

Energie, Entropie, Synergie – Ein Zugang zur nichtlinearen Physik

H. Joachim Schlichting

Der römische Brunnen

*Auf steigt der Strahl und fallend gießt
Er voll der Marmorschale Rund,
Die, sich verschleiern, überfließt,
In einer zweiten Schale Grund;
Die zweite gibt, sie wird zu reich,
Der dritten wallend ihre Flut,
Und jede nimmt und gibt zugleich
Und strömt und ruht.*

CONRAD FERDINAND MEYER

Energie und Entropie erscheinen nicht nur für das Verständnis und eine sachgerechte Einschätzung der Energie- und Umweltproblematik von Bedeutung. Darüber hinaus ermöglichen diese Konzepte einen relativ einfachen Zugang zu Problemen der nichtlinearen Physik. Es wird dargestellt, wie ausgehend von lebensweltlichen Erfahrungen mit Energie und Dissipation von Energie (Energieentwertung) unter Berücksichtigung nichtlinearer Verhaltensweisen das Konzept dissipativer Strukturen eingeführt und zu einem Verständnis der unter so entgegengesetzt erscheinenden Begriffen wie Synergetik und Chaos diskutierten nichtlinearen Physik führen kann.

1 Energie

Kaum ein zweiter Begriff hat die moderne Physik und ihre Wirkungen auf die Lebenswelt so stark geprägt wie die Energie. Fachwissenschaftlich liegt die Bedeutung vor allem darin, die bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts auseinanderdriftenden Zweige der Physik und der Naturwissenschaften wieder zusammenzuschließen und den von namhaften Naturwissenschaftlern geäußerten und nach wie vor große Forschungsaktivitäten beflügelnden Gedanken einer Einheit der Physik zu verfolgen.

Darüber hinaus hat sich der Energiebegriff zu einem lebensweltlichen Konzept ausgewachsen und bestimmt das gesellschaftliche, ökonomische, ökologische und politische Handeln auf vielfältige Weise.

Indessen müssen wir auch heute noch feststellen, daß die Schule dieser doppelten Bedeutung nicht genügend gerecht wird. Insbesondere gelingt es m. E. nur unzureichend, die negativen Interferenzen

zwischen physikalischem und lebensweltlichem Energiekonzept zu beseitigen, geschweige denn, das vorwissenschaftliche Energieverständnis fachlich zu untermauern.

Der Zugang zum Energiebegriff wird m. E. durch Lernschwierigkeiten der Schüler erschwert. Die konzeptuelle Seite dieser Lernschwierigkeiten besteht zum einen darin, daß die Energie in der Regel aus mechanischen Größen nach dem Schema: *Kraft* → *Arbeit* → *Energie* hergeleitet wird. Dieses Vorgehen hat den Nachteil, daß die Energie als Kombination anderer physikalischer Größen aufgefaßt wird, deren Verständnis selbst schon außerordentlich schwierig ist. Wir haben deshalb wiederholt dafür plädiert [1], [2], den Energiebegriff direkt auf der Grundlage von einfachen Phänomenen und Alltagserfahrungen zu gewinnen, also als Grundgröße einzuführen.

Zum anderen beschränkt man sich bei der Einführung des (physikalischen) Energiebegriffs einseitig auf Erfahrungen, die die Energieerhaltung betreffen. Das vorwissenschaftliche Verständnis der Energie ist demgegenüber zusätzlich und vielleicht sogar überwiegend durch Erfahrungen geprägt, die den Verbrauch von Energie und den *Antrieb durch Energie* betreffen.

2 Entropie

Der Verbrauchsaspekt macht sich vor allem in den Kosten der Energie, den Energiesparappellen und der drohenden Erschöpfung von Energiequellen bemerkbar. Der Antriebsaspekt manifestiert sich u. a. in Aktivitäten, bei denen es um das Betreiben von Motoren, das Aufrechterhalten von Bewegungen, oder das Überwinden von Widerständen geht. Die Erfahrungen mit dem Erhaltungsaspekt der Energie sind demgegenüber in der Regel sehr viel subtiler. Die Aufheizung von Flüssen durch Kraftwerke, die im Winter deutlichen höheren Temperaturen in Städten, aber auch das Problem, beispielsweise ein schnelles Auto zum Stillstand zu bringen, gehören dazu.

Wir schlagen vor, den unterschiedlichen Aspekten des vorwissenschaftlichen Energieverständnisses bei der Behandlung der Energie in der Schule da-

durch Rechnung zu tragen, daß zusätzlich (parallel oder zeitlich verzahnt) zum Energiekonzept das Konzept der Energieentwertung oder der Dissipation von Energie eingeführt wird. Während ersteres unmittelbar zum Energieprinzip führt, stellt letzteres ein qualitatives Äquivalent zum Entropieprinzip dar, das im Bedarfsfalle zum quantitativen Entropieprinzip verschärft werden kann [3].

Ausgangspunkt:	lebensweltlicher Energiebegriff		
Aspekte	Erhaltung	Antrieb	Verbrauch
fachwissenschaftliche Konzepte	(physikalische) Energie	Energieentwertung Entropie	

2.1 Zum fachwissenschaftlichen Hintergrund

"1. Die Energie der Welt ist konstant.

2. -Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu."

(RUDOLF CLAUDIUS[6])

Die in den lebensweltlichen Vorstellungen zur Energie enthaltene enge Verknüpfung zwischen Energie und Entropie in Form von Energieentwertung ist auch auf fachwissenschaftlicher Ebene gewissermaßen von Anfang an erkennbar. Bereits in den frühen Arbeiten WILLIAM THOMSONS wird die Irreversibilität von selbst ablaufender Vorgänge in der *"Universal Tendency in Nature to the Dissipation of ... Energy"* [4] gesehen. Sie wird von RUDOLF CLAUDIUS zunächst unter dem Begriff des Verwandlungswertes [5] quantifiziert und schließlich als Entropieprinzip gleichberechtigt neben den Energiesatz gestellt.

Die historische Bedeutung des Entropiesatzes, bzw. des Prinzips der Energieentwertung, liegt vor allem darin begründet, daß die in Reversibilität und Linearität erstarrte klassische Physik mit einem evolutionären Konzept konfrontiert wurde, durch das die Zeitlichkeit von Vorgängen physikalische Bedeutung erlangte.

"Es ist einfach ein Pfeil, der in eine und nur in eine Richtung zeigt." (MICHEL SERRES [7])

Es ist interessant festzustellen, daß etwa zur selben Zeit, in der das Entropieprinzip erarbeitet wurde, sich auch innerhalb der biologischen Wissenschaften insbesondere durch die Arbeiten CHARLES DARWINS [8] ein Evolutionsprinzip durchzusetzen begann. Allerdings schienen sich die beiden Prinzipien in eklatanter Weise zu widersprechen. Wäh-

rend das thermodynamische Entropieprinzip als Gesetz des Niedergangs apostrophiert wurde, an dessen bitterem Ende nur der "Wärmetod der Welt" (CLAUDIUS) stehen konnte, trug das Darwinsche Prinzip der vor allem im Bereich des Lebendigen festzustellenden evolutionären Höherentwicklung Rechnung: Die Zeitpfeile der belebten und unbelebten Natur zeigten in entgegengesetzte Richtung.

