sich schließlich einstellenden Bewegungsmuster gewissermaßen konserviert. Er kann daher als das kreative, von vornherein nicht bestimmbare Element der Strukturbildung angesehen werden.

Die Entstehung von Ordnung aus Fluktuationen ist nach Prigogine [6] die Antwort auf die Frage, wie Neues entsteht, wie den allgemeinen Verhaltensweisen dynamischer Systeme individuelle Merkmale aufgeprägt werden können.

An dieser Stelle wird zum einen erkennbar, dass vom deterministischen Grundsatz

einer strengen Vorhersagbarkeit der Entwicklung eines Systems Abstand genommen werden muss. Obwohl das globale Verhalten einer dissipativen Struktur, beispielsweise ihre Gestalt, vorhersagbar ist, bleibt das lokale Verhalten, beispielsweise die individuelle Realisierung der Gestalt, der Vorhersagbarkeit entzogen. Man kann zwar sagen, dass vibrierender Sand nicht die Form von Kerzenflammen annimmt, sondern typische linsenartige Haufen hervorbringen wird. Wo und in welcher Größe diese Haufen erscheinen, bleibt unserer Vorhersage

jedoch prinzipiell entzogen. Das ist ganz ähnlich wie bei einer Eichel. Setzt man diese dem Erdreich und der Sonnenenergie aus, so kann zwar vorhergesagt werden, dass daraus eine Eiche und keine Buche entsteht. Über das individuelle Aussehen der Eiche kann man indessen keine Vorhersage treffen.

Die Information, die über die jeweilige Spezies der dissipativen Struktur entscheidet, ist gewissermaßen der jeweiligen Stoffart und der Art der Wechselwirkungen zwischen den Teilchen einbeschrieben. Sie bestimmt mit den eingangs zitierten Wörtern Luigi Pirandellos, in welcher Form sich das Fluid, der Sand oder die Kerzenflamme verfängt⁵.

Ordnungsparameterkonzept

Von Bedeutung ist darüber hinaus, dass das hochdimensionale Vielteilchensystem aufgrund phasenübergangsähnlicher Mechanismen aus der enormen Vielfalt möglicher Verhaltensweisen eine Struktur herauszuschälen vermag, die auf wenige Freiheitsgrade beschränkt ist [7]. Die relativ einfache Gestalt der dissipativen Systeme wird durch Mechanismen aufrechterhalten, die ihrerseits durch das kollektive, gleichartige Verhalten einer Vielzahl von Teilchen bestimmt ist. So gesehen ähneln die dissipativen Strukturen mechanischen Systemen, bei denen das kollektive Verhalten der Teilchen durch eine starre Verbindung vermittelt wird. Tatsächlich lässt sich zu manchen dissipativen Strukturen ein reales mechanisches Modellsystem finden, das sich global gesehen ganz ähnlich verhält. Die wesentlichen Phänomene der Bénardkonvektion werden beispielsweise von einem drehbar gelagerten Rad hervorgebracht, das mit Wasserbehältern versehen ist und durch einen Wasserzufluss von oben angetrieben werden kann. Dabei lässt sich die Winkelgeschwindigkeit als Gestalt- oder Ordnungsparameter auffassen, der in Abhängigkeit von einem Kontrollparameter, etwa der Zuflussrate des Wassers, gewissermaßen die jeweilige Ordnung des Systems erfasst. Mathematisch wird das Verhalten

⁵ Diese noch sehr globale Beschreibung erfasst einen, meines Wissens noch nicht hinreichend konzeptualisierten Aspekt der Evolution, der von Freeman Dyson im Bereich der Strukturbildung im Kosmos mit "hangups" bezeichnet wird. Beispielsweise sorgt ein hangup der Rotation dafür, daß sich unter dem Einfluß der Schwerkraft aufeinander zu bewegende Himmelskörper bei einem nichtzentralen Rendezvous nicht ineinander stürzen, sondern sich eine Zeit lang etwa in Form eines Doppelstern- oder Planetensystems gegenseitig umrunden, um sich schließlich gegebenenfalls in weiteren Strukturen zu verfangen. Auch aus der Lebenswelt ist uns diese spontane Strukturbildung geläufig: Ein Hund rennt mit der Leine los und verfängt sich schließlich in einer Gestrüpp. Beim Reparieren einer Angel verfängt sich die Angelschnur unentwirrbar in sich selbst.

des Wasserrades und der Bénardkonvektion gleichermaßen durch drei gekoppelte nichtlineare Differentialgleichungen, den sogenannten Lorenzgleichungen beschrieben [8].

