

# Das Paradigma der Selbstorganisation

Michael R. Riedel

## Inhaltsübersicht:

1. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik
2. Dissipative Strukturen in thermodynamisch offenen Systemen
3. Von der Selbstorganisation zur Evolution
4. Die Gaia-Hypothese

## 1. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik

Unsere Kenntnis über die uns umgebende Natur hat ein gewaltiges Ausmaß erreicht: In kosmischen Dimensionen erfassen wir Zeiten von  $10^{17}$  s ( $\sim$  Weltalter) und Entfernungen von  $10^{26}$  m ( $\sim$  überschaubarer Radius), in der Elementarteilchenphysik erfassen wir Prozesse mit einer räumlichen Ausdehnung bis zu  $10^{-17}$  m (Atomkernradius  $10^{-15}$  m) und mit einer zeitlichen Auflösung bis zu  $10^{-22}$  s; ständig erscheinen neue und spektakuläre Veröffentlichungen zu diesen Themen.

Dabei geht ein bißchen die Tatsache unter, daß in der klassischen Physik nicht minder wichtige und spektakuläre Ergebnisse erhalten wurden und werden, die uns der Lösung eines fundamentalen Problems näherbringen, nämlich dem Verständnis der Selbstorganisation in physikalischen, biologischen und nicht zuletzt auch gesellschaftlichen Systemen, d.h. der Erklärung, wie sich hochgeordnete Strukturen von selbst aus anfänglich undifferenzierten Medien bilden können.

Betrachten wir einige typische Beobachtungen aus dem Alltag:

- |                                      |   |                                      |
|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| Kontakt von warmem und kaltem Körper | ⇔ | Temperaturausgleich                  |
| Überschichtung von Wasser und Sirup  | ⇔ | Konzentrationsausgleich              |
| Tropfen Säure auf Gewebe             | ⇔ | Chemische Reaktion zerstört Struktur |
| Gasexpansion im Vakuum               | ⇔ | homogenisiert System                 |
| Tropfen Tinte in Wasser              | ⇔ | Struktur zerfließt durch Konvektion  |

Allen Phänomenen ist eines gemeinsam: Sie verlaufen zeitlich nur in einer Richtung, d.h. eine eventuelle Umkehr wurde noch nie beobachtet, und sie bauen Struktur ab, sie erzeugen somit eine gewisse „Unordnung“. In der Sprache der Physik hat diese Einseitigkeit des Ablaufs von Prozessen eine geeignete Beschreibung durch den 2. Hauptsatz der Thermodynamik nach Clausius (1865) gefunden:

„Es gibt eine Zustandsgröße, genannt Entropie, die in abgeschlossenen Systemen nur zunehmen kann, bis ein Maximalwert erreicht ist.“

Später wurde von Boltzmann gezeigt (1877), daß die Entropie ein gewisses Maß für den Grad an molekularer Unordnung ist.

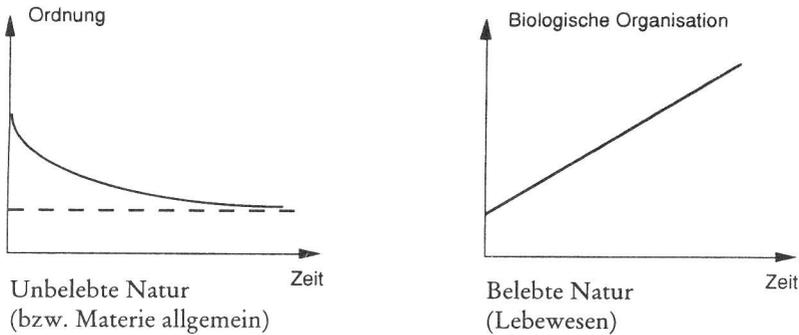
Fast zur gleichen Zeit tauchte im Gegensatz dazu der Evolutionsbegriff über das Darwinsche Prinzip in der Biologie auf (Darwin, 1859):

Aufgrund des Selektionsprinzips nimmt der Organisationsgrad biologischer Systeme ständig zu.

Man stand also vor dem Dilemma, daß in der unbelebten Natur offenbar eine Tendenz zum Abbau von Strukturen vorherrschte, während gleichzeitig die biologische Evolution eine ständige Höherentwicklung existierender Lebensformen zu befördern schien (in der Abbildung 1 dargestellt).

Dieser scheinbare Grundwiderspruch in den Naturwissenschaften hat seitdem immer wieder zur Stellungnahme herausgefordert und oft zu einseitigen Positionen geführt. Entweder wurde die Entropiezunahme an die Spitze gestellt, d.h. die Entropie des Weltalls nimmt ständig zu und führt letztendlich zum sogenannten Wärmetod, die uns umgebenden Strukturen sind episodenhaft und das Ergebnis einer riesigen zufälligen Schwankung, oder aber das Evolutionsprinzip gilt universell, d.h. es existieren besondere Kräfte in lebenden Systemen („Vitalismus“) und die thermodynamischen Gesetze besitzen im Bereich der lebenden Natur nur beschränkte Gültigkeit (Bergson, 1911).

Abbildung 1



Erst in den letzten 20 Jahren gelang es, diesen Widerspruch mit der Entwicklung der Theorie der nichtlinearen Selbstorganisation in der unbelebten Natur im wesentlichen aufzulösen. Mit der Beschreibung dissipativer Strukturbildungsprozesse in offenen Systemen wurde die Vereinbarkeit beider Seiten gezeigt und die theoretische und praktische Existenz von spontanen Strukturbildungsvorgängen auch in unbelebten Systemen nachgewiesen sowie deren physikalische Ursachen, innere Mechanismen und Gemeinsamkeiten herausgestellt (Glandsdorff und Prigogine, 1971; Haken, 1977; Prigogine, 1979).

Bevor wir darauf näher eingehen, soll jedoch noch angemerkt werden, daß in der Physik nicht *alle* Strukturen spontan zerstört werden!

