

Strukturbildung, Selbstorganisation und Synergetik in der Atmosphäre und in anderen Systemen

Vortrag, gehalten

1983 an der Freien Universität Berlin (als Habilitationsvortrag),

1983 an der Technischen Universität Darmstadt

1983 an der Universität Hamburg

1984 im Standquartier für Erdwissenschaften in Eschwege

... und Nachträge aus heutiger Sicht

Kaum ein Gesetz der theoretischen Physik hat die Gemüter mehr bewegt als der zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Dieses Gesetz hat bekanntlich viele Formulierungen. Eine der berühmtesten und auch dramatischsten Formulierungen stammt von Clausius. Hiernach strebt die Welt einem sogenannten "Wärmetod" entgegen. Damit ist gemeint, dass die Unordnung und damit die Entropie der Welt immer mehr zunimmt, bis sie schließlich ein Maximum erreicht. Dieser Zustand des thermodynamischen Gleichgewichts ist der Attraktorzustand der Welt. Die thermodynamische Entwicklung auf diesen Attraktorzustand hin ist ein irreversibler Prozess, also ein Prozess, der nicht mehr rückgängig gemacht werden kann. Ist der Zustand der maximalen Unordnung also erst erreicht, so ist er auch endgültig.

Ein Blick auf die uns umgebende, unbelebte oder belebte Welt scheint diesem Satz sofort zu widersprechen. Wir sind von geordneten Strukturen umgeben, von Kristallen, von Wolken, von Pflanzen, ja sogar von Gehirnen, der offensichtlich höchsten Organisationsform in der Natur. Wie sind die Existenz und die ständige Neubildung solcher Strukturen zu vereinbaren mit dem Gesetz einer ständigen Zunahme von Entropie und Unordnung? Wie ist die *Evolution* damit zu vereinbaren? Können Clausius und Darwin gleichzeitig recht gehabt haben?

Um ein naheliegendes Missverständnis von vornherein auszuschließen, muss als erstes festgestellt werden, dass die Bildung von Strukturen und Selbstorganisationsprozesse durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik nicht *verboten* ist. Der zweite Hauptsatz spricht von einer *globalen* Entropiezunahme, er lässt *lokale* Entropieverminderungen aber durchaus zu. Nur muss dann an anderen Stellen im Raum eine mindestens gleichgroße Entropiezunahme erfolgen. Selbstverständlich folgt daraus, dass Strukturbildungen nur in *offenen Systemen* stattfinden können, denn aus einem *isolierten System* heraus kann ja Entropie nicht exportiert werden.

Wenn der zweite Hauptsatz der Thermodynamik Strukturbildungen in offenen Systemen zwar nicht widerspricht, so tut er andererseits auch nicht das Geringste zu ihrer Erklärung. Dazu muss eine neue Theorie geschaffen werden. Ansätze hierzu gibt es erst seit den letzten 10-15 Jahren, hauptsächlich von Ilya Prigogine, Manfred Eigen und Herrmann Haken. Schlagworte dieser neuen Theorien sind "dissipative Strukturen", "Hyperzyklus" und "Synergetik".

Zunächst muss jedoch die Rolle der Thermodynamik offener Systeme bei Strukturbildungen erörtert werden. Auch in offenen Systemen können irreversible Entwicklungen auf einen Gleichgewichtszustand führen, jedenfalls bei speziellen Randbedingungen. Jedoch ist dann der Attraktorzustand nicht mehr der Zustand des Entropiemaximums, sondern des Extremums einer anderen thermodynamischen Potentialfunktion wie Energie, Freie Energie, Enthalpie oder Freie Enthalpie. Auf welchen dieser Zustände die irreversible Entwicklung hinsteuert, hängt von den Randbedingungen des offenen Systems ab. Wird zum Beispiel die Temperatur des Systems konstant gehalten, so ist der Attraktorzustand verknüpft mit einem Extremwert der Freien Energie. Die Entropie dieses Gleichgewichtszustandes kann dann durchaus gering sein, besonders bei *niedrigen* Temperaturen! Tatsächlich sagt dann die Theorie die Bildung eines Ordnungszustandes voraus, z.B. die Bildung von Kristallen.

Boltzmann hat die irreversible Entwicklung auf einen Attraktorzustand hin zurückgeführt auf eine Entwicklung in Richtung auf Zustände von wachsender Wahrscheinlichkeit. Ein bestimmter makroskopischer Zustand des Systems kann ja realisiert sein durch eine Vielzahl von Mikrozuständen, d.h. von Anordnungen der Moleküle im Phasenraum, die mit den gegebenen Randbedingungen vereinbar sind. Die Wahrscheinlichkeit eines Makrozustandes ist nun nach Boltzmann direkt proportional zur Anzahl dieser Mikrozustände. Der Gleichgewichtszustand ist also der, der durch die größte Anzahl von mikroskopischen Realisierungen erreicht werden kann. So gesehen ist es bei niedrigen Temperaturen wahrscheinlicher, dass die Moleküle aufgrund der molekularen Kräfte beieinander bleiben und Kristalle bilden als dass sie frei und regellos herumfliegen.