Der Widerspruch zwischen dem thermodynamischen und biologischen Evolutionsprinzip läßt sich bis in unsere Tage verfolgen, obwohl bereits Darlegungen LUDWIG BOLTZMANNs den Schlüssel zu seiner Überwindung enthalten: *"Der allgemeine Daseinskampf der Lebewesen ist ... nicht ein Kampf um die Grundstoffe ... auch nicht um Energie, welche in Form von Wärme leider unverwandelbar in jedem Körper reichlich enthalten ist, sondern ein Kampf um die Entropie welche durch den Übergang der Energie von der heißen Sonne zur kalten Erde disponibel wird. Diesen Übergang möglichst auszunutzen, breiten die Pflanzen die unermessliche Fläche ihrer Blätter aus und zwingen die Sonnenenergie ... ehe sie auf das Temperaturniveau der Erdoberfläche herabsinkt, chemische Synthesen auszuführen ... Die Produkte dieser chemischen Küche bilden das Kampfobjekt für die Tierwelt"* [9].

Von Bedeutung ist dabei die Idee, daß "das Prinzip von der Entwertung der Energie" [10], wie es sich im "Übergang von der heißen Sonne zur kalten Erde" manifestiert, ausgenutzt wird zu chemischen Synthesen, bzw. allgemein zum Aufbau von Strukturen. Diese Idee ist in jüngster Zeit im Rahmen der Arbeiten ILYA PRIGOGINES zur *Selbstorganisation* zum Konzept der „dissipativen Strukturen“ [11] verschärft worden: Dissipation bzw. Entwertung von Energie treten hier - gewissermaßen dialektisch gewendet - als konstruktives, aufbauendes, strukturierendes Prinzip in Erscheinung. Die darin enthaltene Versöhnung von Entropieprinzip und Darwinschem Evolutionsprinzip wird zum Ausgangspunkt einer großen Synthese der physikalischen und biologischen Wissenschaften.

Vor diesem fachwissenschaftlichen Hintergrund geht die Konzeptualisierung der Dissipation bzw. Entwertung von Energie über eine Erfassung des vorwissenschaftlichen Verbrauchs-, Verschleiß- und Zerfallsaspektes der Energie weit hinaus. Indem sie den konstruktiven Charakter der Entwertung, wie er sich vorwissenschaftlich bereits im Antriebsaspekt der Energie andeutete, zu erfassen verspricht, wird die Entwertung bzw. Dissipation von Energie zum Schlüsselbegriff eines verständnisvollen Zugangs zu Problemen der Synergetik [12] bzw. Selbstorganisation.

2.2 Das Prinzip der Entwertung

Wieviel Bewegung wird hervorgebracht durch das Streben nach Ruhe.

(MARIE V. EBNER-ESCHENBACH)

Wie schon durch den Bedeutungshorizont des Wortes Entwertung zum Ausdruck kommt, wird zunächst die Erfahrung erfaßt, daß Energie verbraucht, zerstreut wird, Systeme zerfallen, verschleifen, ins thermodynamische Gleichgewicht übergehen. Indem man darin das lerntheoretische Problem einer negativen Interferenz zwischen Verbrauch und Erhaltung sah, wurde die Forderung erhoben und in Schulbüchern verbreitet, die vorwissenschaftlich übliche Bezeichnung des Verbrauchs

aspekt vorstellungsmäßig bereits präformiert erscheint.

Auf diese Weise kann die folgende Einsicht gewonnen werden: *Jeder von selbst ablaufend (energetische) Vorgang geht mit Energieentwertung einher, die darauf beruht, daß der Vorgang von selbst nicht in umgekehrter Richtung abläuft.* (Qualitatives Äquivalent des Entropieprinzips).

Die weitgehende Verankerung der Einseitigkeit der Ablaufrichtung von Vorgängen in der Erfahrung zeigt sich beispielsweise in dem seltsamen Eindruck eines unwirklichen Geschehens, den man beim Betrachten eines rückwärts laufenden Films erlebt (Abb. 1). Auf die beteiligten Systeme bezogen, drückt sich die Entwertung darin aus, daß die Sys-

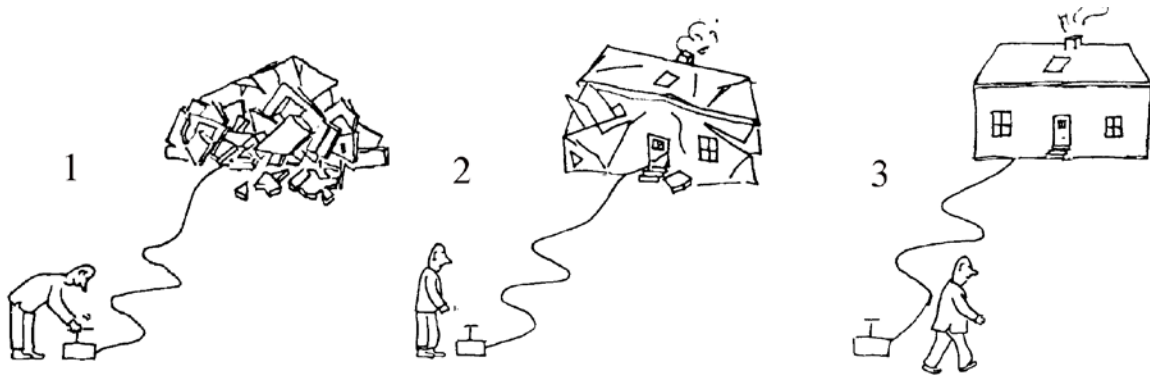


Abb. 1: Ein Trümmerhaufen wird gesprengt. Ein Haus bleibt zurück. Der Physiker sagt: Ein solcher Vorgang ist bislang nicht beobachtet worden.

im Zusammenhang mit der Energie zu vermeiden. Dies scheint uns weder sachlich geboten noch lerntheoretisch sinnvoll zu sein. Denn Verbrauch und Erhaltung stören sich im Alltag nicht nur nicht, sondern ergänzen einander offenbar sogar. So hat man beispielsweise keine Schwierigkeit, von Wasserverbrauch zu sprechen, ohne damit zu verbinden, daß Wasser durch den Verbrauch beim Waschen, Geschirrspülen und Klospülen etc. mengenmäßig vernichtet wird. Im Gegenteil, die Überzeugung, daß verbrauchtes Wasser lediglich eine qualitative Veränderung erfahren hat, quantitativ aber unverändert geblieben ist, drückt sich u. a. in der weitverbreiteten Praxis aus, die Gebühren für die Abwasserbeseitigung anhand der dem Leitungsnetz entnommenen Wassermenge zu ermitteln.

Verbrauch stellt sich also in einem allgemeinen Verständnis als Entwertung dar, die darin besteht, daß der verbrauchte Gegenstand nicht ohne weiteres wieder für den ursprünglichen Verwendungszweck benutzt werden kann. Dies gilt auch und insbesondere für die Energie. Man kann sogar umgekehrt aus der Tatsache, daß von Energieverbrauch gesprochen wird, schließen, daß Energie als etwas Substanzartiges aufgefaßt wird und der Erhaltungs-

teme Energie an die Umgebung abgeben (Dissipation) und auf diese Weise ins thermodynamische Gleichgewicht übergehen. An die Umgebung abgegebene Energie ist aber insofern "nichts mehr wert", als sie von selbst (CLAUSIUS) nicht wieder auf ein System übergeht und dieses aus dem Gleichgewicht herausschleibt. Zum Beispiel:

- Eine Kanne mit heißem Teewasser kühlt sich ab (Abb. 2),

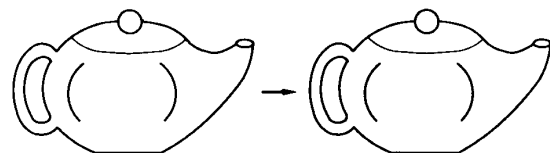


Abb. 2: Eine Kanne mit heißem Tee kühlt sich auf Umgebungstemperatur ab.