Bei der Abkühlung von Wasserdampf, bei dem die ungeordnete Bewegung einzelner Moleküle dominiert, entstehen über die Zwischenstufe des flüssigen Wassers mit einer gewissen Nahordnung bekanntlich regelmäßige, hochgeordnete Eiskristalle. Oder: Ein Ferromagnet, der erhitzt wird, verliert seine permanente Magnetisierung; bei erneuter Abkühlung wächst diese aber unterhalb der kritischen Curie-Temperatur wieder an.

Verantwortlich für diese Strukturbildung auf mikroskopischer Ebene ist das kooperative Verhalten der atomaren Bausteine, die miteinander wechselwirken, und die sich unterhalb einer gewissen kritischen Temperatur  $T_C$  kohärent verhalten. Das Wirkprinzip beruht auf dem bekannten Boltzmannschen Verteilungsgesetz, welches aussagt, daß bei tiefen Temperaturen Strukturen mit geringem Energiegehalt mit höherer Wahrscheinlichkeit realisiert werden. Durch einfache Abkühlung kann also hier der Grad an Ordnung erhöht werden; alle durchlaufenen Zustände des Systems befinden sich stets im thermodynamischen Gleichgewicht, und die eingetretenen Zustandsänderungen bleiben umkehrbar (reversibel). Die beobachteten Eiskristalle sind daher Mikrostrukturen auf *molekularer* Ebene; üblicherweise bezeichnet man diese als konservative Strukturen (Haken, 1977).

Bei lebenden Organismen wird im Gegensatz dazu Ordnung und Funktion nicht durch Temperaturabnahme erzeugt und erhalten, sondern durch ständige

Aufnahme und Abgabe von Stoff und Energie, d.h. durch Wechselwirkung mit der Umgebung.

An die Stelle der atomaren Bausteine treten viele kleine Untersysteme der sogenannten mesoskopischen Längenskala ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ), die kooperativ über eine interne nichtlineare Dynamik miteinander wechselwirken. Die dabei gebildeten hochgeordneten makroskopischen Strukturen und deren Bewegungen (wenige Freiheitsgrade) werden durch die Konsumierung relativ unstrukturierter Energie (viele interne Freiheitsgrade) erzeugt. Hierbei sind die äußeren Bedingungen stets so realisiert, daß das betrachtete System kontinuierlich im Nichtgleichgewicht gehalten wird – der spontane Strukturabbau durch die Entropiezunahme im Innern wird sozusagen durch einen ständigen Eingriff von außen verhindert. Die produzierte Entropie wird am Ende als entwertete Energie wieder an die Umgebung zurück gegeben.

Bereits mit dieser heuristischen Betrachtungsweise sind die Ansätze für eine Suche nach selbstorganisierenden Systemen in der unbelebten Natur aufgezeigt. Man bezeichnet diese, in Anlehnung an Glansdorff und Prigogine (1971), oft auch als *dissipative* Strukturen.

## 2. Dissipative Strukturen in thermodynamisch offenen Systemen

Um vom Gleichgewicht zum Nichtgleichgewicht überzugehen, muß man die Entropieerzeugung explizit berechnen. Es genügt nicht mehr die allgemeine Ungleichung des 2. Hauptsatzes, da die Entropieerzeugung mit wohldefinierten physikalischen Prozessen verknüpft werden soll.

Unter Verwendung der Methoden der irreversiblen Thermodynamik erhält man durch Ausnutzen lokaler Bilanzgleichungen für die interne Entropieproduktion die einfache Bilinearform (Glansdorff und Prigogine, 1971):

$$\frac{d_i S}{dt} = \sum_j X_j J_j > 0 \quad (1)$$

am vorgegebenen Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt. Hierbei sind  $J_j$  die Raten der verschiedenen beteiligten irreversiblen Prozesse (chemische Reaktionen, Wärmestrom, Diffusion etc.) und  $X_j$  die entsprechenden verallgemeinerten Kräfte (Affinitäten, Temperaturgradienten, Gradienten der chemischen Potentiale etc.). Im thermodynamischen Gleichgewicht gilt für alle irreversiblen Prozesse natürlich  $J_j = 0$  und  $X_j = 0$ . Es ist daher in Gleichgewichtsnähe nahelegend, lineare homogene Beziehungen zwischen den Flüssen und Kräften anzunehmen. Auf diese Weise wird die *lineare* Thermodynamik irreversibler Prozesse erhalten, die durch die Beziehungen der Gestalt

$$J_j = \sum_i L_{ji} X_i \quad (2)$$

mit den Koeffizienten  $L_{ji}$  charakterisiert ist.

Die lineare Thermodynamik irreversibler Prozesse wird von zwei wichtigen Ergebnissen beherrscht. Das erste wird durch die Onsagerschen Reziprozitätsbeziehungen (1931) ausgedrückt, welche besagen, daß gilt

$$L_{ij} = L_{ji} \quad (3)$$

Wenn der dem irreversiblen Prozeß  $i$  entsprechende Fluß  $J_i$  von der Kraft  $X_j$  des irreversiblen Prozesses  $j$  abhängt, dann hängt auch der Fluß  $J_j$  von der Kraft  $X_i$  ab, und zwar tritt derselbe Koeffizient  $L_{ij}$  in beiden Fällen in Erscheinung. Die zweite wichtige Eigenschaft linearer Nichtgleichgewichtssysteme ist die Gültigkeit des Gesetzes der minimalen Entropieerzeugung:

$$\frac{\partial}{\partial X_m} \left( \frac{d_i S}{dt} \right) = 0 \quad (4)$$

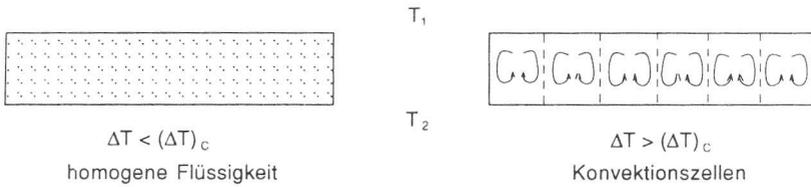
Es drückt eine Art „Trägheits“-Eigenschaft aus. Wenn die gegebenen Randbedingungen das System daran hindern, das thermodynamische Gleichgewicht (also eine verschwindende Entropieerzeugung) zu erreichen, geht das System in den Zustand der geringsten Dissipation über.

