



Lothar Kolditz

Entropie, Selbstorganisation und Evolution, der Energieaustausch

Vortrag in der Klasse für Naturwissenschaften und Technikwissenschaften am 9. Juni 2016

Einleitung

Entropie und Selbstorganisation gehören zu den Begriffen, die oft allgemein verwendet werden, ohne dass in jedem Falle ein tieferes Verständnis ihrer Funktion vorhanden ist. Es gibt dem gegenüber tiefgründige wissenschaftliche Behandlungen dieses Problemkreises, besonders von Ilya Romanowitsch Prigogine (1917-2003) [1], Manfred Eigen [2] und Hermann Haken [3].

Auch die Leibniz-Sozietät hat sich dieser Thematik gewidmet. So hat Werner Ebeling den Festvortrag auf dem Leibniztag 2003 zum Thema Selbstorganisation gehalten, er hat außerdem in einem Vortrag zur Eröffnung des Arbeitskreises „Emergente Systeme, Information und Gesellschaft“ auf die wachsende universelle Bedeutung des Entropiebegriffes hingewiesen [4]. Der von Herbert Hörz und Rolf Löther geleitete Arbeitskreis „Zeit und Evolution“ hat Beiträge zu diesem Themenkreis geliefert. Von Rolf Löther stammen dazu in den Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät eine Reihe von Arbeiten [5].

Trotz der sehr zahlreichen ausgezeichneten und ausführlichen Darstellungen ist es nützlich, diese komplexe Problematik weiter aus verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten, um das Verständnis ihrer Funktion zu fördern, im Falle dieses Vortrages aus dem Blickwinkel der Chemie. Außerdem wird versucht, den Antrieb für die zu Grunde liegenden Vorgänge auf ein allgemein wirkendes Grundprinzip, nämlich den Energieaustausch in einem Kraftfeld zurück zu führen.

Energieaustausch und Evolution

Alle ablaufenden Vorgänge in der Natur sind mit einem Energieaustausch verbunden, der von einer Kraftwirkung angetrieben wird. Die Allgemeingültigkeit dieser These ist ableitbar aus der Feststellung, dass Naturvorgänge immer mit einer Wechselwirkung in einem Kraftfeld zwischen den beteiligten Teilchen verbunden sein müssen. Im Ablauf der Vorgänge verändern sich die Positionen der Teilchen und damit auch die Wechselwirkungen begleitet von einem Energieaustausch.

So rollt eine Kugel von einer Bergspitze unter Verlust von potentieller Energie einen freien Abhang hinunter. Die potentielle Energie wird in kinetische Energie umgewandelt, und die Wechselwirkungskraft stammt in diesem Falle von der Gravitation.

Das ist ein besonders einfacher Fall eines mit Energieaustausch ablaufenden Vorganges. Bei Reaktionen, in denen Veränderungen von Substanzen eintreten, werden kompliziertere Verhältnisse wirksam. Prinzipiell handelt es sich aber auch in diesen Fällen um Triebkräfte, die auf energetischen Umsetzungen unter Krafteinwirkung beruhen.

Dabei ist zu bedenken, dass Masse und Energie unmittelbar mit der Materie verbundene Eigenschaften sind. Sie äußern sich im Erscheinungsbild abhängig von vorhandenen Bedingungen. Licht kann als elektromagnetische Welle auftreten und Interferenzerscheinungen zeigen, aber auch in Photonen mit der Energie $h\nu$ Korpuskular-Eigenschaften annehmen.

Besonders in der Paarbildung werden die unterschiedlichen Erscheinungen deutlich. In dem klassischen von Irène Curie (1897 – 1956) und Frédéric Joliot (1900 – 1958) nachgewiesenen Fall geht ein γ -Photon mit einer Energie von 1,022 MeV in ein positiv geladenes Positron und ein negativ geladenes Elektron über, die im Magnetfeld entsprechende Ablenkungen zeigen. Die Energieangabe entspricht der Ruhemasse eines Positrons und eines Elektrons.

Der Vortrag „Evolution der chemischen Verbindungen“ [6] beschäftigte sich mit der Bildung der Atome nach dem Urknall und zwar durch Kernfusionsreaktionen bis zum Eisen, weiter mit dem Entstehen schwerer Elemente bis zum Wismut in Neutroneneinfangreaktionen mit anschließenden β^- -Prozessen (Elektronenabspaltung aus dem Kern und damit Umwandlung von Neutronen in Protonen mit Erhöhung der positiven Kernladung). Zu diesen Neutroneneinfangreaktionen werden Neutronendichten benötigt, wie sie in pulsierenden roten Riesensternen auftreten. Neutronenreichere Elemente wie Thorium Th und Uran U entstehen bei noch höheren Neutronendichten in Schockwellen von Supernova-Explosionen. Ein weiterer Prozess, der auch in Schockwellen-Schichten von Supernova-Explosionen auftritt, besteht in Protonen-Einfangprozessen oder in aufeinander folgenden Protonen-Einfangreaktionen mit anschließendem β^+ -Zerfall (Positronen-Abspaltung aus dem Kern, die Kernladung erniedrigt sich). Für die Einleitung aller dieser Prozesse ist die Gravitation der wesentliche Antrieb.