Selbstorganisation durch Nichtlinearität

Wie schafft es das System, seine Struktur, die sich in der Gestalt der Konvektionswirbel, der Sandhaufen oder der Flamme manifestiert, gegen stets vorhandene äußere Störungen zu stabilisieren?

Zur Beantwortung dieser Frage betrachten wir die konkreten Mechanismen bei der Bénardkonvektion und bei der Haufenbildung im Sand.

Bénardkonvektion

Wenn der Auftrieb stärker wird als die innere Reibung, beginnen erwärme Wasserportionen aufzusteigen. Je nachdem ob aufgrund von zufälligen Fluktuationen kältere Wasserportionen mehr von links oder rechts oben nachströmen, werden links- oder rechtsdrehende Konvektionswirbel in Gang gesetzt. Da die thermische Energie proportional ist zur Wassermenge, in der sie enthalten ist, und der mit den Rotationswirbeln verbundene Wasserstrom proportional zur Rotationsgeschwindigkeit ist, besteht auch eine Proportionalität zwischen dem die Rotation antreibenden Energiestrom (Antrieb) und der Rotationsgeschwindigkeit. Geht man davon aus, dass die innere Reibung quadratisch mit der Geschwindigkeit variiert, so wächst der Energiestrom, der durch Dissipation verloren geht (Dämpfung), mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit (Bild 10).

Dieser nichtlineare Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Dämpfung ist von entscheiden-

der Bedeutung. Er macht es möglich, dass sich der die Rotation antreibende und die Rotation dämpfende Energiestrom gegenseitig begrenzen können: Bei kleinen Geschwindigkeiten wächst zunächst der Antrieb "schneller" als die Dämpfung. Da die Dämpfung jedoch überproportional mit der Geschwindigkeit zunimmt, holt sie rapide auf, bis sie bei einem bestimmten Wert der Geschwindigkeit v_s den Antrieb übertrifft und infolgedessen eine Abnahme der Geschwindigkeit bewirkt. Dadurch wird der Wert v_s unterschritten, was wiederum eine Geschwindigkeitszunahme zur Folge hat usw. Es kommt zu einer zyklischen Einregelung der stationären Geschwindigkeit v_s . Auf diese Weise können - in gewissen Grenzen - Störungen, die die Rotationsgeschwindigkeit verändern, abgebaut und dem System eine dynamische Stabilität verliehen werden, die es zum Überleben in einer durch zufällige Schwankungen bestimmten Umwelt benötigt.

Haufenbildung

Aufgrund der Vibration des Untergrundes werden die Sandkörner veranlasst, Bewegungen auszuführen, deren Dynamik derjenigen eines schiefen Wurfs entspricht.

Dabei hängt die jeweilige Flugbahn von den konkreten Startbedingungen der einzelnen Körner ab. Die Bahn eines Sandkorns wird umso flacher und schräger ausfallen, je dicker die Sandschicht, also je weicher der Untergrund ist, von dem es startet oder reflektiert wird. Der Energieverlust und die Wahrscheinlichkeit, zur Seite abgelenkt zu werden, nehmen nämlich mit der Zahl der Teilchen zu, mit denen das jeweilige Sandkorn wechselwirkt. Dieser einfache Sachverhalt hat zur Konsequenz, dass dort, wo schon viele Sandkörner sind, sich noch mehr einfinden werden. Eine durch zufällige Fluktuationen gebildete Ansammlung von mehreren Sandkörnern verstärkt sich folglich von selbst: Die Wahrscheinlichkeit, dass von außen in eine solche Ansammlung hineinspringende Sandkörner darin steckenbleiben, ist größer als, dass Sandkörner die Ansammlung verlassen. Auf diese Weise kommt es zu einer Aufböschung von Sandkörnern und der Bildung von kreisrunden, linsenförmigen Haufen.

Mit wachsender Energiezufuhr nehmen die Aufböschungstendenz der Teilchen und damit die Haufenhöhe auf Kosten des Haufenradius zu. Gleichzeitig wächst aber auch die schwerkraftsbedingte Tendenz der Haufen, auseinanderzulaufen und dabei die mit der Aufböschung zunehmende potentielle Energie zu dissipieren.