Eine gewisse Zeit lang wurden beträchtliche Anstrengungen unternommen, dieses Theorem auch auf Systeme weitab vom Gleichgewicht zu verallgemeinern. Es war daher eine große Überraschung, als sich herausstellte, daß das thermodynamische Verhalten in großer Entfernung vom Gleichgewicht ganz anders, ja sogar entgegengesetzt sein konnte, als es nach dem Gesetz der minimalen Entropieerzeugung zu erwarten gewesen wäre. Auf diese Weise kann das Nichtgleichgewicht sogar zu einer *Quelle* von Ordnung werden (Prigogine, 1979). Diese neuartigen Strukturen fernab vom Gleichgewicht stellen sich somit als die von uns intuitiv gesuchten dissipativen Strukturen heraus.

Als klassisches Beispiel für ein sich selbst organisierendes System in der unbelebten Natur gilt der sogenannte Bénard-Effekt, das Einsetzen von konvektivem Wärmetransport in einer Flüssigkeit mit Temperaturgradienten.

Erhitzt man eine horizontale Flüssigkeitsschicht einseitig von unten und hält beide Temperaturen  $T_2$  (unten) und  $T_1$  (oben) konstant, so bildet sich bei überkritischer Temperaturdifferenz  $\Delta T = T_2 - T_1 > 0$  spontan ein räumliches Muster von Konvektionszellen in der Flüssigkeitsschicht heraus, die einen wesentlich effektiveren Wärmetransport durch die Flüssigkeit ermöglichen (ausführliche Darstellung z.B. in Chandrasekhar, 1961).

Abbildung 2



Ein *kooperatives* Verhalten gleichartiger Subsysteme (kleine Volumenelemente innerhalb der Flüssigkeitsschicht werden durch Erwärmen leichter, steigen auf, werden abgekühlt und sinken wieder) führt hier bei überkritischem Abstand vom thermodynamischen Gleichgewicht  $\Delta T > (\Delta T)_C$  zur spontanen Herausbildung einer makroskopischen Struktur, in diesem Fall zu der Bildung eines räumlich regelmäßigen Konvektionszellenmusters. Diese entspringt dabei nicht etwa der äußeren Gefäßform oder anderen äußeren Vorgaben, sondern primär der inneren Dynamik der Flüssigkeit.

Als weiteres Beispiel betrachten wir auf Grund seiner zentralen Bedeutung das wechselwirkende System Sonne–Erde. Der Hauptteil der für das Entstehen von Leben auf dem Planeten Erde notwendigen Energie wird durch die Sonnenstrahlung geliefert, nur ein geringer Bruchteil entstammt der inneren Erdwärme infolge radioaktiver Zerfallsprozesse bzw. der Abkühlung des Erdinnern. Die gleiche Energiemenge wird dabei pro Zeiteinheit durch die Erdoberfläche aufgenommen und wieder abgegeben, der Energiehaushalt der Erde ist (in der von uns betrachteten Zeitskala) ausgeglichen.

Der Entropieexport der Erde kann am einfachsten über die aufgenommene und wieder abgegebene Strahlung abgeschätzt werden. Wie in der folgenden Abbildung gezeigt, absorbiert die Erde im Mittel etwa 230 W pro  $m^2$  mit einer Strahlungstemperatur von etwa 5800 K und emittiert etwa die gleiche Strahlungsmenge in einem langwelligen Bereich mit der Strahlungstemperatur von etwa 260 K. Der Entropietransport der Erde beträgt somit  $10^{14}$  bis  $10^{15}$  W/K oder etwa 1 W/K pro  $m^2$  der Erdoberfläche. Die kurzwellige Sonnenstrahlung ist damit die wichtigste Entropiepumpe der Erde.

Letzten Endes ist die Sonnenstrahlung die Triebkraft für die vielfältigen Prozesse der biologischen Evolution auf unserem Planeten, die von den primitiven Organismen in den Gewässern der Ur-Erde in einer reduzierenden Atmosphäre über viele Verzweigungen zu den rezenten Organismen geführt hat.

Zusammenfassend lassen sich die wichtigsten Schlußfolgerungen in der Abbildung 4 veranschaulichen.

Abbildung 3

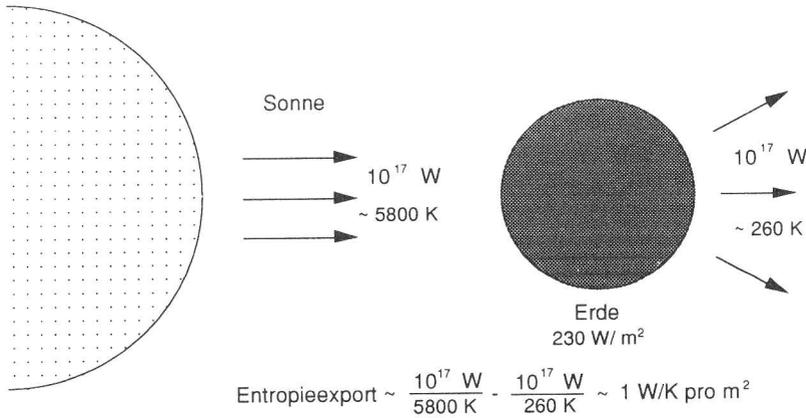
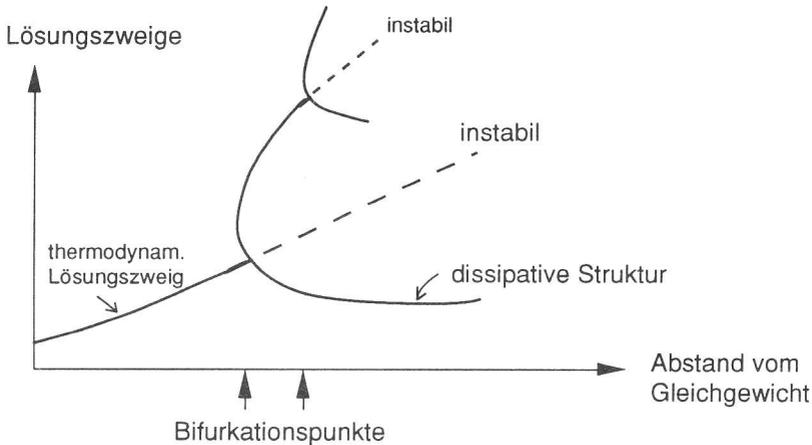