- Eine Kerze brennt nieder (Abb. 3),
- eine Kugel rollt einen Berg hinab (Abb. 4),
- Wasser wird beim Waschen schmutzig,
- Ordnungsstrukturen zerfallen (Abb. 5).



Abb. 5: Eine Kerze brennt allmählich nieder

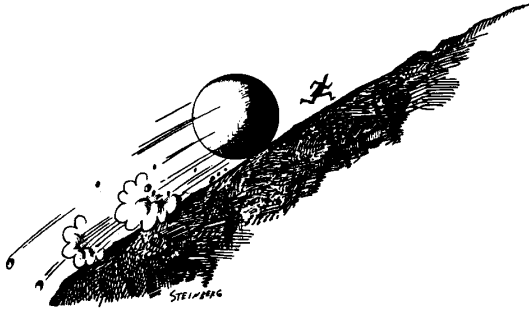


Abb. 3: Karrikatur von Steinber. Quelle: The New Yorker Magazine Inc., 1963

Zwar läßt sich die Kerze im Prinzip aus den chemischen Bestandteilen, in die sie zerfällt, zurückgewinnen, der kalte Tee läßt sich wieder erwärmen, die Kugel wieder den Berg hinaufrollen und das Wasser reinigen. Aber diese Umkehrprozesse geschehen nicht von selbst. Sie machen es erforderlich, daß gleichzeitig mindestens ein weiterer (selbsttätiger) Vorgang abläuft.

Dadurch daß man beispielsweise die brennende Kerze unter das abgekühlte Teewasser stellt, kann die Abkühlung rückgängig gemacht werden (Abb. 6). Während die Kerze nach wie vor unter Energieentwertung abbrennt, wird das Teewasser unter Umkehrung der Energieentwertung bzw. unter Energieaufwertung erwärmt.

Mit dieser Prozeßumkehr wird das Prinzip der Energieentwertung insofern nicht verletzt, als die Erwärmung des Tees und das Abbrennen der Kerze gekoppelt sind und für sich betrachtet nur Teile eines Gesamtprozesses darstellen. Dieser Gesamtprozeß läuft aber selbsttätig unter Energieentwertung ab. Allerdings ist die mit dem Gesamtprozeß verbundene Entwertung kleiner als die mit dem Abbrennen der Kerze verbundene. Denn von ihr ist die sich im Erwärmen des Tees manifestierende Energieaufwertung "abzuziehen". Dieser Sachverhalt stimmt übrigens genau mit unserer Anschauung überein, daß das bloße Abbrennen der Kerze eine Energieverschwendung darstellt, während das Erwärmen des Tees mit Hilfe der abbrennenden Kerze als etwas Nützliches aufgefaßt werden kann. Durch zahlreiche weitere Beispiele läßt sich dieses Ergebnis verallgemeinern:

Die Umkehr eines (selbsttätigen) Prozesses muß durch den Ablauf eines anderen Prozesses erzwungen werden. Oder: Eine Energieaufwertung wird durch eine Energieentwertung betrieben [1], [3].

Rein anschaulich betrachtet, kommt der Antrieb, d. h. die positive, konstruktive Wirkung des an sich negativen, destruktiven Entwertungsprinzips dadurch zustande, daß der „Schwung“, die „Gewalt“, mit der alles dem thermischen Gleichgewicht entgegenstrebt, hier und da "hängenbleibt" (und auf diese Weise Systeme aus dem Gleichgewicht herauszureißen und „Ordnung“ hervorzubringen vermag:

"Die Trosse um den stromaufwärtsliegenden Poller ziehen, gegen den Strom". (MICHEL SERRES [7])

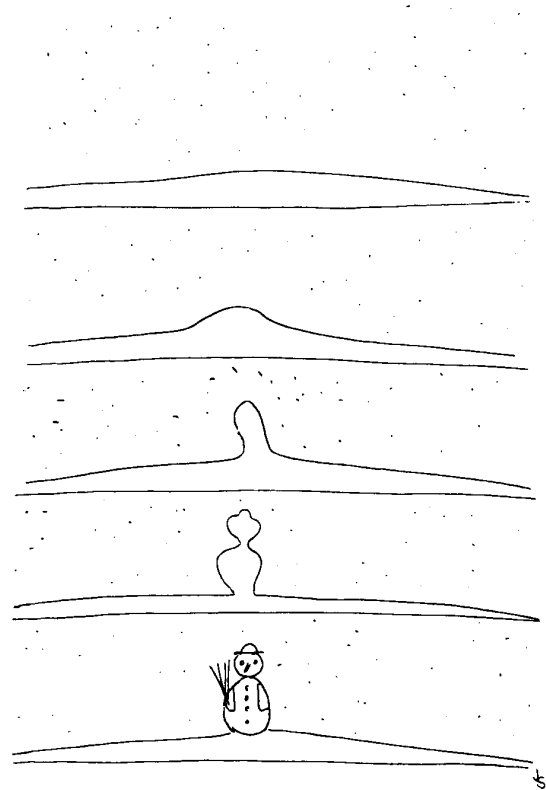


Abb. 4: Hier entsteht eine Ordnungsstruktur: Es schneit. Der Schnee sammelt sich bevorzugt an einer Stelle und bringt schließlich die Struktur eines Schneemanns hervor.

Ein wesentlicher Aspekt des Energiesparens besteht darin, gegebene Energieentwertungen zu größtmöglichen Energieaufwertungen auszunutzen. Theoretisch wäre dabei eine Aufwertung zu erreichen, durch die die antreibende Energieentwertung vollständig kompensiert würde. Praktisch ist dieses Ideal jedoch unerreichbar, denn wenn überhaupt keine

Nettoentwertung zurückbleibt, kann auch nichts mehr bewegt, keine Aktivität entfaltet werden. Damit der Gesamtprozeß tatsächlich abläuft, muß eine mehr oder weniger große Entwertung hervorgerufen werden. Diese bestimmt in gewisser Weise die Geschwindigkeit des Prozeßablaufs. Wenn beispielsweise Wasserstoffgas einfach nur explodiert, ohne sonst etwas zu bewirken, dann ist die Entwertung maximal. Wenn man den Wasserstoff jedoch in einer Brennstoffzelle „kalt“ verbrennt, so kann er in einem hohen Grade dazu ausgenutzt werden, einen elektrischen Strom nießen zu lassen. Allerdings ist die Prozeßgeschwindigkeit bereits so klein, daß die Brennstoffzelle den durch hohe Energieraten bestimmten Anforderungen der gegenwärtigen Energiewirtschaft nicht gerecht wird. Deshalb werden fossile Energieträger nach wie vor in Wärmekraftwerken verbrannt, in denen die Entwertungsrate so groß ist, daß genügend große Prozeßgeschwindigkeiten erreicht werden.

2.3 Das mephistophelische Prinzip

Denn alles muß in Nichts zerfallen, wenn es im Sein beharren will. (J. W. v. GOETHE)

Die Bedeutung der Energie für alle Vorgänge in unserem Kosmos, insbesondere für das Alltagsleben des Menschen, wurde zu der Zeit, da sich der Energiebegriff in den Naturwissenschaften zu etablieren und in Form energietechnischer Einrichtungen alle Lebensbereiche zu durchdringen begann, zuweilen mit schwärmerischen Worten beschrieben. So verehrt beispielsweise FELIX AUERBACH *"die Energie als Göttin, als Königin hier gebend und dort nehmend, im ganzen aber weder gebend noch nehmend, (die) sich über allem, was sich im unendlichen Raume, im Strome der dahinfließenden Zeit abspielt thront"*. Demgegenüber ist für ihn die Entropie nur *"der Schatten, der böse Dämon, der zu beeinträchtigen, wenn nicht gar zu verderben suchen wird, was (sich die Energie H. J. S.) in das Dasein an Großem: Schönem und Gutem hineinzu-tragen bemüht"* [13].