Vergleicht man diese Strukturbildung mit der Bénardkonvektion, so entspricht die Aufböschung dem Antrieb und die der Aufböschung entgegenwirkende mit Energiedissipation verbundene Ten-

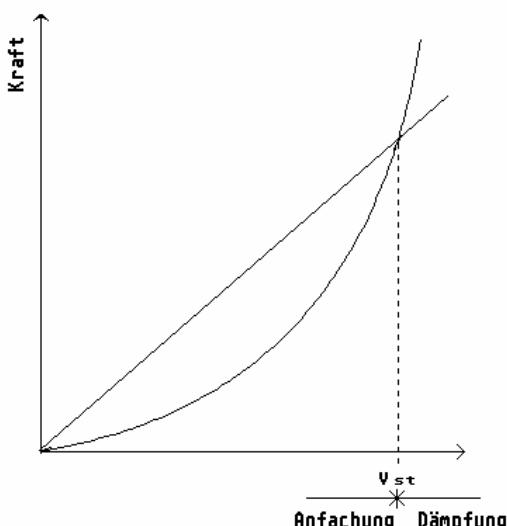


Bild 10: Die gegeneinander wirkenden nichtlinearen "Kräfte" regeln das stationäre Gleichgewicht ein.

denz des Auseinanderlaufens der Sandkörner der Dämpfung. Auch in diesem Fall wächst die Dissipation schneller als die Dämpfung, so dass sich die Stabilität der Haufen gegen äußere Störungen ebenfalls der nichtlinearen Charakteristik der gegeneinanderwirkenden "Kräfte" verdankt⁶.

Die Kreisform der Haufen ist ebenfalls eine Folge dieses Regelmechanismus. Jede Abweichung von der Kreisform bedeutet, dass einige Sandkörner einen größeren Abstand vom Mittelpunkt haben als die übrigen. Die Tendenz, auseinanderzurollen und dadurch den Radius weiter zu vergrößern, ist bei ihnen kleiner als bei den anderen. Daher überwiegt die Aufbösungstendenz solange, bis keine derartig abweichenden Körner mehr vorhanden sind, also die Kreisform hergestellt ist. Umgekehrt hat eine Verkleinerung des Radius die Dominanz des Aus-

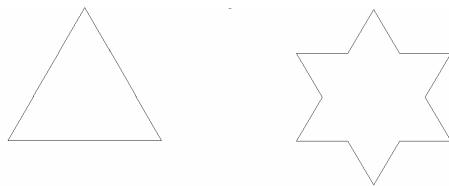


Bild 11: Durch wiederholte Ausstülpungen der Seiten eines Dreiecks entsteht der Kochsche Stern, der stets nur im Entstehen angetroffen werden kann und niemals vollendet ist.

einanderlaufens zur Folge.

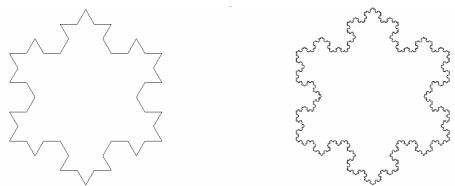
Führt man sich vor Augen, dass diese Mechanismen ständig am Werk sind, so wird klar, dass die Haufen gar keine Haufen im üblichen Verständnis sind, sondern ein Ensemble tanzender Teilchen, die ihre Bewegungen so koordinieren, dass sie auf dem Gebiet eines linsenförmigen Sandhaufens beschränkt bleibt. Kommt die Vibration und mit ihr die lebensnotwendige Energiezufuhr zum Erliegen, so bricht die Dynamik des Haufens zusammen, ohne dass der Haufen seine äußere Gestalt wesentlich ändert. Er ist aber ein toter Haufen, der sich zu einem lebendigen Haufen wie eine Leiche zu einem lebenden Organismus verhält. "Der Ausdruck der organischen Gestalt ist Ruhe (d.h. ein Bestehen), obgleich dieses beständige Reproduziertwerden der ruhenden Gestalt nur durch einen continuierlichen

Wechsel möglich ist" [11].

Der Tanz der Teilchen im Kollektiv des Sandhaufens ändert sich mit zunehmender Energiezufuhr. Die Aufbösungstendenz wächst sich zu einer ondulierenden Bewegung der gesamten Oberfläche der Haufen aus, in der sich unschwer eine Konvektion des Sandes erkennen lässt, wie sie uns bereits beim erhitzten Wasser begegnet ist. Die Konvektion erfasst schließlich den gesamten Haufen und macht die Analogie zum Wasser vollständig [3]. Es ist daher auch von der Temperatur des Sandes [12] die Rede.

Zirkuläre Dynamik

Entscheidend für die Stabilität einer dissipativen Struktur in einer durch ständige Änderungen geprägten Welt ist demnach die nichtlineare Dynamik



des Systems. Ein nichtlineares System vermag ständig seine eigenen Anfangsbedingungen zu verändern, wenn man unter Anfang den Beginn eines jeden neuen Systemzyklus versteht. Das System vermag auf diese Weise die Anfangsbedingungen stets so zu modifizieren, dass die während eines Zyklus auftretenden Störungen, (die das System aus dem stationären Gleichgewichtszustand zu treiben und damit die Funktionsfähigkeit zu beeinträchtigen drohen), wieder abgebaut werden.

