

# 1 Das Zentralnervensystem als integrierter selbstorganisatorischer Prozess

## 1.1 Grundlegende Prinzipien selbstorganisatorischer Prozesse

Der Topos „Selbstorganisation“ wird im Zusammenhang mit Systemen verwendet, die sich „von selbst“, d.h. spontan und ohne Steuerung von außen strukturieren können. Kennzeichnend für selbstorganisatorische Systeme ist die Irreversibilität. Selbstorganisation lässt eine neue Form von Kreativität in der Materie erkennen.

Schon Kant setzte sich so mit der Idee der Selbstorganisation auseinander: „Man sagt von der Natur und ihrem Vermögen in organisierten Produkten bei weitem zu wenig, wenn man dieses ein Analogon der Kunst nennt; denn da denkt man sich den Künstler (ein vernünftiges Wesen) außer ihr. Sie organisiert sich vielmehr selbst und in jeder Spezies ihrer organisierten Produkte, zwar nach einerlei Exemplar im Ganzen, aber doch auch mit schicklichen Abweichungen, die die Selbsterhaltung nach den Umständen erfordert“.<sup>1</sup>

Kant erklärte angesichts der begrenzten Erfahrungstiefe der damaligen Wissenschaft die Fähigkeit der Materie zur Selbstorganisation als „unerforschte Eigenschaft“.

Der Begriff Selbstorganisation wird von Ebeling und Feistel so definiert: „Unter Selbstorganisation verstehen wir Prozesse, die weitab vom Gleichgewicht ablaufend durch systemimmanente Triebkräfte zu komplexeren Ordnungsstrukturen führen“.<sup>2</sup>

Die modernen Theorien der Selbstorganisation leiten sich aus vielen gedanklichen Zuflüssen ab. Dazu zählen u.a. die Kybernetik, die mit dem Namen Norbert Wiener verbunden ist, oder die Informationstheorie mit Claude E. Shannon als ihrem bekanntesten Vertreter, zum Aufbau der Theorie der Selbstorganisation hat vor allem allgemeine Systemtheorie Wesentliches beigetragen, die mit dem Namen Bertalanffy verbunden ist. Die Theorie der Selbstorganisation von einem physikalischen Zugang aus, hatte seit Beginn der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts eine rasante Entwicklung erfahren. Als Startpunkte dieser Entwicklung wären drei Arbeiten zu nennen: P. Glansdorff, I. Prigogine: *Thermodynamic Theory of Structure, Stability, and Fluctuations* (1971), zum anderen die Arbeit „*Synergetics*“ von Hermann Haken (1973) sowie „*The Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules*“ von Manfred Eigen (1971). Schon seit den vierziger Jahren des letzten Jahrhunderts arbeitete Prigogine an den Problemen der irreversiblen Thermodynamik und im Jahre 1971 gelang es ihm, deren Formalismus auf Ungleichgewichtsprozesse zu übertragen und in der oben genannten Arbeit zu veröffentlichen. Ilya Prigogine konnte in seinen Studien über die Thermodynamik irreversibler Prozesse eindrucksvoll zeigen, dass sich Systeme auch unter gleichgewichtsfernen Bedingungen zu stationären Nichtgleichgewichtszuständen mit einem annähernd linearen Verhalten entwickeln können.<sup>13</sup> Zur Aufrechterhaltung dieses Zustandes bedarf es aber einer dauernden Energiezufuhr. Bei einer weiteren Entfernung vom Gleichgewichtszustand, beispielsweise im Gefolge von Änderungen der Randbedingungen des Systems, werden zu irgendeinem Punkt solche Zustände erreicht, bei denen Ir-

1 Kant, I. (1924): *Kritik der Urteilskraft* 65, B 293, 6. Aufl. hrsg. v. K. Vorländer. Leipzig, S. 237.

2 Ebeling, W., Feistel, R. (1994): *Chaos und Kosmos*. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin Oxford, S. 35.

reversibilität auftritt. Selbstorganisation erfordert neben einer überkritischen Distanz zum Gleichgewicht auch eine nicht lineare Dynamik des Systems, die in der Regel durch Rückkopplungseffekte bedingt ist. Unter den herrschenden Bedingungen von Nicht-Linearität sind solche Zustände von Instabilität möglich, die spontan in die Bildung von neuen räumlichen, zeitlichen bzw. raumzeitlichen Mustern und Strukturen einmünden können. Dissipative Strukturen sind Manifestationen von Selbstorganisationsprozessen, die in den einzelnen Realitätsschichten verschiedene Formen annehmen können. In chemischen Systemen können dies rhythmische Veränderungen der Zusammensetzung oder der Konzentration der Stoffe sein. Dabei handelt es sich um kohärente Bewegungen von Milliarden Molekülen. Kennzeichnend für alle lebenden Systeme sind vor allem nicht lineare rückgekoppelte Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten, wie wir es von den katalytischen Netzwerken von Enzymen und Nukleotiden her kennen. Ähnliche Muster sind auch im Verhalten von Insektenpopulationen zu beobachten und selbst im Bereich menschlicher Gesellschaften. Die überwältigende Mehrzahl von Krankheitsprozessen folgt einer selbstorganisatorischen Dynamik, die durch Rückkopplungsphänomene gekennzeichnet ist: Die dynamischen Musterbildungen im Bereich der großen integritätserhaltenden Systeme des Menschen, angefangen auf der Ebene der Gene bis zum Immunsystem und weiteren Systemen des Körpers, gehen aus nicht linearen selbstorganisatorischen Prozessen hervor. Wir werden zeigen, dass auch das Verhalten der neuronalen Netzwerke auf allen Ebenen des Zentralnervensystems auf der Basis selbstorganisatorischer Prozesse stattfindet und die Vermutung liegt nahe, dass das gesamte System der Evolution auf der Basis derartiger Prozesse stattfindet. Die Entwicklung der dissipativen Systeme ist durch unterschiedliche Phasen gekennzeichnet: In der einen Phase entwickeln sich selbstorganisatorische Systeme auf der Grundlage von deterministischen bzw. quasideterministischen Gesetzmäßigkeiten. Hierbei folgen die Mittelwerte der Variablen einer kausalen Entwicklung. In einer anderen Phase kann das System in einen Zustand von zunehmenden Fluktuationen eintreten, so dass das globale Verhalten des Systems einen abrupten Umschlag erfährt. Dies hat zur Folge, dass jenseits der kritischen Parameter bestimmte Moden der Fluktuation verstärkt werden, welche die Keime zu neuen Strukturen beinhalten. Die durch Selbstorganisation entstandenen Strukturen sind in der Regel sowohl durch Randwerte als auch durch innere Faktoren bedingt.<sup>3</sup> Biologische Systeme bilden also neue Formen bei überkritischer Distanz zum Gleichgewichtszustand unter Zuführung von hochwertiger Energie aus. Systeme, die Übergänge in solche Zustände durchlaufen, werden demzufolge als selbstorganisierende Systeme bezeichnet. Mit den gleichgewichtsfernen Situationen verbinden sich Begriffe wie Empfindlichkeit, Instabilität, Stochastik und Verzweigung (Bifurkation).

Instabilität bedeutet, dass Fluktuationen die globale Entwicklung eines Systems bestimmen können. Ereignisse können infolgedessen nicht mehr auf ein regelmäßiges, reproduzierbares Verhalten reduziert werden. Vielmehr hängt es von den Umständen ab, ob Ereignisse kausal wirksam werden: Ein und dasselbe Ereignis kann völlig vernachlässigbar sein, wenn das System stabil ist und das gleiche Ereignis kann für das Verhalten des Systems dann wesentlich werden, wenn das System unterwegs in

3 Ebeling, W., Feistel, R. (1994): Chaos und Kosmos. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin Oxford, S. 41.

Richtung auf einen Nichtgleichgewichtszustand ist. Systeme sind dann nicht mehr kontrollierbar beschreibbar. Damit kommt nach Prigogine ein narratives Element in die Physik.<sup>4</sup> An den sogenannten Verzweigungspunkten, d.h. im Bereich von kritischen Schwellenwerten, wird das Systemverhalten zunehmend instabil und kann sich zu unterschiedlichen stabilen Funktionsweisen hin entwickeln.

Fluktuationen und abrupte Änderungen des Verlaufes können bei einer Vielzahl von Krankheitsverläufen vom Kliniker beobachtet werden. Jeder klinisch tätige Arzt kennt diese kritischen Situationen, in denen nicht mehr zu prognostizieren ist, wie sich der Zustand eines Patienten entwickeln wird. Bei einem am einfachsten anzunehmenden Verzweigungspunkt wird ein Zustand instabil, während zwei andere mögliche stabile Zustände symmetrisch hervortreten. Das Verhalten des Systems ist zu diesem Zeitpunkt nicht weiter deterministisch, vielmehr tritt in den Verzweigungssituationen ein unüberwindliches probabilistisches Moment hervor. Die Wahrscheinlichkeit, das System nach einem Verzweigungspunkt in einem der beiden Zustände anzutreffen, beträgt dann 50:50. Ein System, das vom Gleichgewichtszustand weggedrängt wird, kann darüber hinaus viele Zonen der Instabilität durchqueren, in denen es zu qualitativen Veränderungen seines Verhaltens kommen kann – so kann es beispielsweise in ein chaotisches Verhalten umschlagen, d.h. sein Verhalten ist nur noch teilweise kohärent, sein Verhalten wird von weitreichenden Korrelationen bestimmt, und es ist unvorhersehbar geworden.<sup>5</sup> Beispiele für Selbstorganisationsprozesse sind vielfältig in den Bereichen der Chemie, der Physik, der Astronomie und vor allem in den lebenden Systemen zu finden.

Die Selbstorganisation ist der Elementarprozess der Evolution, die als unbegrenzte Folge selbstorganisatorischer Prozesse verstanden werden kann. In Sinne eines selbstorganisatorischen Narratives handelt es sich bei den Prozessen auf der Erde und im Kosmos um Evolutionsprozesse, die nur im Zusammenhang mit ihrer Geschichte, d.h. der gesamten Kette verursachender Selbstorganisationsprozesse, verstanden werden können. Prozesse der Selbstorganisation entwickeln sich nicht selten aus kinetischen Übergängen, die mit steigender Abweichung vom Gleichgewicht bei bestimmten kritischen Parameterwerten auftreten können. Hier hat die Wissenschaft der Synergetik wertvolle Arbeit geleistet.

## 1.2 Synergetische Gesichtspunkte in der Organisation des Zentralnervensystems

Synergetik ist ein Begriff, der von Hermann Haken (1969,1977) vorgeschlagen wurde, um ein interdisziplinäres Forschungsgebiet zu umreißen, das zum Ziel hat zu verstehen, wie sich Muster in offenen Nichtgleichgewichtszuständen bilden.<sup>6</sup> Lebende Systeme sind von einem kontinuierlichen Zufluss an Materie und/oder Energie abhängig.

Wie können viele individuelle Teile eines Systems miteinander kooperieren, um neue raumzeitliche Strukturen oder Prozesse zu entwickeln? Auf diesem Gebiet

4 Prigogine, I., Stengers, I. (1993): Das Paradox der Zeit, S 93.

5 Prigogine, I., Stengers, I. (1993): Das Paradox der Zeit, S. 97.

6 Haken H. (1969): Vorlesung an der Universität Stuttgart. Haken H. (1975): Cooperative Phenomena in Systems Far from Thermal Equilibrium and in Non-Physical Systems. Ich: Reviews of Modern Physics 47, S. 67-121- Haken, H. (1977): Synergetics: An Introduction. Springer Verlag Berlin.

wurden enorme Fortschritte geleistet, wie die Natur in offenen physikalischen, chemischen und biologischen Systemen Muster erzeugt.<sup>7</sup> Auch den synergetischen Konstruktionsprinzipien einer Theorie der Selbstorganisation liegen die Konzepte von Instabilität und Fluktuationen und darüber hinaus die Konzepte von Ordnungsparametern und Versklavung zugrunde. Hakens paradigmatisches Ausgangsmodell war der Laser, an dem nachzuweisen ist, wie durch das kohärente Zusammenwirken von Komponenten, d.h. in diesem Fall von Elektronen, das monochromatische Laserlicht entstehen kann.<sup>8</sup> Normales weißes Licht aus der Glühlampe besteht aus einem Gemisch von Wellen unterschiedlicher Frequenz und Phase. Die gesamte Energie des elektrischen Feldes eines Laserstrahles geht dagegen aus einem einzigen monochromatischen Wellenzug hervor. Dieses selbstorganisatorische Verhalten von Laserlicht erfolgt nicht durch regulatorische Einflüsse von außen, sondern durch Kooperation der Komponenten des Laserstrahls miteinander.

Ein System kann mehrere Konfigurationen oder Verhaltensmuster einnehmen, die auch als Moden bezeichnet werden. Ändern sich die äußeren Randbedingungen, so kann ein solches System in einen neuen Modus eintreten. Größen, welche kollektive Moden beschreiben, werden Ordnungsparameter genannt.

Ein ähnlicher Ansatz liegt Manfred Eigens Theorie eines Kooperationsverbundes zugrunde, den er als Hyperzyklus bezeichnet hat.<sup>9</sup>

Um die selbstorganisierte Bildung von Mustern in komplexen Systemen zu verstehen mussten zuvor die mathematischen Werkzeuge der nicht linearen Dynamik entwickelt werden. In der Physik werden die Übergänge zwischen verschiedenen Aggregatzuständen der Materie – fest, flüssig, gasförmig – als Phasenübergänge bezeichnet. Wenn sich Dampf in Eis verwandelt ist dies ein Beispiel für einen Übergang von Unordnung in Ordnung. Nicht lineare Prozesse, die weitab vom Gleichgewicht stattfinden, sind reich genug, um biologische Selbstorganisation zu ermöglichen. Biologische Systeme, einschließlich des Gehirns, existieren nahe an Grenzen, die reguläres von irregulärem Verhalten trennen. Sie überleben somit an der Grenze zur Instabilität. Wie noch zu zeigen ist, so ist auch das Gehirn sowie das Zentralnervensystem als Ganzes ein Beispiel für ein aktives selbstorganisatorisches System. Einen der wesentlichen Kernpunkte der Synergetik ist im Begriff der Komplexität verinnerlicht: Es besteht eine starke Evidenz für die Annahme, dass biologische Systeme multifunktional operieren. Dabei werden mehrere Muster gleichzeitig gebildet. Das heißt: Der gleiche Satz von Systemkomponenten kann sich für verschiedene Funktionen selbst organisieren oder verschiedene Komponenten können sich für die gleiche Funktion selbst organisieren. Diejenigen Prozesse, welche bestimmen, wie ein Muster aus Myriaden von Möglichkeiten selektiert wird, werden von den Gesetzen der Selbstorganisation erfasst. Diese Bestimmung erfolgt im Rahmen von Kooperation und Wettbewerb. Von Herrman Haken wurde in diesem Zusammenhang das Prinzip der Ordnungsparameter auf folgenden Grundlagen formuliert: Bei der Untersuchung von Selbstorganisationsprozessen steht in der Regel nur eine Zeitskala im Mittelpunkt des Interesses. Alle schnelleren Prozesse werden als stationär oder

7 Kelso J.A.S. (1997): Im Organismus sind neue Gesetze zu erwarten: Synergetik von Gehirn und Verhalten. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin Oxford, S. 157-183.