Sternexplosionen verteilen die Elemente in den unendlichen Weiten des Universums. Ihre Reaktionen untereinander liefern Verbindungen, wie sie in [6] beschrieben werden. Dabei wurde die Betrachtung auf die entstandenen Verbindungen fokussiert, wobei nicht nur, wie häufig üblich, die organischen Kohlenstoffverbindungen als Träger des Lebens Berücksichtigung fanden, sondern es wurde auch auf die anorganischen Substanzen hingewiesen, die für den Ablauf im gesamten Reaktionsgeschehen eine wichtige Rolle spielen.

Diese Betrachtung aus Sicht der entstandenen Substanzen mit ihren besonderen Bindungseigenschaften soll nun ergänzt werden durch eine Diskussion der Entwicklung der Reaktionsmöglichkeiten, die sich mit der Bildung immer komplizierterer Verbindungen und dem Fortschreiten der Selbstorganisation ergibt. Wir richten den Blick nunmehr verstärkt auf den Reaktionsprozess im Unterschied zu der früheren Betrachtung des Endproduktes der Reaktion.

Die Entropie

Rudolf Clausius (1822-1888) hat den Begriff der Entropie zur Beschreibung von thermodynamischen Kreisprozessen geprägt. Das Differential der Entropie für reversible Vorgänge ist das Verhältnis von übertragener Wärme δQ_{rev} zur absoluten Temperatur T :

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

Ludwig Boltzmann (1844-1906) wird oft mit der Gleichung

$$S = k \ln W$$

im Zusammenhang genannt, wobei S die Entropie, k die Boltzmann-Konstante und $\ln W$ der natürliche Logarithmus der Anzahl der möglichen Mikrozustände im System ist. Das statistische Gewicht der möglichen Mikrozustände ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit des Zustandes, worauf die Verwendung des Buchstaben W hinweist. Die Boltzmann-Konstante ist die allgemeine Gaskonstante R dividiert durch die Avogadro-Konstante N , die die Anzahl der Teilchen in einem Mol darstellt:¹

Die Gleichung $S = k \ln W$ geht auf Max Planck (1858-1947) zurück, der sie in Präzisierung der Ideen von Boltzmann formulierte.

Bei der hier betrachteten Entropie handelt es sich um die thermodynamische Entropie, die Ähnlichkeiten mit der von Shannon in der Informationstheorie eingeführten Größe aufweist, aber nicht direkt damit gleichzusetzen ist. Bei der Shannon-Entropie tritt der Informationsaustausch an Stelle des Energieaustausches in den Vordergrund.

Diese Ausführungen stellen die wissenschaftliche Grundlage zum Verständnis der Entropie dar. Wir wollen uns in einer etwas anderen Sichtweise dem Problem nähern und beginnen mit einem

¹ Die von Boltzmann verwendete Loschmidt-Zahl ist die von Josef Loschmidt (1821-1895) ermittelte Anzahl der Gasmoleküle in einem Kubikzentimeter Gas unter Normalbedingungen. Mit dem Molvolumen multipliziert ergibt sie die Avogadro-Konstante.

Experiment, das durch zwei aneinander liegende mit Schieber getrennte Behälter gekennzeichnet ist. In einem Behälter befindet sich das Edelgas Neon Ne, im anderen das Edelgas Argon Ar. Bei Öffnung des Schiebers beginnen sich die Gase zu mischen, bis nach vollständiger Vermischung keine Konzentrationsänderung mehr festgestellt werden kann. Bewegung findet zwar immer noch statt, Ne- und Ar-Atome wechseln weiterhin ihre Plätze, aber nunmehr im gegenseitigen Ausgleich. Eine makroskopische Änderung ist nicht zu bemerken, da ein Gleichgewicht eingetreten ist. Eine Entmischung der Edelgasatome in Richtung auf den ursprünglichen Zustand findet ohne Eingriff von außen auf das System nicht statt.

Die Triebkraft für den Ablauf der Vermischungsreaktion ist die Entropie, die auch mit dem Ordnungszustand im System in Zusammenhang gebracht werden kann. Die Mischung hat einen geringeren Ordnungszustand als die getrennten Gase. Anstieg von Entropie bedeutet damit Anstieg an Unordnung. Im Falle der Edelgase ist dies einleuchtend. Für komplexere Systeme aber ist diese Deutung nicht immer klar ersichtlich.

Eine Entmischung im geschlossenen System ist, wie bereits angedeutet, nicht erreichbar. Die Entmischung kann nur mit Öffnung des Systems und Zufuhr von Energie bewirkt werden.