Durch diese - kybernetisch gesprochen - Rückkopplung werden Wirkungen von Ereignissen an jedem Punkt des Kreislaufs ganz herumgetragen, um Veränderungen im Ausgangspunkt hervorzurufen [13]. Diese Wirkungen sind von der Art, dass beispielsweise bei der Bénardkonvektion eine Störung, die eine Verminderung der Rotationsgeschwindigkeit unter v_s zur Folge hat, eine Vergrößerung der Geschwindigkeit hervorruft, die - sobald sie v_s überschreitet - wieder eine Geschwindigkeitsverminderung einleitet usw.: Kurzum: Wenn die Geschwindigkeit zunimmt, dann nimmt sie ab, dann nimmt sie zu, dann nimmt sie ab...

In dieser Pendelbewegung um den stationären Gleichgewichtszustand offenbart das nichtlineare System eine Rückwirkung auf die eigenen Ursache und bringt damit die Überwindung der Kausalität in ihrer primitiven Form einer starren Verkettung von Ursache und Wirkung zum Ausdruck. Eine Art zirkuläre Kausalität charakterisiert das Geschehen,

⁶ Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß bereits Kant im Unterschied zu Newton, der nur von attraktiven Kräften spricht, "dauerhaftes Leben", nämlich das "Leben" eines dissipativen Systems, nur für möglich hält, wenn Attraktion im Zusammenhang mit der Gegenkraft, der Repulsion, gedacht wird. Für ihn ist ebenso wie für die Naturphilosophen die Stabilität und Dauerhaftigkeit des Universums nur durch das Gegeneinanderwirken, den "Streit" antagonistischer Richtungskräfte gesichert [9]. Nach Schelling bildet sich die Identität von Strukturen "aus dem grenzbildenden Gleichgewicht von Attraktion und Repulsion" [11].

wonach jede Ursache die Wirkung ihrer eignen Wirkung darstellt: So gesehen bilden bei der Bénardkonvektion Auftrieb und innere Reibung bzw. bei den Sandstrukturen Sandanhäufung und -ausbreitung eine Schleife, innerhalb derer vorher getrennte Phänomene zu einer oszillierenden Einheit verschmelzen.

Das erinnert an ein geometrisches Äquivalent, etwa an den Kochschen Stern, jenes merkwürdige fraktale Gebilde, das durch folgende einfache Vorschrift entsteht: Die Seiten eines Dreiecks werden so ausgestülpt, dass ein sechszackiger Stern entsteht, deren Seiten erneut auf dieselbe Weise ausgestülpt werden usw. ad infinitum [14]. Dieser Stern besitzt eine kohärente Gestalt, da er unmittelbar zu erfassen ist (Bild 11). Doch ähnlich wie bei den Konvektionswalzen im erwärmten Tee ist das, was wir wahrnehmen, "wie ein mythischer Vorfahr, der niemals vollständig gezeichnet oder beschrieben, sondern nur als Trend einer abgebrochenen Wiederholung festgestellt werden kann" [15].

Diese Beziehung zwischen einer räumlichen und einer zeitlichen Struktur ist mehr als eine Merkwürdigkeit. Wie weiter unten noch angedeutet wird, spielen geometrische Methoden eine wesentliche Rolle bei der Beschreibung nichtlinearer Vorgänge.

Die Konvektionswirbel in der Flüssigkeit oder die Sandhaufen auf der vibrierenden Platte werden durch gegeneinanderwirkende "Kräfte" stabilisiert. Die Nichtlinearität "sorgt" dafür, dass es nicht zu einer bloßen Aufhebung von Wirkungen sondern zu einer neuen Qualität kommt. In einer solchen polaren Dynamik manifestiert sich ein wesentlicher Strukturzusammenhang der Natur, der seit Anaximander im naturphilosophischen Denken immer wieder von Bedeutung gewesen ist.

In einem größeren Zusammenhang gesehen, können die Konvektionswirbel und die Umwälzungen im Sand als Metapher der Selbstorganisation in der Natur angesehen werden: "Der Wirbel ist nicht etwas Feststehendes, sondern beständig Wandelbares- aber in jedem Augenblick neu Reproduziertes. Kein Produkt in der Natur ist also fixiert, sondern in jedem Augenblick durch die Kraft der ganzen Natur reproduziert" [10].