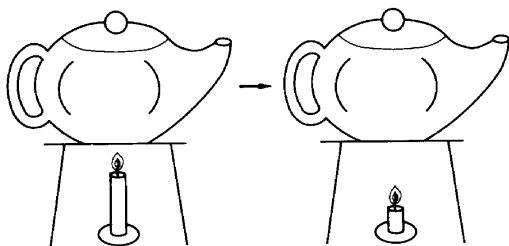


Abb. 7: Eine niederbrennende Kerze kann die Abkühlung von heißem Tee zurückspulen.

Diese Auffassung bestimmt auch heute noch weitgehend unser Denken. Dabei wird jedoch überse-

hen, daß nicht die in ihrer Quantität ewig unveränderliche Energie als treibende Kraft allen Geschehens anzusehen ist, sondern gerade der böse Dämon, die Entropie, die alles zugrundezurichten trachtet. Man wird an GOETHE'S Mephistopheles erinnert, der die Hölle des Wärmetodes auf ganz ähnliche Weise zu erreichen versucht: *"Ich bin der Geist, der stets verneint!/ Und das mit Recht, denn alles was entsteht,/ Ist wert, das es zugrundegeht"*. Dabei kommt ihm früher oder später aber die Erkenntnis, er sei *"Ein Teil von jener Kraft,/ Die stets das Böse will und stets das Gute schafft"*.. Mit anderen Worten: Aufwertung, Ordnung, Struktur ... ist nur durch Entwertung, Dissipation, Zerfall.. möglich.

Darin kommt ein wesentlicher Zug unserer Existenz zum Ausdruck: *"Tout est dangereux ici- bas, et tout est nécessaire"* (VOLTAIRE). Das Leben wird aufrechterhalten durch das, was ihm auch tödlich werden kann.

Diese Aussage kann auch physikalisch durchaus wörtlich genommen werden. Dazu muß man sich nur vergegenwärtigen, daß die Atmung, eine der

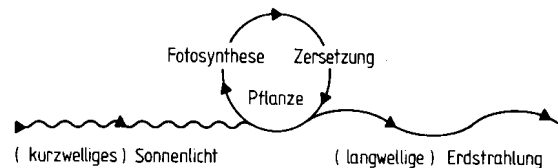
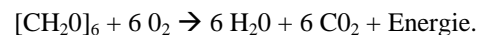


Abb. 6: Durch Entwertung von Sonnenenergie wird der Zerfall von Biomasse zurückgespult (Fotosynthese)

Lebensäußerungen schlechthin, einen Zerfallsprozeß darstellt. Die Atmung bedingt, daß die organischen Nahrungsmittel (beispielsweise Glukose) in ihre anorganischen Bestandteile zerfallen und auf diese Weise die Lebensvorgänge des Organismus in Gang halten:



Das funktioniert natürlich nur so lange, wie dafür gesorgt wird, daß auch dieser Vorgang immer wieder unter Aufwertung von Energie und anorganischer Materie zurückgespult wird (Fotosynthese). Dafür ist grob gesagt der globale Dissipationsvorgang verantwortlich, aufgrund dessen Sonnenlicht (bei hoher Temperatur) auf die Erde fällt und diese schließlich (bei Umgebungstemperatur) wieder verläßt (Abb. 7), eine Tatsache, die bereits LUDWIG BOLTZMANN Um die Jahrhundertwende erfaßte [9].

3 Synergie

3.1 Das Ruhende im Bewegten: Nichtgleichgewichtsstrukturen

*Gleich, mit jedem Regengusse
Ändert sich dein holdes Tal,
Ach, und in demselben Flusse
Schwimmst du nicht zum zweitenmal.*

(J. W. v. GOETHE)

Indem ein selbsttätiger Prozeß einen anderen zurückspült, wird ein System aus dem thermischen Gleichgewicht herausgetrieben. Dabei handelt es sich insofern um eine Aufwertung, als das System - sich selbst überlassen - erneut unter Energieentwertung ins thermische Gleichgewicht zurückgeht. Soll ein System ständig in einem bestimmten Nichtgleichgewichtszustand verbleiben, so muß man dafür sorgen, daß die pro Zeiteinheit auftretende Energieentwertung in gleichem Maße rückgängig gemacht wird. Indem die Kerze dem Teewasser pro Zeiteinheit genauso viel Energie zuführt, wie dieses an die Umgebung abgibt, bleibt die Energie des Systems und damit die Temperatur konstant. Die Kanne mit Tee ist somit ein offenes, von Energie durchflossenes System, das durch die Entwertung von Energie (Zufuhr als Wärme bei hoher Temperatur und Abgabe als Wärme bei Umgebungstemperatur) ständig vor dem Übergang ins thermische Gleichgewicht bewahrt wird.

"Daß da stets ein Hase im Garten, eine Reblaus auf den Reben oder eine Schlange im Paradies ist, beweist, daß die Systeme offen sind" (MICHEL SERRES [7])

Man wird an eine Badewanne mit offenem Abnuß erinnert, bei der durch Verbrauch und ständige Zufuhr ein bestimmter Wasserspiegel aufrechterhalten wird.

Solche Systeme umgeben uns in großer Zahl. Der mit einer bestimmten Geschwindigkeit fließende Fluß gehört ebenso dazu wie das Zimmer, das durch eine Heizung auf einer bestimmten Temperatur gehalten wird. Bei der Heizung des Zimmers tritt die Energieentwertung als (zurück-)bleibende Veränderung in Form von leeren Heizöltanks besonders drastisch in Erscheinung.

Warum kommt es überhaupt zur Ausbildung solcher stationären Zustände? Es wäre doch auch denkbar und würde keinem bekannten Naturgesetz widersprechen, wenn - um beim Beispiel des Tees zu bleiben die Kerze unter Entwertung von Energie abbrennen würde, ohne das Teewasser zu erwärmen. In der Tat widersprechen derartige Vorgänge weder dem Energie- noch dem Entropieprinzip, stünden aber dennoch im Widerspruch zur Erfah-

rung, wonach die Natur sich ökonomisch verhält. Die Tatsache, daß Teewasser erwärmt und damit energetisch aufgewertet wird, wenn man eine Kerze darunter stellt, ist so gesehen nichts anderes als eine Verringerung der Energieentwertungsrate des Gesamtvorgangs: Die im Abbrennen der Kerze zum Ausdruck kommende Entwertung wird gewissermaßen um den Betrag der Aufwertung verringert, die sich in der Erwärmung des Teewassers manifestiert. In Bezug auf die Entwicklung des organischen Lebens auf der Erde spricht PASQUAL JORDAN von einer *"Bremsung derjenigen Entropievermehrung, welche mit der auf der Erde geschehen Absorption des Sonnenlichtes vor sich geht"* [15].

3.2 Fernab vom Gleichgewicht: Dissipative Strukturen

Das heißt existieren, dem Tode die Stirn bieten, eine beständige Abweichung vom Gleichgewicht sein.

