Von der Dissipation zur Dissipativen Struktur

H. Joachim Schlichting. WWU Münster

The system can be regarded as having evolved in great part to discover patterns, so that a pattern becomes in a sense its own reward, even if it confers no particular advantage in the real world

Murray Gell- Man

Prozess und Struktur: Das Ruhende im Bewegten

Im Rahmen des Energieentwertungkonzepts [1] wird das Warmhalten von Tee auf einem Stövchen folgendermaßen beschrieben: Der selbsttätige Vorgang der Abkühlung des Tees auf Umgebungstemperatur wird ständig durch den Vorgang des Abbrennens der Kerze zurückgespult, so dass das Teewasser auf eine Temperatur oberhalb der Umgebungstemperatur eingeregelt und das System in einem stationären Nichtgleichgewichtszustand gehalten wird. Solche Nichtgleichgewichtszustände umgeben uns in großer Zahl:

- Das mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h fahrende Auto,
- die Badewanne ohne Stöpsel, die durch zulaufendes Wasser auf einer gleichbleibenden Füllhöhe bleibt,
- der gleichmäßig dahin fließende Fluss, dessen Fließen allenfalls an einem mitbewegtes Blatt zu erkennen ist,
- das von einer Glühwendel abgegebene Licht, aber auch der durch die Wendel fließende elektrische Strom,
- die Kerzenflamme,
- die gegen den Wind wandernden Sandrippel in der Wüste,
- die blühende Blume etc.

Bei den zuletzt genannten Beispielen liegt es nicht sofort auf der Hand, dass es sich um gegeneinander wirkende Vorgänge bzw. Prozesse handelt. Die "Lichtstruktur" der Kerze kann als Ergebnis von Prozessen aufgefaßt werden, in denen das Erlöschen infolge der Abgabe von Wärme, Licht und Stoffen ständig durch Oxidation von neuem Wachs zurückgespult wird, wodurch das System fern vom thermodynamischen Gleichgewicht gehalten wird. Demnach kann man alle genannten Beispiele sowohl als Prozesse als auch als Nichtgleichgewichtsstrukturen, also energiedurchflossene (offene) Sys-

teme auffassen. Man wird vor allem dann von einer Struktur sprechen, wenn das System eine auffällige äußere Gestalt annimmt. In allen Fällen bleibt die Energie des Systems (im Mittel) konstant. Dem System wird genauso viel Energie und/oder Materie zugeführt, wie es an die Umgebung abgibt (Bild 1). Allerdings wird dabei die Energie entwertet bzw. dissipiert. Das System muß daher mehr Entropie abgeben als es aufnimmt. Durch diesen Entropieexport wird die Struktur im Nichtgleichgewicht gehalten.



Nichtgleichgewichtsstrukturen

Bild 1: Schematische Darstellung einer Nichtgleichgewichtsstruktur, deren Energieinhalt im zeitlichen Mittel konstant bleibt, weil ebenso viel Energie (bzw. Materie und Energie) aufgenommen wie abgegeben wird. Dabei wird Entropie produziert.

Fließgleichgewicht

Wie weit entfernt sich ein durch Energieentwertung angetriebenes System vom thermodynamischen Gleichgewicht? Die Antwort auf diese Frage macht eine Differenzierung der obigen Beispiele nötig. Zur Verdeutlichung betrachten wir den auf dem Stövchen warmgehaltenen Tee etwas genauer.

Solange die Wärmezufuhr nur gering ist, wird die Wärme zur kälteren Oberfläche *geleitet* und dort an die Luft abgegeben. Das System ändert sich rein äußerlich nicht und behält die Symmetrie bei, die es im thermodynamischen Gleichgewicht besaß: Es bleibt dem Gleichgewicht sehr nahe. Im Falle der Wärmeleitung ist mit dem Energiestrom durch das System hindurch eine Entropieproduktions- bzw. Dissipationsrate:

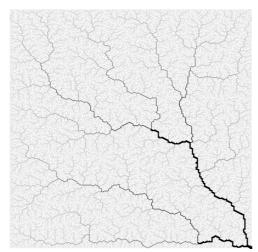


Bild 2: Simulation eines Flußnetzwerkes mit Abfluß in der Ecke, das dabei ist, sich in eine Struktur mit minimaler Dissipationsrate zu entwickeln (auf einem Gitter mit 200x200 Feldern) (aus [5]).

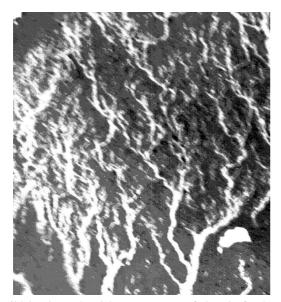


Bild 3: Einzugsbereich von Wasser auf einer in feuchter Farbe gestrichenen Papierfläche, die nach der Benetzung mit Wasser schräg gehalten wurde.