Sensitivität durch Nichtlinearität

*Nur das allein zählt,
was sich unendlich, unbestimmt der Analyse entzieht
- dieses Nichts dieser Rest, diese äußerste Dezimale.*

Paul Valéry

Der kreative Akt eines strukturellen Phasenübergangs führt zur Entstehung der Strukturen in Sand, Wasser und Luft (wenn man die Kerzenflamme einmal als Luftstruktur bezeichnet). Voraussetzung

ist, dass die Energiezufuhr ein kritisches Maß überschreitet und das System weit aus dem thermischen Gleichgewicht heraustriebt:

Es kommt zu einem erneuten Symmetriebruch. Die gleichbleibende Struktur der Systeme bricht zusammen zugunsten irregulärer, chaotischer Verhaltensweisen, die rein äußerlich durch das Fehlen einer festen Struktur charakterisiert sind. In dieser Situation tritt in jedem Moment eine neue Struktur auf, so dass sich auf den ersten Blick der Versuch einer physikalischen Beschreibung von selbst verbietet.

In der Tat scheint eine Vorhersage des Systemverhaltens im klassischen Sinne ausgeschlossen. Im Rahmen der sich in jüngster Zeit rapide entwickelnden Chaostheorie versucht man jedoch, auch diesen Phänomenen auf physikalische Weise beizukommen. Dazu ist aber eine Veränderung des physikalischen Blicks erforderlich, der Stock muss am anderen Ende aufgenommen werden (T.S. Kuhn).

Beim Übergang ins Chaos hört ein nichtlineares System nicht auf zu existieren, indem es beliebiges Verhalten zeigt. Man möchte fast sagen, im Gegen teil: Es erlangt einen Zustand, in dem es besonders sensibel auf die geringsten Einflüsse aus der Umwelt zu reagieren vermag, ohne die eigene Individualität aufzugeben. Um dieser paradox erscheinenden Situation auch begrifflich gerecht zu werden, spricht man vom deterministischen Chaos. Auch im chaotischen Bereich einer dissipativen Struktur wird die Dynamik durch eine (deterministische) Bewegungsgleichung beschrieben. Dieselbe nichtlineare Dynamik kann sowohl Ordnung als auch Chaos hervorrufen. Ein nichtlineares System verhält sich demnach - mit Georg Christoph Lichtenberg zu sprechen - wie ein starker Regen, durch den "alle Schweine rein und alle Menschen dreckig" werden.

Die für den chaotischen Bereich typische Sensitivität führt anders als im Bereich des regulären Verhaltens dazu, dass die Einflüsse zufälliger Schwankungen nicht im Sinne eines Abbaus dieser Störungen auf die Anfangsbedingungen rückwirken, sondern im Sinne einer Verstärkung, so dass sie das Systemverhalten dominieren und die globale Entwicklung des Systems bestimmen. Die Umgebung "füttert" das System gewissermaßen ständig mit neuen, vom Zufall bestimmten Anfangsbedingungen. Von einem regelmäßigen, reproduzierbaren Verhalten des Systems kann nicht mehr die Rede sein.

Wie die Entwicklung eines Systems, z.B. einer von unten geheizten Flüssigkeitsschicht verläuft, hängt von den Umständen ab. Ein und dasselbe Ereignis, ein und dieselbe zufällige Schwankung, kann entweder vernachlässigbar oder wesentlich für das

Verhalten des Systems sein. In Gleichgewichtsnähe wird jede kleinere Störung abgebaut und "vergessen". Fernab von Gleichgewicht beeinflusst sie das konkrete Verhalten des Systems.

In Gestalt der chaotischen Systeme erlangt eine bereits vor fast hundert Jahren von Henri Poincaré geäußerte Erkenntnis aktuelle Bedeutung: "Kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen (können) große Unterschiede in den späteren Erscheinungen bedingen; ein kleiner Irrtum in den ersten kann einen außerordentlich großen Irrtum in den letzten nach sich ziehen. Die Vorhersage wird unmöglich" [16] (Bild 12). Andererseits: "Nichts in der Welt kann schwerer sein als die Umstände bei Versuchen hinlänglich gleich zu machen" (Georg Christoph Lichtenberg).