8 Haken, H. (1983): Synergetik. Eine Einführung, Berlin, Springer Verlag.

9 Eigen, M (1987): Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie, Piper München.

quasistationär betrachtet und die entsprechenden dynamischen Variablen werden durch ihre stationären oder Mittelwerte ersetzt. Diese Variablen wurden von Haken als „versklavte“ Moden bezeichnet. Die wesentlich langsameren Prozesse werden als statistische äußere Bedingungen aufgefasst und ihre Variablen werden einfach festgesetzt und als Kontrollparameter bezeichnet. Die eigentlich interessanten Größen sind somit die Ordnungsparameter, die in den meisten Fällen nur wenige Größen, d.h. von 1-5 beinhalten. Ein eindimensionales System wäre demnach ein System mit nur einem Ordnungsparameter.

Als Paradebeispiel für spontane Musterbildungen gilt die Rayleigh- Bénard-Instabilität. Hierbei wird eine Flüssigkeit erhitzt. Alle Moleküle in der Flüssigkeit folgen zunächst einer zufälligen, d.h. ungeordneten Bewegung. Wenn die Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und der Unterfläche des Flüssigkeitsspiegels gering ist, so ist keine sichtbare Bewegung der Flüssigkeit auf der makroskopischen Skala erkennbar. In diesem Stadium ist die Wärme zwischen den Teilchen noch als mikroskopische Bewegung verteilt. Dennoch besteht auch hier ein geringes Temperaturgefälle zwischen oben und unten. Das System wird über ein Temperaturgefälle aktiviert, das in der Sprache der Synergetik als Kontrollparameter bezeichnet wird. Wächst dieser Kontrollparameter an, so entsteht Instabilität und die Flüssigkeit beginnt sich in rollenförmigen Mustern, die an Bienenwaben erinnern, zu bewegen: Milliarden von Molekülen stehen in einem kooperativen Zusammenhang und entwickeln Muster in Raum und Zeit. In der Synergetik spielt die Amplitude der Rollbewegung die Rolle eines Ordnungsparameters oder einer kollektiven Variablen: Alle Teile der Flüssigkeit sind nicht mehr unabhängig voneinander, sondern sind in einen geordneten Kooperationsmodus hineingesaugt. Nahe an der Instabilität wird das Verhalten des makroskopischen Systems nur durch einige wenige kollektive Modi, d.h. die Ordnungsparameter beherrscht. Sie sind die einzigen Variablen, um sich entwickelnde Muster erschöpfend zu beschreiben. Diese Kompression der Freiheitsgrade nahe an den kritischen Punkten wird als Versklavungsprinzip bezeichnet, dem Haken eine mathematische Form für eine große Klasse an Systemen gegeben hat: Im Organismus sind neue Gesetze zu erwarten: Synergetik von Gehirn und Verhalten.<sup>10</sup> Dieses Temperaturgefälle wird in der Sprache der Synergetik als Kontrollparameter bezeichnet. Diese sichtbare Rollenbewegung wird im allgemeinen Sprachgebrauch als Konvektion bezeichnet. Der Grund für die Konvektion ist darin zu sehen, dass die kühlere Flüssigkeit, die sich ja am oberen Rand des Gefäßes befindet, dichter ist und die Tendenz hat, herunterzusinken, während die wärmere und weniger dichte Flüssigkeit am erhitzten Boden des Gefäßes die Tendenz hat, aufzusteigen. Weitere Beispiele stellen die Bildung von typischen Konzentrationsmustern bei chemischen Reaktionen dar, wie der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion, aber auch das Einsetzen von kohärentem Laserlicht. Allen diesen Reaktionen ist gemeinsam, dass die Entstehung der Muster als Resultat der kooperativen Dynamik des Systems zustande kommt - ohne Einwirkungen von außen. Diese Muster sind Produkte der Selbstorganisation. Der Ordnungsparameter wird durch die Kooperation der verschiedenen Systemkomponenten etabliert, der umgekehrt wiederum das Verhalten der einzelnen Teile bestimmt. Es handelt sich dabei

10 Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin Oxford (1997) S. 161-162). Haken, H. (1977): Synergetics: An Introduction. Springer Verlag, Berlin.

um das Beispiel einer zirkulären Kausalität, der wir an zahlreichen Stellen des Buches wieder begegnen werden. Das Ergebnis der genannten Prozesse ist eine enorme Kompression von Informationen. Zirkuläre Kausalität ist typisch für nicht lineare Prozesse weitab vom thermodynamischen Gleichgewicht: Die Information fließt nicht in eine Richtung, beispielsweise von der DNA zu RNA und nicht umgekehrt, wie früher angenommen wurde. Vielmehr fließt die Information immer wieder zurück. Die selbstorganisatorischen Systeme sind zudem durch weitere Eigenschaften gekennzeichnet wie Fluktuation und Symmetriebrechung. Das Wechselspiel zwischen Zufälligkeit (stochastisch) und Auswahl bestimmt die Muster, die gebildet werden. Die Fluktuationen testen fortwährend die Stabilität der Zustände und gestatten dem System, neue zu entdecken. Eine ausgezeichnete kurze prägnante und gut verständliche Übersicht zur Bedeutung der Fluktuation findet sich in dem Artikel von J.A.S. Kelso und H. Haken über „Neue Gesetze im Organismus: Synergetik von Gehirn und Verhalten“.<sup>11</sup> In selbstorganisatorischen Systemen können sich auf diese Weise immer neue Muster mit immer größerer Komplexität bilden. Das System kann derart angetrieben werden, dass es in einen turbulenten Zustand übergeht. Das Verhalten der Systeme kann sich diskontinuierlich und abrupt ändern, wenn ein Kontrollparameter einen kritischen Wert überschreitet. Es kann zu Nichtgleichgewichtsphasenübergängen kommen oder zu Bifurkationen. Muster, die bei Nichtgleichgewichtszuständen bevorzugt auftreten, werden Attraktoren genannt: Viele unabhängige Trajektorien mit unterschiedlichen Ausgangsbedingungen konvergieren im Laufe der Zeit zu einer gemeinsamen Attraktorlösung. Die resultierende Musterdynamik ist nicht linear. Daraus erschließt sich die reiche Komplexität des Verhaltens, einschließlich eines zufälligen, stochastischen Verhaltens oder eines Verhaltens analog eines deterministischen Chaos in den Systemen des Lebens. Diese grundlegenden Variationen von Mustern sind vor allem auch in den Funktionen der neuronalen Netzwerke, speziell des Gehirns, zu beobachten.

Die heutige komplexe Welt kann somit nur als Resultat eines umfassenden grundlegenden Prozesses der Selbstorganisation verstanden werden. Die Evolution der lebenden Systeme ist nicht nur eine Evolution auf der Basis der Gesetze von Selektion, Auslese, Survival of the fittest, sie ist vielmehr ihrem Wesen nach ein aller biologischen Materie zugrunde liegender selbstorganisatorischer und damit kreativer schöpferischer Prozess. Evolution ist kreativ.

### 1.3 Chaos und Ordnung in selbstorganisatorischen Systemen

Jede chemische Reaktion, jedes in den neuronalen Netzwerken gebildete Muster, jede Repräsentation im Gehirn, jeder Prozess im Ablauf einer Krankheit, ja jede neu gebildete Information markiert einen Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft. Nach dem von Clausius aufgestellten zweiten Hauptsatz der Thermodynamik verursachen alle natürlichen Prozesse eine Zunahme der Entropie. Jede chemische Reaktion entwickelt sich ohne Einwirkung von außen auf einen Gleichgewichtszustand hin und damit in den Zustand einer Gleichförmigkeit, der zum Verschwinden

<sup>11</sup> In: Was ist Leben? Die Zukunft der Biologie...S163-- Kelso, J.A.S. (1997): Im Organismus sind neue Gesetze zu erwarten: Synergetik von Gehirn und Verhalten. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin Oxford, S. 157-183. Haken, H. (1983): Synergetik. Eine Einführung, Berlin, Springer Verlag.

ihrer Anlässe führt. Lange galt die Turbulenz in Flüssigkeiten als ein typisches Beispiel für Unordnung und ein Kristall erschien als Inbegriff von Ordnung. Nach der Chaostheorie, insbesondere nach den Arbeiten von I. Prigogine ist ein turbulentes System in Wirklichkeit ein geordnetes System: Im Zustand der Turbulenz sind die Bewegungen zweier Moleküle, zwischen denen ein makroskopischer Abstand besteht, korreliert. Die Atome eines Kristalls schwingen dagegen inkohärent um ihre Gleichgewichtslage: Der Kristall ist hinsichtlich seiner Anregungsmoden (seiner Wärmebewegung) ungeordnet<sup>12</sup>. Der Aufbau komplexer Biomoleküle beruht auf der Zerstörung anderer Moleküle durch den Stoffwechsel, wobei die gekoppelten Prozesse in der Summe einer positiven Entropieerzeugung entsprechen. Sowohl Ordnung als auch Unordnung sind Bestandteil und Produkt von korrelierten Entwicklungsprozessen. Dissipative Strukturen sind solche Strukturen, die nur solange existieren können, wie das System Energie dissipiert und Entropie erzeugt. Nach Prigogine kann die Entropieänderung beliebiger Systeme unterteilt werden in:

- Entropieproduktion  $d_i S$  im Inneren eines Systems im Gefolge der dort ablaufenden irreversiblen Prozesse und
- in den Entropiefluss  $d_e S$  über die Grenzen des Systems in die Umgebung hinein oder aus ihm heraus nachfolgender Formel:

$$dS = d_i S + d_e S$$

Bei reversiblen Prozessen ist  $d_i S = 0$ . Bei irreversiblen Prozessen ist  $d_i S > 0$ .<sup>13</sup>

Der Unterschied zwischen einem geschlossenen und offenen System besteht darin, dass in einem abgeschlossenen System keine Information verworfen wird. Damit ist das Verhalten des Systems reversibel und die Phasenvolumina bleiben erhalten. In offenen Systemen geht Information an die Umwelt verloren, das Verhalten des Systems ist nicht reversibel und das Phasenvolumen des Systems kann abnehmen.

Für lebende Systeme ist somit festzuhalten, dass die in diesen Systemen im Gefolge der irreversibel ablaufenden Prozesse zunehmende Entropie durch einen Abtransport in die Umgebung wieder kompensiert wird.

Unter den herrschenden Bedingungen von Nicht-Linearität sind Instabilitäten möglich, die in die spontane Bildung von neuen räumlichen, zeitlichen oder raumzeitlichen Mustern und Strukturen einmünden können.

Ein Beispiel aus der Hydrodynamik für die spontane Musterbildung in dissipativen Systemen ist die schon oben genannte „Bénard-Instabilität“. Das Auftreten einer kollektiven Flussdynamik ist gleichbedeutend mit einer Brechung der räumlichen Symmetrie: In Gleichgewichtsnähe war die Bewegung der Moleküle inkohärent und zufällig. Bei Wärmezufuhr nahmen die Moleküle ein kohärentes kollektives Verhalten an.<sup>14</sup>

12 Prigogine, I., Stengers, I. (1993): Das Paradox der Zeit... S 80.

13 Prigogine I. (1969): Structure, Dissipation and Life. In: Theoretical Physics and Biology (Ed. M. Marois). North Holland, Amsterdam.

14 Prigogine, I., Stengers, I. (1993): Das Paradox der Zeit. Piper Verlag München Zürich, S. 82-83.

## 1.4 Emergenz als grundlegende Eigenschaft selbstorganisatorischer Systeme

Sowohl in der Theorie der selbstorganisatorischen Systeme als auch in den Kognitionswissenschaften stößt der Emergenzbegriff als eine Art von Mittelweg zwischen Vitalismus und Mechanismus auf zunehmendes Interesse.

Eine allgemein akzeptierte Verständigung auf die inhaltlichen Kennzeichen von Emergenz existiert bis dato allerdings noch nicht: In den Naturwissenschaften soll unter diesem Begriff das Verhalten komplexer Systeme mit spontanen Musterbildungen beschrieben werden, in den Kognitionswissenschaften und in der Philosophie des Geistes wird dieser Begriff in dem Zusammenhang gebraucht, wenn auf die Unmöglichkeit einer Reduktion von mentalen auf physische, d.h. mit den Naturgesetzen definierbare, Vorgänge abgehoben wird. Es kann somit auch nicht verwundern, dass in diesem Zusammenhang verschiedene begriffliche Spielarten genannt werden. So wird unter einem schwachen, synchronen und diachronen (Struktur-)Emergentismus unterschieden. Von diesen begrifflichen Ausdeutungen ist der schwache Emergentismus mit einigen reduktionistischen Positionen kompatibel. Diese Form des schwachen Emergentismus liefert eine gemeinsame Basis für die meisten anspruchsvollen Emergenztheorien. Der diachrone Emergentismus berücksichtigt vor allem Aspekte der Unvorhersagbarkeit und Neuartigkeit, während der synchrone Emergentismus vor allem das Merkmal der Irreduzibilität betont. Die Thesen des schwachen Emergentismus basieren vor allem auf den Thesen eines physischen Monismus, der These der systemischen Eigenschaften und der These der synchronen Determiniertheit. Damit sind solche Thesen angesprochen, die durchaus mit reduktionistischen Positionen vereinbar sind. In der These des physischen Monismus sind beispielsweise begriffliche Zuordnungen wie „res cogitans“ oder „Entelechie“ nicht enthalten.