Das Gemisch müsste z. B. abgekühlt und verflüssigt werden. Danach kann durch Destillation eine Trennung erfolgen. Die Entmischung ist also nur durch Energiezufuhr von außerhalb des Systems möglich. Um auf das Bild der vom Bergabhang rollenden Kugel zurückzukommen, besteht der Vorgang der zugeführten Energie in einer Anhebung der Kugel auf die Bergspitze und ein Festhalten (geschlossener Schieber). Der entmischte Zustand hat eindeutig eine höhere Energie als die Mischung. Eine mathematische Beschreibung des Vorganges lautet

$$\Delta G = -T\Delta S$$

ΔG ist die freie Energie, T die absolute Temperatur und ΔS die Entropiedifferenz der beiden Zustände. ΔS steigt während der Mischung an, ist also positiv, die freie Energie damit negativ. Bei Ablauf der Reaktion wird die freie Energie vom System abgegeben (negative Zählung). Die mathematische Beschreibung stellt zwar die Triebkraft dar, nämlich die Abgabe der freien Energie, erfasst aber nicht die Mikrovorgänge, die inneren Vorgänge für die Abnahme der freien Energie.

Die Betrachtung der inneren Vorgänge führt weiter. Neon und Argon bilden zwar keine chemische Verbindung miteinander, üben aber doch eine gegenseitige Kraftwirkung durch die Van-der-Waals-Bindung aufeinander aus. Die Umsetzung in diesem Kraftfeld besteht im Energieausgleich der gegenseitigen Wechselwirkung unter den Atomen bis hin zum Mischungsgleichgewicht.

Die chemische Reaktion

Bei jeder chemischen Reaktion werden Bindungen zwischen Atomen gespalten und auch neue geknüpft. Dabei wird Energie umgesetzt. Es tritt die Reaktionsenergie auf. Üblich ist es, die Bezeichnung Enthalpie zu verwenden, wenn die Reaktion unter konstantem Druck abläuft. Die Bezeichnung Energie wird gebraucht, wenn konstantes Volumen eingehalten wird. Der Reaktionsenthalpie H , die bei Ablauf der Reaktion unter konstantem Druck freigesetzt oder gebunden wird, entspricht erweitert durch ein Entropieglied die freie Reaktionsenthalpie G .

Die allgemeine Beschreibung der Reaktion wird durch die Gleichung

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

ausgedrückt. ΔG ist die freie Reaktionsenthalpie, ΔH die Reaktionsenthalpie, die bei der Reaktion entsteht oder auch gebunden wird.

Bei dieser Gleichung handelt es sich um die Formulierung des II. Hauptsatzes der Thermodynamik für die chemische Reaktion. Dieser II. Hauptsatz stellt ein Naturgesetz von grundsätzlicher Bedeutung dar, das auch in anderen Bereichen zur Geltung kommt und hochkomplexe Vorgänge erfasst.

Für das Verhalten von Individuen wurde im Vortrag Deterministisches Chaos und Gesellschaft [7] eine Gleichung abgeleitet, die dem II. Hauptsatz entspricht:

$$F_i = E_i - \varphi \cdot E_i / v_i$$

F_i ist der als Energiegröße aufgefasste freie Antrieb für eine Handlung des Individuums, E_i die zugehörige Erfahrung des Individuums mit der Dimension Energie, v_i die Aufnahmekapazität des Individuums für die Erfahrung E_i . Die Größe φ entspricht der Gesamtaufnahmekapazität für die Erfahrung.

Der Ausdruck E_i/v_i hat Entropiecharakter und stellt damit eine Ordnungsfunktion dar.

Werner Ebeling und Karl Lanius (1927 – 2010) [8] (vgl. auch [7]) haben in ihrer Betrachtung zur Vorhersagbarkeit komplexer Prozesse die Shannon-Entropie aus der Informationstheorie herangezogen, die diskrete Zustände und ihre Wahrscheinlichkeit behandelt. Dabei wurde das von Andrej N. Kolmogorov (1903 – 1987) entwickelte Konzept der dynamischen Entropie verwendet, das sich auf die Shannon-Entropie bezieht.

Allgemein ist zu vermuten, dass Ordnungsfunktionen mit Entropiecharakter bei allen komplizierten Vorgängen eine wichtige Rolle spielen.

Es wäre nützlich, die verschiedenen Anwendungen der Entropiefunktion zu vergleichen und ihre Gemeinsamkeiten und Unterschiede festzustellen. Das würde aber über den Rahmen dieses Vortrages hinausgehen.

Die Reaktionskinetik

Im chemischen Reaktionsgeschehen sind wir eine Stufe weiter vorangeschritten. Es entstehen neue Verbindungen mit festen Bindungen zwischen den Atomen.

Die thermodynamische Beschreibung durch den II. Hauptsatz gibt die Möglichkeit der Reaktion an. Ob sie eintritt, hängt von den Bedingungen in der Reaktionskinetik ab.