(MICHEL SERRES [7])

Ein Nichtgleichgewichtssystem, das sich in der Nähe des thermischen Gleichgewichts, im sogenannten Fließgleichgewicht, befindet, ist in der Tat - wie PRIGOGINE zeigen konnte - durch eine minimale Energieentwertungsrate charakterisiert (Prinzip minimaler Entropieerzeugung [14]). In einem solchen Fließgleichgewicht befindet sich beispielsweise unser Teewasser solange die Flamme des Teelichts nicht allzu groß ist: Die auf das Wasser übertragene Wärme wird zur kälteren Flüssigkeitsoberfläche geleitet und dort an die Luft abgegeben. Das System ändert sich rein äußerlich nicht und behält die Symmetrie bei, die es im thermischen Gleichgewicht besaß.

Übersteigt der Temperaturgradient zwischen Ober- und Unterseite der Wasserschicht und damit der Wärmefluß einen kritischen Wert, so setzt plötzlich ein völlig neuartiges Phänomen ein: Erwärmte Flüssigkeit steigt auf, weil ihre Auftriebskraft die innere Reibungskraft übertrifft. Auf diese Weise wird die Wärmeleitung durch den sehr viel effektiveren Transportmechanismus der Wärmekonvektion überlagert, und die Symmetrie des Systems wird gebrochen. Infolgedessen steigt die Energieentwertungsrate sehr stark an und treibt das System in einen vom thermischen Gleichgewicht sehr weit entfernten stationären Zustand.

Da das Aufsteigen erwärmter Flüssigkeit ein Absinken kalter Flüssigkeit zur Folge hat, die dann ebenfalls erwärmt wird, aufsteigt und die inzwischen an der Oberfläche abgekühlte Flüssigkeit "nachzieht", spielt sich eine Rollbewegung ein, die je nach den Randbedingungen des Systems (z. B. Form des Gefäßes, Viskosität) durch ein typisches Muster aufeinander abgestimmter Konvektionswal-

zen (Abb. 8) aufgebaut ist. Im Falle einer dünnen gleichmäßig von unten geheizten Flüssigkeitsschicht bilden diese Walzen beispielsweise eine bienenwabenhörmige Struktur von Konvektionszellen (Benard-Konvektion).

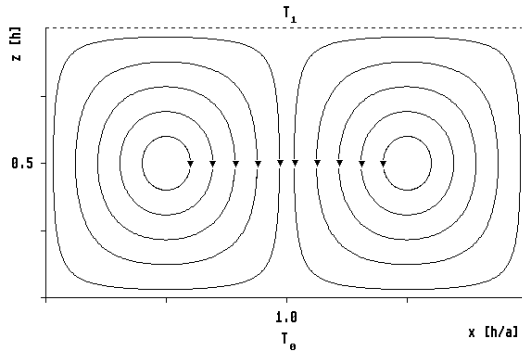


Abb. 8: Querschnitt durch eine Bénard-Konvektionszelle (aus [19]) in willkürlichen Einheiten.

Die sich jeweils einstellende Struktur macht gewissermaßen die Individualität des Systems aus. Sie ist insofern relativ stabil, als sie (oberhalb des kritischen Temperaturgradienten) in einem gewissen Temperaturbereich auch in Gegenwart von Störungen ihre Identität bewahrt.

Solche Systeme werden ganz im Sinne unseres Entwertungskonzepts *dissipative Strukturen* (PRIGOGINE [11]) genannt: Bei gegebenen Parameterwerten nimmt das System hochwertige Energie (hier: Wärme bei relativ hoher Temperatur) auf und gibt sie als minderwertige Energie (hier: Wärme bei Umgebungstemperatur) wieder an die Umgebung ab. Innerhalb des Systems bleibt die Energie im zeitlichen Mittel konstant. Das "lebenswichtige Nichtgleichgewicht (wird) durch Energiedissipation" [16] aufrecht erhalten; die Dissipation bzw. Entwertung kann daher als "Antrieb" der Struktur angesehen werden.

3.3 Strukturbildung durch Symmetriebruch

C'est la dissymetrie qui crée le phénomène.

(PIERRE CURIE)

Dissipative Struktur und Fließgleichgewicht haben eines gemeinsam: "Alle Körper ... befinden sich ... in einem immerwährenden Ab- und Zuflusse wie die Ströme, und es fließen fortwährend Teile ein und aus". Dies wurde bereits von LEIBNIZ [17] als Merkmal für "lebende" Systeme angesehen. Der wesentliche Unterschied besteht darin, daß das Fließgleichgewicht, dem Gleichgewicht, so nahe wie möglich [14] kommt, während sich die dissipative Struktur ganz im Gegenteil durch den kreativen Akt eines Symmetriebruchs weit vom Gleichge-

wicht entfernt und eine Art autonomes Verhalten an den Tag legt.

Der hochsymmetrische Zustand des thermischen Gleichgewichts wird am kritischen Punkt instabil. In einer solchen Situation wachsen kleinste, durch Schwankungen bestimmte Abweichungen vom thermischen Gleichgewicht über alle Grenzen und bringen eine neue makroskopische Struktur hervor. Der diesen Schwankungen anhaftende Zufall "entscheidet" beispielsweise wie bei einem auf dem Kopf stehenden Pendel, ob die Drehung der Konvektionswalzen nach links oder nach rechts erfolgt. Der Zufall wird in dem sich schließlich einstellenden Bewegungsmuster gewissermaßen konserviert. Er muß daher als das kreative, von vornherein nicht bestimmbare Element der Strukturbildung angesehen werden.

"Ein Lärmschauer, das kleine Zufallselement transformiert ein System oder eine Ordnung in ein anderes System, eine andere Ordnung". (MICHEL SERRES [7])

Die Entstehung von Ordnung aus Schwankungen (l'ordre par fluctuations) ist nach PRIGOGINE [11] die Antwort auf die Frage, wie Neues entsteht, wie Innovationen und Schöpfung einer physikalischen Beschreibung zugänglich werden. Dies ist bereits im Ansatz an einem so einfachen System wie dem von unten erwärmten Teewasser erkennbar.

Von Bedeutung ist darüber hinaus, daß das hochdimensionale Vielteilchensystem aufgrund solcher phasenübergangsähnlicher Mechanismen aus der enormen Vielfalt möglicher Verhaltensweisen eine Struktur herauszuschälen vermag, die durch wenige Freiheitsgrade beschrieben werden kann [12]. EDWARD LORENZ konnte 1963 zeigen, daß sich die Bewegung des Fluids durch ein dreidimensionales Gleichgewichtssystem beschreiben läßt, ohne daß die er die Bewegungsfiguren charakteristischen Merkmale des Systems verlorengehen [18]. Auf diese Weise wird es möglich, die Bewegungsfiguren der Bénardkonvektion an einem mechanischen Modellsystem, einer Art Wasserrad, zu untersuchen und zu beschreiben [19]. Darin kommt auf anschauliche Weise zum Ausdruck - und das ist eine der zentralen Erkenntnisse der nichtlinearen Physik -, daß extrem einfache, aber nichtlineare Systeme jene Komplexität hervorbringen können, die sich als typisch für kreative Strukturen der Realität erweisen: "Die Verbindungen von simplen Gesetzen (können) sehr verwickelte Erscheinungen gewähren". (G. CHR. LICHTENBERG)

3.4: Nichtlinearität: Prinzip der Rückkopplung

Dissipative Strukturen sind von sich selbst die Ursache zugleich und die Wirkung (F. W. J. SCHEL-

LING) Wie schafft es das System, die Ordnung, die sich in den Bewegungen der Konvektionswirbel manifestiert, einzuregulieren und gegen stets vorhandene äußere Störungen zu stabilisieren? Ordnung und Stabilität gehen gewissermaßen aus einem "Streit", dem Gegeneinanderwirken von "Kräften", in diesem Fall einem die Konvektionswirbel antreibenden und bremsenden Drehmoment hervor.