Bild 12: Manche Vorgänge sind sensitiv

Die Vorhersage wird unmöglich heißt, dass der Vorhersagezeitraum auf beliebig kleine Zeiten schrumpft und damit uninteressant wird. Sollte es da nicht möglich sein durch eine genauere Festlegung der Anfangsbedingungen den Vorhersagezeitraum zu vergrößern und auf diese Weise wenigstens im Prinzip zu einer physikalischen Vorhersage des Verhaltens kommen? Leider liegt es in der nichtlinearen Natur der Sache, dass eine Verzehnfachung der Zeit, während derer die Entwicklung eines Systems vorhersagbar bleibt, eine Steigerung der Genauigkeit der Anfangsbedingungen um den Faktor e^{10} erforderlich machen würde. Nur im menschenunmöglichen Falle einer streng unendlichen Präzision könnten hier deterministische Vorhersagen getroffen werden. Da kein Beobachter, und seien seine Sinne noch so geschärfte, einen Zustand ohne jede Näherung erfassen kann, ist es aber "völlig unnütz, die Genauigkeit zu vergrößern oder sie sogar zum Unendlichen tendieren zu lassen. Es bleibt bei völliger Ungewissheit, sie verringert sich nicht in dem Maß, in dem die Genauigkeit zunimmt. Damit ist der Laplacesche Dämon, der große Berechner der Bahnen endlich tot, und zwar für immer, weil die Wissenschaft ihn getötet hat, die ihn erzeugte" [17].

Betrachten wir als konkretes Beispiel die Bénardkonvektion. Die Sensitivität tritt dann in Erschei-

nung, wenn aufgrund einer sehr hohen Energiezufuhr, die Konvektionswalzen so schnell rotieren, dass nicht ausreichend Gelegenheit zur Erwärmung der aufsteigenden und zur Abkühlung der absinkenden Flüssigkeit besteht. So kommt es zu labilen Situationen, in denen Links- und Rechtsdrehung gleichberechtigt sind. Stets vorhandene kleinste Störungen "entscheiden" dann immer aufs Neue, wo es lang geht. Es kommt zu einer irregulären Folge von Richtungswechseln, so dass von Rotationen im vertrauten Verständnis nicht mehr die Rede sein kann. Die Bewegung des aufsteigenden heißen und absinkenden kalten Wassers gestaltet sich mit einem Wort chaotisch. Offenbar gelingt dem System in einem solchen wirren Durcheinander von kaltem und heißem Wasser der Transport thermischer Energie von unten nach oben besser als in dem geordneten Ensemble der Konvektionswirbel.

Die Attraktion im Zustandsraum

Gebildet ist ein Werk, wenn es überall scharf begrenzt, innerhalb der Grenzen aber grenzenlos und unerschöpflich ist, wenn es sich selbst ganz treu, überall gleich und doch über sich erhaben ist.

Friedrich Schlegel

Wenn chaotische Phänomene durch irreguläres und wirres Verhalten gekennzeichnet sind, das sich einer detaillierten Vorhersage entzieht, so stellt sich die Frage, worin der Unterschied zu rein stochastischem Verhalten besteht, das sich ja gerade durch Strukturlosigkeit und Beliebigkeit jedem physikalisch zu nennender Zugang entzieht. Lässt man beispielsweise die chaotischen Signale der Bénardkonvektion einige Zeit auf sich wirken (Bild 13), so ergeben sich so gut wie keine Anhaltspunkte für eine wie auch immer geartete Regelmäßigkeit.

Betrachtet man jedoch das Verhalten des Systems aus der Perspektive des Zustandsraums, in dem das Langzeitverhalten in komprimierter Form dargestellt wird, so offenbaren sich Strukturen, die in Verfolgung einzelner Trajektorien im Anschauungsraum nicht zu erkennen sind. So wird beispielsweise im chaotischen Bereich der Bénardkonvektion die Rotation - ausgedrückt durch das Verhalten der Winkelgeschwindigkeit einer Konvektionswalze - durch ein völlig irreguläres, nicht vorhersagbares Signal charakterisiert (Bild 13). Im Zustandsraum des Systems erzeugt dieselbe Bewegung eine achterbahnartige Spur, die sich im unregelmäßigen Wechsel um zwei Fixpunkte herumwindet. Dieser sogenannte chaotische (Lorenz-) Attraktor ist ein für die chaotische Bénardkonvektion typisches Gebilde. Obwohl zur Beschreibung eines Vielteilchensystems ein Zustandsraum mit einer astronomisch hohen Dimension erforderlich ist,

stellt der Attraktor ein ziemlich kompaktes, klar begrenztes, niedrigdimensionales Gebilde dar. Er zieht gewissermaßen das Systemverhalten an und beschränkt es auf ein kleines Gebiet im Zustandsraum. Darin kommt zum Ausdruck, dass wie im Bereich des regulären Verhaltens auch im chaotischen Bereich die große Zahl der Teilchen des Systems in einer sinnvollen Wechselwirkung kooperiert und ein kollektives, in gewisser Weise einheit-