Wesentlich für den Ablauf einer Reaktion ist die Begegnung der Reaktionsteilnehmer. In Gassystemen oder auch in Flüssigkeiten ist dies mit der Brownschen Molekularbewegung gewährleistet. Bei Reaktion mit Festkörperbeteiligung kann die Reaktion an der Oberfläche durch sich annähernde Verbindungen erfolgen. Im Festkörper selbst ist die freie Wanderung der Teilchen behindert. Deshalb muss in der Regel die interne Festkörperreaktion durch höhere Temperaturen gefördert werden. Unter Normalbedingungen werden längere Zeiten benötigt, die aber in der Evolution vorhanden sind.

Der analoge Vergleich mit der Kugel am Bergabhang wird nun etwas erweitert durch Einbau von Mulden im Bergabhang, in die die Kugel gehoben oder in denen durch Festhalten der Kugel das Abwärtsrollen unterbrochen werden kann. Der Bergabhang mit Mulden entspricht besser der Realität als der glatte Bergabhang. Die Mulden symbolisieren Reaktionshemmungen, die es glücklicherweise gibt. Ohne Reaktionshemmungen würden z. B. bei Sauerstoffüberschuss alle organischen Kohlenstoffverbindungen zu CO_2 , H_2O , SO_2 und N_2 umgesetzt werden. Leben wäre damit nicht möglich.

Zum Ablauf einer Reaktion müssen Reaktionshemmungen energetisch beseitigt werden. Die Kugel muss über den Muldenrand gehoben werden. Das kann z. B. in einem Gemisch aus brennbarem Gas und Sauerstoff durch einen Funken geschehen. Die Reaktion kommt in Gang und kann sich bis zur Explosion steigern. Energie für die jeweils nachfolgende Reaktion wird vom Überschuss der vorausgehenden Reaktion geliefert.

Das Bild der Kugel in der Mulde im Bergabhang vermittelt einen weiteren wichtigen Einblick in das Reaktionsgeschehen. Reaktionshemmungen treten bei vielen Reaktionen dadurch ein, dass sie zu ihrem Ablauf die Überwindung einer Aktivierungsenergie benötigen, die durch die Wand der Mulde im Bergabhang symbolisiert wird.² Es ist aber nicht in jedem Falle notwendig, die gesamte Höhe der Energiebarriere aufzubringen, um die Barriere zu überwinden. Es gibt Substanzen, die die Energiebarriere verringern, die Katalysatoren.

² Wie der II. Hauptsatz der Thermodynamik nur die Möglichkeit für die chemische Reaktion erfasst, so gibt auch die Gleichung für F_i nur die Möglichkeit der Handlung wieder. Für die Durchführung der Handlung ist ein Analogon zur chemischen Reaktionskinetik erforderlich, das Aktivierungsschranken oder Reizschwellen berücksichtigt.

Katalysatoren

Katalysatoren haben die Eigenschaft, mit einer umzusetzenden Verbindung in Wechselwirkung zu treten und diese in einen reaktionsbereiten Zustand zu überführen. Nach der Reaktion löst sich die entstandene Verbindung ab, und der Katalysator steht für einen neuen Reaktionszyklus bereit.

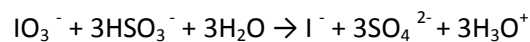
Die Katalyse kann in einem homogenen Bereich erfolgen, z. B. in einer Flüssigkeit oder als Heterogenreaktion an einer Festkörperoberfläche ablaufen.

Ein Gemisch aus Wasserstoff und Sauerstoff, das Knallgasgemisch, kann wie das oben beschriebene Gemisch aus brennbarem Gas und Sauerstoff durch einen Funken entzündet werden, aber auch durch Katalyse an Platinoberflächen, was Johann Wolfgang Döbereiner (1780-1849) im Jahre 1823 in Jena entdeckte. Die Anlagerung der Wasserstoffmolekeln H_2 an die Platinoberfläche verändert die Wasserstoff-Wasserstoff-Bindung und macht sie reaktionsbereit, in diesem Falle mit Sauerstoff. Das Reaktionsprodukt Wasser löst sich von der Oberfläche ab, die dann zur erneuten Katalyse bereitsteht.

In der Entwicklung der chemischen Verbindungen spielte die Katalyse an festen Oberflächen z. B. an den weit verbreiteten Silikaten eine herausragende Rolle. Der Katalysator wird in der Regel zurückgebildet, also nicht verbraucht, es sei denn, dass der homogene Katalysator in einer Nebenreaktion verändert wird oder in der heterogenen Katalyse die aktive Oberfläche durch andere fest haftende Verbindungen blockiert wird (Katalysatorgifte). Im lebenden Organismus tritt die Katalyse als beherrschender Reaktionstyp auf. Alle Enzyme sind Katalysatoren.