Schneekristalle sind Beispiele für solche Gleichgewichtsstrukturen. Man kann ihnen einen hohen Ordnungszustand nicht absprechen. Insbesondere fällt auf, dass alle Individuen eine sechseckige Form haben. Was also diese Kristallstrukturen betrifft, so gibt es keinen Widerspruch zwischen klassischer Thermodynamik und dem Auftreten von Ordnung. Sechseckige Strukturen erzeugt die sogenannte Benard-Konvektion: Wenn man eine flache Flüssigkeit von unten gleichmäßig erwärmt, dann bilden sich bei einem bestimmten Wert des vertikalen Temperaturunterschiedes solche Konvektionszellen.

Wegen der sechseckigen Form in beiden Fällen könnte man auf eine physikalische Verwandtschaft zwischen dieser und der kristallinen Struktur schließen. Das wäre jedoch ganz falsch, denn es gibt entscheidende prinzipielle Unterschiede. Die Kristallstruktur wird aufrechterhalten von den Wechselwirkungen zwischen den Molekülen, d.h. die

Größenskala der Wechselwirkung ist nicht größer als der Skala der Moleküle selbst. Es gibt kein *kooperatives* Verhalten der Moleküle über einen größeren räumlichen Bereich hinweg. Die Struktur der Konvektionszellen dagegen kann sich nur ausbilden, wenn sich die Moleküle über einen makroskopischen Bereich koordinieren! Vor dem Erreichen des kritischen Temperaturgradienten ging der Zellenkonvektion eine Phase der molekularen Wärmeleitung voraus. Da haben etwa 10^{23} Moleküle unabhängig voneinander durch Zufallsbewegungen für den Wärmetransport gesorgt. Es ist schon fast unbegreiflich, dass sich derart viele Moleküle plötzlich in ihrem Verhalten aufeinander abstimmen, dass sie sich im Verbund wohlgeordnet bewegen. Dieses kohärente Verhalten von 10^{23} Molekülen steht im größten Gegensatz zu den Voraussetzungen für eine Kristallstruktur, die nur auf die geometrische Ordnung zwischen je zwei oder drei Nachbarmolekülen angewiesen ist.

Sechseckige Konvektionszellen findet man auch in der Atmosphäre. Diese hält aber auch noch sehr viele andere kohärenten Strukturen bereit. Ein Beispiel wären Wolkenstraßen, wie man sie auf manchen Satellitenbildern sieht. Sie signalisieren eine kohärente Rollenbewegung der Luft unterhalb der Wolken. Solche Rollenbewegungen kann man andererseits auch im Labor erzeugen, man erhält sie z.B. im Benard-Experiment, wenn man das Stadium der Sechseckzellen erreicht hat und dann den vertikalen Temperaturgradienten *noch* weiter erhöht. Ging zuvor Unordnung in Ordnung über, so geht nun ein Ordnungszustand in einen anderen über. Beide Male wird ein alter Zustand instabil und er wird ersetzt durch einen neuen stabilen Zustand. Strukturbildung und Strukturänderung sind also mit Instabilitäten verknüpft.

Kohärente Struktur kennt man auch im Bereich der Chemie. Wir wissen natürlich, dass chemische Reaktionen mit Farbänderungen verbunden sein können. So kann z.B. beim Zusammengießen einer blauen und einer farblosen Flüssigkeit im Reagenzglas durchaus eine rote Flüssigkeit entstehen. Es muss aber größtes Erstaunen hervorrufen, wenn die Färbung des gesamten Reaktionsproduktes nicht homogen ist. Und doch gibt es Reaktionen, die zu farbigen Mustern im Reagenzglas führen. Auch dazu ist ein kooperatives Verhalten der chemisch reagierenden Moleküle erforderlich.

Als letztes Beispiel für eine kooperative Struktur möchte ich auf das menschliche Gehirn hinweisen. Man kennt ja die faszinierenden Bilder von wenigen Nervenzellen, die einen winzigen Ausschnitt aus dem Netzwerk eines Gehirnes mit ihren wechselseitigen planvollen Verbindungen darstellen. Denkt man daran, dass jede Einzelzelle für sich schon einen extremen Organisationsgrad erreicht hat - in jeder Zelle finden gleichzeitig und aufeinander abgestimmt hunderte von biochemischen Reaktionen statt - denkt man ferner daran, dass im menschlichen Gehirn viele Milliarden solcher Zellen miteinander verknüpft sind, so ahnt man, zu welcher gigantischen Leistungen das Prinzip der Strukturbildung befähigt ist. Eine solche Struktur ist ja sogar dazu befähigt, die Welt irgendwie in sich abzubilden und darüber zu reflektieren. Es gibt also Strukturen, die über Strukturen nachdenken können. Unsere eigenen Gehirne in diesem Augenblick meines Vortrags sind der beste Beweis dafür!