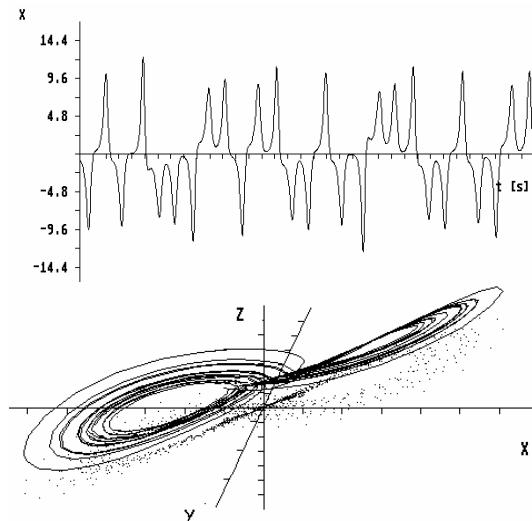


Bild 13: Das chaotische Signal als Zeitserie (oberes Bild) und als chaotischer Attraktor im dreidimensionalen Zustandsraum (unteres Bild), der durch die unabhängigen Variablen X, Y und Z aufgespannt wird. Zur besseren Orientierung wurde die Projektion des Attraktors auf die XY- Ebene gepunktet mitgezeichnet. Weitere Einzelheiten entnehme man [8].

liches Verhalten an den Tag legt.

Der Attraktor erfasst so gesehen auf geometrische und daher anschauliche Weise das Sagbare eines an sich irregulären Verhaltens. Er enthält alle relevante Information des Systems. Seine ästhetisch anmutende in gewisser Weise wohlgeordnete Struktur offenbart eine dem chaotischen Verhalten zugrundeliegende tiefere Ordnung, die u.a. darin besteht, dass das System abgesehen von der Übergangsphase des "Einschwingverhaltens" bei weitem nicht alle Möglichkeiten ausschöpft, die es theoretisch wahrnehmen könnte. Das ist eine andere Art zu sagen, dass das System ein zwar nicht im Detail vorhersagbares trotzdem aber sinnvolles Verhalten zeigt. Was Goethe vom Lyrischen sagt, nämlich dass es im Ganzen vernünftig, im Einzelnen ein bisschen unvernünftig sei, gilt offenbar auch für ein chaotisches System.

Dadurch, dass der Attraktor ein endlich dimensionales Objekt darstellt, eröffnet sich überhaupt erst die Möglichkeit, ihn als einheitliches Ganzes zu erfassen und (mathematisch) zu behandeln. Der Un-

terschied zum regulären Verhalten des Systems besteht allerdings darin, dass es trotz dieser Beschränkung immer noch unendlich viele Verhaltensmöglichkeiten gibt, die sich in einer erstaunlichen Feinstruktur des Attraktors bemerkbar machen. Der Lorenzattraktor stellt beispielsweise mit seinen Spiralen anschaulich gesprochen nicht nur ein einfach gefaltetes Blatt im Dreidimensionalen Raum dar, sondern offenbart bei näherer Betrachtung ein ganzes System solcher Blätter. Es sind nicht weniger als unendlich viele. Ivar Ekeland hat den Lorenzattraktor als vereinfachte Version einer mythologischen Darstellung (Bild 14) betrachtet [18]. Dabei handelt es sich um ein an vierblättrigen Klee erinnerndes Labyrinth, dessen Blätter nacheinander durchlaufen werden. Das Lorenzsystem stellt so gesehen unendlichblättrigen Klee dar, dessen Blätter auf unvorhersehbare Weise durchlaufen werden. Auf diesen unendlich vielen unendlich dicht gepackten und daher als einheitliches Ganzes erscheinenden Blättern steht wie in einem Buch die gesamte Information des Systems geschrieben.

Solche vielblättrigen Gebilde nennt man Fraktale. Sie stellen im Rahmen der fraktalen Geometrie ein mächtiges Mittel dar, Gebilde wie den obigen Lorenzattraktor physikalisch in den Griff zu bekommen. Ob Jorge Luis Borges mit seinem "Sandbuch" das Konzept des Fraktals wenigstens in metaphorischer Umschreibung vorweggenommen hat? Denn



Bild 14: Vierblättriger mythologischer Vorläufer des Lorenzattraktors.

auch das Sandbuch hat wie der Sand weder Anfang noch Ende... Er forderte mich auf, das erste Blatt zu suchen. Ich drückte die linke Hand auf das Titelblatt und schlug das Buch auf, den Daumen fest an den Zeigefinger gepresst. Alles war zwecklos: Immer schoben sich einige Blätter zwischen Titelblatt und Hand. Es war, als brächte das Buch sie hervor " [19].