Autokatalyse

Eine besondere Art der Katalyse tritt auf, wenn der Katalysator im Verlauf der Reaktion entsteht oder verbraucht wird. So verläuft die Reduktion von Permanganat MnO_4^- durch Oxalsäure $(COOH)_2$ am Anfang sehr langsam an. Die während der Umsetzung entstehenden Mn^{2+} -Ionen wirken katalytisch und beschleunigen die Reaktion maßgeblich. Ein solcher Vorgang wird Autokatalyse genannt. Auch die Oxydation von Sulfit durch Jodat in essigsaurer Lösung (Landolt-Reaktion) ist autokatalytisch



Der Verlauf dieser Reaktion beruht darauf, dass aus Jodat und Jodid Jod gebildet wird, das die Reaktion von Sulfit zu Sulfat bewirkt und beschleunigt. Es entsteht eine positive Rückkopplung.

Oszillierende Reaktionen

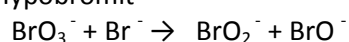
Besonders interessant unter den autokatalytischen Vorgängen sind die oszillierenden Reaktionen. Das klassische Beispiel dafür wurde 1951 von Boris Pavlowitsch Belousov (1893 – 1970) entdeckt.

Es handelt sich um die Bromierung von Malonsäure $HOOC-CH_2-COOH$ zu Brommalonsäure $HOOC-CHBr-COOH$ mittels Bromat BrO_3^- und Bromid Br^- bei Gegenwart von Cer-Ionen Ce^{3+} und Ce^{4+} .

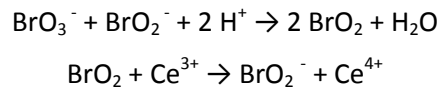
Die Reaktion schwankt zwischen zwei Zuständen hin und her, die mit den Konzentrationen von Ce^{3+} - und Ce^{4+} -Ionen verbunden sind, was durch Zugabe von Ferroin verdeutlicht wird. Ferroin wird bei Überschuss von Ce^{3+} rot und bei Überschuss von Ce^{4+} blau gefärbt. Es gelang Belousov nicht, seine Untersuchungen in bekannten wissenschaftlichen Zeitschriften zu veröffentlichen. Die Arbeit wurde abgelehnt mit der Begründung, dass sie nicht mit der Thermodynamik übereinstimme und dem II. Hauptsatz widerspräche.

In den 60er Jahren gelang Anatoli Markowitsch Zhabotinsky (1938 – 2008) der Nachweis, dass die Reaktion eine im System begründete Oszillation darstellt, bei der die Komponenten in ihren Konzentrationen zeitlich hin und her schwanken. Die komplizierte Reaktionsfolge wurde von Richard Field und Mitarbeitern in den wesentlichen Schritten aufgeklärt [9], [10].

Es handelt sich um hintereinander geschaltete autokatalytische Reaktionen, deren Einzelschritte auch heute noch nicht vollständig erfasst sind. Die Hauptschritte bestehen in einer Reaktion von Bromat und Bromid zu Bromit und Hypobromit



Aus Bromat und Bromit bildet sich Bromdioxid BrO_2 , das von Ce^{3+} zu Bromit BrO_2^- reduziert wird.



In den Wechsel der Oxydationsstufen greift das dabei entstehende Ce^{4+} oxydierend ein.

Die Bromierung der Malonsäure wird durch Umsetzungsprodukte von Bromit BrO_2^- und Bromid Br^- bewirkt, sehr wahrscheinlich durch den Eingriff einer dabei entstehenden aktivierten elementaren Bromspezies.

In dem Reaktionsgeschehen pendeln autokatalytisch gesteuert die Konzentrationen der Teilnehmer hin und her. Bei sehr niedriger Bromidkonzentration kommt die Bromierung der Malonsäure praktisch zum Erliegen, um bei Entstehen von Bromid in der komplexen Reaktion wieder angefacht zu werden.

Der II. Hauptsatz $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ wird dabei nicht verletzt. Während des gesamten Prozesses sinkt in der Summierung die freie Enthalpie ΔG .

Evolution der Verbindungen

Die geschilderten Reaktionsmechanismen Katalyse, Autokatalyse, oszillierende Reaktionen ermöglichen nach Entstehung der Atome und ihrer Verbindungen eine Entwicklung der Reaktionen von einfachen Umsetzungen zu immer komplizierteren Reaktionszyklen. Mit den entstandenen Verbindungen hat sich eine Energiespeicherung herausgebildet, die sich weiter entwickelte. Vorteilhafte Systeme dominierten und bildeten den Ausgang für eine Weiterentwicklung, so dass das gesamte Reaktionsgeschehen immer komplexere Formen annahm [11].

In funktionierenden lebenden Systemen haben sich schließlich Reaktionszyklen herausgebildet, die sich hintereinander reihen. Sie gelangen nicht zum chemischen Gleichgewicht, sondern reagieren fernab vom Gleichgewicht. Zwar setzen sich die Substanzen in Richtung auf das Gleichgewicht um, die produzierten Verbindungen werden aber vor Erreichung des Gleichgewichtes weiter verwendet. Es entsteht kein ruhendes Gleichgewicht, was den Tod des lebenden Systems bedeuten würde, sondern ein Fließgleichgewicht. Substanzen werden am Anfang einer Kette zugeführt, Nebenprodukte scheiden aus der Kette aus.