Lebende Systeme, darunter auch die Lebewesen mit Bewusstsein, bestehen aus den gleichen Bausteinen wie die unbelebten Objekte. Emergente Eigenschaften, Dispositionen oder Verhaltensweisen werden im physischen Monismus nur aus physischen Komponenten instanziiert. Nach der These der systemischen Eigenschaften sind beispielsweise die Fähigkeit zu fliegen oder sich zu bewegen, als solche Eigenschaften zu bezeichnen, die aus dem kollektiven Zusammenwirken der Systemkomponenten hervorgehen und die nicht primäre Bestandteile des Systems selbst sind. Sie reflektieren damit das System als Ganzes, wobei kein Teil dieses Systems eine solche Eigenschaft aufweist. Die These der synchronen Determiniertheit spezifiziert mehr den Typ des Verhältnisses, das zwischen der Mikrostruktur eines Systems und dessen emergenten Eigenschaften besteht. Diese These zielt darauf ab, dass es keinen Unterschied in den systemischen Eigenschaften geben kann, ohne dass es zugleich Unterschiede in Anordnung oder Eigenschaften der Systembestandteile gibt.<sup>15</sup> In der Natur ist auf Auftreten von neuen emergenten Eigenschaften keineswegs selten, sondern überall zu finden. Die Welt ist voll von Eigenschaften, die auf Systemebene auftreten und nicht auf der Ebene der Systemkomponenten.

15 Stephan, A. (2006): Zur Rolle des Emergenzbegriffes in der Philosophie des Geistes und in der Kognitionswissenschaft. In: D. Sturma: Philosophie und Neurowissenschaften. Suhrkamp Verlag Frankfurt a.M., S. 147-149.

Im Zusammenhang mit dem Emergenzbegriff offenbart sich die Schwierigkeit, das Auftreten von Kognition und Bewusstsein mit den Mitteln der Physik oder Neurobiologie befriedigend zu lösen.

Es wird von Neurobiologen und Philosophen zwar wiederholt vorgetragen, dass die neurobiologische Aktivität, die Repräsentation von sensorischen Ereignissen im Gehirn und damit auch das Bewusstsein nichts anders seien als das Gehirn selbst, dass Bewusstsein und Gehirn somit wesensgleich seien. Damit sei, wenn nicht heute, so doch in absehbarer Zukunft das Bewusstsein vollständig in physikalischen Parametern beschreibbar

Dem ist allerdings entgegenzuhalten, dass die Physik noch nicht einmal eine Antwort darauf zu liefern vermag, was Materie und Energie im eigentlichen Sinne sind. Die Physik legt nur Messmethoden fest und erstellt auf der Basis der Verknüpfung von Messresultaten Theorien auf. Mathematik und Physik sind ihrer Herangehensweise nach gigantische syntaktische Gebäude, denn sie behandeln ihre Fragestellungen in einem abstrakten Raum von Zeichenbewertungen. Mathematische Formeln haben ihre Bedeutung, aber diese Bedeutung kann auf Zeichenmechanismen zurückgeführt werden. Die physikalische Formel bezieht sich auf die reale Welt, ohne diese selbst zu sein. Sie ist ihrem Wesen nach eine Reduktion, indem sie die Bedeutung einer Messung auf eine Dimension reduziert, für die Zahlenwerte ausreichend sind.<sup>16</sup> Physikalische Theorien enthalten somit in gewisser Weise Informationen über die Natur, denn wir sind mit ihr in der Lage, konkrete Aussagen über den Ausgang eines Experimentes zu gewinnen. Es gibt aber keinen direkten Kurzschlussweg zwischen Natur und ihrer theoretischen Beschreibung.

Die theoretische Beschreibung von Naturphänomenen in der Physik besteht somit ausschließlich in der Verknüpfung von Messgrößen. Physik fragt nicht nach dem Wesen oder gar nach dem Sinn von Wirklichkeiten. Die Physik weiß nicht, was Masse und Energie „wirklich“ ist, dennoch wurden im Rahmen wissenschaftlicher Konzepte präzise mathematische Begriffe formuliert, mit denen ausgewählte Eigenschaften und ihr Verhalten unter Beobachtungsbedingungen beschrieben werden können.

Wissenschaft beschränkt sich immer auf Realdefinitionen, in denen die Art der Messung und die Einheiten, in denen gemessen wird, angegeben sind.

16 Zemnek: In Folberth, S. 25.

## 2 Attraktoren als Modelle für die Selbstorganisationsprozesse lebender Systeme

### 2.1 Mathematische Grundlagen

Der Begriff Attraktor ist ein tiefgründender Begriff, der die Spiegelwelt von Ordnung und Chaos in den Prozessen lebender Systeme miteinander verbindet.

Die Bahnkurven im Geltungsbereich der Newtonschen Physik folgen stetigen Verläufen.

Dissipative Systeme sind Systeme mit einer besonderen Art von Reibung. Ein kennzeichnendes Merkmal ist der Verlust an Energie: Ein Pendel, das in der Luft frei schwingt, weist Dissipation durch Reibung an den Luftmolekülen auf und muss zu irgendeinem Punkt zur Ruhe kommen, wenn nicht Energie von außen zugeführt wird.

Mit den Modellen von Attraktoren lassen sich viele selbstorganisatorische Prozesse im Körper und damit auch im Bereich des Zentralnervensystems zumindest im Prinzip und unter entsprechender Verallgemeinerung darstellen. Das mathematische Grundgerüst von Attraktoren beruht auf nicht linearen Differenzialgleichungen.

Zwischen dem Eingang  $X_n$  und dem Ausgang  $X_{n+1}$  eines biologischen Prozesses besteht eine nicht lineare Beziehung, d.h. das dynamische Gesetz  $x_{n+1} = f(X_n, C)$  ist komplexer als die einfache Proportionalität  $X_{n+1} = KX_n$ . Die Qualität der Lösungen dieser Gleichung hängt von der Größe  $C$  ab, die in jedem iterativen Prozessschritt hineingegeben ist. Diese Prozesse streben drei möglichen Endungen zu:

1. Der Endwert  $X$  nähert sich einem Grenzwert, den er im Asymptotischen, d.h. im Unendlichen erreicht, was bei linearen Differenzialgleichungen der Fall ist.
2. Der Prozess mündet in eine harmonische Schwingung ein (Pendelbewegung, Planetenumlauf) ein.
3. Der Prozess hat einen unbestimmten Ausgang, der somit unvorhersagbar ist.

In der physikalischen und physiologischen Realität sind alle drei Möglichkeiten vorhanden. Die meisten vorkommenden Systeme sind Mischsysteme mit teilweise chaotischen Lösungen.<sup>17</sup>

Typisch für eine nicht lineare Dynamik sind abrupte Richtungsänderungen, Zufallsbewegungen und eine hohe Empfindlichkeit der Systeme gegenüber Veränderungen der Ausgangsbedingungen. Die Dynamik dieser komplexen Systeme ist Inhalt der Chaostheorie, die sich zu einem der fruchtbarsten Zweige der modernen Naturwissenschaften entwickelt hat. Im Geltungsbereich dieser Chaostheorie arbeiten viele wissenschaftliche Disziplinen, die sich beispielsweise mit Wetterbeobachtungen, mit den Stoßwellen von Überschallflugzeugen, mit den oftmals chaotischen Ausschlägen der Aktienmärkte, aber auch der chaotischen Rhythmik des Herzschlages und der elektrischen Gehirnaktivität, den Schwankungen des Blutdruckes, der hormonellen Systeme bis zu den großen Steuerungs- und Regelkreisen des Organismus beschäfti-

<sup>17</sup> Cramer, F. (1993): Chaos und Ordnung. Insel-Verlag, S.185.

gen. Die schier ins Unendliche gehende Variabilität der Muster in fließendem Wasser haben die Künstler zu allen Zeiten inspiriert. Auch das Genie Leonardo da Vinci hatte sich intensiv mit den Fließeigenschaften des Wassers beschäftigt. So gelangen ihm faszinierende und naturgetreue Skizzen von Turbulenzen und Wirbelbildungen. Turbulenz ist eine typische Eigenschaft des Chaos. Die Phänomene der Turbulenz sind für viele Gebiete der Wissenschaft, angefangen bei der Astronomie, Luftfahrt und Meteorologie bis hin zur Medizin von großer Bedeutung. Moderate Turbulenzen sind physiologischerweise in den peripheren Blutgefäßen oder im Bereich der Herzklappen bei jedem gesunden Menschen nachweisbar, starke und strömungsrelevante Turbulenzen im Bereich der Herzklappen können dagegen Hinweiszeichen auf insuffiziente Herzklappen oder auf arteriosklerotische Gefäßverengungen sein.

Stationäre Turbulenzen werden auch als Attraktoren bezeichnet. Die verschiedenen Zustände, die ein dynamisches System durchläuft, modellieren Bahnkurven, die auch als Trajektorien bezeichnet werden. Die mannigfaltigen Bewegungsmoden der Milliarden von Wasserteilchen einem strömenden Bach können somit auf spezifischen Trajektorien dargestellt werden.

Die Bewegungen von Wasserteilchen im Einzugsbereich einer Turbulenz folgen Trajektorien auf annähernd zirkulären Bahnkurven um das Zentrum dieser Turbulenz, d.h. sie bauen einen Attraktor als Modell eines relativ stabilen Bewegungsmusters in einem fließenden dynamischen System auf.

Im Jahre 1976 machte Otto E. Rössler die Entdeckung, wie auf eine einfache elementare Weise Chaos in einem zeitkontinuierlichen System konstruiert werden kann. Hierzu gelang ihm ein einfacher mathematischer Formalismus, der auch von einem Laien nachvollzogen werden kann, der dem Modell seines Attraktors zugrunde liegt:<sup>18</sup>

$$x' = -(y + z)$$

also:

$$x' = -(y + z)$$

$$y' = x + ay$$

$$z' = b + xz + xz - cz$$

Die drei Koeffizienten a, b, c sind Konstanten, die geeignet gewählt werden können. Die Parameter a und b bleiben fest, während c variiert wird:

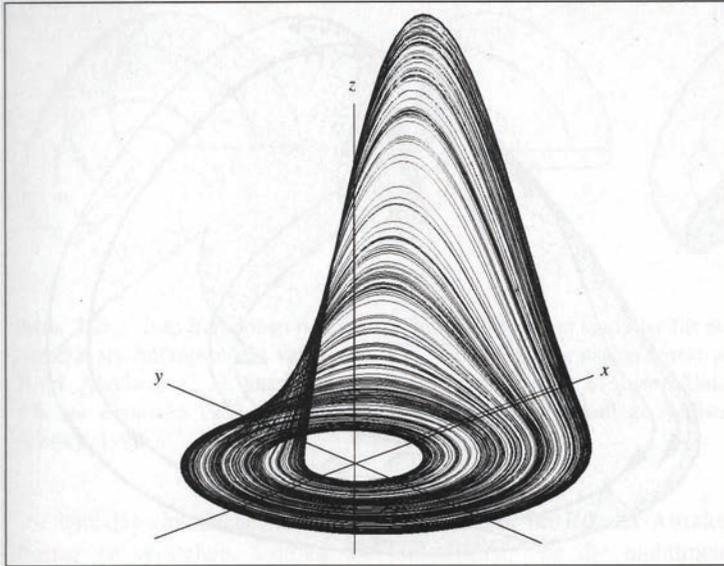
$$a = 0.2, b = 0.2$$

In diesem System sind also drei Variablen enthalten: x, y, z. Das System kann somit als ein System von Bewegungsgesetzen für einen Punkt mit den Koordinaten (x, x, z) im dreidimensionalen Raum aufgefasst werden. Bei gegebenen Anfangskordinaten  $(x_0, y_0, z_0)$  definiert das System eine eindeutige Trajektorie, die durch die Zeit t parametrisiert ist und die Gleichungen zu allen Zeiten erfüllt. Werden die Koordinaten dieser Trajektorie zum Zeitpunkt t mit  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$  bezeichnet so bedeutet dies:

18 Rössler, O. E. (1976): An equation for continuous chaos, Phys. Lett. 57A, 379-398.

$$\begin{aligned}x'(t) &= -(y(t) + z(t)) \\y'(t) &= x(t) + ay(t) \\z'(t) &= b + x(t)z(t) - cz(t)\end{aligned}$$

Wird diese Trajektorie mit den Koordinaten  $(x, y, z)$  im dreidimensionalen Raum aufgezeichnet, so erhält man einen visuellen Eindruck von diesem Rössler-Attraktor (siehe Abbildung).



Die Bahnen auf dem Attraktor winden sich aus dem Ursprung heraus und verlaufen meist in der Nähe der  $xy$ -Ebene. Übersteigt der Abstand einer Bahn vom Ursprung einen kritischen Wert, so führt die Bahnkurve aus der  $xy$ -Ebene heraus. Nachdem sie einen maximalen  $z$ -Wert erreicht hat wird sie wieder in denjenigen Bereich des Attraktors gebogen, der sich nahe der  $xy$ -Ebene um den Ursprung windet: Je näher die Auslenkung in  $z$ -Richtung ist, desto näher kommt die Bahn an den Ursprung zurück. Dieser Prozess wiederholt sich immer wieder.<sup>19</sup>

Attraktoren als mathematische Objekte repräsentieren spezifische Regionen in einem Phasenraum, auf welche die Trajektorien der Systemprozesse hin konvergieren. Sie können die Form eines Punktes aufweisen oder sie können beispielsweise auch in der Form von periodischen Schleifen vorhanden sein. Periodische Muster werden als Grenzyklen bezeichnet. In Abhängigkeit von ihrem mathematischen Grundgerüst können sie noch weitaus komplexere Gebilde modellieren, beispielsweise eine geometrische Form von der Art eines Torus. Attraktoren können zudem auch fraktale geometrische Eigenschaften aufweisen, die weiter unten zur Besprechung

19 Peitgen, H. O., Jürgens, H., Saupe, D. (1998): Chaos. Bausteine der Ordnung. Rowohlt Verlag, S. 250-252.

kommen werden. Das Langzeitverhalten von dissipativen Systemen kann sich somit auf vergleichsweise „einfache“ Bewegungsmuster wie Grenzyklen einpendeln.