Abbildung 4



In der Nähe des thermodynamischen Gleichgewichtes, also im Gültigkeitsbereich der Onsagerschen linearen Ansätze, sind alle Strukturbildungsprozesse an das Prinzip der minimalen Entropieproduktion gebunden und entsprechen daher im Ablauf eher der konservativen Strukturbildung. Erst von einem überkritischen Abstand an werden Bifurkationen zu neuartigen Lösungszweigen des dynamischen Systems möglich; dies kann unter geeigneten äußeren Randbedingungen zur Herausbildung von stationären Nichtgleichgewichtsstrukturen führen.

### 3. Von der Selbstorganisation zur Evolution

Der Brückenschlag von der Physik der Selbstorganisation zu einer Physik der Evolutionsprozesse ist nicht unproblematisch, da bereits die kleinsten Mikroorganismen einen vielfach komplizierteren Aufbau besitzen als die traditionellen Objekte in Physik und Chemie. Hier bietet nur der Ansatz einer verallgemeinerten Betrachtungsweise einigermaßen reelle Erfolgsaussichten, um herauszufinden, welche allgemeinen Gesetzmäßigkeiten der unbelebten Natur übertragbar sind und welche spezifisch neuen Bedingungen für die Evolution hinzukommen.

Die von Ebeling (1982) hierzu vertretene und hier übernommene Grundfassung ist folgende:

Die Gesetze der Physik gelten auch uneingeschränkt im Bereich der Evolution. Ausnahmen wurden nie beobachtet und sind auch nicht zu erwarten.

Die Physik steckt somit einen allgemeinen Rahmen für die Evolutionsprozesse ab, indem sie Möglichkeiten und Verbote formuliert. Andererseits kann die Physik *allein* die Grundgesetze und das Spezifische der Evolution nicht erkennen, da hier sehr komplizierte Zusammenhänge wesentlich werden. Das Anliegen kann also nicht darin bestehen, Evolutionsgesetze auf physikalische Grundgleichungen zurückzuführen, sondern lediglich darin, dem Evolutionsforscher alle gesicherten Kenntnisse und Erfahrungen der Physiker zuzuarbeiten, die zum Bearbeiten der außerordentlich verwickelten Probleme der Evolution nützlich sein können.

Nach dem gegenwärtigen Erkenntnisstand sind – wie bisher ausgeführt – folgende Faktoren für eine Physik der Selbstorganisation entscheidend:

1. *Entropieexport*, d.h. die Fähigkeit thermodynamisch offener Systeme, Entropie an die Umgebung abzugeben;
2. *Gleichgewichtsferne*, d.h. überkritischer Abstand vom thermodynamischen Gleichgewicht, das System hat den Charakter einer dissipativen Struktur;
3. *Nichtlinearität*, d.h. die innere Dynamik des Systems ist wesentlich durch nichtlineare Effekte bestimmt.

Zu diesen allgemeinen Bedingungen der Selbstorganisation kommen die eigentlich spezifischen Evolutionsfaktoren hinzu (Eigen und Winkler, 1975; Ebeling, 1982):

4. *Selbstreproduktion*, d.h. die Fähigkeit zum Herstellen relativ genauer Kopien des Originalsystems und ein ständiges Aufeinanderfolgen von Generationen;
5. *Multistabilität*, d.h. Existenz mehrerer stabiler Zustände des Systems, Abhängigkeit des aktuellen Zustands von der Vorgeschichte, Fähigkeit zum Speichern von Informationen;

6. *Selektion*, d.h. die Auslese günstiger Systeme oder Mechanismen aus einer Vielzahl von Möglichkeiten durch Konkurrenzprozesse;
7. *Mutabilität*, d.h. das Auftreten von zufälligen Fehlerkopien, welche die Quelle neuer Strukturen und Mechanismen darstellen;
8. *Mobilität*, d.h. die Fähigkeit zur Ortsveränderung, zum Optimieren des Milieus.

Weitere wichtige Aspekte darüber hinaus sind die Informationsspeicherung, die Optimierung und Adaption, ein hierarchischer Aufbau, die Differenzierung und die Morphogenese, die Entwicklung von Sprachen sowie der Verzweigungs-, Netzwerk- und Spielcharakter der Evolution (Eigen, 1971; Eigen und Winkler, 1975; Ebeling, 1982, 1985; Ebeling und Feistel, 1986). Im folgenden sollen davon näher die Bedeutung von Multistabilität und Information erläutert werden.