Die beherrschende Rolle im Fließgleichgewicht spielen autokatalytische Reaktionen. Es entstehen positive Rückkopplungen, die dem lebenden System eine Entfernung vom Gleichgewicht ermöglichen. Eingebaute Regelprozesse verhindern ein Ausufern der Reaktion. Diese Verhältnisse hat Ilya Prigogine in seinen Arbeiten über Dissipative Strukturen, Selbstorganisation und Irreversibilität beschrieben [1], [12], [13] vgl. [4], [14].

Selbstorganisation und Evolution

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Schritte der Selbstorganisation im materiellen Zusammenspiel von Energie und Masse praktisch bereits behandelt, ohne sie immer als solche zu benennen. Es beginnt mit der Bildung der Atome der Elemente und wird fortgeführt in ihrer Vereinigung zu Verbindungen, gekennzeichnet durch eine Entwicklung von einfacher zu komplexer Zusammensetzung.

Voraussetzung für diese Entwicklung sind die in der Thermodynamik und der Reaktionskinetik zusammengefassten Eigenschaften der Materie im Erscheinungsbild von Energie und Masse, symbolisiert im Kugelmodell durch die Mulden im Bergabhang. Ein glatter Bergabhang würde nicht zur Entwicklung führen. Wesentlich ist die Möglichkeit, durch Energiezufuhr ein Anheben in höhere, also energiereichere Mulden, zu bewirken.

Mit der Entwicklung der Verbindungen zu komplexeren Verhältnissen wird auch eine Entwicklung der Reaktionsmöglichkeiten dieser Verbindungen untereinander eingeleitet. Beherrschend sind in diesem Zusammenhang die Katalyse und die Autokatalyse. Sie führten zu immer komplexeren Reaktionszyklen, was schließlich das Entstehen von Leben ermöglichte und sich dann in einer höheren

Form der Selbstorganisation fortsetzte. Dazu brauchte die Evolution eine lange Zeit. Das Voranschreiten der Selbstorganisation ist bedingt durch die Eigenschaften der Materie im komplexen Zusammenwirken bei der Entwicklung der Reaktionstypen.

Reaktionszyklen sind die beherrschenden Formen in der lebenden Materie. Sie wurden aus den Urzyklen schrittweise in Jahrmilliarden aufgebaut. Wir wissen heute, dass sie schon in den Bakterien und Archaeen vorhanden sind und zu den Eukaryoten übergangen [15].

Die Bedeutung der oszillierenden Reaktionen für den Ausbau der Selbstorganisation steht im Einklang mit den Zyklen und den Hyperzyklen, die Manfred Eigen als zyklische Verknüpfung von Reaktionszyklen zur Erklärung für die Selbstorganisation in der Evolution formulierte [3], [16].

Als gemeinsames Band für die Triebkräfte der hier diskutierten Vorgänge ist der als Eigenschaft der Materie anzusehende Energieaustausch in einem Kraftfeld aufzufassen und das damit verbundene Umverteilungsbestreben der Energie, was Ilya Prigogine in seinen Dissipativen Strukturen zum Ausdruck bringt [1], [12], [13]. Es ist als Triebkraft für das Wirken von Entropie und Selbstorganisation im Fortschritt der gesamten Evolution anzusehen und fügt sich damit auch ein in die Lehre der Synergetik von Hermann Haken [3], [17], mit der das Zusammenwirken von Teilen im komplexen dynamischen System und ihrer Wechselwirkung erfasst wird.

Zum Schluss erhebt sich die Frage, ob neben der geschilderten gerichteten Entwicklung auch eine Rückkehr in Richtung auf den Ausgangszustand möglich ist. Ein Hinweis folgt aus den Kollisionsexperimenten mit Protonen und auch schweren Atomkernen (Blei) im Large Hadron Collider (LHC) im CERN. Bei diesen Experimenten tritt Zersplitterung von Teilchen und Bildung eines Quark-Gluonen-Plasmas bei Energien ein, die jedoch noch weit unterhalb der Werte von kosmischer Strahlung liegen. Im begonnenen Lauf 2 des LHC hofft man die Protonenenergie auf 7 TeV steigern zu können, was beim Zusammenprall $14 \text{ TeV} = 14 \cdot 10^{12} \text{ eV}$ liefern würde [18].

Die kosmische Strahlung besteht aus Protonen, Elektronen und ionisierten Atomen. Relativ niedrige Energien haben die von der Sonne ausgesandten Teilchen (Sonnenwind). Besonders hohe Teilchenenergien (10^{20} eV) treten in der Galaktischen Kosmischen und der Extragalaktischen Kosmischen Strahlung auf. Ihr Ursprung wird auf Supernovae, Pulsare, Quasare und Jets von Schwarzen Löchern zurückgeführt [19].

Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist die Kosmische Gammastrahlung. In ihr treten die in den letzten Jahrzehnten entdeckten Gamma-Blitze auf, deren Herkunft noch nicht vollständig geklärt ist. An ihrer Entstehung sind aber wohl Supernova-Explosionen, Neutronenstern-Verschmelzungen und Schwarze Löcher beteiligt [20].

Die Supernova-Explosionen verteilen nicht nur gebildete schwere Elemente, sondern erzeugen gleichzeitig durch hohe Neutronendichten in ihren Schockwellen neutronenreichere Elemente. Zertrümmerungsreaktionen laufen dabei aber auch in viel größerem Ausmaß ab, als es im LHC im CERN möglich ist.

Einen wesentlichen Prozess spielt bei allen diesen Vorgängen die Entropie. Erniedrigung von Entropie kann in geschlossenen Systemen nur durch Öffnen und Energiezufuhr von außen erreicht werden, also – um das Ordnungsbild zu gebrauchen – Erhöhung von Ordnung nur im offenen System.

Bei Annahme der Unendlichkeit des Universums ist ein geschlossenes System immer ein Teilsystem des Ganzen, was zum offenen System erweitert werden kann.

Einzelenergiezufuhren in offene Systeme etwa durch Supernovae oder auch Schwarze Löcher reichen als Rückkehr zum Ausgangszustand nicht aus. Es muss dazu eine umfassendere Umwandlung eintreten. Möglicherweise ereignet sich das auch außerhalb des uns sichtbar zugänglichen Kosmos, z.B. durch Bildung eines überdimensionalen Schwarzen Loches.

Offensichtlich spielt in allen diesen Fällen die Gravitation eine entscheidende Rolle. Trotz zahlreicher Versuche ist es bisher nicht gelungen, die Gravitation mit den anderen drei Grundkräften der Physik, der starken und der schwachen Kernkraft und der elektromagnetischen Kraft zu einer einheitlichen Theorie zusammenzufassen. Langjährige Bemühungen Albert Einsteins (1879 – 1955) und vieler namhafter Physiker und Mathematiker blieben erfolglos, obwohl die verschiedensten Wege untersucht wurden. Rüdiger Vaas hat in seinem Buch „Jenseits von Einsteins Universum“ [21] eine umfangreiche Zusammenstellung und Bewertung dieser Arbeiten geliefert. Es zeigt sich in diesem Zu-

sammenhang auch, dass trotz der glänzenden Bestätigung von Voraussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie noch Unklarheiten bezüglich des Kosmischen Standardmodells bestehen, die kontrovers diskutiert werden. Dazu gehören auch die Aussagen zur Dunklen Masse und Dunklen Energie. Die Stringtheorie und die Schleifen-Quanten-Gravitation werden als aussichtsreiche Theorien zur Lösung der angestrebten Vereinheitlichung angesehen, jedoch gibt es bisher keine quantitativen Aussagen dieser Theorien, die experimentell zu prüfen wären, sondern nur qualitative Äußerungen.

Die Quantentheorie der Gravitation, also die Einbeziehung der Quantenmechanik in die Gravitationstheorie, ist noch mit zahlreichen ungelösten Problemen behaftet, so dass eine einheitliche Beschreibung von Materie im Universum nicht erreichbar ist. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Gravitation. Sie ist entscheidend beteiligt an der Evolution im Universum und Schaffung von Fusionsbedingungen zur Elemententstehung und weiteren Reaktionen zur Elementproduktion im Universum. Sie ist die maßgebliche Kraft in den Vorgängen im Universum bis hin zu den Schwarzen Löchern.

Die Gravitation, die sich nach heutigen Erkenntnissen nicht abschirmen lässt im Gegensatz zu den anderen Grundkräften, erzeugt wohl ein Feld, das als Motor der fortlaufenden Evolution dient. Im Gegensatz dazu gibt es auch die Anschauung, dass die Gravitation keine Kraft sei, sondern nach der Allgemeinen Relativitätstheorie lediglich als Ausbuchtung in der Raumzeit aufzufassen ist. Für die Klärung der Quantentheorie der Gravitation wird neuerdings ein Vorgehen vorgeschlagen, das als Grundlage die Verschränkung von Raum und Zeit beinhaltet [22]. Auch diese Ausführungen unterstreichen die noch vorhandenen offenen Fragen im Theoriengebäude der Physik.

Der nach Auswertung der Aufnahmedaten vom September 2015 im Februar 2016 bekanntgegebene Nachweis von Gravitationswellen hat Einsteins Voraussage bestätigt und ein neues Fenster in der Astronomie geöffnet, das viele neue Erkenntnisse erwarten lässt. Die nachgewiesenen Gravitationswellen stammen von einer Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher mit insgesamt 62 Sonnenmassen vor 1,3 Milliarden Jahren. Drei Sonnenmassen an Energie wurden dabei in Form von Gravitationswellen abgestrahlt [23].