Es wäre stark übertrieben, zu behaupten, dass die Naturwissenschaft heute eine auch nur ansatzweise vollständige Erklärung bereit hätte für die verschiedensten Strukturbildungen einschließlich der extremsten Ausprägung im letzten Beispiel. Aber einige Gemeinsamkeiten und Gesetzmäßigkeiten kann man schon angeben, obwohl die entsprechenden Theorien erst seit 15 Jahren existieren. Nichtkohärente Strukturen wie die des Kristalls sind schon durch die klassische Thermodynamik erklärbar. Sie bilden sich, weil sie bei niedrigen Temperaturen im Boltzmannschen Sinn am wahrscheinlichsten sind. Schwankungen um den wahrscheinlichsten Zustand herum gibt es zwar, aber sie dürfen nur klein sein. Je grösser sie sind, desto unwahrscheinlicher sind sie. Eine spontan einsetzende kollektive Konvektionsbewegung von 10^{23} Molekülen ist aber eine gigantische Schwankung, und sie müsste statistisch sofort wieder verschwinden. Kohärente Strukturen sind also im Boltzmannschen Sinne extrem unwahrscheinlich, aber dennoch existieren sie! Das ist der eigentliche Konflikt zwischen der klassischen Thermodynamik und der Strukturfähigkeit der Natur. Wie verträgt sich das von Boltzmann geforderte statistische Verschwinden aller Besonderheiten, aller seltenen Konfigurationen, mit der statistischen Auslese und der Stabilisierung extrem seltener Ereignisse?

Wo liegt der Schlüssel zur einer Antwort? Er liegt darin, dass das klassische Boltzmannprinzip auf ein reines Abzählen von Fällen hinausläuft, die alle eine gleiche a priori - Wahrscheinlichkeit haben. Dass die Mikrozustände aber alle gleichwahrscheinlich sind, ist physikalisch gar nicht begründet. Es ist nur ein Axiom, welches unter Gleichgewichtsbedingungen zwar erfüllt ist, bei großen Entfernungen vom thermodynamischen Gleichgewicht jedoch nicht! Tatsächlich *können* kohärente Strukturen auch nur unter gleichgewichtsfernen Bedingungen existieren!

Was kann ein thermodynamisches System überhaupt davon abhalten, sich in den Gleichgewichtszustand zu begeben? Das kann nur dadurch geschehen, dass die Umgebung des Systems das Gleichgewicht immer wieder stört, mit anderen Worten, die Randbedingungen eines offenen Systems können mit dem Zustand des thermodynamischen Gleichgewichtes unvereinbar sein. Z.B. wird im Falle der Benard-Konvektion der Gleichgewichtszustand durch das ständige Nachheizen von unten verhindert.

Nun hat man sorgfältig zu unterscheiden, ob wenigstens noch Zustände in der Nähe des Gleichgewichts erlaubt sind oder nicht. Dieser Unterschied ist grundlegend, denn er entscheidet darüber, ob lineare oder nichtlineare Gesetze das System bestimmen. Die lineare Thermodynamik, also Thermodynamik in Gleichgewichtsnähe, liefert keine neuen Erkenntnisse zum Thema Strukturbildung. Man kennt auch hier einen Attraktorzustand, das sogenannte Fließgleichgewicht. Dieses ist auch wieder durch das Extremum eines Potentials gekennzeichnet, des Extremums der Entropieproduktion. Die bloße Existenz eines Potentials garantiert aber schon die Stabilität des stationären Zustandes. Eine Schwankung treibt ja das System aus dem Potentialminimum heraus. Sie wird daher sofort gedämpft. Strukturbildungen sind unter diesen Bedingungen nicht zu erwarten, denn sie sind ja untrennbar mit riesigen Schwankungen und mit Instabilitäten verbunden.

Wie die Gleichgewichtsthermodynamik, so ist also auch die *lineare* Nichtgleichgewichtsthermodynamik eine Theorie, die im Wesentlichen nur die Auflösung von kohärenten Strukturen beschreibt. Die Potentialfunktion dieser Theorie, die Entropieproduktion, misst geradezu das Ausmaß dieser Zerstörung von Ordnung. Bei großen Entfernungen vom thermodynamischen Gleichgewicht, also im Bereich der nichtlinearen Thermodynamik, ändert sich die bisher geschilderte Situation jedoch ganz radikal, und zwar in zweifacher Hinsicht.

Erstens gibt es nun bei vorgegebenen Randbedingungen mehrere mögliche Zustände für das System. Das liegt einfach daran, dass nichtlineare Gleichungen mehrere Lösungen haben. Ist die Systemgleichung zum Beispiel nichtlinear n -ten Grades, so hat sie auch n Lösungen. Dabei können allerdings mehrere Lösungen zusammenfallen, d.h. es müssen nicht alle n Lösungen verschieden voneinander sein. Wie viele Lösungen tatsächlich verschieden voneinander sind, hängt von den Parametern der Gleichungen ab, und diese wiederum werden von den Randbedingungen bestimmt. Durch eine Variation der Grenzbedingungen kann sich die Vielfachheit der Lösungen also auch ändern. Zweitens sind die stationären Lösungen im nichtlinearen Bereich nicht mehr durch das Extremum einer Potentialfunktion gekennzeichnet. Damit ist auch die Stabilität nicht mehr automatisch gewährleistet. Welche Lösungen stabil sind und welche nicht, hängt wieder von den Randbedingungen des Systems ab.

Durch Variationen der Randbedingungen ändern sich also i.A. sowohl die Vielfachheit der Lösungen als auch die Stabilitätsverhältnisse jeder dieser Lösungen. Das ist der Untersuchungsgegenstand der sogenannten Verzweigungstheorie, auch Bifurkationstheorie genannt. *Eine* der mehrfachen Lösungen der nichtlinearen Gleichungen entspricht dem Zustand der größten Boltzmannschen Wahrscheinlichkeit. Diese Lösung wird thermodynamischer Zweig genannt. In Gleichgewichtsnähe ist dies sogar die einzige stabile Lösung, so dass keine kohärenten Strukturen möglich sind.