$\Delta S_{iWL}/\Delta t = \Delta Q/\Delta t \; (1/T_U - 1/T)$

verbunden (vgl.[2].). Dabei stellt $\Delta Q/\Delta t$ einen Energiestrom und $(1/T_U-1/T)$ eine (verallgemeinerte) Kraft dar, die den Strom antreibt. Die Dissipationsrate kann ganz allgemein (also nicht nur bezogen auf die Wärmeleitung) als Produkt aus Strömen und diese antreibenden Kräften aufgefaßt werden. So gilt beispielsweise für die elektrische Leitung:

$$\Delta S_{iel}/\Delta t = I~U/T$$
,

wobei I den (elektrischen) Strom und die Spannung U/T die verallgemeinert Kraft darstellen.

In der Nähe des thermodynamischen Gleichgewichts können Ströme und Kräfte als proportional

zueinander angesehen werden (lineare Näherung). In diesem stationären (Fließ-) Gleichgewicht nimmt die Dissipationsrate einen im Rahmen der jeweiligen Randbedingungen minimalen Wert an (Prigoginesches Prinzip der minimalen Dissipations- bzw. Entropieproduktionsrate). Damit lässt sich dieser Bereich der linearen Nichtgleichgewichtsthermodynamik ähnlich wie das thermodynamische Gleichgewicht durch das Extremum einer Potentialfunktion charakterisieren (vgl. z.B.[2]).

Natürliche Entwässerung als Minimalsystem

Als eindrucksvolles Beispiel für das Prinzip der minimalen Dissipationsrate sei hier der stationäre Zustand eines Systems erwähnt, bei dem es um die Entwässerung einer Ebene durch die Ausbildung eines Netzes von Flüssen und Nebenflüssen geht (Bild 2), die jeden Punkt der Ebene in eindeutiger Weise einbeziehen. Man kommt auf eine solche Minimalstruktur, wenn man die Minimierung der Dissipationsrate in einen Computeralgorithmus zur Simulation der Flußstruktur umsetzt [5]. Auch experimentell sind derartige Minimalstrukturen auf einfache Weise zugänglich (Bild 3).

Der gefangene Ball

Auch in dem folgenden Freihandexperiment bildet sich ein Fließgleichgewicht aus. Hält man einen Tischtennisball vor den Flaschenhals einer halbierten mit Wasser gefüllten Plastikflasche (ein Trichter ist ebenfalls geeignet), so kann man den Ball getrost loslassen, er wird nicht wie vielleicht erwartet durch das sehr viel dichtere Wasser hochgedrückt, sondern bleibt vor der Öffnung und versperrt dem Wasser weitgehend den Weg. Nur ein kleines Rinnsal fließt an den Seiten des Balls vorbei (Bild 4). Auf diese Kleinigkeit kommt es indessen an. Denn darin zeigt sich der irreversible, dissipative Vorgang, der diese Nichtgleichgewichtsstruktur aufrechterhält.

Nichtgleichgewichtsstruktur? Ja, das System befindet sich au-Berhalb des thermodynamischen Gleichgewichts, denn aufgrund des untergetauchten Balls sehr geringer Dichte wird der Schwerpunkt des Systems erhöht. Verhindert man die Dissipation potentieller Energie durch das abfließende Wasser, indem man die untere Öffnung zuhält.



Bild 4: Der Tischtennisball "versucht" den Hals der halben Pet- Flasche zu verschließen.

schnellt der Ball sofort nach oben und bringt das System ins Gleichgewicht.

Wie kommt es zu dieser Strukturbildung? Hält man den Ball gegen die Auftriebskraft vor die Öffnung, so verengt man den Strom abfließenden Wassers. Das vor und hinter dem Ball mit großem Querschnitt fließende Wasser wird auf einen sehr kleinen Querschnitt eingeschränkt. Dadurch wird das Wasser an der Engstelle stark beschleunigt. Beschleunigung bedeutetet aber anschaulich gesehen, dass die jeweils nachfolgenden Wasserportionen die zurückgebliebenen "Leerstellen" aus Trägheit nicht so schnell auffüllen können, wie sie entstehen. Das bei nichtbeschleunigten Strömungsvorgängen schende Gleichgewicht mit dem äußerem Luftdruck wird in der Weise gestört, dass der Ball unter Druck gerät und in die Strömung hinein gepreßt wird (Bernoulli- Prinzip). Dadurch werden die Beschleunigung der Strömung und der Unterdruck weiter verstärkt. Der Strom würde sich selbst strangulieren, wenn nicht aufgrund des mit der Enge zunehmenden Strömungswiderstandes die Geschwindigkeit des Stroms noch stärker vermindert als sie durch die Verkleinerung des Querschnitts erhöht würde. Der Strömungswiderstand wächst also mit einer höheren Potenz der Geschwindigkeit als die mit der Verengung wachsende Kraft auf den Ball. Aufgrund dieser Nichtlinearität können sich beide Tendenzen gegenseitig "überholen", begrenzen und auf diese Weise einen stationären Fließvorgang einregeln (siehe weiter unten).