Wenn der Auftrieb die innere Reibung überwindet und kleinste Schwankungen eine Entscheidung für eine Drehrichtung herbeigeführt haben, geraten erwärmte Wasserportionen der Bodenschicht in den aufsteigenden Strom und abgekühlte Wasserportionen der kalten Oberfläche in den absinkenden Strom der Konvektionswalzen. Dadurch wird ein die Rotation antreibendes Drehmoment aufgebaut, das um so größer wird, je schneller erwärmte Wasserportionen nachgeliefert werden, also je schneller die Konvektionswalzen rotieren. Mit ansteigender Geschwindigkeit werden aber auch die Zeiten, in denen sich das Wasser der Wirbel an der Oberfläche abkühlen und am Boden erwärmen kann, immer kürzer. In zunehmendem Maße sinken nur unvollständig abgekühlte Wasserportionen ab und steigen nur mäßig erwärmte Wasserportionen auf und bauen infolgedessen ein die Rotation bremsendes Drehmoment auf. Entscheidend ist nun die Tatsache, daß das bremsende Drehmoment stärker als das antreibende Drehmoment mit der Geschwindigkeit zunimmt; m. a. W.: Die Dämpfung wächst mit einer höheren Potenz der Geschwindigkeit als der Antrieb. Geht man davon aus, daß der Antrieb linear mit der Geschwindigkeit variiert, so variiert die Dämpfung stärker als linear, also nichtlinear; und nur darauf kommt es an. Aufgrund dieser Nichtlinearität können sich nämlich die antreibende und dämpfende "Kraft" gegenseitig begrenzen (Abb. 9): Bei kleinen Geschwindigkeiten dominiert zunächst der Antrieb die Dämpfung. Da die Dämpfung jedoch überproportional mit der Geschwindigkeit zunimmt, holt sie mit steigender Geschwindigkeit rapide auf bis sie bei einem bestimmten Wert v , die Antriebskraft übertrifft und infolgedessen eine Abnahme der Geschwindigkeit bewirkt. Dadurch wird v , unterschritten, der Antrieb dominiert erneut, wodurch abermals v , überschritten wird usw. Auf diese Weise regelt sich die stationäre Geschwindigkeit v , gewissermaßen von selbst ein (Selbstorganisation). Nach demselben Schema können auch externe Störungen abgebaut und dem System eine dynamische Stabilität verliehen werden, die es zum "Überleben" in einer durch zufällige Schwankungen bestimmten Umwelt benötigt.

Die nichtlineare Dynamik des Systems bringt demnach eine Art Rückkopplung hervor, wodurch "Wirkungen von Ereignissen an jedem Punkt des Kreislaufs ganz herumgetragen werden, um Verände-

rungen an diesem Ausgangspunkt hervorzurufen" [20]. Darin kommt zum Ausdruck, daß aufgrund der Nichtlinearität die Kausalität in ihrer primitiven Form einer "starreren Verkettung von Wirkungen und Ursachen" (CLAUDEL) durchbrochen und durch eine zirkuläre Kausalität ersetzt wird, wonach "jede Ur-

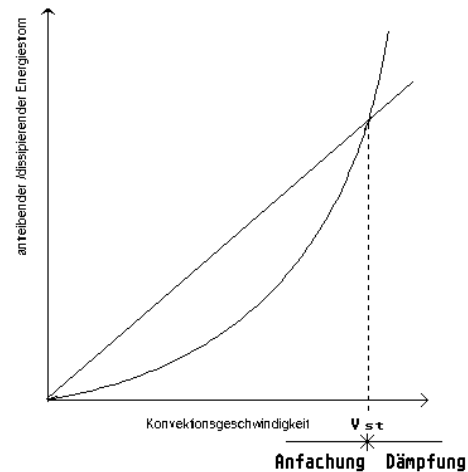


Abb. 9: Die gegeneinander wirkenden nichtlinearen "Kräfte" regeln das stationäre Gleichgewicht ein

sache die Wirkung ihrer eigenen Wirkung" (IBN' ARABI) darstellt: Wärmetransport und Konvektion bilden eine Schleife, innerhalb derer vorher getrennte Phänomene zu einer oszillierenden Einheit verschmelzen: Wenn die Konvektionsgeschwindigkeit über v , hinaus zunimmt, dann nimmt sie (aufgrund der dadurch bedingten nichtlinearen Zunahme der Dämpfung) ab, dann nimmt sie zu, dann nimmt sie ab....

Das erinnert an ein geometrisches Äquivalent, etwa an den Kochschen Stern, jenes merkwürdige fraktale Gebilde, das folgendermaßen entsteht: Die Seiten eines Dreiecks werden so ausgestülpt, daß ein sechszackiger Stern gebildet wird, deren Seiten erneut auf dieselbe Weise ausgestülpt werden usw. ad infinitum [21]. Dieser Stern besitzt eine kohärente Gestalt, da er unmittelbar zu erfassen ist. Doch ähnlich wie bei den Konvektionswalzen im erwärmten Tee ist das, was wir wahrnehmen, "wie ein mythischer Vorfahr, der niemals vollständig gezeichnet oder beschrieben, sondern nur als Trend einer abgebrochenen Wiederholung festgestellt werden kann"[22].

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

Die Konvektionswirbel in der Flüssigkeit werden durch gegeneinander wirkende Kräfte stabilisiert. Die Nichtlinearität "sorgt" dafür, daß es nicht zu einer bloßen Aufhebung von Wirkungen sondern zu einer neuen Qualität kommt. In einer solchen polaren Dynamik manifestiert sich ein wesentlicher Strukturzusammenhang der Natur, der seit ANAXIMANDER im naturphilosophischen Denken immer wieder von Bedeutung gewesen ist.

In einem größeren Zusammenhang gesehen, können die Konvektionswirbel als Metapher der Selbstorganisation in der Natur angesehen werden: "Der Wirbel ist nicht etwas Feststehendes, sondern beständig Wandelbares aber in jedem Augenblick neu Reproduziertes. Kein Produkt in der Natur ist also fixiert, sondern in jedem Augenblick durch die Kraft der ganzen Natur reproduziert". [23]

3.5 Nichtlinearität: Sensitivität

So können kleine Dinge große Zeichen ihres Daseins geben, welches man nicht genug merken kann ...

(G. CHR. LICHTENBERG)

Mit dem regulären Muster der Konvektionswirbel (Bénardzellen) sind die Möglichkeiten dynamischer Verhaltensweisen noch lange nicht ausgeschöpft. Wenn der Temperaturgradient zwischen Ober- und Unterseite der Flüssigkeitsschicht noch weiter erhöht wird, verschwindet das reguläre Muster und damit das geordnete Verhalten genauso plötzlich, wie es in Erscheinung getreten ist: Ein erneuter "Phasenübergang" zwingt dem System nunmehr ein irreguläres, chaotisches Verhalten auf. Während man noch bis vor wenigen Jahren an dieser Stelle aufgab, weil der Mangel an Regelmäßigkeiten jede physikalische Aussage unmöglich erscheinen ließ, hat die sich in jüngster Zeit rapide entwickelnde Chaosphysik damit begonnen, die Kantsche Aussage, daß "die Natur auch selbst im Chaos nicht anders als regelmäßig und ordentlich verfahren kann", auch in Fällen wie dem chaotischen Bénardproblem zu bestätigen, allerdings auf eine ganz andere Weise als es nach klassischen Vorstellungen hätte erwartet werden können. Es zeigt sich, daß die in einem Aphorismus MARIE v. EBNER-ESCHENBACHS ausgedrückte Einsicht: "*Sehr geringe Unterschiede bedingen manchmal große Verschiedenheiten*" auch eine physikalische Relevanz besitzt. Die sensitive Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen, eine weitere Konsequenz der nichtlinearen Charakteristik dynamischer Systeme, setzt nämlich die für die lineare Physik typische starke Kausalität außer Kraft, wonach ähnliche Ursachen ähnliche Wirkungen zeitigen: Wie bereits POINCARÉ vor fast hundert Jahren feststellte, können "kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen große Unterschiede in den späteren Erscheinungen bedingen, ein kleiner