Den Prozess der Struktur-Bildung können wir uns nun folgendermaßen vorstellen. Die Randbedingungen treiben das System immer weiter aus dem Gleichgewicht heraus. Bei einem bestimmten kritischen Wert der Umweltparameter kommt es zu den erwähnten Lösungsverzweigungen. Der thermodynamische Zweig wird instabil und gleichzeitig ändert sich die Mehrfachheit der Wurzeln. So entstehen *andere* stabile Lösungen, und das System nimmt einen neuen Zustand ein, der folglich nicht mehr der Zustand der größten Boltzmannschen Wahrscheinlichkeit sein kann. Rein statistisch gesehen stellt dieser neue Zustand also eine Besonderheit dar, es ist ein kohärenter Zustand.

Strukturbildungen geschehen also deswegen, weil bei bestimmten kritischen Werten der Umweltparameter der strukturlose Zustand instabil wird. Die Systemgleichungen verzweigen dann zu anderen stabilen Lösungen, welche kohärenten Strukturen entsprechen. Diese Erklärung ist natürlich noch immer sehr abstrakt. Können wir unsere Anschauung mit diesem rein mathematischen Befund in Übereinstimmung bringen? Können wir einen

Mechanismus erkennen, welcher zur Stabilisierung der statistischen Besonderheiten führt?

Das können wir tatsächlich. Die statistischen Besonderheiten sind ja kohärente Schwankungen, sie sind makroskopisch wie die Umwelt und können diese gewissermaßen erkunden. Die stabilisierten Schwankungen sind nun gerade die, die an die erkundeten äußeren Zwangsbedingungen am besten angepasst sind. Im Benard-Experiment zum Beispiel bilden sich Sechseckzellen, weil sie den von der Umwelt auferlegten vertikalen Wärmetransport am besten bewerkstelligen. Eigentlich ist die Sechseckzelle eine extrem seltene Schwankung um den Zustand maximaler Boltzmannscher Wahrscheinlichkeit. Dennoch erlangt sie plötzlich die Oberherrschaft, denn sie hat bei den gegebenen Umweltbedingungen einen *Selektionsvorteil*. Kohärente Schwankungen anderer Art sind zwar auch vorhanden, sie würden aber die Wärme in anderer Weise transportieren wollen, in einer Weise, die von der Umwelt gerade nicht verlangt wird. Sie sterben also aus.

Dennoch wird das Stadium der Sechseckzellen durch Fluktuationen aller Arten ständig neu in Frage gestellt. Ändert sich die Umwelt, so kann eine andere Schwankung besser angepasst sein. Dann übernimmt diese das Regime. Es kommt zu einer erneuten Verzweigung der Lösungen, zu einer sogenannten sekundären Bifurkation. Aus den Sechseckzellen werden Rollenbewegungen. Das kann zum Beispiel dann eintreten, wenn sich die geometrische Form des Wassertanks ändert. Rollen haben in einem rechteckigen Gefäße, Sechseckzellen in einem runden Gefäße einen Selektionsvorteil. Die Analogie zur umweltbedingten Selektion biologischer mutierter Spezies ist schon beeindruckend.

Kohärente Strukturen bilden sich also durch einen Prozess, der dem der biologischen Evolution weitgehend ähnlich ist. Was die Schwankungen in der Hydrodynamik sind, sind in der Biologie die Mutationen. Auch diese sind ja meist nutzlos und sterben aus. Aber gerade weil sie zufällig sind, also sehr vielfältig und unspezifisch, erfüllt immer wieder mal eine von ihnen genau die Erfordernisse einer möglicherweise veränderten Umwelt und wird selektiert. Wie bereits erwähnt, kann das Umschlagen der Zellenkonvektion in die Rollenkonvektion auch bei einer Vergrößerung des vertikalen Temperaturgradienten erfolgen. Wenn die Zwangsbedingungen das System dann *noch* weiter vom Gleichgewicht entfernen, gibt es weitere Lösungsverzweigungen und Ordnungszustände. Zuerst fangen die Konvektionsrollen an zu schwingen, d.h. zur räumlichen Struktur kommt eine zeitliche Struktur hinzu. Bei noch größeren Entfernungen vom Gleichgewicht werden die Bewegungen unperiodisch und schließlich wird die Strömung turbulent!

Im Gegensatz zur laminaren Wärmeleitung ist die turbulente Wärmeleitung durchaus kohärent. Trotzdem empfinden wir den turbulenten Zustand mit Recht als chaotisch. Das liegt daran, dass nun zu viele Strukturen aufgetaucht sind, die in ihrer Gesamtheit auch wieder unüberschaubar sind. Wirklich geordnete und verlässliche Funktionen sind also nur möglich bei einem wohldosierten Abstand vom thermodynamischen Gleichgewicht.

Dieser Abstand darf nicht zu klein und nicht zu groß sein, denn sonst ist nur das Chaos der molekularen Bewegung oder das Chaos der turbulenten Bewegung möglich.