Dissipative Struktur

Wenn sich ein System noch weiter aus dem thermodynamischen Gleichgewicht heraus entwickelt als es bei einem Fließgleichgewicht der Fall ist, kommt es zu einer neuen Struktur. Dazu betrachten wir noch einmal den auf dem Stövchen warmgehaltenen Tee. Bislang waren wir davon ausgegangen, dass die von unten zugeführte Wärme durch Wärmeleitung durch das System transportiert wird. Wenn der zugeführte Wärmestrom erhöht wird und ein kritisches Maß überschreitet, entfernt sich das System weiter vom thermodynamischen Gleichgewicht, und es tritt ein völlig neues Phänomen auf: Die Flüssigkeit setzt sich in Bewegung. Die Auftriebskraft aufgrund der erwärmten und sich infolgedessen ausdehnenden unteren Flüssigkeitsschicht wird so stark, dass es zu einer Überwindung der inneren Reibungskraft kommt und erwärmte Flüssigkeit aufsteigt. Auf diese Weise wird die Wärmeleitung durch den sehr viel effektiveren Transportmechanismus der Wärmekonvektion überlagert. Dadurch steigt die Dissipationsrate sehr stark an und treibt das System in einen stationären Zustand fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht. In diesem Falle spricht man mit Ilya Prigogine von einer Dissipativen Struktur,

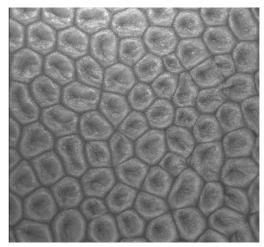


Bild 6: Typische Konvektionszellen in einer Flüssigkeitsschicht. In der Mitte quillt der Zellen quillt die Flüssigkeit hoch, um – an der Oberfläche abgekühlt – an den Zellengrenzen in Konkurrenz mit den Nachbarzellen wieder abzusinken.



Bild 5: Konvektionszelle in einer Sandschicht, die mit Hilfe eines Vibrationsgenerators in Schwingung versetzt wird. Obwohl es sich hier um ein völlig anderes System handelt, ist die Ähnlichkeit zur Bénardkonvektion frappierend.

einem System, dessen Struktur sich der Dissipation (bzw. Entwertung) von Energie verdankt.

Die durch die Konvektion bedingte Strukturierung der Flüssigkeit kann man insbesondere in einer wenige Millimeter dünnen Flüssigkeitsschicht (z.B. Silikonöl, dem man als Indikator der Bewegungen z.B. etwas Kupfer- oder Aluminiumpulver beigemengt hat) eindrucksvoll sichtbar machen (Bild 6) Die Flüssigkeitsschicht wird je nach den Randbedingungen des Systems (z. B. Form des Gefäßes, Viskosität) durch ein typisches Muster aufeinander abgestimmter Konvektionszellen geprägt (Bénard-Konvektion).

Ein ähnliches Zellenmuster kann man erzeugen, wenn man eine flache Schale mit Sand auf einem

Vibrationsgenerator (siehe z.B. [3]) in Schwingung versetzt. Dann sind es kollektiv zirkulierende Sandkörnchen, die sich in dieser Struktur organisieren.

Aber auch die Flamme einer Kerze kann als dissipative Struktur aufgefaßt werden. Bei ruhiger Luft erscheint sie fast wie die Blüte einer Blume in gleichbleibender äußerer Form: "Der Stengel der Flamme ist so gerade, so zart, dass die Flamme eine Blume ist" (Gaston Bachelard). Wie bei dem äußerlich gleichbleibenden Muster der Bénardzellen verdankt sich auch hier die Dauerhaftigkeit der Struktur einem ständigen Wechsel. Im Docht aufsteigendes flüssiges Wachs verdampft, reagiert mit dem Luftsauerstoff und setzt Energie frei, die vor allem nicht verbrannten Kohlenstoff zum Leuchten bringt. Da ständig neues Wachs verbrennt und anschließend als Verbrennungsgas aufsteigt, werden stets neue Kohlenstoffteilchen zum Leuchten gebracht. Die Flamme vergeht und entsteht in jedem Moment neu.