Irrtum in den ersteren kann einen außerordentlich großen Irrtum in den letzteren nach sich ziehen. Die Vorhersage wird unmöglich". [24]

Im Falle der Bénardkonvektion tritt die Sensitivität dann in Erscheinung, wenn die Rotationsbewegung instabil wird, weil die aufsteigende warme Flüssigkeit und die absinkende kalte Flüssigkeit aus dem Takt geraten und die Konvektionswalzen „exzentrisch“ werden. Je nach der Größe der Exzentrizität reicht dann der "Schwung" vielleicht gerade noch zu einer vollständigen, "Drehung" aus, oder es kommt vorher zu einem Richtungswechsel: Die Bewegung wird irregulär.

Diese als Chaos bezeichnete Irregularität hat es insofern "in sich", als sie sich zwar in einem durch die Differentialgleichungen des Systems eindeutig bestimmten Bewegungsablauf manifestiert, der aber selbst im Prinzip nicht reproduzierbar und daher unvorhersagbar ist. Infinitesimale Unterschiede in den Anfangsbedingungen führen nach kürzester Zeit zu völlig unterschiedlichen Bewegungsfiguren. Hier versagen selbst die Fähigkeiten des Laplaceschen Dämons, dessen Hilfe immer dann gerne in Anspruch genommen wird, wenn es um Probleme geht, die nur deshalb unlösbar erscheinen, weil der Rechenaufwand die menschlichen Möglichkeiten übersteigt.

3.6 Die Attraktion im Zustandsraum

Die Attraktion scheint bei der leblosen was die Selbstliebe bei der lebendigen ist.

(G. CHR. LICHTENBERG)

Chaotisches Verhalten erinnert ans Würfeln. Auch die Bewegung eines geworfenen Würfels wird vollständig durch die Gesetze der Mechanik bestimmt und durch Differentialgleichungen beschrieben. Aufgrund der Sensitivität, mit der kleinste Unterschiede in den Anfangsbedingungen darüber „entscheiden“, ob der ausrollende Würfel gerade noch eine Kante überwindet oder zurückfällt, sind bereits in jedem noch so kleinen Intervall der Anfangsbedingungen alle zu den Seiten des Würfels führenden Orbits (Bahnen im Zustandsraum des Systems) enthalten (Abb. 10). Deshalb kann das Ergebnis des Würfels geradezu als Inbegriff eines zufälligen Ereignisses aufgefaßt werden. Dennoch ist es im Rahmen der Wahrscheinlichkeitstheorie gelungen, den Zufall kalkulierbar zu machen.

Dabei war es von Bedeutung, daß "der Stock...am anderen Ende aufgenommen" (T. S. KUHN) wurde. Statt die Aufmerksamkeit auf eine einzelne Lösung zu richten, wurde die Gesamtheit aller möglichen Lösungen in den Blick genommen. Es ist interessant festzustellen, daß auch der Chaosforschung eine ähnliche Idee zugrunde liegt, obwohl das zu einem definitiven Ende kommende Würfeln einem ständig

"in Bewegung bleibenden((dynamischen System sehr unähnlich ist. Anstatt einzelne Bahnen des chaotischen Systems zu verfolgen, betrachtet man die Gesamtheit aller Orbits auf einmal und vollzieht damit einen Übergang zu einer Art geometrischer Systemanalyse.

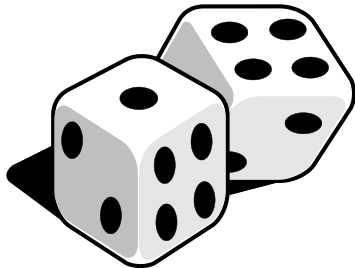


Abb. 10: Ob der Würfel die Kante noch zu überwinden vermag oder zurückfällt, hängt vom Zufall ab.

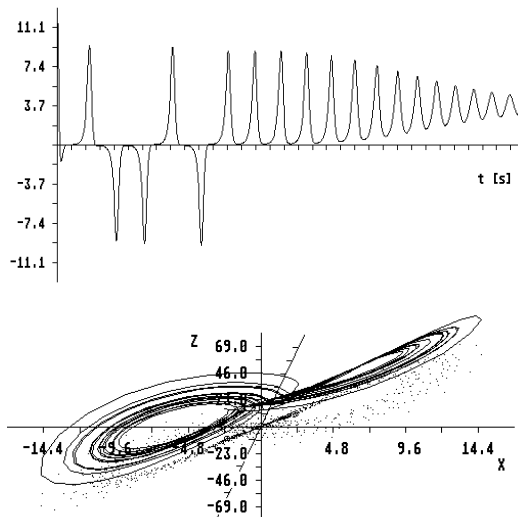


Abb. 11: Das chaotische Signal als Zeitserie (oberes Bild). Der dazugehörige Attraktor im dreidimensionalen X,Y,Z- Zustandsraum (unteres Bild). Zur Besseren Orientierung wurde die Projektion des Attraktors auf die X, Y- Ebene gepunktet mitgezeichnet. Weitere Einzelheiten (insbesondere zu den Einheiten in [19]).

So wird beispielsweise im chaotischen Regime die Bewegung einer Konvektionswalze durch ein völlig irreguläres, nicht vorhersagbares Signal charakterisiert (Abb. 11 oben). Im dreidimensionalen Zustandsraum des Systems erzeugt dieselbe Bewegung eine achterbahnartige Spur, die sich im unregelmäßigen Wechsel um zwei Fixpunkte herumwindet (Abb. 11 unten). Dabei wird man vielleicht - insbesondere dann, wenn man den Vorgang auf dem Monitor des Computers live verfolgt - an die Worte GOETHES (Faust II) erinnert:

"Faden kommen, Fäden weifen,/ Jeden lenk' ich seine Bahn,/ Keinen laß' ich überschweifen,/Füg' er sich im Kreis heran".

In der Tat schweifen die „Fäden" nicht über. Sie werden auf ein für das "brodelnde" Teewasser charakteristisches Gebilde beschränkt, den sogenannten chaotischen (Lorenz-) Attraktor.

Der Attraktor zieht alle Orbits an: So chaotisch und unvorhersagbar sie sich im einzelnen auch verhalten mögen, so sicher kann man sein, daß sie auf dem Attraktor landen und auf diesem verbleiben.

3.7 Strukturen im Chaos

Ich bin, sehen Sie, ein neugieriger Geist, chaotisch, äußerst chaotisch und zugleich geometrisch, arithmetisch . . . was weiß ich.