Als ein Beispiel für einen Grenzyklus aus der Alltagsrealität wären die Pendelbewegungen eines mechanischen Uhrwerkes zu nennen: Nähert sich das Pendel dem höchsten Punkt seiner Schwungbahn, so verlangsamt es seine Geschwindigkeit immer mehr und kommt an diesem höchsten Punkt kurzzeitig zur Ruhe. Von diesem Ruhepunkt aus schlägt es anschließend den Weg in die Gegenrichtung ein, wobei es wieder an Geschwindigkeit gewinnt, bis es mit Höchstgeschwindigkeit den tiefsten Punkt seiner Bahn erreicht hat. Anschließend strebt es wieder mit nachlassender Geschwindigkeit dem höchsten Punkt auf der Gegenseite zu. In einer idealen Newtonschen Welt ohne Reibungsverluste könnte das Pendel für ewige Zeiten so weiterschwingen. In der physikalischen Realität dagegen bewegt sich das Pendel zwischen Geschwindigkeitsextremen hin und her, wobei die Geschwindigkeit an den beiden Punkten, die am weitesten von seiner Mittellage entfernt sind, gegen Null geht. Dieses Hin- und Herschwingen des Pendels kann unter idealen Bedingungen im Vakuum als komplette Kreisform in einem Zustandsraum abgebildet werden. Versetzt man dem Pendel einen zusätzlichen Impuls durch einen kräftigen Stoß, so erhöht es entsprechend seine Geschwindigkeit, damit schwingt das Pendel weiter aus und der Durchmesser seiner Kreisform nimmt entsprechend zu. Unter realistischen Bedingungen ist aber der Luftwiderstand mit einzuberechnen. D.h., das Pendel schlägt auch gegen den Luftwiderstand aus und verliert dabei an Energie. Mit der Zeit werden dann seine Ausschläge immer kleiner und seine Geschwindigkeit verlangsamt sich. In einem solchen realen Zustandsraum beschreibt das Pendel im Gefolge dieser kontinuierlichen Energieverluste also eine spiralförmige Bewegung nach innen, bis das Pendel schließlich in einem Mittelpunkt mit einem Impuls und einer Auslenkung Null zur Ruhe kommen muss. Dieser Mittelpunkt, auf welchen das Pendel zustrebt, wird von den Mathematikern Attraktor genannt. Attraktoren üben also quasi eine Art von Anziehungskraft auf dynamische Systeme aus. In einer vom Uhrmacher exakt eingestellten mechanischen Uhr erhält das Pendel in regelmäßigen Abständen einen Stoß und damit eine Energiezufuhr. Diese Energiezufuhr ist zeitlich exakt auf die Schwingungsmodi abgestimmt. D.h. die Uhr geht mit der Zeit nicht langsamer und muss nicht nachgestellt werden. Die Uhr gibt somit immer genau die Zeit an.

Grenzyklen sind in vielen Bereichen der Natur zu sehen. Ein eindrucksvolles Beispiel für einen solchen Grenzyklus liefern die Populationsuntersuchungen von Raub- und Beutetieren: Auch das Verhalten zwischen Beute und Räuber findet in der Art eines Schwingungsmodus zwischen Raubtier und Beute statt, ähnlich einem Pendelausschlag: Von Jahr zu Jahr erreichen periodisch einmal die Karpfen und einmal die Hechte ihre höchsten Populationsziffern. Man weiß aus Untersuchungen, dass sich die Anzahl der Hechte und Karpfen immer wieder an ihren ursprünglichen Grenzyklus annähern. Auch wenn eine Krankheit die Karpfen nahezu ausrotten sollte, so wird sich die Population unter verbesserten Bedingungen spiralförmig in den ursprünglichen Grenzyklus annähern. Solche Systeme sind in ihrer inhärenten Dynamik somit bemerkenswert stabil.

Grenzyklen können auch in gegenseitige Wechselwirkungen eintreten. Dabei entstehen höher dimensionale Attraktorgebilde, beispielsweise Torusattraktoren. Mathematiker können mit Tori beliebig hoher Dimension umgehen. Gekoppelte Bewegungen eines Paares von Oszillatoren können als eine Linie betrachtet werden, die sich um einen Torus schlingt. Dies zeigt auf, dass die Oberfläche eines Torus selbst der Attraktor ist. Stehen die Perioden oder Frequenzen der beiden gekoppelten Systeme in einem einfachen Verhältnis zueinander, wenn beispielsweise die Frequenz des einen Systems doppelt so groß ist wie die Frequenz des anderen Systems, so passen die beiden Windungen um das Torussystem genau zusammen: Das kombinierte System ist streng periodisch aufgebaut. Das Verhältnis von gekoppelten Schwingungen kann aber auch „irrational“ sein. Dies ist bei positiven und negativen Rückkopplungen der Fall: Während sich rationale Zahlen, beispielsweise  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$  etc. als Dezimalbruch mit einer endlichen Anzahl von Ziffern darstellen lassen oder als einfacher Dezimalbruch  $1/3$ , so lassen sich irrationale Zahlen nicht mehr als Bruch aufschreiben. In ihrer Darstellung als Dezimalzahl tritt eine unendliche Zahl von Ziffern ohne sich wiederholende Muster auf. Die Ziffern sind wie zufällig angeordnet. Ergibt also das Verhältnis der Frequenzen von gekoppelten Schwingungen eine irrationale Zahl, so wandert ein gedachter Punkt um den Torus herum und trifft sich selbst niemals wieder: Das System ist als quasiperiodisch zu bezeichnen.<sup>20</sup> Es gibt unendlich viele rationale Zahlen, jedoch haben die Mathematiker gezeigt, dass die Anzahl der irrationalen Zahlen noch weitaus größer ist. Es scheint sich so zu verhalten, dass quasiperiodische Systeme das Universum und damit auch die Prozesse des Lebens beherrschen. Man weiß auch, dass die meisten Planetenbahnen quasiperiodisch sind. In den Saturnringen wurden „Lücken“ gefunden, die durch nicht lineare Wechselwirkungen (positive Rückkopplungen) durch die inneren Satelliten des Saturns verursacht werden. Diese Lücken entsprechen einfachen Verhältnissen zwischen den Rotationsperioden der Ringe und der Monde, welche diese Störungen verursachen. Bei Detailuntersuchungen findet man heraus, dass innerhalb dieser Lücken wiederum Lücken existieren, als ob es sich um Kaskaden von Spiegelungen eines Gegenstandes handeln würde, der zwischen zwei Spiegeln steht. Mathematisch gesehen bedeutet dies, dass der Torus der Saturnringe sich in immer kleinere Tori aufspaltet. Einige dieser Tori bleiben stabil, andere jedoch nicht.<sup>21</sup>

## 2.2 Chaos und seltsame Attraktoren

In nicht linearen rückgekoppelten Systemen, und dies gilt auch und insbesondere für die Systeme des Lebens, sind Zufälligkeit und Ordnung miteinander verwoben, das Einfache schließt das Komplexe ein und das Komplexe umfasst wiederum das Einfache. Gesetzmäßigkeit und Chaos wechseln sich auf immer kleineren Skalen ab, was als „fraktal“ bezeichnet wird. Beim Chaos handelt es sich um eine subtile Form von Ordnung.

20 Biggs, J., Peat, F. D. (1993): Die Entdeckung des Chaos. Dtv Taschenbuch München, S. 55-56.  
 21 Briggs, J., Pea, D. (1993): Die Entdeckung des Chaos. Dtv Verlag München, S. 61.

Turbulenzen sind Beispiele für seltsame Attraktoren: In der Turbulenz hat das System viele Freiheitsgrade angenommen. Turbulenzen können im Organismus an vielen Stellen auftreten und krankheitsrelevant sein. So können Turbulenzen im Herzkreislaufsystem zu thromboembolischen Komplikationen führen. In einem zunehmend turbulenten Fluss kann jedes Strömungselement als Auslöser von Zufällen für jeden anderen Teil dienen. Der Fluss erzeugt die Zufälle aus seiner Ganzheit heraus. Die Liapunow-Zahl ist ein Maß dafür, wie schnell benachbarte Punkte, bzw. wie schnell benachbarte Elemente in einem Fluss sich voneinander entfernen, sie gibt somit ein Maß dafür an, wie schnell Korrelationen in einem System zerstört werden können und wie schnell sich die Wirkung einer Störung auszubreiten vermag.

Seltsame Attraktoren sind durch eine hochkomplexe Struktur gekennzeichnet und sie sind durch chaotische Eigenschaften geprägt.

Als geometrische Objekte sind seltsame Attraktoren Fraktale und als dynamische Objekte sind sie chaotisch. Der erste seltsame Attraktor, der in der Naturwissenschaft im Jahre 1962 weithin bekannt wurde, ist der Lorenz-Attraktor. Das geometrische Modell dieses Attraktors wurde von John Guckenheimer und Philip Holmes entworfen.<sup>22</sup>

13 Jahre vor der Etablierung des oben genannten Rössler-Attraktors entwarf der Meteorologe Edward N. Lorenz einen nach ihm benannten und im populärwissenschaftlichen Schrifttum oft dargestellten Attraktor, dessen Gleichungen ähnlich wie beim Rössler Attraktor lauten.<sup>23</sup>

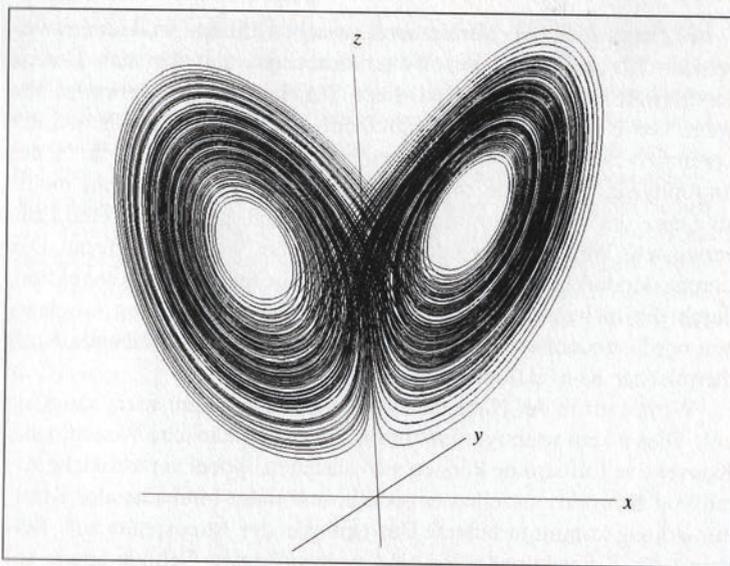
$$\begin{aligned}x' &= -\sigma x + \sigma y \\y' &= Rx - y - xz \\z' &= -Bz + xy\end{aligned}$$

Die Zahlen  $\sigma$ ,  $B$  und  $R$  sind die physikalischen Parameter, die von Lorenz auf

$$\sigma = 10, B = \frac{3}{8}, R = 28$$

festgelegt wurden.

<sup>22</sup> Guckenheimer, J., Holmes, P. (1983): *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*, Springer Verlag New York.  
<sup>23</sup> Lorenz, E. N. (1963): *Deterministic nonperiodic flow*, *J. Atmos. Sci.* 20, S.130-141).



Die Abbildung zeigt den zugehörigen Attraktor, der im Gegensatz zum Rössler-Attraktor zwei Kompartimente aufweist, in denen sich die Trajektorien spiralförmig nach außen winden.

Das Lorenz-Modell ist ein mittlerweile als klassisch zu bezeichnendes Modell für thermische Konvektion: Wird nämlich Luft in der Nähe der Erdoberfläche erwärmt, so steigt die Luft auf und es können verschiedene Arten von Konvektionszellen, darunter auch die beschriebenen Bénard-Zellen. In diesen hexagonalen oder walzenförmigen Zellen steigt die angewärmte Luft in der Mitte auf, kühlt sich in höheren Luftschichten ab und sinkt am Rand der Zellen wieder nach unten. Auf diese Weise können bei hinreichender Krafteinwirkung turbulente Bewegungen in der Atmosphäre auftreten.

Die Rekonstruktion chaotischer Attraktoren führt zu Algorithmen, mit denen numerische Größen wie Dimensionen und Ljapunov-Exponent bestimmt werden können. Derartige numerische Größen dienen als Maß dafür, wie chaotisch und seltsam ein Attraktor ist.

Mathematisch gesehen umfasst ein Attraktor also eine endliche Menge an Zuständen, die ein System durchlaufen kann. Dabei werden in der Realität aber nie exakt gleiche, sondern immer nur ähnliche Zustände durchlaufen: Satelliten kehren auf ihrer Umlaufbahn um die Erde niemals exakt genau an ihren Ausgangspunkt zurück, sondern sie weichen immer um einen mehr oder weniger großen Betrag davon ab. Die Bahnkurven der Satelliten folgen somit keiner exakten Kreisbahn in einer exakten Periodizität, sie treffen nach einem Erdumlauf nicht mehr genau an ihrem Ausgangspunkt ein, sie nähern sich diesem vielmehr nur unter mehr oder weniger großen Abweichungen an. Ein solches Verhalten wird als Ergodizität bezeichnet. Würde man beispielsweise einen gedachten Schnitt durch einen exakt determinis-

tischen Kreisprozess führen, so würde man immer nur einen Schnittpunkt treffen, da sich ja alle Punkte des Prozesses auf dieser einen und idealen Kreislinie befinden. In quasi-periodischen Prozessen, wie zum Beispiel beim Umlauf eines Satelliten um die Erde, erhält man eine große Menge an verschiedenen Schnittpunkten, im Extremfall bei unendlich vielen quasiperiodischen Durchläufen auch eine unendliche Menge an Schnittpunkten. Bei quasiperiodischen Prozessen käme somit ein ganzes Netzwerk an Schnittflächen zur Darstellung, wollte man sie in einem Phasenraum abbilden. Derartige Gitternetzwerke, die auch homoklines Gewirr genannt werden, sollen Poincare einmal zu der Aussage veranlasst haben: „Die Dinge sind so bizarr, dass ich es nicht ertrage, weiter darüber nachzudenken“.

In den nicht linearen rückgekoppelten Systemen sind Zufälligkeit und Ordnung miteinander verwoben, das Einfache schließt das Komplexe ein und das Komplexe umfasst wiederum das Einfache. Gesetzmäßigkeit und Chaos wechseln sich auf immer kleineren Skalen ab, was als „fraktal“ bezeichnet wird. Beim Chaos handelt es sich um eine subtile Form von Ordnung.