Die mathematische Behandlung dieser Vorgänge ist sehr kompliziert und umfangreich, und ich muss mich hier auf wenige Andeutungen beschränken. Strukturbildungen sind nur möglich in Systemen mit ungeheuer vielen Freiheitsgraden. Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Freiheitsgrade mathematisch-physikalisch zu definieren. Eine Möglichkeit ist die, Entwicklungen nach irgendwelchen Orthogonalfunktionen vorzunehmen. Dann ist jeder mögliche Freiheitsgrad gegeben durch eine bestimmte Mischung der Amplituden der Reihenentwicklungen. Eine andere Auffassung ist die, als Freiheitsgrad einen bestimmten Mikrozustand anzusehen, also eine Verteilung der Orte und Impulse der Moleküle im Phasenraum. Das ist der bisher eingenommene Standpunkt. Gleichgültig, wie die Freiheitsgrade definiert sind, die Entwicklung des Systems als Ganzes ist gegeben durch die zeitliche Änderung aller Freiheitsgrade. Wenn die Freiheitsgrade mit X_i bezeichnet werden und wenn N ihre Anzahl ist, dann ist das System durch Gleichungen der Art

$$\dot{X}_i = f_i(X_1, X_2, \dots, X_N; P_n), \quad N = \text{Zahl der Freiheitsgrade}$$

beschrieben. f_i sind N nichtlineare Funktionen, P symbolisiert n Parameter, welche die äußeren Zwangsbedingungen beschreiben. Bei einem Gassystem könnte X_i der Ort oder der Impuls irgendeines der Gasmoleküle bedeuten, N hätte dann die Größenordnung von 10^{23} , und P_1 bis P_3 könnten die Werte von Temperatur, Druck oder Volumen des Gases symbolisieren. Die zeitliche Entwicklung jedes einzelnen der vielen Freiheitsgrade hängt also in nichtlinearer Weise von allen anderen Freiheitsgraden ab, und von den durch P_n symbolisierten Umweltbedingungen! Es ist völlig aussichtslos, ein solches Gleichungssystem numerisch oder gar analytisch lösen zu wollen.

Der thermodynamische Zweig ist nun dadurch gekennzeichnet, dass diese Gleichungen für keinen der vielen Freiheitsgrade eine irgendwie auffällige Entwicklung ergeben. Daher ist der makroskopische Zustand des Systems sehr gut durch geeignete Mittelbildungen über die Gleichungen beschrieben. Durch diese Mittelungen reduziert sich die Zahl der Freiheitsgrade entscheidend, und die Gleichungen werden auf diese Weise einer mathematischen Behandlung zugänglich. Wenn nun einer der Umweltparameter P einen kritischen Wert überschreitet, verändern sich die Lösungen des Gleichungssystems in der Weise, dass nun einige wenige der vielen Freiheitsgrade X_i dominieren. In der Sprache der Synergetik treten am Verzweigungspunkt Ordner O_j auf. Das sind die selektierten Freiheitsgrade, welche alle anderen Freiheitsgrade S_k versklaven.

$$\begin{array}{ll} \rightarrow O_j(X_1, X_2, \dots, X_M) & \rightarrow \text{wenige Ordner} \\ X_i & M \ll N: \\ \rightarrow S_k(X_{M+1}, X_{M+2}, \dots, X_N) & \rightarrow \text{viele versklavte Freiheitsgrade} \end{array}$$

Man kann die Ordner O in der Menge aller Freiheitsgrade X durch eine Stabilitätsanalyse aufspüren. Eine pauschale thermodynamische Mittelung über alle Freiheitsgrade ist nach dem Auftreten der Ordner nicht mehr möglich. Herrmann Haken bietet in seiner "Theorie der Synergetik" ein mathematisches Eliminationsverfahren an, welches es gestattet, die versklavten Freiheitsgrade S_k einzig durch die Ordner O_j darzustellen, obwohl doch eigentlich jeder Freiheitsgrad von jedem Freiheitsgrad abhängt:

$$S_k = S_k(O_j), \quad k = 1, \dots, N \quad ; \quad j = 1, \dots, M$$

Hiernach folgen also die vielen versklavten Freiheitsgrade den wenigen Ordnern ohne jede Einschränkung. Alle S können durch die wenigen Ordner O bestimmt werden. Letztendlich bleiben nur noch wenige Gleichungen für die Ordner allein übrig.

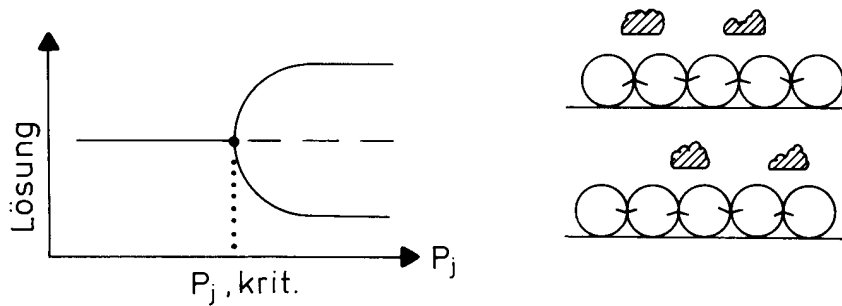
$$O_j = O_j(O_1, \dots, O_M; P_n), \quad M = \text{Zahl der Ordner}$$

Das sind ja auch die interessanten Freiheitsgrade, deren Entwicklung mit der Strukturbildung *identisch* ist. M ist deswegen viel kleiner als N , weil nur wenige der vielen $(N+M)$ anfänglichen Freiheitsgrade "zufällig" an vorgegebene Randbedingungen angepasst sein können und so den Evolutionsvorteil zur Entwicklung zu Ordnern erhalten.