Eine Schlüsselrolle bei der Evolution spielen sowohl die Fähigkeit zur Selbstreproduktion als auch die Fähigkeit zur Informationsspeicherung. John von Neumann, einer der bedeutendsten Mathematiker und Physiker unseres Jahrhunderts, hat bereits Anfang der 50er Jahre gezeigt, daß Systeme mit der Fähigkeit zur Selbstreproduktion unter bestimmten Bedingungen Kopien hervorbringen können, die komplizierter als das Original sind (von Neumann, 1966). Dieser Ansatz ist weiter ausgebaut worden von Cairns-Smith (1968, 1982), der einen selbststartenden Kreislauf in kybernetischen Modellrechnungen erzeugen und damit eine (wenn auch nur in Modellrechnungen) Entsprechung zu den Eigenschon Hyperzyklen finden konnte (Eigen, 1971).

Selbstreproduktion ist im Evolutionsprozeß eng mit den Faktoren Generationsfolge, Konkurrenz und Selektion verknüpft. Damit sich ein System mit Selbstreproduktion, Konkurrenz und Selektion entwickelt, müssen in ihm Mutationen auftreten, d.h. es muß zufällig alternative Möglichkeiten produzieren. Eine Mutation bedeutet häufiger eine Verschlechterung des Systems als eine Verbesserung. Treten aber zufällig neue günstige Möglichkeiten auf und werden diese verstärkt, so schreitet die Evolution fort.

Die Möglichkeiten für das Auftreten neuer Primärstrukturen bei der Reproduktion der Erbanlagen bestimmen sich aus dem genetischen Kode. Die Anzahl der verschiedenen DNA-Moleküle der Länge  $\mu$ , die aus den 4 verschiedenen Nukleotidbasen Adenin (A), Thymin (T), Cytosin (C) und Guanin (G) hervorgehen können, beträgt  $W = 4^\mu$ . Für ein Polynukleotid bestehend aus 1000 Basen ist folglich die Zahl der möglichen Primärstrukturen gleich

$$W = 4^{1000} \sim 10^{600} \quad (5)$$

Diese Zahl ist von astronomischer Größenordnung, das Reservoir der Variationsmöglichkeiten des Genoms somit praktisch unerschöpflich.

Führt eine Mutation zu einer neuen Variante des Phänotyps, entscheidet ein Selektionsprozeß über ihre Durchsetzung und eventuelle Etablierung als neue Spezies:

„Neue Arten entstehen dadurch, daß neuere Formen Vorteile über ältere besitzen, und Formen, die bereits herrschen oder Vorteile über andere ihres Gebietes haben, lassen die größte Zahl neuer Varietäten oder beginnender Arten entstehen.“ (Darwin, 1859)

Die Geschichte der Evolution ist somit die Geschichte der Bildung immer komplexerer Strukturen aus einfacheren Strukturen.

Ein besonderer Wesenszug der Evolution ist dabei auf jeder Ebene die Fähigkeit zur Integration einfacherer Elemente zu Ganzheiten höherer Stufe, d.h. zu Systemen, die durch qualitativ neue Eigenschaften gekennzeichnet sind.

An die bekannte Evolution der Arten von Tieren und Pflanzen nach Darwin, also die Entwicklung der Erdoberfläche vom Zustand des Urmeeres in den „Zustand“ der kontinuierlich komplexer werdenden Lebensformen, schließen sich an:

- die Evolution des Menschen (Entwicklung der Arbeit und des Denkens),
- die Evolution der menschlichen Gesellschaft (Entwicklung der Arbeitsteilung, der Organisation, der Technik),
- die Evolution der Information und des Informationsaustausches (Entwicklung der Kommunikation und der Wissenschaften).

Auch in diesen späteren Phasen verlaufen viele Evolutionsprozesse nach ähnlichem Grundmuster, so daß deren Strukturen heute als im wesentlichen bekannt gelten.

Eine neue Qualität entsteht im Zuge dieser Entwicklung mit der Fähigkeit zur *Informationsspeicherung*, also mit der Fähigkeit zur Akkumulation von Erfahrung. Sie wird zunehmend zu einer entscheidenden Bedingung für die höheren Stadien der Evolution.

Lebewesen können generell drei Formen der Information nutzen:

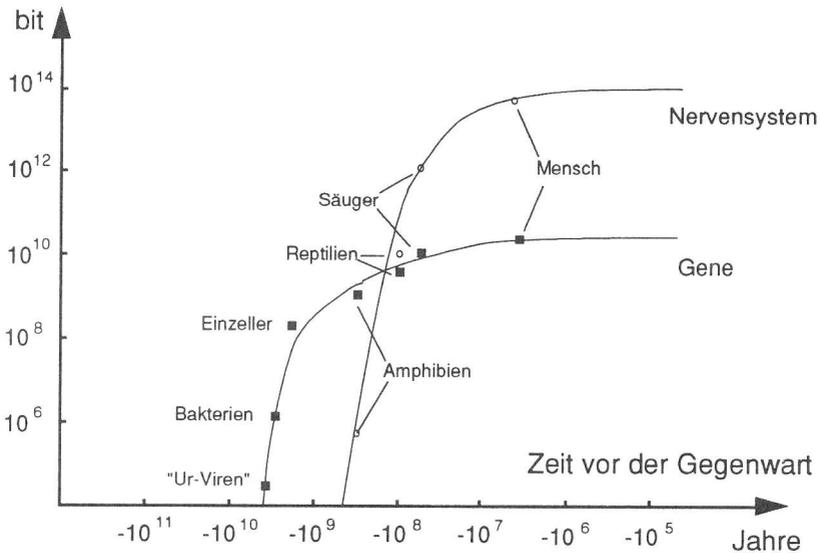
- genetische Informationen,
- Informationen im Nervensystem,
- Informationen außerhalb (Bücher, Datenbasen, Computersysteme, elektronische Medien usw.).

Diese drei Formen sind entwicklungsgeschichtlich nacheinander entstanden (Abbildung und Diskussion dazu komplett nach Ebeling, 1982):

Die genetische Informationsspeicherung bildete sich mit der Entstehung des Lebens vor 3–4 Milliarden Jahren und hat sich fortwährend schnell entwickelt. Nach dem Entstehen der Amphibien, Reptilien und Säuger erreichte sie einen Plateauwert mit etwa  $10^{10}$  bit genetischer Information pro Individuum.