Die komplexen Systeme der Natur behalten ihre Baupläne und ihr Aussehen auf immer kleineren Skalen im Detail bei. Die fraktalen Verzweigungsmuster der großen Arterien zeigen das nahezu gleiche komplexe Erscheinungsbild auf immer kleineren Skalen bis hinunter zu den Kapillaren. Fraktale können als Linien bezeichnet werden, die durch unendliches Detail charakterisiert sind, beispielsweise durch unendliche Längen, durch gebrochen zahlige Dimensionen und durch Selbstähnlichkeit und sie lassen sich durch Iteration erzeugen. Ein typisches Beispiel einer derartigen fraktalen Kurve ist die nach Guiseppe Peano genannte Kurve, die derart komplex aufgebaut ist, so dass sie Flächencharakter aufweist. Diese Kurve ist bei der Betrachtung auf immer kleineren Skalen von so extremer Unregelmäßigkeit gekennzeichnet, so dass ihre fraktale Dimension annähernd zwei ist. Sie bildet derartig viele Windungen aus, so dass sie jeden Punkt einer Fläche erreicht. Und dennoch kommt es nirgendwo zu einer Überschneidung. Ein anderes Beispiel für ein solches Fraktal ist die sog. Koch-Kurve, die in ihrer Form starke Ähnlichkeiten zu einer Schneeflocke aufweist. Diese Kurve geht aus einem Iterationsprozess hervor, in dessen Verlauf gleiche Schritte auf immer kleineren Skalen wiederholt werden.

Eine Mandelbrot-Menge mit den sie umgebenden und von ihr kontrollierten Julia-Mengen geht aus einer ähnlichen nicht linearen Gleichung hervor. Diese bekannten Figuren entstehen in rückgekoppelten Gleichungen

$$X_{n+1} = X_n^2 + C$$

worin C eine komplexe Konstante ist. Die Mandelbrot-Menge, die wegen ihrer Gestalt auch als Apfelmännchen bezeichnet wird, hat an seinen chaotischen Rändern fraktale Dimensionen und bei jeweils höherer Auflösung zeigen sich immer neue und verfeinerte Abbildungen von Julia-Mengen.

Daraus werden die Zusammenhänge von Attraktoren und Fraktalen ersichtlich: Auf einem seltsamen Attraktor kommen diejenigen Spuren von Systemzuständen zur Darstellung, die ein System im Phasenraum mit der Zeit durchläuft.

### 2.3 Attraktoren und Fraktale im Organismus

Die allermeisten Systeme in unserem Organismus sind dissipative selbstorganisatorische Systeme, die ihre Quellen für Ordnung auf den verschiedenen Ebenen durch Konvergenz auf kleinere Attraktoren in ihren Phasenräumen etablieren und erhalten. Die eigentliche Quelle der in ihnen bestehenden Ordnung geht aus der Art und Weise hervor, wie dynamische Trajektorien im Phasenraum des Systems auf kleinere Attraktoren konvergieren:

Der gesamte integrative Attraktor des Gehirns baut sich aus den dynamischen Trajektorien auf, die auf kleinere Attraktoren konvergieren:

Es wurde gezeigt, dass die Trajektorien auf komplexen Attraktoren bzw. seltsamen Attraktoren durch eine ungemein hohe Komplexität gekennzeichnet ist. Seltsame Attraktoren modellieren somit fraktale Kurven. Fraktale Kurven und fraktale Objekte sind auf immer kleineren Skalen selbstähnlich: Für Systeme, die sich unter dem Einfluss eines seltsamen Attraktors befinden, stellt jede einzelne Bewegungsform ein Spiegelbild des gesamten Prozesses dar. In den komplexen Systemen des Lebens, darunter der Medizin, vor allem aber auch in den Bereichen der Systeme des zentralen Nervensystems haben wir es mit Attraktorengelbilden zu tun, die durch eine große Anzahl von Variablen aufgebaut sind. Diese Attraktoren stehen zudem in Wechselwirkungen miteinander, wobei Trajektorien von einem Attraktor zu einem anderen Attraktor springen können. Die Dynamik dieser Systeme ist nicht linear, teilweise stetig und damit differenzierbar, teilweise jedoch sprunghaft und undifferenzierbar und oft in der Nähe zu Chaos und Turbulenz. Wir können chaotische Zustände als Zustände einer impliziten Ordnung erkennen, die sich im geometrischen Aufbau von komplexen Attraktorengelbilden immer wieder findet. Das Prinzip der Selbstähnlichkeit geht aus der Iteration der grundlegenden Rechenschritte hervor, wobei das Ergebnis eines Rechenschrittes als Eingabe im nächsten Rechenschritt erscheint. Dadurch erklärt sich die Wiederholung von Details auf immer kleineren Skalen. Selbstähnlichkeit ist auf allen Ebenen der Welt nachzuweisen und sie kommt auf der zellulären Ebene, im Aufbau der Organe bis zur Verteilung der Galaxien im Universum zur Darstellung: Das Detail spiegelt das Ganze und der Verlauf einer Trajektorie auf einem Attraktor spiegelt die strukturelle Dynamik des Ganzen. Die Welt der nicht linearen selbstorganisatorischen Prozesse ist eine Welt der Ganzheitlichkeit. Fraktale sind einerseits außerordentlich komplex und dennoch einfach. Sie sind komplex wegen ihren unendlichen Details und ihrer einzigartigen mathematischen Eigenschaften. Kein Fraktal ist mit dem jeweils anderen völlig gleich. Und dennoch sind sie einfach, weil sie im Gefolge fortlaufender Iterationsschritte entstehen. Darin ist einer der Gründe zu sehen, dass derartige komplexe Systeme nicht vollständig analysierbar sein können. Aus diesen Gründen von Selbstähnlichkeit und Iteration sind komplexe Systeme letzten Endes auch nicht vollständig analysierbar, weil sie nicht vollständig auf ihre Teile reduzierbar sind. Dies gilt für alle selbstorganisatorischen Systeme des Körpers und zumal für die Zustände des Gehirns. Es kann schon vorab gesagt werden, dass jede sensorische Wahrnehmung durch fraktale Trajektorienbahnen auf den Attraktoren der neuronalen Aktivität gespeichert ist und damit die Zustände der Systeme als Ganzes spiegelt. Jeder Bahndurchgang

ist auf den bei jedem Vergrößerungsschritt im immer subtiler erscheinenden und bis in das Unendliche geschachtelte Detail solcher Attraktoren gespeichert. Ein Speicherproblem stellt sich insofern nicht, weil die Speicherkapazität aus der komplexen Geometrie von Attraktoren und ihrer im Detail immer komplexer erscheinenden Feinstruktur hervorgeht. Jedes Detail spiegelt das Ganze und das Ganze wirkt auf das Detail zurück.

## 2.4 Krankheit und Selbstorganisationsprozesse: Eine Einführung

Hohe Grade an Vernetzungen und Wechselwirkungen sprechen für hohe Komplexität. Komplexe nicht lineare Systeme, beispielsweise die Systeme des Stoffwechsels, finden im physiologischen Zustand in der Nähe zum Chaos statt. Hierbei handelt es sich nicht landläufig verstanden um chaotische Zustände im Sinne von nahezu völliger Unordnung, sondern um stabile Zustände von hoher Sensibilität und Flexibilität: Alle Systeme des Organismus, angefangen bei der DNS über die Zellen und Organe bis zum Zentralnervensystem, müssen flexibel auf die sich stets verändernden Bedingungen reagieren können.

So erfolgen die Kontraktionen des Herzens nicht nach dem Muster eines exakten periodischen Pendelschlages, vielmehr könnte ein völlig gleichmäßiger periodischer Herzschlag Hinweise auf eine Herzerkrankung geben. Die komplexen Verzweigungen der Gefäßbäume in unserem Körper oder die Netzwerke der Herzkranzgefäße sind durch fraktale geometrische Prinzipien aufgebaut und die quasizyklischen Muster der elektrischen Aktivität des Herzens sind durch Attraktoren darstellbar. Im Zustand von Kammerflimmern ist dieser Attraktor aus seiner Ruhelage geraten und strebt jetzt dem Chaos zu. Ein elektrischer Stromstoß, oder die Gabe von bestimmten Medikamenten soll diesen in seinem Phasenraum dislozierten Attraktor wieder in seine Ausgangslage zurückverlagern.

Krankheiten sind durch krankheitsspezifische Selbstorganisationsprozesse mit abrupten Phasenübergängen, Unstetigkeit und gehäuftem Auftreten von Fraktalen charakterisiert. Krankheiten sind Selbstorganisationsprozesse eigener Art innerhalb der integrierten Selbstorganisationsprozesse des Körpers. Eine ganze Anzahl von Krankheiten ist durch für sie typische Verläufe gekennzeichnet. Diese sind zumindest im Prinzip mathematisch durch nicht lineare Differenzialgleichungen als Grundlage für Attraktorenmodelle darstellbar. Denn Attraktoren stellen das optisch heraus und machen dasjenige sichtbar, was das Denken überschreitet.

### 3 Zum Informationsbegriff im Zusammenhang mit selbstorganisatorischen Systemen des Lebens

Der Informationsbegriff leitet sich ursprünglich vom platonisch-aristotelischen Eidosbegriff ab und findet sich u.a. in der scholastischen Philosophie des Thomas von Aquin als Grundbegriff der aristotelischen Abstraktionslehre. In der modernen Philosophie wurde dieser Begriff mehr und mehr von der Seinslehre auf die Erkenntnislehre verlegt, wobei sich der Begriff Eidos, Struktur von der Struktur eines Objektes auf das menschliche Subjekt verlegte<sup>25</sup>, wobei dieser Begriff zur Beschreibung eines geistigen (Descartes) oder sinnesphysiologischen Vorgangs (Locke) herangezogen wurde.

Der Begriff der Information findet mittlerweile eine vielschichtige Deutung in den verschiedenen Wissensgebieten der Physik, Biologie, Sprachwissenschaft, Psychologie und Medizin und ist zu einer Zentralmetapher einer Vielzahl von fachüberschreitenden Theorien aufgestiegen, beispielsweise der Informationstheorie, Kommunikationstheorie, Systemtheorie, Kybernetik und Semiotik. Alle diese Theorien beschäftigen sich mit der Frage, wie Information erzeugt, dargestellt, übertragen und verarbeitet werden kann. Entsprechend groß ist damit auch die Begriffsverwirrung über das, was mit dem Begriff Information eigentlich gemeint ist. In diese Richtung zielt Norbert Wieners tautologisch anmutende Definition: „Information ist Information, weder Materie noch Energie“.<sup>26</sup>

Der Informationsbegriff ist vielfältig und vielschichtig hinsichtlich folgender Gesichtspunkte:

1. Die Informationsmenge als nachrichtentechnisches Maß (Shannon)
2. Information als Äquivalent der Steuerung (gespeichertes Programm)
3. Information als Gradient möglichen Wissens (semantisches Informationsmaß)
4. Information als strukturbestimmendes Element
5. Information als Maß für Komplexität
6. Information als Abbild von realen Dingen (informatrische Modelle, Simulation).<sup>27</sup>

Die Beziehung zwischen Entropie und Informationsmaß ist qualitativ und wesentlich, weil sie Physik und Informationstheorie koppelt. Jede Änderung der Unbestimmtheit in einem System ist mit einer Änderung der Entropie verknüpft. Der Erhalt einer Information über ein System wird mit der Übernahme von Entropie bezahlt, d.h. ein Informationsstrom ist stets von einem proportionalen Entropiestrom begleitet. Nach einer von Szilard-Brillouin formulierten Relation ist dagegen nicht jede Entropieübertragung mit einer Informationsübertragung verknüpft.

<sup>25</sup> Öser, E., in: Folberth, O. G., Hackl, C. (1986): Der Informationsbegriff in Technik und Wissenschaft, Oldenbourg Verlag, München, Wien, S. 231.

<sup>26</sup> Wiener in: Oeser, E.: Der Informationsbegriff in der Philosophie und Wissenschaftstheorie. In: Folberth, O. G., a.a.O., S. 231.

<sup>27</sup> Ganzhorn, K.: Information, Strukturen und Ordnungsprinzipien. In: Folberth, O. G., a.a.O., S. 106.

Diese Relation besagt zudem, dass die Informationsübertragung stets kleiner als die Entropieübertragung ist. Weil im Zustand eines thermodynamischen Gleichgewichtes die Entropie und damit die Unbestimmtheit maximal ist, erfordern Informationsprozesse Nichtgleichgewichtsbedingungen. Diese Feststellung unterstreicht die Bedeutung der Information in evolvierenden Nichtgleichgewichtssystemen. So gesehen, kann Informationsverarbeitung als eine Form der Selbstorganisation angesehen werden.<sup>28</sup>

Gewinnung von Information kostet also Entropie, wobei 1 bit mindestens  $k_B \ln 2$  beträgt. Aufnahme und Ausgabe von Information sind also mit irreversiblen Entropiekosten verbunden. Ein Informationssystem muss demnach in der Lage sein, Entropie abzugeben, z.B. in Form von Wärme oder Strahlung.<sup>29</sup>

Ebeling und Feistel unterscheiden streng zwischen gebundener und freier Information.<sup>30</sup> Diese Unterscheidung ist grundlegend auch für einige Aussagen in diesem Buch im Zusammenhang mit der neuronalen und mentalen Aktivität. Gebundene Information liegt in jedem physikalischen System vor und ihr universelles quantitatives Maß ist die Entropie des betrachteten Zustandes. Diese Information ist nativ, gewissermaßen verhüllt. Sie repräsentiert sich selbst und ist eine unmittelbare materielle Eigenschaft des betrachteten Systems. Freie Information ist stets Teil einer Beziehung zwischen zwei Systemen, dem Sender und Empfänger. Sie entspricht einer binären Relation zwischen zwei Systemen. Weil sie eine Relation darstellt, ist sie keine unmittelbare Systemeigenschaft. Sie ist wesentlich etwas anderes als ein normales physikalisches Objekt. Sie hat einen Zweck, sie verfügt über eine gewisse Unabhängigkeit vom Träger und sie ist an die Existenz von mindestens zwei Systemen gebunden, die sie aus gebundener Information extrahieren, austauschen, speichern, verarbeiten, um sie wieder in gebundene Information verwandeln, beispielsweise zu dem Zweck, ein Programm oder einen Bauplan zu erstellen. Die konkrete Bindung an den materiellen Träger ist für den Inhalt der Information nicht relevant. Freie Information ist eine abstrakte oder auch eine geistige.<sup>31</sup> Zweck ist ein Terminus, der nur für Lebewesen eine Bedeutung hat. So verstanden hätte freie Information außerhalb der Lebewesen keine Existenz. Feistel<sup>32</sup> konnte zeigen, dass es ein Maß für die Information ist die Auftrittswahrscheinlichkeit einer Nachricht. Shannon entwickelte eine operationale Definition der Information einer Nachricht als Folge von binären Möglichkeiten. Dieser Binärcode, bestehend aus dem Abzählen von Bits, bezeichnet die effektivste Methode zur Handhabung von Information. Die Semantik und das damit zusammenhängende Effektivitätsproblem werden dadurch aber nicht gelöst. Keines dieser Probleme lässt sich durch bloßes Abzählen von Bits lösen. Das reine Abzählen von Bits steht also in der Hierarchie der Probleme im Zusammenhang mit der Ausdeutung des Informationsbegriffes relativ weit unten. Nutzlos ist auch das bloße Sammeln von Information. Von einer Information kann man nur dann sprechen, wenn sie einen beobachtbaren Einfluss hat. Aus diesem Grunde haben die Physiker Gell-Mann und Jim Hartle versucht, den aus der Quantenphysik