Damit ist auch hier eine enorme Reduzierung der Zahl der Freiheitsgrade gelungen. Man beachte aber den Unterschied zur thermodynamischen Methode. Die Reduzierung erfolgt hier nicht durch eine pauschale Mittelung über alle Freiheitsgrade, sondern die Freiheitsgrade werden verschieden behandelt, je nachdem, ob sie am Bifurkationspunkt Anwachsen oder nicht.

Das hier angedeutete Eliminationsverfahren verdeutlicht auch, dass das Wachstum der Ordner ein autokatalytischer Prozess ist, also ein Prozess, der sich durch positive Rückkopplung selbst verstärkt. Ein Anwachsen der Ordner katalysiert über die Versklavung der übrigen Freiheitsgrade ein weiteres Anwachsen der Ordner. Dieser Verstärkungsmechanismus für *einige* Freiheitsgrade widerspricht natürlich total der Boltzmannschen Annahme einer gleichen Apriori-Wahrscheinlichkeit für alle Freiheitsgrade. Hier ist gewissermaßen die Dynamik des Selektionsvorganges sichtbar.

Es wurde schon erwähnt, dass am Bifurkationspunkt, also bei Erreichen eines kritischen Wertes der Umweltparameter P_n , mehrere neue Lösungen auftauchen können. Hiervon können auch mehrere stabil sein. In der Skizze ist als Beispiel der Fall angedeutet, dass eine einzige stabile Lösung übergeht in drei Lösungen. Zwei von ihnen sind stabil und entsprechen Rollenkonvektionen, wobei in den jeweiligen Aufwindgebieten die hier angedeuteten Wölkchen entstehen, die in der zur Zeichnung senkrechten Richtung den oben erwähnten Wolkenstraßen entsprechen.



Welche der beiden stabilen Lösungen wird das System also auswählen? Die deterministische Physik kann hierauf keine Antwort geben, sie ist absolut am Ende ihrer Weisheit. Man spricht hier schon von einer makroskopischen Unschärfe in Analogie zur Unschärferelation der Quantentheorie. Die beiden angedeuteten Rollenkonvektionen sind. Beide sind offenbar gleich gut an die Umwelt angepasst, aber die Wolkenstrassen liegen jeweils an verschiedenen Stellen. Man versetze sich in die Lage des armen Meteorologen, der die Lage der Wolkenstrasse prognostizieren soll, und der nach Methoden sucht, dieses zu tun. Er wird keine Methode finden. Welchen der beiden Zustände das System wirklich einnimmt, hängt vom Zufall ab, nämlich davon, welche der beiden Möglichkeiten am Bifurkationspunkt als Schwankung zufällig etwas stärker ausgeprägt war. Für diese arbeitet dann der autokatalytische Rückkopplungsprozess effektiver, d.h. der weitere Ablauf außerhalb der Bifurkationspunkte ist dann wieder determiniert.

Mathematisch bedeutet dies, dass die Gleichung obige $O_j = O_j(O_1, \dots, O_M; P_n)$ noch nicht vollständig ist. Es müssen noch Zufallsfunktionen hinzugenommen werden, die ja die Entwicklung der Ordnung mitbestimmen. Dadurch geht diese Gleichung in eine stochastische Differentialgleichungen über. - Die Synergetik kann man also als den Versuch ansehen, die deterministische Systemtheorie und die Theorie stochastischer Prozesse miteinander zu vereinen. In diesem Versuch spiegelt sich die Überzeugung wieder, dass Zufall *und* Notwendigkeit das Naturgeschehen beeinflussen. Der Zufall regiert an den Bifurkations - *Punkten*, die Notwendigkeit in den *Zweigen*. Die Welt ist also weder rein deterministisch, das wäre eine Welt, welche wie ein Uhrwerk abspulte und jede Freiheit zur Illusion machte, noch ist sie ausschließlich durch blinden Zufall bestimmt. Erst das Zusammenspiel von Zufall und Notwendigkeit zeichnet ein realistischeres Bild der Welt.

Ich möchte nun noch auf die Frage eingehen, ob die bis hier dargestellten Prinzipien der Strukturbildung auch ausreichen, die Entstehung des Lebens zu erklären oder ob da noch etwas "hinzukommen" muss. Leben ist ja noch um Größenordnungen komplexer und organisierter als etwa eine Konvektionszelle oder das chemische Muster im Reagenzglas. Es kommen mit Sicherheit noch weitere Prinzipien hinzu, von denen viel noch unbekannt sind. Das muss aber nicht heißen, dass diese außerhalb des Gültigkeitsbereiches der Naturgesetze liegen.