Gravitationswellen entstehen bei der Beschleunigung von Massen und äußern sich in Signalen, die die Raumzeit durchheilen. Die kosmische Inflation kurz nach dem Urknall müsste ein besonders prägnantes Signal in der Raumzeit erzeugt haben. Die Erschließung der Gravitationswellen sollte hierzu Aufklärung bringen können.

Das Wesen der Gravitation selbst ist damit aber noch nicht hinreichend geklärt. Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt mit den Feldgleichungen die Auswirkung der Gravitation und nicht ihre grundlegende Natur, sowie auch das Newtonsche Gravitationsgesetz die Wirkung der Gravitation unter klassischen Bedingungen wiedergibt.

Das Bestreben, die Gravitation mit den übrigen Grundkräften, der schwachen und der starken Kernkraft und der elektromagnetischen Wechselwirkung zu vereinigen, das Einstein nicht gelang und das in neuerer Zeit von einer Reihe bekannter Theoretiker, darunter Smolin, wieder in Angriff genommen wurde, halte ich für einen wenig erfolgversprechenden Weg. Die Gravitation erscheint vielmehr als eine eigenständige Urkraft, die sich nicht in die Kategorie der anderen Grundkräfte einreihen lässt.

Wir sind damit bei Fragen angekommen, deren Antwort noch sehr im Dunkeln liegt und deren Bearbeitung noch viel Nachdenken und Experimentieren erfordern wird. Es handelt sich aber auch um Fragen, die in letzter Konsequenz nicht voll lösbar erscheinen. Das betrifft besonders die Frage nach dem Ursprung von Materie, die wir nicht beantworten können, da wir selbst in diesem System befangen sind.

Literatur

- [1] Ilya Prigogine, Vom Sein zum Werden, Piper München Zürich, 5. Auflage 1988.
- [2] Manfred Eigen, Stufen zum Leben, Piper München Zürich 1987.
- [3] Hermann Haken, Erfolgsgeheimnisse der Natur, Deutsche Verlags-Anstalt Stuttgart 1981.

- [4] Werner Ebeling, Selbstorganisation – Entwicklung des Konzepts und neue Anwendungen, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, 60 [2003] Heft 4, S.37-47 und Vortrag Werner Ebeling: Entropie – ein Begriff der Physik, der universelle Bedeutung gewinnt, s. Bericht Dezember-Klassensitzung 2015: Emergente Systeme, <http://www.leibnizsozietat.de>.
- [5] <http://www.leibnizsozietat.de>
- [6] Lothar Kolditz, Evolution der chemischen Verbindungen, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät 85 [2006] S.57-79.
- [7] Lothar Kolditz, Deterministisches Chaos und Gesellschaft, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 110 [2011] S. 107-122.
- [8] Werner Ebeling, Karl Lanius, Zur Vorhersagbarkeit komplexer Prozesse, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Band 42 [2000] 5-26.
- [9] Philip Ball, Chemie der Zukunft – Magie oder Design? VCH Verlagsgesellschaft mbH.1996, S. 337-346.
- [10] R. M.Noyes u. R. J. Field, Ann. Rev. Phys. Chem. 25 [1974] S. 95.
- [11] Lothar Kolditz, Chemie und Zeit, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät 80 [2005] S.115-123.
- [12] Ilya Prigogine, Introduction to Irreversible Processes, Charles C. Thomson Publishers, 1955.
- [13] Grégoire Nicolis u. Ilya Prigogine, Self-Organization in Nonequilibrium Systems, Wiley-Interscience, New York 1977.
- [14] Hans Joachim Schlichting, Von der Dissipation zur dissipativen Struktur, Praxis der Naturwissenschaften /Physik 49/2 [2000] S.12-16.
- [15] Nicole Paschek, Entscheidendes Bindeglied in der Evolution des Lebens, Spektrum der Wissenschaften, August 2015, S. 10.
- [16] Manfred Eigen, Peter Schuster, The Hypercycle – A Principle of Natural Self-Organization, Springer Verlag Berlin 1979.
- [17] Hermann Haken, Synergetik, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1982.
- [18] Andreas Stiller, Licht ins Dunkel – CERN startet Run 2 des Large Hadron Collider, c't magazin für computertechnik Heft 6, 2015 S. 74-77.
- [19] vgl. Wikipedia – Kosmische Strahlung.
- [20] Jan Hattenbach, Gammablitz im neuen Licht, Spektrum der Wissenschaften, Januar 2009., S. 14.
- [21] Rüdiger Vaas, Jenseits von Einsteins Universum – Von der Relativitätstheorie zur Quantengravitation, Franckh-Kosmos Verlags GmbH & Co. KG, Stuttgart 2015, 463 S.
- [22] Ron Cowen, Quantengravitation Raum-Zeit-Verschränkung, Spektrum der Wissenschaften, April 2016, S. 48-53.
- [23] vgl. Wikipedia – Gravitationswellen.

Adresse des Verfassers:

Prof. Dr. Lothar Kolditz (MLS)
Steinförde, Steinerne Furth 16
16798 Fürstenberg/Havel
eMail: lothar.kolditz@t-online.de