28 Ebeling, W., (1991): Chaos-Ordnung-Information. Verlag Harri Deutsch Frankfurt a.M., S. 61.

29 Ebeling, W. a.a.O., S. 64.

30 Ebeling, W., Feistel, R. (1994): Chaos und Kosmos. Spektrum Akad. Verlag Heidelberg/Berlin/Oxford, S. 55.

31 Ebeling, W., Feistel, R., (1994): Chaos und Kosmos, S. 56.

32 Feistel, R. (1990): Ritualisation und die Selbstorganisation der Information. In: Selbstorganisation, Jahrbuch der Komplexität (U. Niedersen, Hrsg.) Duncker & Humblot Verlag Berlin.

bekanntem Begriff des Beobachters zu formalisieren.<sup>33</sup> Ihr Konzept bezeichneten sie als IGUS (Information Gathering and Utilizing System).<sup>34</sup>

Im Vergleich der Shannon'schen Informationsgröße mit der Boltzmann'schen Definition der Entropie gelang erstmalig ein Brückenschlag zwischen einer physikalischen und informatorischen Größe: Die Informationsmenge zur Beschreibung eines Systemzustandes ist umso größer, je kleiner dessen Entropie ist.

In der umgangssprachlichen Bedeutung stellt Information eine Art von faktischem Wissen dar. Nachrichten und Informationen werden zwar umgangssprachlich oft synonym gebraucht, obwohl beide Begriffe in der Informatik streng zu trennen sind. Die Nachricht trägt vielmehr die Information oder stellt sie dar. Sie ist jedoch nicht die Information. Eine Information zusammen mit ihrer Repräsentation wird als Objekt oder Datum bezeichnet. Repräsentationen sind konkrete Phänomene der physikalischen Welt, während Informationen grundsätzlich abstrakte Ideen sind. Die Interpretation schlägt einen Bogen zwischen diesen beiden Welten. Information bedarf einer Repräsentation, sonst kann sie weder mitgeteilt noch gespeichert, noch verarbeitet werden. Umgekehrt ist jede Repräsentation ohne zugeordnete Information sinnlos.<sup>35,36</sup>

Der Begriff der Information ist ein abstrakter, nicht ein raumzeitlicher Begriff, der mit den fundamentalen Parametern Masse und Energie der Physik nicht beschrieben werden kann. Im Begriff der Information ist auch der Begriff von Form enthalten. Aristoteles äußerte in seiner Theorie der Wahrnehmung die Ansicht, dass die Formen eines Gegenstandes in unserem Verstand präexistent vorhanden seien: „Nicht der Stein befindet sich in der Seele, sondern seine Form“.<sup>37</sup> Form kann in mathematischen Begriffen ausgedrückt werden. So arbeitete Alan Turing sehr lange an einer mathematischen Theorie von Gestalt und Form.<sup>38</sup> Form bringt Beziehung zum Ausdruck. Information ist aber nicht dasselbe wie Form allein, denn das Wort „informare“, d.h. gestalten, beinhaltet zusätzlich eine dynamische Komponente in dem Sinne, dass Information die Übertragung von Form von einem Medium auf das andere beinhaltet. In dieser Sichtweise werden Zusammenhänge mit dem menschlichen Informationsaustausch, also der Kommunikation, ersichtlich.

Der Informationsbegriff bringt nach C. von Weizsäcker die beiden Gegenpole der Materie, nämlich Form und Bewusstsein, wieder ins Spiel. Information ist nach v. Weizsäcker als Maß der Menge von Form zu bezeichnen. Information ist durch die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Ereignisses nach der Gleichung  $I = \log_2 W$  definiert. Ein Ereignis bringt demgemäß umso mehr Information, je unwahrscheinlicher es ist. Es wäre aber nach v. Weizsäcker ganz irrig, daraus zu schließen, Information sei ausschließlich ein Bewusstseinsinhalt, da ja Wahrscheinlichkeit etwas Subjektives, nämlich eine Mutmaßung ist. Jeder gedachte Begriff ist nach v. Weizsäcker etwas Subjektives und damit auch der Begriff der Materie oder eines Dings. Jeder Begriff ist sogleich „objektiv“, sofern er „wahr“ ist. In diesem Sinne ist nach v.

33 Baeyer von, H. Ch. (2005): Das informative Universum, Beck-Verlag München, S. 48.

34 Gell-Mann, M. (1994): Das Quark und der Jaguar. Vom Einfachen zum Komplexen – die Suche nach einer neuen Erklärung der Welt. Piper Verlag, S. 232.

35 Pepper, P. (1992): Grundlagen der Informatik. Oldenbourg Verlag, 2. Auflage, 11.

36 Kolmogorov, A. N. (1941): Interpolation und Extrapolation von stationären zufälligen Folgen. Bulletin de Academie des Sciences URSS, Serie Math. 5, pp 3-11.

37 Baeyer v., H. Ch. (2005): Das informative Universum. C.H. Beck Verlag, 2005, S. 35.

38 Hodges, A., Turing, A. (1989): Enigma. Verlag Kammerer & Unverzagt, S. 567.

Weizsäcker auch der Begriff der Wahrscheinlichkeit ein objektiver wahrer Begriff, sofern es möglich ist, Wahrscheinlichkeitsurteile empirisch zu überprüfen<sup>39</sup>.

Die Information eines Ereignisses kann nach von Weizsäcker auch definiert werden als die Anzahl von völlig unentschiedenen einfachen Alternativen, die durch das Eintreten des Ereignisses entschieden werden. Als quantitatives Maß der Menge an Form eines Gegenstandes schlägt v. Weizsäcker die Anzahl von einfachen Alternativen vor, die entschieden werden müssten, um seine Form zu beschreiben. In diesem Sinne misst die Information nach v. Weizsäcker in der Tat auch die Form. Dass Information ihrem Wesen aber subjektbezogen ist, wird von v. Weizsäcker so hergeleitet: „Sie (die Information) lässt sich aber gleichzeitig ... nicht ohne Bezug auf ein Bewusstsein definieren, und zwar in dem Sinn, in dem dies nicht von jedem Begriff gilt. Auch der objektive Wahrscheinlichkeitsbegriff ist nämlich subjektbezogen ...“<sup>40</sup>. Die Begriffe „Information“ und „Wahrscheinlichkeit“ müssen sowohl subjektiv als auch objektiv erstanden werden, denn es ist ihr begrifflicher Sinn, „Wissen zu quantifizieren“ und „Wissen ist stets Wissen, das jemand von etwas hat“<sup>41</sup>.

In Anlehnung an Carl Friedrich v. Weizsäcker, A. Zeilinger und weitere moderne Naturwissenschaftler ist Information schlechthin der Urstoff des Universums. Information ist Antwort auf Fragen, die wir stellen. Die Bedeutung des „Bit“ liegt in der Charakterisierung von Aussagen, ob sie wahr oder falsch sind.

Im technischen Gebrauch bezeichnet Information Symbole, mit denen eine Nachricht übermittelt wird, unabhängig davon, für was sie stehen. Nach von Weizsäcker ist Information „Form“. Seine Bedeutung leitet sich vom lateinischen Wort „informare“ ab und bedeutet „formen“, „im Geist gestalten“, „sich vorstellen“ und von da aus bedeutet „informatio“ eine „Vorstellung“, ein „Begriff“, ein „Abbild“. Information ist somit etwas wie das Einbringen von Form in die Materie oder auch der Materie in die Form.<sup>42</sup>

Nach Aristoteles ist die Form die Summe aller wesentlichen Eigenschaften eines Dings.

Das ganze Universum und die aus Atomen und Strahlung aufgebaute Wirklichkeit um uns und auch in uns selbst ist aufgebaut aus einfachsten und nicht weiter zerlegbaren Symbolen aus einer Folge von Nullen und Einsen. Symbole sind die Träger, ihr Substrat wiederum ist die Information.

Und doch ist auch von einem solchen Zugang aus ein Brückenschlag zur Physik möglich: Denn Information bezieht sich immer auf etwas Überraschendes, mehr oder weniger Unvorhersehbares. Die echte, überraschende Information einer Quelle ist der nicht vorhersehbare Teil der Information, und damit die Ungeordnetheit und Entropie. In diesem Sinne wäre die Information mit der Entropie identisch. Information würde sich beispielsweise auf den Überraschungsgehalt einer Zeichenfolge beziehen. Ihr syntaktisches Maß ist dann die Entropie. Den Begriff der Entropie übernahm Shannon aus der Physik sehr bewusst unter Nennung des H-Theorems von Boltzmann. Der Formelmechanismus ist bei beiden Verfassern praktisch identisch, nur hat die physikalische Entropie eine Dimension. Hier wäre also der Brü-

39 Weizsäcker, v., C. F.: Die Einheit der Natur. Dtv Wissenschaft (1995), S. 347.

40 Weizsäcker, v., C. F.: Die Einheit der Natur. Dtv Wissenschaft (1995), S. 348.

41 Weizsäcker, v., C. F.: Die Einheit der Natur. Dtv Wissenschaft (1995), S. 348.

42 Weizsäcker, v., C. F.: Die Einheit der Natur. Dtv Wissenschaft (1995), S. 348.

ckenschlag zur Physik gegeben.<sup>43</sup>

Information hat also mehrere Tiefenstrukturen: Einmal die Struktur einer Ziffern- und Zeichenfolge, einer mathematischen Notation sowie einer Bedeutungszuweisung.

Information ist nicht eine Dimension wie Masse und Energie. Sie hat einen dynamischen Charakter und ist abhängig von Verarbeitungsvorgängen, die außerhalb von ihr liegen. Ihr wird von außen eine Semantik zugewiesen. Sie weist eine transzendente Dimension auf. Information ist nach bisherigem Verständnis unmessbar.

Information ist insoweit Information, als sie etwas bewirkt, als sie einem Unterschied entspricht, der einen Unterschied ausmacht.<sup>44</sup> Carl Friedrich von Weizsäcker deutete sogar an, diesen Begriff der Information ins Transzendente und nicht in das empirische Bewusstsein zu verlegen. Dennoch ist die Information als Teil und Voraussetzung der Erkenntnis immer auch ein Teil der realen Welt, denn Information ist an einen materiellen Träger gebunden. In seiner Grunddeutung bezieht sich der Informationsbegriff sowohl auf die Struktur eines Gegenstandes der Erkenntnis und gleichzeitig auch auf das Erkenntnissubjekt. Denn die innere Struktur (Eidos) ist das, was man von einem Objekt erkennen und was man als begriffliche Erkenntnis weitergeben kann.<sup>45</sup> Dies bedeutet, dass die innere Struktur eines Gegenstandes potenzielle Information für ein Erkenntnissubjekt ist und dass es demnach Information ohne Beobachter, ohne erkennendes Subjekt per Definitionem nicht geben kann. Die heutige Naturwissenschaft lehrt uns dagegen, dass es den statischen Strukturbegriff, das unveränderliche Eidos, eines Gegenstandes als einer festen, beharrenden Substanz, nicht gibt. In der modernen Sichtweise werden Gegenstände dynamisch als zeitlich andauernde Zustände betrachtet. Danach kann nur das Eintreten eines Ereignisses als Information aufgefasst werden, wobei der Informationsgehalt umso größer ist, je unwahrscheinlicher sein Auftreten ist. Information entsteht somit aus Entscheidungen zwischen den Alternativen möglicher Zustände. Diese Information ist neu und sie ist objektiv, weil sie in Bezug auf den vorherigen Zustand neu ist<sup>46</sup>, wobei es gleichgültig sein soll, ob dieses Ereignis beobachtet wird oder nicht. Information entsteht somit nur dort, wo sich Strukturen ändern bzw. wo Strukturen im Fluss sind. Im Begriff der Information ist somit immer eine Änderung, Struktur-differenz und eine grundlegende dynamische Komponente enthalten. Im Gleichgewichtszustand eines isolierten Systems werden keine Informationen mehr generiert. Das System verharrt in der Konsequenz aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik in einer Art von Wärmetod. Anders verhält es sich bei offenen Systemen mit einer dynamischen Stabilität: Hier steht das System in ständigem Energie- und Informationsaustausch mit der Umgebung. Durch Integration dissipativer Hierarchien kann sich in solchen energiedurchflossenen Systemen eine funktionell geordnete Autonomie von hoher Informationsdichte aufbauen. Die Evolution als Ganzes gesehen, mit ihrem Fortschreiten von niedrigeren auf höhere Stufen, entspricht einem Prozess der universalen Verdichtung der Information, die durch das Auftreten von immer komplexeren Systemen mit immer größerer Variabilität ihrer Elemente

43 Zemanek, H. (1986): Information und Ingenieurwissenschaft. In: O.G. Folberth, C. Hackl: Der Informationsbegriff in Technik und Wissenschaft. R. Oldenbourg Verlag München Wien, pp 24.

44 Bateson, G. (1985): Steps to an Ecology of Mind. New York: Ballantine Books (1972). Deutsche Ausgabe: Ökologie des Geistes. Frankfurt Suhrkamp.

45 Öser, E., in: Folberth, O. G., Hackl, C. (1986): Der Informationsbegriff in Technik und Wissenschaft, Oldenbourg Verlag, München, Wien, S. 234.