Einige zusätzliche Prinzipien können schon genannt werden. Die wohl aufregendste Erkenntnis ist die, dass in den Lebewesen die *Information* getrennt ist von der *Funktion*. Das ist in den Strukturen der unbelebten Welt offenbar nicht der Fall. Zum Beispiel ist die Information, die sich in der geometrischen Form einer Konvektionszelle manifestiert, unlösbar mit der Funktion des Wärmetransportes verknüpft. Beide bilden eine Einheit. In biologischen Systemen dagegen sind sie voneinander getrennt. Die Information ist im DNS - Molekül gespeichert, der berühmten Doppelhelix, und zwar in Form von Sequenzen von Nukleinsäuren. Diese Moleküle nehmen aber an den eigentlichen biochemischen Aktionen wie Stoffwechsel usw. gar nicht teil. Die Funktion wird von den Eiweißen übernommen, deren Bildung von der DNS gesteuert wird durch einen höchst raffinierten Mechanismus der Informationsübertragung. - Es ist interessant, festzustellen, dass für Lebensvorgänge nicht *nur* kohärente Strukturen wichtig sind, sondern dass auch kristallartige Strukturen mitgenutzt werden. Der Zusammenhalt der DNS erfolgt ja durch molekulare Kräfte. Die Doppelhelix, welche die Informationsspeicherung übernimmt, ist also eine Art Kristall aus Nukleotiden. Das Prinzip der Trennung von Information und Funktion hat zur Folge, dass das Prinzip des autokatalytischen Verstärkungsmechanismus bei der Stabilisierung der selektierten Zufallsereignisse nicht unmittelbar übernommen werden kann. Manfred Eigen hat herausgefunden, dass stattdessen eine zyklische Katalyse stattfindet, ein sogenannter Hyperzyklus: die Nukleotide katalysieren die Aminosäuren und die Aminosäuren die Nukleotide.

Worin liegt nun der Vorteil des Prinzips Trennung der Information von der Funktion für die Strukturbildung? Dadurch, dass die DNS nicht direkt an den Aktionen teilnimmt, ist die Information von all den Vorgängen weitgehend geschützt. Wenn also durch selektierte Mutationen erst einmal eine biologische Struktur entstanden ist, wird sie konserviert. Sie muss sich nicht gleich wieder auflösen, wenn die Umwelt sich ändert, so wie zum Beispiel die Sechseckzellen sofort wieder verschwinden, wenn der Temperaturgradient verschwindet. Das Leben hat sich so eine gewisse Eigenständigkeit und Unabhängigkeit von der Umwelt erworben. Andererseits sind Weiterentwicklungen der Struktur durchaus möglich, und dabei kann von dem jeweils erreichten Stand ausgegangen werden, es muss nicht jedes Mal bei null angefangen werden.

Durch diese Technik der Speicherung der Information des jeweiligen Standes der Strukturbildung ist es der belebten Natur möglich geworden, die Evolution zu einen geschichtlichen Prozess zu machen. Ein historisches Element ist auch schon bei der Strukturbildung in unbelebten Systemen enthalten. Nachdem eine Folge von Verzweigungen durchlaufen ist, hängt der Zustand ja von dem speziellen historischen Weg ab, den das System genommen hat, und nicht nur von den aktuellen Parametern des Systems. Das kann schon deswegen nicht sein, weil nichtlineare Gleichungen für einen Parametersatz mehrere Lösungen zulassen. Auch der Effekt der Hysterese ist in diesem Zusammenhang zu nennen. Dennoch ist die historische Komponente in der biologischen Strukturbildung ungleich wichtiger.

Im hydrodynamischen Experiment oder in der Atmosphäre findet Evolution von Strukturen aus Zufallsschwankungen nur für die Dauer des Experimentes bzw. für die Dauer des Aufrechterhaltens des Nichtgleichgewichtszustandes statt. Es ist wohl einsichtig, dass ein Zeitraum von Millionen von Jahren für die biologische Evolution komplexere Strukturen hervorbringen kann. Das Erreichen des unfassbar hochstrukturierten Zustandes war den lebenden Systemen also nur durch die Erfindung des konservativen Prinzips möglich. Die konservative Komponente enthält aber auch Gefahren, nämlich dann, wenn sich die Umwelt zu schnell ändert, so dass die Mutabilität nicht ausreicht, eine neue angepasste Struktur dem Selektionsmechanismus zur Verfügung zu stellen. Wenn zum Beispiel ein Nadelbaum eine Mutation hervorbringen würde, die den Stoffwechsel so verändert, dass ein saures Milieu einen Ernährungsvorteil bedeutet, so würde das in der heutigen Problematik des sauren Regens einen Selektionsvorteil bedeuten. Aber vermutlich reicht die Mutabilität für die schnelle Umweltveränderung, die der saure Regen mit sich bringt, nicht aus.

In hydrodynamischen Systemen dagegen, die das konservative Prinzip nicht erfunden haben, ist für jede Art der Umweltveränderung sofort die passende Schwankung da. Selbstverständlich kann das konservative Prinzip von den lebenden Systemen nicht aufgegeben werden, wie gesagt hat es die Bildung von Leben überhaupt erst ermöglicht. Es sieht so aus, als ob die Sexualität ein weiteres Prinzip der Strukturbildung wäre, welches den Nachteil des konservativen Systems teilweise wieder rückgängig machen kann. Dadurch, dass zwei verschiedene DNS - Informationsmoleküle zusammenkommen, können Mutationen, die im Augenblick noch keinen Vorteil bedeuten, in einer Hälfte des Chromosomensatzes gespeichert werden. "Gearbeitet" wird zunächst mit der anderen, dominanten Hälfte. Dennoch sind in der Vielzahl der Individuen einer Population auch viele Mutationen latent immer vorhanden, und wenn sich die Umwelt ändert, kann eine Anpassung viel schneller erfolgen, als wenn die geeignete Mutation erst abgewartet werden müsste.