Qualitative Physik

Bei der physikalischen Erschließung von Phänomenen der Selbstorganisation, zu denen auch die chaotischen Verhaltensweisen als besonders vielfältige Variante zählen, zeigt sich, dass das übliche quantitative Vorgehen durch qualitative Methoden ersetzt wird. Dieses Vorgehen sollte aber nicht nur negativ im Sinne einer unvollständigen Beschreibung gesehen werden. Es bringt vielmehr das veränderte Naturverständnis zum Ausdruck, das nicht mehr ausschließlich an einer exakten für alle Zeiten gültigen, aber in vielen Fällen irrealen Vorhersage von Ereignissen ausgerichtet ist, sondern der faktischen Offenheit und Freiheit von Entwicklungen insbesondere komplexer Strukturen Rechnung trägt: "Das Chaos als vereinheitlichendes Element entspricht der Vorstellung von einer offenen, sich entwickelnden Welt, in der, um Paul Valery zu zitieren, "die Zeit Konstruktion ist" [20]. Mit anderen Worten: Chaotisches Verhalten wird nicht länger als Grenze physikalischer Erkenntnis angesehen sondern wird selbst zum Gegenstand der Erkenntnis.

In der Geometrisierung der Vorgänge wird wie wohl kaum jemals zuvor das kreative Vermögen des Menschen zur Mustererkennung explizit für die Forschung ausgenutzt mit dem Ergebnis, dass von "außen" betrachtet völlig irreguläre Erscheinungen geordnete Strukturen offenbaren, die mit herkömmlichen Methoden nicht zu entdecken sind. Bei der Betrachtung dieser geometrischen Objekte gewinnt man nicht selten den Eindruck, dass die Natur einige ihrer schönsten Muster für den Zustandsraum erschafft: Die Schönheit der Strukturen und ihr Gestaltreichtum demonstrieren eindrücklich eine dem Chaos zugrundeliegende Ordnung. Die Chaoforschung ist dabei, diese Strukturen zu entschlüpfeln und mit physikalischem Inhalt zu füllen.

Literatur

- [1] Leibniz, G.W.: *Monadologie*. Stuttgart: Reclam 1954, S.28
- [2] Stegmüller, W.: *Hauptströmungen der Gegenwart Philosophie*, II. Band, S. 496
- [3] Nordmeier, V., Schlichting, H.J.: *Strukturen im Sand*. Zur Veröffentlichung.
- [4] Bachelard, Gaston: *Die Flamme einer Kerze*. München, Wien: Hanser 1988.
- [5] Schlichting, H.J., U. Backhaus: Energieentwertung und der Antrieb von Vorgängen. *Naturwissenschaften im Unterricht- Physik* 35/24, 15 (1987), sowie: Schlichting, H.J.: *Energie und Energieentwertung in Naturwissenschaft und Umwelt*. Heidelberg: Quelle & Meyer 1983.
- [6] Prigogine, I.: *La thermodynamique de la vie*. Recherche 24/3, 547 (1972)

- [7] Haken, H.: *Synergetik*. Berlin etc.: Springer 1983
- [8] Schlichting, H.J., Backhaus, U., Küpker, H.G.: Chaos beim Wasserrad- ein einfaches mechanisches Modell für das Lorenz System. *Physik und Didaktik* 19/3, 196 (1991)
- [9] Kant, I.: *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*. Königsberg und Leipzig 1755
- [10] Schelling, F. W. J: *Werke III*. Stuttgart: Cotta 1856
- [11] Schelling, F. W. J: zit. nach Heckmann, R., Krings, H., Meyer R.W.: *Natur und Subjektivität*. Stuttgart: frommann- holzboog 1985, S.304
- [12] Edwards, S. F., Mehta, A.: *Journal de Physique* (Paris), 50, 2489 (1989)
- [13] Bateson, G.: *Geist und Natur*. Frankfurt: Suhrkamp 1984, S. 130
- [14] Schlichting, H.J.: *Schöne fraktale Welt*. MNU 45/4, 202 (1992)
- [15] Varela, F.: *Der Kreative Zirkel. Skizzen zur Naturgeschichte der Rückbezüglichkeit*. In: Watzlawick, P. (Hrsg.): *Die erfundene Wirklichkeit*. München 1984, S.295 ff
- [16] Poincaré, H.: *Wissenschaft und Methode*. Darmstadt 1963, S. 380
- [17] Prigogine, I., Stengers, I., Pahaut, S.: *Die Dynamik - von Leibniz zu Lukrez*. In: *Anfänge*. Berlin: Merve 1991
- [18] Ekeland, I.: *Zufall, Glück und Chaos*. München: Hanser 1992
- [19] Borges, J. L.: *Die zwei Labyrinthe*. München: Hanser 1986
- [20] Prigogine, I.: *Das Paradox der Zeit*. München: Piper 1993