Die im Nervensystem gespeicherten Informationen sind zunächst um viele Größenordnungen kleiner und erreichen erst mit dem Auftauchen der Reptilien die Menge der genetischen Informationen, um sie dann bei den Säugern und speziell beim Menschen um viele Größenordnungen zu übertreffen. Ein erwachsener Mensch verfügt in seinem Gehirn über etwa  $10^{13}$  bit Informationen.

Abbildung 5



Die externe Informationsspeicherung gibt es erst seit etwa 10.000 Jahren. Sie ist heute der bei weitem dynamischsten Entwicklung unterworfen, wenn wir nur an die explosionsartig gewachsenen Möglichkeiten der Kommunikationsindustrie denken (internationale Datennetze, weltweiter Informationsaustausch, CD-ROM-Datenträger mit über 600 Millionen Byte Kapazität als Konsumartikel usw.). Sie hat inzwischen die Menge der im Nervensystem des Menschen speicherbaren Information um ein Vielfaches übertroffen. Der Zugriff auf diesen externen Wissensspeicher und dessen aktive Vergegenwärtigung ist heute zunehmend zu dem limitierenden Faktor für die Behandlung bzw. Lösung eines beliebigen naturwissenschaftlichen oder gesellschaftlichen Problems geworden.

Spätestens mit der Herausbildung der Spezies „Mensch“ und seiner besonderen Fähigkeit zur Bildung gesellschaftlicher Strukturen, die weit über das biologisch Notwendige hinaus in den Stoffwechselkreislauf des Planeten Erde einzugreifen vermögen, wird deutlich, daß die getrennte Betrachtung dieses globalen Kreislaufes in einzelnen Untersphären, wie z.B. in der Bio-, Hydro-, Litho- oder Atmosphäre, zunehmend ihren Sinn verliert.

Die unbelebte Natur ist nun nicht mehr der bloße Lieferant fest vorgegebener Kontrollparameter – wie z.B. der mittleren Temperatur auf der Erdoberfläche – für die sich dynamisch entwickelnde lebende Natur, sondern sie verändert sich gemeinsam mit ihr.

Dieses vorerst letzte Stadium der Evolution ist eng mit der Anschauung der sogenannten *Gaia-Hypothese* verbunden.

## 4. Die Gaia-Hypothese

Seit mehr als einem Jahrhundert ist in den Geowissenschaften bekannt, daß die lebende Natur die auf der Erde stattfindenden physikalischen und chemischen Prozesse in starkem Maße beeinflußt, als Beispiel sei hier nur die Paläontologie als Fachdisziplin für die Altersbestimmung von Gesteinen an Hand von enthaltenen fossilen Rückständen erwähnt.

Trotzdem war und ist das vorherrschende Paradigma die Ansicht, daß die Kräfte der unbelebten Natur wie

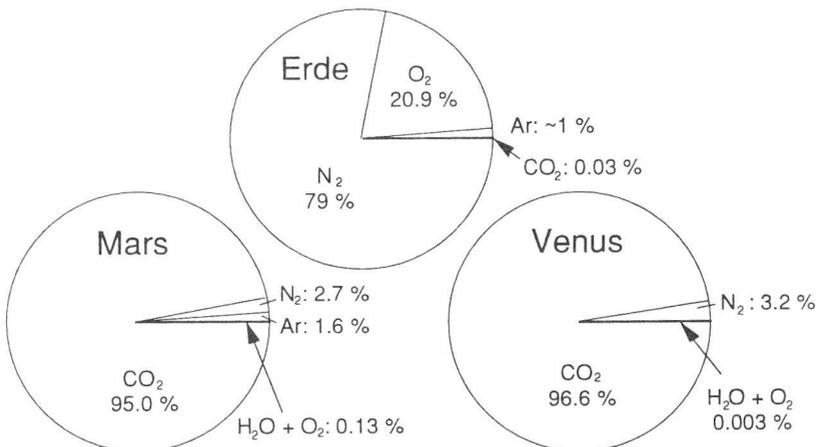
- die Veränderung der eingestrahnten Sonnenenergie
- die Kollision der Erde mit extraterrestrischen Körpern
- die Drift der kontinentalen Lithosphäre

für alle globalen Veränderungen wie die z.B. Klimaschwankungen maßgeblich sind, und daß die lebende Natur stets von diesen elementaren Naturgewalten mit unerbittlicher Konsequenz zur Anpassung gezwungen worden ist. Dieses Weltbild hat mit der Formulierung der Gaia-Hypothese durch Lovelock und Margulis (1973) einen deutlichen Bruch bekommen.

Ausgangspunkt war zunächst die Beobachtung, daß über die Analyse der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre eines Planeten mit ziemlicher Sicherheit die Frage entscheidbar ist, ob auf diesem Planeten Lebensformen existieren oder nicht (Lovelock, 1972). Ein toter Planet würde eine Atmosphäre besitzen, die nicht weit vom thermodynamischen Gleichgewicht mit Hydro- und Lithosphäre entfernt ist.

Im Gegensatz dazu würde die Atmosphäre eines lebenden Planeten deutliche Spuren biogenen Abfalls tragen und so die Existenz von Lebewesen verraten.

Abbildung 6



Vergleicht man nun unter den terrestrischen Planeten die Atmosphäre von Erde, Mars und Venus, so fällt auf, daß letztere stark vom  $\text{CO}_2$ -Gehalt dominiert werden und sich dadurch in einem abiotischen Zustand befinden. Die Erdatmosphäre zeigt dagegen bedeutende Anteile „inkompatibler“ Gase wie Sauerstoff oder auch Kohlenwasserstoffe, die ohne das Vorhandensein von Lebewesen nicht zu erklären sind (siehe Abbildung 6).