46 Ohler, in: Folberth, O. G., Hackl, C. (1986): Der Informationsbegriff in Technik und Wissenschaft, Oldenbourg Verlag, München, Wien, S. 236.

gekennzeichnet ist. Auf der Ebene der anorganischen Strukturen erfolgt die Informationserzeugung als Folge von Wechselwirkungsprozessen zwischen Molekülen bzw. als Folge von mehr oder weniger zufälligen Interaktionen von gleichzeitigen Ereignissen im Rahmen synergetischer Gesetzmäßigkeiten. Auch auf diesen Stufen erfolgen einfache Bewertungsprozesse von potenziell entstehenden Informationen, beispielsweise hinsichtlich der molekularen Komplementarität zwischen den Bindungsstellen von Molekülen und der sich daraus erschließenden Verbesserung der energetischen Zustände. Auf den Stufen der organischen Systeme kommt dagegen der Bewertung von Information immer größere Bedeutung zu. Hier geht es weniger um die quantitative Vergrößerung der Informationsräume als um die qualitative Verbesserung von Strukturen und Funktionen und damit Vergrößerung der informatorischen Vielfalt durch Bewertungsprozesse. Komplex strukturierte Organismen mit einem zentralen Nervensystem verfügen über die Fähigkeit neuartige Informationsräume aufzuspannen, die in ihrem Inneren Modelle der Außenwelt aufbauen, um sich so von der Außenwelt abzugrenzen. Möglicherweise bezeichnen diese für jeden Menschen unterschiedlichen Modelle das, was von einigen Wissenschaftlern und Philosophen im Zusammenhang mit dem Begriff des Individuums verstanden werden soll. Ob diese mentalen Informationsräume tatsächlich trägerinvariant sein könnten, d.h. von der Materie des Gehirns abgelöst werden können, ist heftig umstritten. Hier steht Auffassung gegen Auffassung: Das Gehirn ist der Geist oder Auffassungen, die besagen, dass das bewusste Erkenntnissubjekt keine direkte Erfahrung vom materiellen Träger der Information, d.h. den neuronalen Zuständen des Gehirns hat.<sup>47</sup>

Information hat immer auch eine rätselhafte subjektive Bedeutung. So hat eine Zahlenreihe 1459265... für die meisten Personen als zufällige Zahlenfolge keine Bedeutung. Für den Mathematiker handelt es sich dagegen um eine Ziffernfolge der Zahl  $\pi$  nach dem Komma. Daraus wird erkennbar, wie schwierig sich eine allgemeingültige Definition des Informationsbegriffes gestalten muss.

### 3.1 Semantischer Aspekt von Information

Semantik in einem absoluten Sinn kann es nicht geben, sondern sie steht immer relativ in Bezug auf einen semantischen Referenzrahmen. Ein solcher Referenzrahmen kann auf molekularer Ebene beispielsweise in der Beziehung zwischen einem Hormon und seinem spezifischen Rezeptor vorgegeben sein. Nur dann, wenn beide Reaktionspartner zueinander passende Domänen aufweisen, kann es zur Bindung eines Hormons an seinen spezifischen Rezeptor kommen. Kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen den beiden Partnern, so entsteht ein informationstragendes Signal. Nicht jedes Hormon passt also zu jedem Rezeptorentyp. Man könnte somit sagen, dass ein spezifischer Rezeptorentyp den Referenzrahmen für Wechselwirkungen mit spezifischen Hormonen vorgibt.

47 Öser, E., in: Folberth, O. G., Hackl, C. (1986): Der Informationsbegriff in Technik und Wissenschaft, Oldenbourg Verlag, München, Wien, S. 239.

Auch die genetische Information enthält keine absolute, sondern nur eine relative Semantik, die bezogen ist auf die aktuellen Erfordernisse des Stoffwechsels oder der Körperzustände im Allgemeinen. Am Beispiel der menschlichen Sprache tritt besonders deutlich hervor, dass Worte nur in spezifischen sprachlichen Kontexten eine definitive Bedeutung ausweisen. So kann man unter dem Wort Bank ein Möbel zum Sitzen oder ein Institut verstehen, das Geld verwaltet. Semantik wird einer Information somit erst nach einer entsprechenden Bewertung zuerkannt.

In der modernen Biologie stellt sich die Frage nach dem semantischen Aspekt der Information mit besonderem Nachdruck, d.h. ob überhaupt und inwieweit Aspekte von Sinn und Bedeutung auf empirischer Basis objektiviert werden könnten.

Das Entstehen biologischer Ordnung und Planmäßigkeit als charakteristische Merkmale lebender Systeme sind informationsgesteuert. Das Problem der Entstehung biologischer Information geht dem Problem der Entstehung des Lebens parallel. Es liegt auf der Hand, dass das ungeheuer komplexe Netzwerk von Stoffwechselkreisläufen in der Zelle informationsgesteuert ist. Jeder komplizierte Prozess erfordert einen Plan. So liegt auch dem komplexen Zusammenspiel der Stoffwechsel- und Regulationsprozesse ein bis in die Einzelheiten festgelegter Plan zugrunde.<sup>48</sup> In der genetischen Information ist der Plan für die komplexen Lebensabläufe verschlüsselt, deren Aufgabe in der Selbsterhaltung, Selbstreproduktion und der Weitergabe der genetischen Information besteht.

Die in der Buchstabenfolge der DNA verschlüsselte Information lässt sich leicht in die Sprache der Informationstheorie übertragen: Die Nukleinsäuren werden aus vier Grundbausteinen aufgebaut. Damit würde man in einem binären Codesystem jeweils zwei Code-Einheiten benötigen, um einen Buchstaben zu verschlüsseln, so zum Beispiel:

$$A = 00, T = 11, G = 01, C = 10 \text{ usw.}$$

Die Frage nach dem Ursprung biologischer Information ist gleichbedeutend mit der Frage nach dem Ursprung dieser Sequenzen auf der DNA, die ja einer spezifischen Auswahl aus einer unübersehbaren Fülle alternativer Sequenzen entsprechen.

Eine Theorie der Entstehung des Lebens muss aus den genannten Gründen geradezu zwangsläufig auch eine Theorie der Entstehung von semantischer Information miteinfassen. Aus informationstheoretischen Erwägungen heraus ist eine Zufallshypothese im Zusammenhang mit der semantischen Information lebender Systeme nicht beweisbar. Die sogenannte Vitalismushypothese eines vorgegebenen Plans ist auf der anderen Seite zumindest nicht widerlegbar. Die empirischen Grundlagenwissenschaften in ihrer traditionellen Form schließen Phänomene der Semantik aus ihrem intendierten Anwendungsbereich aus. Dies wurde auf eine recht drastische Ausdrucksweise von M. Polanyi einmal so zum Ausdruck gebracht: „All objects conveying information are irreducible to the terms of physics and chemistry“<sup>49</sup>.

48 Watson. In: Folberth, O. G., Hackl, C. (1986): Der Informationsbegriff in Technik und Wissenschaft, Oldenbourg Verlag, München, Wien, S. 1982.

49 Polanyi, M.: Life transcending physics and chemistry. Chemical Engineering News (1967), S. 45, 56. Küppers, B. O.: Molekulare Selbstorganisation und die Entstehung von biologischer Information. In: Folberth, O. G., Hackl, C., a.a.O., S. 181-203.

Küppers, B. O.: Molekulare Selbstorganisation und die Entstehung von biologischer Information. In: Folberth, O. G., Hackl, C., a.a.O., S. 193.

Über diese genetischen Vorgaben hinaus spielen die Prozesse der Selbstorganisation eine wesentliche Rolle, deren informatorischer Output kontrollierend und verändernd wiederum auf die genetische Information rückwirkt.

Die Frage nach der Semantik von Information enthält implizit auch die Frage, ob ausschließlich unter den Gesetzmäßigkeiten von Physik und Chemie die biologischen Makromoleküle spontan aus ihren Grundbausteinen entstehen können und sich selbstorganisatorisch zu belebten Systemen entwickeln können. Aus der präbiotischen Chemie wissen wir, dass die Fülle der vorliegenden Ergebnisse keinen Hinweis darauf zu liefern vermag, dass sich Proteine und Nucleinsäuren nicht spontan bilden könnten. So gehört die abiotische Synthese von Aminosäuren und Nucleotiden heute zum Standardrepertoire der präbiotischen Chemie<sup>50</sup> Andererseits ist derzeit die Frage noch nicht abschließend beantwortet, ob eine mit Nucleinsäuren angereicherte Ursuppe neben einer notwendigen auch eine hinreichende Voraussetzung für die Entstehung von lebenden Systemen ist. Können sich biologische Makromoleküle selbst zu lebenden Systemen organisieren. Es wurde für die spontane Entstehung eines einfachen Bakterienbauplans mit ca. 4 Millionen Nucleotiden die Anzahl der Sequenzalternativen mit unvorstellbaren  $10^{2.4}$  Millionen geschätzt. Demnach wäre die Erwartungswahrscheinlichkeit für die zufällige Entstehung eines Bakterienbauplanes so niedrig, dass noch nicht einmal die Größe des Universums mit einer geschätzten Gesamtmasse des Universums, ausgedrückt in Masseinheiten des Wasserstoffatoms von  $10^{78}$  nicht ausreichen würde, um eine Zufallssynthese wahrscheinlich werden zu lassen.<sup>51</sup>

Die genannten statistischen Probleme, die sich im Zusammenhang mit der Entstehung biologischer und vor allem mit semantischer Information stellen, könnten als ein Indiz dafür gedeutet werden, dass es sich bei den Strukturen von lebenden Systemen um wesentlich irreduzible Strukturen handelt, deren vollständige Erklärung die Physik und Chemie zumindest in ihrer gegenwärtigen Form transzendiert.<sup>52</sup> In diese Richtung weisend, äußerten sich auch andere, darunter auch Polanyi.<sup>53</sup>

### 3.2 Zum Begriff der biologischen Information

Biologische Systeme sind vollständig informationsgesteuert und zeichnen sich durch ein hohes Maß an Ordnung und Planmäßigkeit aus.

Die Evolution ist eine unendliche Kette von Prozessen der Selbstorganisation, in welchen laufend neue Informationen generiert und bewertet werden. Dem Bilde Hegels folgend erschließt sich die evolutionäre Dynamik aus endlosen Ketten der Selbstorganisation. Nach Ebeling und Feistel durchläuft jeder dieser Zyklen folgende Stadien:

1. Ein relativ stabiler Evolutionszustand wird durch Veränderungen der inneren oder äußeren Bedingungen instabil.

50 Miller, S. L., Orgel, L. E. (1974): *The Origins of Life on Earth*. New Jersey: Prentice-Hall.

51 Küppers, B. O.: Molekulare Selbstorganisation und die Entstehung von biologischer Information. In: Folberth, O. G., Hackl, C., a.a.O., S. 187.

52 Küppers, B. O.: Molekulare Selbstorganisation und die Entstehung von biologischer Information. In: Folberth, O. G., Hackl, C., a.a.O., S. 193.

53 Polanyi, M. (1967): *Life ist transcending physics and chemistry*. Chemical and Engineering News 45, 56.

2. Diese Instabilität löst einen Prozess der Selbstorganisation aus, der neue Strukturen generiert.
3. Als Resultat entsteht ein neuer relativ stabiler Evolutionszustand, der wiederum in einen neuen Zyklus münden kann.<sup>54</sup>

Die Dynamik der einzelnen Zyklen der Selbstorganisation folgt im Wesentlichen nicht linearen Differenzialgleichungen. Die Übergänge zwischen den Zyklen erfolgen in der Form von Bifurkationen und zeigen grobe Analogien zu den Phasenübergängen der Thermodynamik. So zeigen thermodynamische Systeme in der Nähe von Phasenübergängen weitreichende räumliche Korrelationen, Strukturen auf vielen Skalen, besondere Rauchspektren, starke Fluktuationen und lange Relaxationszeiten. In den selbstorganisatorischen Prozessen liegt im Übergangsbereich zwischen den Zyklen eine kritische Instabilität vor, die von Bak und Chen als selbstorganisatorische Kritizität bezeichnet wurde.<sup>55</sup> Während die Newton'sche oder Hamilton'sche Mechanik nicht in der Lage waren, den Widerspruch zwischen Reversibilität und Irreversibilität aufzuklären, sind die Prozesse der Selbstorganisation durch das Prinzip der Instabilität gegenüber Variationen der Anfangsbedingungen gekennzeichnet. Der Begriff der Instabilität verweist darauf, dass in der Dynamik von Systemen benachbarte Trajektorien auseinanderstreben: Zwei anfangs dicht benachbarte Trajektorien laufen dann mit zunehmendem Prozessfortschritt immer weiter auseinander. Das Konzept der Divergenz von Trajektorien bzw. der Instabilität ist mit einem weiteren Begriff verbunden, nämlich über den Entropiebegriff mit der Kolmogorov-Entropie. Kleine Unsicherheiten in der Kenntnis der Anfangsbedingungen führen schon nach kurzer Zeit zur weitgehenden Unkenntnis tatsächlichen Zustandes eines Systems. Für instabile Gebiete des Phasenraumes wächst die Abweichung zweier ursprünglich dicht benachbarter Trajektorien exponentiell mit der Zeit an. Solche Systeme werden als chaotisch bezeichnet. Der sogenannte Lyapunov-Exponent bezeichnet das quantitative Maß des Auseinanderstrebens. Dieser Exponent hängt wiederum in engem Zusammenhang mit der Kolmogorov-Entropie, welche die Summe der positiven Lyapunov-Exponenten beschreibt.<sup>56</sup> Eine endgültige Lösung des Entropieproblems und damit verbunden des Informationsproblems steht noch aus. Ebeling hält die Einbeziehung von kosmologischen Aspekten in dieser Fragestellung jedoch für unverzichtbar. Vieles könnte darauf hindeuten, dass die Ursache der makroskopischen Gerichtetheit von Prozessen auf den Prinzipien von Instabilität und der Divergenz der mikroskopischen Bewegungen, d.h. auf dem mikroskopischen Chaos, beruht und dass es diese Prinzipien sind, welche dem kosmologischen Zeitpfeil vom Chaos zu immer komplexeren Ordnungsstrukturen zugrunde liegen.<sup>57</sup>

Im Bereich der lebenden Systeme schreitet die Evolution aus den genannten Gründen nicht kontinuierlich, wie verschiedentlich behauptet wird<sup>58</sup>, sondern in zyklischen Prozessen mit sprunghaften Phasenübergängen voran, aus denen emergent

54 Ebeling, W., Feistel, R. (1994): Chaos und Kosmos. Spektrum Akad. Verlag Heidelberg/Bern/ Oxford, S. 211.

55 Bak, P., Chen, K. (1991): Selbstorganisatorische Kritizität. Spektrum der Wissenschaft März.

56 Ebeling, W., Feistel, R. (1994): Chaos und Kosmos. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin Oxford, S. 198.