Nachträge aus heutiger Sicht:

- 1) Bei der Durchsicht des dieses 27 Jahre alten Vortrags fiel mir auf, dass ich im "biologischen" Schlussteil etwas hochgestapelt habe. Jedenfalls sind die hier aufgeführten Erkenntnisse über das Zusammenspiel der kristallinen und der kohärenten Strukturen und die partielle Überwindung des Nachteiles der kristallinen Struktur durch Sexualität nicht der direkte Output meiner damaligen eigenen Forschung. Möglicherweise gehörte ein solches Klappern zum notwendigen Geschäft damaliger Habilitationsverfahren. Es war verpönt bis nicht erlaubt, das Thema des Habilitationsvortrages der Habilitationsschrift zu entnehmen, mit deren Herstellung man sich ja gerade einige Jahre lang fast ausschließlich befasst hatte. Leider kann ich heute die Quellen, aus denen ich für den Schlussteil dieses Vortrags recherchiert hatte, nicht mehr rekonstruieren. Ich habe ihn aber trotzdem nicht weggelassen, (aus meinem Vortragsmanuskript, aus den tatsächlich gehaltenen Vorträgen schon), denn ich finde die Thematik

auch heute noch extrem interessant. Vielen Dank, liebe vergessene Autorin oder lieber vergessener Autor! Und Sorry ...

- 2) Der Satzesatz des vorletzten Absatzes "... vermutlich reicht die Mutabilität für die schnelle Umweltveränderung, die der saure Regen mit sich bringt, nicht aus" entsprang allerdings meiner damaligen eigenen Überzeugung, über die ich mich aus heutiger Sicht fast schämen muss: Als kritischer Wissenschaftler, der ich ja sein wollte, hätte ich trotz des damaligen publizistischen Hochkochens des Themas "Waldsterben" dem Trommelfeuer nicht erliegen müssen, der mit Parolen wie "rettet den Wald", "erst stirbt der Wald und dann der Mensch" übersät war. Ich hätte schon damals erkennen können, dass Systeme, die dermaßen komplex sind wie dieses Ökosysteme, schlicht und einfach nicht vorhersagbar sind. Übrigens, warum spricht man heute so gut wie nicht mehr vom sauren Regen? Der industrielle Input in die Atmosphäre ist doch wohl in den letzten 40 Jahren nicht zurückgegangen? Vielleicht, weil saurer Regen u.a. CO₂ aus der Atmosphäre auswäscht, und das kann man für das heutige Trommelfeuer für eine CO₂ - bedingte Erderwärmung nicht gebrauchen?
- 3) Wie in diesem Vortrag kurz erwähnt, gibt es neben der hier hauptsächlich vorgestellten "Synergetik" mehrere Konkurrenztheorien zu Strukturbildungen, die heutzutage z.B. bei Google oder bei Wikipedia mit Schlagwörtern wie "Dissipative Systeme", "Hyperzyklen" oder "Selbstorganisierte Kritizität" leicht zu finden sind. (Die Theorie der selbstorganisierten Kritizität ist erst nach diesen Vorträgen hinzugekommen. Sie ist mit dem Namen Per Bak verbunden). Aus heutiger Sicht kann man sagen, dass sich keine von diesen stark voneinander abweichenden Theorien allgemein durchgesetzt hätte, und dass eine allgemeine Vorhersagbarkeit komplexer Systeme nicht erreicht wurde. (Die "Chaostheorie" möchte ich - anders als viele Autoren - nicht als Komplexitätstheorie bezeichnen, weil eine *Vernetzung vieler Freiheitsgrade* eine Vorbedingung für Komplexität sein sollte, für deterministisches Chaos aber keine solche Bedingung ist).
- Betrachten wir z.B. die Anwendbarkeit der Synergetik auf das komplexe Klimasystem. Die im Vortrag erörterte "Versklavung" vieler Freiheitgrade durch wenige "Ordner" könnte nahelegen, dem CO₂ - Gehalt eine solche Ordnerfunktion zuzubilligen. Dagegen sprechen aber mindestens drei Gründe: Zum ersten ist offenbar der "Laser" das einzige physikalische System, auf das die Synergetik bis hin zur Gewinnung prognostischer Gleichungen erfolgreich operationell angewendet werden konnte. Zum zweiten ist es selbst bei der extrem hypothetischen Situation der Anwendbarkeit der Theorie auch auf die Atmosphäre mit ihrem unermesslich höheren Komplexitätsgrad sehr unwahrscheinlich, dass innerhalb der ungezählten Freiheitsgrade, die alle im Rahmen ihrer Vernetzung durch Wechselwirkungen verstärkt oder abgeschwächt werden können, ausgerechnet das CO₂ zum Ordner würde. Und zum dritten wäre gerade *dann*, wenn auch das noch der Fall wäre, die Voraussetzung der Definition des Klimas als "gemittelttes Wetter" verlorengegangen, denn wie im Vortrag ausgeführt, wird bei jeder synergetischen "Versklavung" durch Ordner der thermodynamische Zweig verlassen, und damit auch die *Voraussetzung* für Mittelbildungen überhaupt.