Darüber hinaus erweist sich diese Nichtgleichgewichts-Zusammensetzung der Erdatmosphäre als relativ stabil selbst über geologische Zeitskalen ( $> 1$  Million Jahre), welches nur über aktive Regulationsmechanismen erklärbar ist. Da die meisten dieser inkompatiblen Gase in kürzester Zeit durch den Sauerstoffanteil verbrannt werden würden, muß ein gigantischer Produktionsmechanismus für ständigen Nachschub sorgen.

Gas	Vorkommen (in vol-%)	Gleichgewichts- konzentration	Differenz (in Jahren)	Verweilzeit ( $10^6$ Tonnen/Jahr)	Produktions- menge
$\text{N}_2$	0,8	$10^{-10}$	$10^9$	$3 \cdot 10^6$	1000
$\text{CH}_4$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$< 10^{-35}$	$10^{29}$	7	2000
$\text{NH}_4\text{Cl}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$< 10^{-35}$	$10^{27}$	0,01	1500
$\text{H}_2$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$< 10^{-35}$	$10^{23}$	2	20

Tabelle nach Margulis und Hinkle (1991).

Diese Unterschiede können nur, da die terrestrischen Planeten des Sonnensystems vor ca. 4.5 Milliarden Jahren in nahezu gleicher chemischer Zusammensetzung entstanden sind, durch die geologische Evolution in Kopplung mit der Biosphäre entstanden sein. Das  $\text{CO}_2$  z.B. ist nicht von der Erde verschwunden, sondern der größte Teil ist als biogener Niederschlag in den Sedimenten der Lithosphäre in Form von Kalzit oder Dolomit chemisch gebunden. Diese Gesteine sind das Resultat der Aktivität von Mikroorganismen über Millionen von Jahren, die auf diese Weise für den Sauerstoffanteil in der Erdatmosphäre mit gesorgt haben (als ein Beispiel sei die Herausbildung von Korallenriffen genannt).

Der russische Wissenschaftler Vernadskii (1863–1945) hatte schon sehr früh erkannt, daß die Trennung zwischen lebender Natur und ihrer unbelebten Umgebung nur künstlich aufrecht erhalten werden kann, und er führte dazu den Begriff der „Noosphäre“ in die Literatur ein (Vernadskii, 1945). Dieser gilt heute gemeinhin als Vorläufer für die Gaia-Hypothese.

Deren Inhalt läßt sich in folgende prägnante Formulierung bringen (Love-lock, 1991):

„Die Gaia-Theorie beinhaltet die Evolution eines eng gekoppelten Systems, dessen Konstituenten die biogene Natur und deren Umgebung darstellen, einschließlich der Atmosphäre, der Ozeane und der Oberflächengesteine der Erde. Selbstregulationsmechanismen wichtiger Eigenschaften wie das Klima oder die

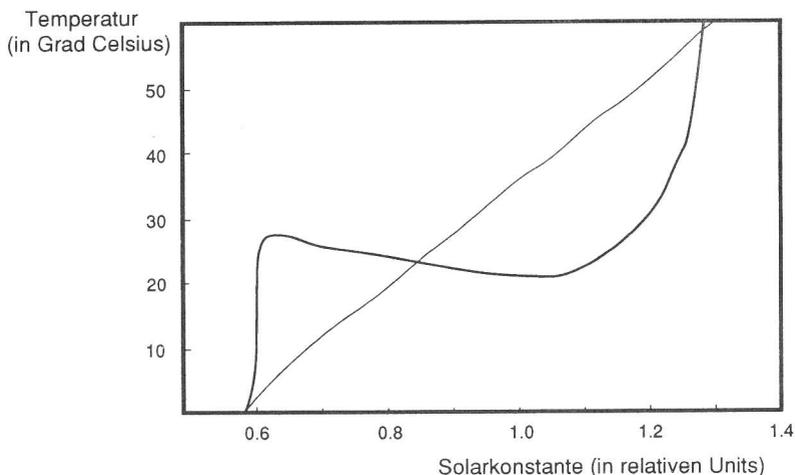
chemische Zusammensetzung der Atmosphäre sind die unmittelbare *Konsequenz* dieser engen Kopplung.“

Mitunter wird auch verkürzt von der Erde als einem in diesem Sinne einheitlichen und lebenden Organismus gesprochen.

Um ein anschauliches Beispiel für die Wirkungsweise dieser Selbstregulationsmechanismen geben zu können, wurde die Vorstellung einer fiktiven „Daisyworld“, einer Welt bestehend nur aus weißen und schwarzen Gänseblümchen, betrachtet. Das Problem der gekoppelten Stoff- und Energiekreisläufe wird dadurch drastisch vereinfacht, daß nur noch ein einziger Parameter, nämlich die Oberflächentemperatur des fiktiven Planeten, berücksichtigt werden muß. Die mittlere Oberflächentemperatur bestimmt sich entsprechend dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz aus der einfallenden Sonnenstrahlung und der wieder abgestrahlten Energie.

Der Planet sei komplett mit Gänseblümchen bewachsen, deren Wachstumsrate sei proportional zum Quadrat der Temperatur, und es gibt genügend Wasser als Nährstoff zum Wachstum der Pflanzen. Unter diesen Voraussetzungen erhält man ohne große Schwierigkeiten ein einfaches (auf dem Computer) lösbares System gewöhnlicher Differentialgleichungen. Es zeigt sich nun (Carter und Prince, 1981), daß das Wechselspiel zwischen weißen und schwarzen Gänseblümchen in der Lage ist, die Temperatur auf der Oberfläche dieses fiktiven Planeten innerhalb bestimmter Grenzen zu stabilisieren:

Abbildung 7



In dem Intervall zwischen 60% und 120% der momentanen Solarkonstanten bleibt die Temperatur nahezu konstant, unterhalb bzw. oberhalb dieses Bereiches stirbt der Planet. Die dünne Linie gibt den Temperaturverlauf ohne Rückwirkung der Biosphäre wieder.