57 Prigogine, I., Stengers, I. (1993): Das Paradox der Zeit. Zeit, Chaos und Quanten. Piper-Verlag Heidelberg-München.

58 Singer, W. (2002): Der Beobachter im Gehirn. Suhrkamp Verlag Frankfurt a.M., S. 60.

das jeweils Neue entsteht. Die Dynamik der Prozesse erfolgt auf der Basis von Prozessen der Selbstreproduktion in Verbindung mit Mutation und Selektion. Mutation entspricht einer fehlerhaften Selbstreproduktion und ist somit im Wesentlichen als ein stochastisches Phänomen aufzufassen. Evolution schreitet also über Wechselspielen zwischen Zufall und Notwendigkeit fort. Im Prozess der der Ausprägung von Selbstreproduktion von Polynukleotidketten unter der katalytischen Einwirkung von Polypeptiden, wurden Verfahren zur Codierung von Informationen in der Primärsequenz und zur Weitergabe dieser codierten Information entwickelt. Mit dieser Entdeckung hat sich die Wissenschaft ein großes Stück der Frage nach der Entstehung von biologischer Information angenähert. Aus moderner Sicht kann die Informationsverarbeitung in biologischen Systemen als eine besonders hoch entwickelte Form der Selbstorganisation begriffen werden.<sup>59</sup> Der Begriff „Selbstorganisation“ kann in diesem Zusammenhang als ein Prozess definiert werden, welcher das Verhalten eines Systems ohne Zutun von außen, d.h. ohne Steuerung von außen strukturiert bzw. ihm eine Funktion verleiht, wobei dem Begriff der Funktion gegenüber der Struktur die höhere Bedeutung zukommen soll.<sup>60</sup> Die historische Entwicklung des Begriffes Selbstorganisation ist mit den Namen hervorragender Wissenschaftler verknüpft, beispielsweise mit Boltzmann, Ostwald, Poincare, Andronov, Schrödinger, Bertalanffy, V. Foerster, Turing, Prigogine, Eigen, Haken.

Die Prozesse der Selbstorganisation lassen sich von verschiedenen Ebenen aus betrachten, wobei auf allen Ebenen die Entropie als allgemeines Ordnungsmaß eine wichtige, wenn auch unterschiedliche, Rolle spielt. Während dieser Begriff ursprünglich von Clausius und Planck nur für makroskopische Systeme definiert wurde, erfolgte u. a. von Boltzmann, Meixner und Prigogine dessen Ausweitung auf Nichtgleichgewichtszustände und wurde schließlich von Shannon, Szilard, Hartley und Brillouin auf informationstragende Systeme übertragen. Die Beziehung zwischen Entropie und Informationsmaß ist qualitativ und wesentlich, weil sie Physik und Informationstheorie koppelt. Diese Zusammenhänge werden später in der Untersuchung des Gehirn-Geist-Problems näher zur Darstellung kommen.

Die Einführung des Wahrscheinlichkeitsbegriffes in der Quantenmechanik verläuft parallel zum Ersatz des Trajektorienmodells durch das statistische Bündel im Bereich der Mechanik. Die statistischen Bündel im Zusammenhang mit der Dynamik komplexer selbstorganisatorischer Systeme weisen die Eigenschaft auf, im zeitlichen Fortgang über alle möglichen Zustände verschmieren zu können. Eine reversible Beschreibung der Naturphänomene ist dann nicht mehr möglich: Mathematisch formuliert geht die Gruppe der reversiblen Bewegungen in die Halbgruppe der irreversiblen Dynamik über.<sup>61</sup> Chaos und begrenzte Vorhersagbarkeit schließen sich jedoch keineswegs aus. Die oben genannte Synergetik komplexer Systeme erlaubt es beispielsweise, das Systemverhalten auf höherer Ebene mit Hilfe einer kleinen Zahl von Ordnungsparametern und mittels reduzierter Information zu beschreiben.<sup>62</sup>

59 Eigen, M. (1971): The Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules. *Naturwissenschaft* 58, S. 465.  
Ebeling, W., Feistel, R. (1982/1986): Physik der Selbstorganisation und Evolution. Berlin Akad. Verlag, Wolkenstein, M. W. (1990): Entropie und Information. Berlin/Frankfurt/M Akademie-Verlag/Verlag H. Deutsch. Nicolis, G., Prigogine, I. (1991): Chaos and Information Processing. Singapore (World Scientific).

60 Ebeling, W., Feistel, R. (1994): Chaos und Kosmos. Spektrum Akad. Verlag Heidelberg Berlin Oxford, S. 210.

61 Petrosky, T., Prigogine, I. (1993): Poincare' Resonances and the Limits of Trajectory Dynamics. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 90, 9393.

62 Haken, H. (1988): Information and Selforganization. Springer Verlag Berlin/Heidelberg/New York.

Feistel konnte zeigen, dass es in der Evolution einen Phasenübergang von gebundener zu freier Information gibt.<sup>63</sup> Dieser Phasenübergang wurde als Ritualisierung oder Symbolisierung genannt. Freie Information als Relation bzw. als Beziehung zwischen zwei Systemen ist demnach immer auch eine symbolische Information. Denn sie setzt voraus, dass Sender und Empfänger diese Symbole erzeugen und verstehen können. Wir werden an verschiedenen Stellen auf diese zentrale Metapher der freien Information zurückkommen. Für den Inhalt der Information ist es unwesentlich, von welcher Art diese Symbole sind, solange Sender und Empfänger unter dem gleichen Symbol das Gleiche verstehen. Während die gebundene Information den physikalischen Zustand eines Systems repräsentiert und mit dem sie untrennbar verbunden ist, zeigt die freie Information eine Invarianz gegen die physikalische Natur der Datenträger. Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik streben abgeschlossene Systeme einem Zustand des thermodynamischen Gleichgewichtes mit einer maximalen Entropie entgegen. Aus diesem Zustand kann keine Information mehr extrahiert werden. Es ist immer die Differenz zwischen dem besagten Maximalwert der Entropie und dem aktuellen Wert, der für die gebundene Information relevant ist. Diese Differenz entspricht der potenziell gebundenen Information, welche auch als Klimontovich Entropieabsenkung bezeichnet wird. Freie Information kann auf einem materiellen Datenträger oder auch auf einem lokalen Attraktor eines dissipativen Prozesses gespeichert werden. Aus dieser grundlegenden Invarianz der freien Information gegen die physikalische Natur des Datenträgers ist herzuleiten, dass diese Form der Information der Wirkung bzw. dem Geltungsbereich derjenigen Gesetze entzogen ist, denen die Struktur ihrer Herkunft entzogen ist.<sup>64</sup> Es ist Ebeling und Feistel in dieser bedeutsamen Erkenntnis beizupflichten, dass die begrifflichen Innenschichten der freien Information zumindest im Rahmen der derzeit bekannten physikalischen Gesetze nicht bzw. nicht vollständig beschrieben werden können. Diese Erkenntnis hat nach hiesiger Ansicht eine grundlegende Bedeutung für die modernen naturwissenschaftlichen Weltbilder und vor allem auch für die Diskussion des Gehirn-Geist-Problems. Im physikalischen Messvorgang wird freie Information aus gebundener Information extrahiert. Freie Information repräsentiert somit immer nur Teilaspekte eines Objektes. Sie kann anschließend zur gebundenen Information gespeichert und transportiert werden oder sie kann nach den Regeln der Mathematik und Logik mit freier Information anderer Herkunft verknüpft werden: Bibliotheken mit unendlichen Mengen an gebundener Information sind auf diese Weise entstanden. Mit dem Anwachsen der freien Information treten Mittel der Datendekompression, der Abstraktion und Begriffsbildung immer mehr in den Vordergrund: Diese Prozesse können dann als Ritualisierungsprozesse auf einer höheren Stufe bezeichnet werden.<sup>65</sup> Während auf den physikalischen Ebenen der dissipativen Prozesse im Bereich der Phasenübergänge Ritualisierungs- bzw. Symbolisierungsprozesse in Erscheinung treten, handelt es sich auf der Ebene der lebenden Systeme um Symbolisierungsprozesse auf einer höheren Ebene, weil auf diesen Ebenen Strukturen von Symbolen als neue Symbole den Zeichenvorrat er-

63 Feistel, R. (1990): Ritualisation und die Selbstorganisation der Information. In: Selbstorganisation, Jahrbuch für Komplexität (U. Niedersen, Hrsg.) Duncker & Humblot Verlag Berlin.

64 Ebeling, W., Feistel, R. (1994): Chaos und Kosmos, a.a.O., S. 57.

65 Ebeling, W., Feistel, R. (1994): Chaos und Kosmos, a.a.O., S. 60.

weitem, den Textumfang im Gefolge von Datenkompression jedoch verringern. Ein zentrales Merkmal der biologischen Evolution ist somit die Bedeutung der freien Information, während die Komplexität der kosmischen Evolution sich in der gebundenen Information der durchlaufenen Zustände widerspiegelt.<sup>66</sup>

In der biologischen Evolution nehmen Prozesse der Optimierung und Bewertung von Information eine zunehmend zentrale Bedeutung ein. Schon von Clausius stammt die Idee, dass die Entropie ein Maß für die Wertlosigkeit von Information ist. Den von Darwin beschriebenen Selektionsprozessen der Evolution liegt die Auslese von im Konkurrenzprozess positiv bewerteter Spezies zugrunde. Auch in der modernen Informationstheorie spielt der Wertbegriff eine zentrale Rolle.<sup>67</sup> Werte, die Elementen eines Systems zugeordnet werden, drücken ganzheitliche Eigenschaften des Systems aus und sind nicht als Eigenschaften der isolierten Elemente zu verstehen. Werte sind für die Struktur und Dynamik von Evolutionssystemen von entscheidender Bedeutung, indem sie die Relation der Elemente zueinander bestimmen. Grundlegend in diesem Zusammenhang sind wiederum Wettbewerb und Selektion.<sup>68</sup> Diese Werte können jedoch nicht aus den phänotypischen Eigenschaften der Organismen abgeleitet und berechnet werden, Werte sind vielmehr solche Größen, die sich nicht aus den Variablen der Systeme ableiten lassen. Hierbei handelt es sich also um emergente Eigenschaften. Werte drücken das Wesen von biologischen, ökonomischen oder sozialen Wechselwirkungen und Relationen in Bezug auf die Dynamik des Gesamtsystems aus. Nach Ebeling sind Werte abstrakte nicht physikalische Eigenschaften von Spezies in einem dynamischen Kontext.<sup>69</sup>

In der Evolution der Lebewesen spielen also freie Informationen und Wertesysteme eine wesentliche Rolle. Die Aufrechterhaltung der Homöostase ist eine grundlegende Voraussetzung für die effiziente Steuerung der komplexen Systeme von lebenden Organismen, das gilt für die Amöbe und den Menschen gleichermaßen. Hierbei spielen in einem erweiterten Sinn Wertesysteme, Belohnungs- und Bestrafungssysteme, eine Rolle. Der Wertbegriff ist in der Thermodynamik direkt mit dem Entropiebegriff und in Analogie dazu in der Informationswissenschaft mit dem Informationsbegriff verbunden. Im Rahmen des Wertkonzeptes für die physikalische Entropie ist der zweite Hauptsatz der Thermodynamik so auszudeuten, dass isolierte Systeme spontan zur Entwertung der im Körper enthaltenen Energie streben. Dort ist die Menge der Entropie, die in einem physikalischen Körper vorhanden ist, ein Maß für die Wertlosigkeit seiner Energie. Je größer die Entropie ist, desto wertloser ist seine Energie. Die Bewertung und Optimierung spielen somit auch von diesem gedanklichen Zugang aus in der Evolution der Lebewesen eine wichtige Rolle. Selektion ist Auslese von positiv bewerteter Spezies. Wie schon beschrieben, sind Werte abstrakte physikalische Eigenschaften von Spezies in einem dynamischen Kontext. Werte drücken ganzheitliche Eigenschaften eines Systems aus.<sup>70</sup> In den biologischen Systemen repräsentieren spezifische chemische Transmitter Werte in den Belohnungs- und Bestrafungssystemen, darunter beispielswei-

66 Ebeling, W., Feistel, R. (1994): Chaos und Kosmos, a.a.O., S. 60.

67 Haken, H. (1998): Information and Selforganization, a.a.O.

Wolkenstein, M. W. (1990): Entropie und Information, a.a.O.

68 Ebeling, W., Feistel, R. (1994): Chaos und Kosmos, a.a.O., S. 66.

69 Ebeling, W., Feistel, R. (1994): Chaos und Kosmos, a.a.O., S. 66.

70 Ebeling, W., Feistel, R. (1994): Chaos und Kosmos, a.a.O., S. 66.

se das Dopamin, Noradrenalin, Serotonin, Oxytocin oder Vasopressin und andere. Werte sind in einem unmittelbaren Zusammenhang mit dem Überleben verortet. Damit scheint der bestmögliche an die Umgebung angepasste, physiologisch reibungsfrei arbeitende Zustand der Organe und Gewebe innerhalb der Homöostasebereiche eine Triebkraft für die biologischen Bewertungen und Wertesysteme zu sein. Die ständige Repräsentation chemischer Parameter im Gehirn ermöglicht es zudem, ständig einen Abgleich zwischen Ist- und Sollzuständen im Rahmen der Homöostase durchzuführen und entsprechende differenzielle Korrekturen durchzuführen. Abläufe, die für eine optimale Lebenssteuerung sorgen, werden als besonders wertvoll angesehen. Diese Zusammenhänge gelten auch für die kognitiven und emotionalen Systeme des Menschen.<sup>71</sup> Optimale Bereiche finden ihren Ausdruck im bewussten Geist als angenehme Gefühle; gefährliche Bereiche äußern sich in schmerzhaften Gefühlen.<sup>72</sup> Definierende Aspekte unserer Gefühle sind demnach die bewusste Wahrnehmung unserer als positiv bewerteten Körperzustände, die von Emotionen modifiziert werden.

71 Montague, R. (2006): *Why Choose This Book? How We Make Decisions?* London; Penguin.

72 Damasio, A. (2010): *Selbst ist der Mensch*. Siedler Verlag München, S. 67.