(A. PALAZZESCHI)

Mit Hilfe eines Attraktors kann das analytisch Unsagbare visualisiert werden. Hierin zeigt sich, daß das übliche quantitative Vorgehen durch qualitative Methoden ersetzt wird. Dies ist gewissermaßen der Preis, der dafür zu zahlen ist, daß man mit der Aufgabe der Linearität auch auf eine äußerst wirkungsvolle, zu einfachen quantitativen Zusammenhängen führende Strategie der Komplexitätsreduktion verzichten muß. Das durch die Nichtlinearität notwendig gewordene qualitative geometrische Vorgehen kann aber nicht nur negativ im Sinne einer unvollständigen Beschreibung gesehen werden. In ihm drückt sich gewissermaßen das veränderte Naturverständnis aus, das nicht mehr ausschließlich an einer exakten für alle Zeiten gültigen, aber in vielen Fällen irrealen Vorhersage von Ereignissen ausgerichtet ist, sondern der faktischen Offenheit und Freiheit von Entwicklungen insbesondere komplexerer Strukturen Rechnung trägt. In der Geometrisierung der Vorgänge wird wie wohl kaum jemals zuvor das kreative Vermögen des Menschen bei der Mustererkennung explizit für die Forschung ausgenutzt mit dem Ergebnis, daß von „außen(c betrachtet völlig irreguläre Erscheinungen geordnete Strukturen offenbaren, die mit herkömmlichen Methoden nicht zu entdecken sind. Bei der Betrachtung dieser geometrischen Objekte gewinnt man nicht selten den Eindruck, daß die Natur einige ihrer schönsten Muster für den Zustandsraum erschafft: Die Schönheit der Strukturen und ihr Gestaltreichtum demonstrieren eindrücklich eine dem Chaos zugrundeliegende Ordnung. Die Chaosforschung ist dabei, diese Strukturen zu entschlüsseln und mit physikalischem Inhalt zu füllen. So konnte beispielsweise entdeckt werden, daß

- der Übergang eines Systems vom geordneten in den ungeordneten Zustand nach universellen und das heißt vom konkreten System unabhängigen Gesetzmäßigkeiten erfolgt,

- das Chaos durch einen Streck- und Faltmechanismus hervorgebracht wird, durch den die Orbits des Systems gemischt werden [25].

3.8 Kreatives Chaos

...man muß: noch Chaos in sich haben, um einen tanzenden Stern zu gebären. (F. NIETZSCHE)

Der chaotische Zustand, in den ein dynamisches System übergeht, darf nicht mit dem mißverständlicherweise häufig ebenfalls (molekulares) Chaos genannten thermischen Gleichgewicht verwechselt werden. Wie man sich beispielsweise an einem typischen Übergang, dem sogenannten Feigenbaumszenario [25], klarmachen kann, geht der chaotische Zustand aus dem regulären durch eine unendliche Folge von Symmetriebrüchen hervor. Das Chaos ist daher durch ein hohes Maß an Strukturiertheit und Komplexität gekennzeichnet. Chaos, Komplexität und Organisiertheit gehen gewissermaßen Hand in Hand. Das Fehlen jeder Form von Regelmäßigkeit und Ordnung in einem chaotischen Signal bedeutet, daß die zeitliche Entwicklung des dynamischen Systems rechnerisch irreduzibel ist. Dies ist aber eine andere Form zu sagen, das System verhalte sich unvorhersagbar. Denn es gibt keine schnellere Möglichkeit herauszufinden, wie sich das System entwickeln wird, als es selbst zu beobachten. Das ist wie bei einem Tennisspiel: Die größten Computersysteme der Welt wären nicht imstande, das Spiel in einer Weise zu simulieren, die dem realen Geschehen auch nur annähernd gleich käme. Der große Reiz, der von einem Tennisspiel ausgeht, beruht auf dieser seiner Unkalkulierbarkeit: Hier erleben wir Kreativität in reinster Form, vor unseren Augen entwickelt sich etwas Neues, Einmaliges: *"Organisation wird aus den Umständen geboren, wie Aphrodite aus dem Schaum"* (MICHEL SERRES [7]).

Obwohl die Chaosforschung noch am Anfang steht, erhofft man von ihr letztlich auch eine Antwort auf die Frage, wie Neues entsteht, wie die Evolution zu Höherem „funktioniert“. Die pessimistische Perspektive, daß beispielsweise die Entstehung des Lebens einem gigantischen blinden Zufall zu verdanken sein soll [26], weicht immer mehr einer Auffassung, die man vielleicht am besten mit den Worten ELIAS CANETTIS erfaßt:

"Der Geist lebt vom Zufall, aber er muß ihn ergreifen".

Literatur

- [1] H.J. SCHLICHTING: Energie und Energieentwertung. Heidelberg: Quelle & Meyer 1983.
 [2] H.J. SCHLICHTING - U. BACKHAUS: Energie als grundlegendes Konzept. - Physik und Didaktik 7 (1979) 139.

- [3] H.J. SCHLICHTING- U. BACKHAUS: Energieverbrauch und Energieentwertung. - Der Physikunterricht 18/3 (1984-) 24; und Entropie und Exergie: Zwei Größen zur Beschreibung der Irreversibilität und Energieentwertung. - Im selben Heft, S. 41.
 [4] W. THOMSON: On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy. - Proc. Roy. Soc. Edinburg, April 1852.
 [5] R. CLAUDIUS: Über eine veränderte Form des Zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie. Poggendorffs Annalen 93 (1854) 481.
 [6] R. CLAUDIUS: Über verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie. - Ann. d. Physik 125 (1865) 353.
 [7] M. SERRES: Der Parasit. - Frankfurt: Suhrkamp 1984.
 [8] CH. DARWIN: The Origin of Species by Means of Natural Selection 1859.
 [9] L. BOLTZMANN: Der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. - In: Populäre Schriften. Leipzig: Barth 1905, S. 40.
 [10] H. POINCARÉ: Der Stand der theoretischen Physik an der Jahrhundertwende. - Phys. Bl. 15/4 (1959) 148.
 [11] I. PRIGOGINE: Le thermodynamique de la vie. - Recherche 24/3 (1972) 54-7.
 [12] H. HAKEN: Synergetik. - Berlin etc.: Springer 1983.
 [13] F. AUERBACH: Die Weltherrin und ihr Schatten. -Jena: Fischer 1913, S.1.
 [14] I. PRIGOGINE - I. STENGERS: Dialog mit der Natur. München: Piper 1983, S. 147.
 [15] P.JORDAN: Das Bild der modernen Physik. - Hamburg: Stromverlag 194-7, S. 118.
 [16] M. EIGEN: Evolution und Zeitlichkeit. - In: Die Zeit. München: Piper 1990, S. 57.
 [17] G. W. LEIBNIZ: Monadologie 71, Estpublikation 1714.
 [18] E. N. LORENZ: Determmistic nonperiodic flow. -J. Atmos. 20 (1963) 130.
 [19] H.J. SCHLICHTING- U. BACKKHAUS- H. G. KÜPKER: Chaos beim Wasserrad - ein einfaches mechanisches Modell für das Lorenz-System. - PhuD 20 (1991) 196-220.
 [20] G. BATESON: Geist und Natur. - Frankfurt: Suhrkamp 1984, S.130.
 [21] H.J. SCHLICHTING: Schöne fraktale Welt. Annäherungen an ein neues Konzept der Naturwissenschaften . MNU 45 (1992) 202-214.
 [22] F. VALRELA: Der kreative Zirkel. Skizzen zur Naturgeschichte der Rückbezüglichkeit. In: P. WATZLAWICK (Hg.): Die erfundene Wirklichkeit. - München: Piper 1984., S. 295ff.
 [23] F.W.J. SCHELLING: Werke III. - Stuttgart: Cotta 1856
 [24] H. POINCARÉ: Wissenschaft und Methode. - Darmstadt: Wiss. Buchges. 1963, S. 380.
 [25] U. BACKHAUS - H.J. SCHLICHTING: Auf der Suche nach Ordnung im Chaos. - MNU 43 (1990) 456. [26] J. MONOD: Zufall und Notwendigkeit. - München: dtv 1975.