Zusammenfassend läßt sich somit feststellen:

1. Das Leben ist ein Phänomen von planetarer Dimension. Es kann kein Leben lediglich in Spuren auf einem Planeten geben, es wäre so instabil wie etwa ein halber Organismus. Die Lebewesen sind dazu gezwungen, ihre Umwelt zu regulieren, ansonsten würden physikalisch-chemische Kräfte diese unbewohnbar machen.
2. Die Gaia-Hypothese und ähnliche Überlegungen erweitern die Darwinsche Evolutionstheorie. Die Entwicklung der Spezies kann nun nicht mehr isoliert von ihrer Umgebung betrachtet werden. Es ist nicht mehr hinreichend festzustellen, daß sich der Organismus mit der größten Nachkommenschaft durchsetzt. Es setzt sich am Ende der Organismus durch, der am besten mit seiner Umwelt umzugehen versteht.
3. Die Gaia-Hypothese und verwandte Ansätze verlangen neue philosophische Versuche, die komplexe Nichtlinearität der Welt zu begreifen.

Betrachtet man die Entwicklung des Planeten Erde über den Zeitraum seiner Entstehung von insgesamt ca. 5 Milliarden Jahren, so wird deutlich, daß deren Beschreibung in separaten Teildisziplinen wie Geophysik, Chemie, Biologie oder Soziologie nur in sehr unbefriedigendem Maß der komplizierten Verflechtung aller Evolutionsprozesse Rechnung trägt. Schon für das Verständnis der einfachsten globalen Sphäre, der Atmosphäre, reichen geophysikalische Gesetzmäßigkeiten allein nicht mehr aus und Kenntnisse aus Biologie und Chemie werden benötigt.

Eine breite fachspezifische Untersetzung, die der zu einem gegenseitigen Verständnis notwendigen Verallgemeinerung Rechnung trägt, kann nur auf dem Fundament der *physikalischen Prinzipien* von Selbstorganisation und Evolution einigermaßen erfolgversprechend sein.

Dieses deutlich werden zu lassen, ist Anliegen dieses Beitrages: Der Erkenntnisfortschritt in den zurückliegenden 15–20 Jahren hat zu einem kompletten Umbruch des physikalischen Weltbildes auf dem Gebiet der Nichtgleichgewichtsprozesse in der unbelebten Natur und der nichtlinearen Strukturbildung geführt, im Ausmaß durchaus vergleichbar mit der Revolutionierung des physikalischen Weltbildes durch die Quantentheorie und die Einsteinsche Relativitätstheorie in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts. Nur daß die einschneidenden Konsequenzen in diesem Falle besonders der Vereinheitlichung des naturwissenschaftlichen Weltbildes insgesamt dienen.

## Literatur

- Bergson, H., *Creative Evolution*, N. Holt & Co., New York 1911
- Boltzmann, L., Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Ansätzen über das Wärmegleichgewicht, in: *Abhandlungen*, II. Bd. 1877, S. 164, 165, 217, 218
- Cairns-Smith, A.G., *An Approach to a Blueprint for a Primitive Organism*, in: C.H. Waddington (Ed.), *Towards a Theoretical Biology*, Bd. 1, Edinburgh 1968, S. 57–66
- Cairns-Smith, A.G., *Genetic Takeover and the Mineral Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge 1982
- Chandrasekhar, S., *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, Clarendon Press, Oxford 1961
- Clausius, R., Über verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie, in: *Annalen der Physik und Chemie* 1865, 125, S. 353, 390
- Darwin, Ch., *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or, The Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*, J. Murray, London 1859
- Ebeling, W., *Physikalische Prinzipien der Selbstorganisation und Evolution*, in: *Wissenschaft und Fortschritt* 32 (1), 1982, S. 34–39
- Ebeling, W., *Thermodynamics of Selforganization and Evolution*, in: *Biomed. Biochim. Acta* 44 1985: 831–838
- Ebeling, W. und Feistel, R., *Physik der Selbstorganisation und Evolution*, Akademie-Verlag, Berlin 1986
- Eigen, M., *Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules*, in: *Naturwissenschaften* 58, 1971, S. 465–523
- Eigen, M. und Winkler, R., *Das Spiel, Naturgesetze steuern den Zufall*, Piper-Verlag, München 1975
- Glanssdorf, P. and Prigogine, I., *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations*, J. Wiley & Sons, New York 1971
- Haken, H., *Synergetics. An Introduction. Nonequilibrium Phase Transitions and Self-organization in Physics, Chemistry, and Biology*, Springer-Verlag, New York 1977
- Lovelock, J.E., *Gaia as seen through the atmosphere*, in: *Atmospheric Environment* 6, 1972, S. 579–580
- Lovelock, J.E. and Margulis, L., *Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: The Gaia hypothesis*, in: *Tellus* 26, 1973, S. 1–10
- Lovelock, J.E., *Geophysiology – The Science of Gaia*, in: *Scientists on Gaia*, S.H. Schneider und J.P. Boston (Eds.), MIT Press Cambridge, Massachusetts 1991, S. 3–10
- Margulis, L. and Hinkle, G., *The Biota and Gaia: 150 Years of Support for Environmental Sciences*, in: *Scientists on Gaia*, S.H. Schneider und J.P. Boston (Eds.), MIT Press Cambridge, Massachusetts 1991, S. 11–18
- Onsager, L., *Physical Review* 37, S. 405; *Physical Review* 38, 1931, S. 2265
- Prigogine, I., *Vom Sein zum Werden, Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften*. Piper-Verlag, München 1979
- Schneider, S.H. and Boston, P.J. (Eds.), *Scientists on Gaia*, MIT Press Cambridge, Massachusetts 1991
- Vernadskii, V., *The biosphere and the noosphere*, in: *American Scientist* 33, 1945, S. 1–12
- von Neumann, J., *Theory of self-reproducing automata*, University of Illinois Press, Urbana 1966