Strukturbildung durch Symmetriebruch

Die Strukturbildung ist offensichtlich mit einem Bruch der Symmetrie des Systems verbunden. Die neue Struktur besitzt eine niedrigere Symmetrie als im thermodynamischen Gleichgewicht, aus dem sie hervorgeht. Im Falle der Bénardkonvektion wachsen die Polygonzellen aus der homogenen Flüssigkeitsschicht heraus, sobald eine kritische Temperatur überschritten wird. Dabei wird die hohe Symmetrie des Systems erniedrigt (siehe z B. [3]).

An welcher Stelle der Flüssigkeitsschicht setzt das Konvketionsgeschehen ein? Im Fall einer ideal gleichmäßigen Erwärmung wäre das System genau so blockiert wie Buridans Esel, der in der Mitte zwischen zwei gleichen Heuhaufen verhungert, weil von beiden gleich starke Reize ausgehen. Denn da die Flüssigkeitsschicht als Ganzes wärmer und damit spezifisch leichter wird, müsste sie als Ganzes aufsteigen. Das ist natürlich unmöglich. Zum Glück ist das System ebenso wie der Esel in einem derartigen labilen Gleichgewicht hochgradig sensitiv: Kleinste, Störungen reichen aus (beispielsweise das zufallsbedingte gleichzeitige Aufsteigen einiger Flüssigkeitsmoleküle an bestimmten Stellen), um sich zu makroskopischen Bewegungen aufzuschaukeln, die schließlich die ganze Flüssigkeitsschicht erfassen und mit Konvektionszellen ausfüllen. Wie auf ein Kommando schält sich aus dem mikroskopischen Chaos des thermodynamischen Gleichgewichts ein kohärentes, kollektives Verhalten heraus. Die vorher individuell und unabhängig voneinander agierenden Flüssigkeitsteilchen machen plötzlich gemeinsame Sache. Solange sich an den äußeren Bedingungen nichts ändert (konstanter Energiestrom), bleibt dieses zufällig zustande gekommene Zellenmuster erhalten. Der Zufall wird gewissermaßen konserviert und bestimmt die individuelle Gestalt der dissipativen Struktur. Der Zufall kann daher als das kreative, von vornherein nicht bestimmbare und nicht vorhersagbare Element der Strukturbildung angesehen werden: Aus zufälligen Schwankungen innerhalb eines Systems geht eine ganz neue Ordnung des Systems hervor. Ilya Prigogine sah in diesem Verhalten die physikalische Antwort auf die Frage, wie Neues im Bereich der unbelebten und belebten Natur entsteht.

Von Bedeutung ist darüber hinaus, dass das hochdimensionale Vielteilchensystem aufgrund solcher phasenübergangsähnlicher Mechanismen aus der enormen Vielfalt möglicher Verhaltensweisen eine Struktur hervorbringt, die durch wenige Freiheitsgrade beschreibbar ist. Edward Lorenz konnte 1963 zeigen, dass sich Konvektionsbewegungen in Fluiden (bis auf Fluktuationen) durch ein System dreier gekoppelter nichtlinearer Differentialgleichungen beschreiben lassen. Daher gelingt es, die Bewegungsfiguren der Bénardkonvektion an einem mechanischen Modellsystem, einer Art Wasserrad, zu untersuchen und zu beschreiben [6].

Die Rolle der Nichtlinearität

Die einmal eingestellte Struktur erweist sich als äußerst robust. Wenn man das System etwas stört, so baut es die Störungen sofort wieder ab. Diese Stabilität beruht auf der Nichtlinearität der Energiebzw. der damit verbundenen Entropieströme, die das System in Gang halten.

Dazu machen wir uns folgendes klar: Der mit der rotierenden Flüssigkeit transportierte Wärmestrom und der damit verbundene Entropiestrom ist proportional zur strömenden Flüssigkeitsmenge (Masse). (Dabei gehen wir davon aus, dass die Temperatur des Flüssigkeitsstroms von unten nach oben näherungsweise gleich bleibt).

Mit der Konvektion entsteht ein Strom mechanischer Energie, der quadratisch mit der Geschwindigkeit wächst. Da die mit der Erzeugung mechanischer Energie verbundene Entropieabnahme durch Entropiezunahme im System (Ausgleichsvorgänge) mindestens kompensiert werden muß, nimmt der Strom der erzeugten Entropie mindestens quadratisch, also nichtlinear mit der Geschwindigkeit zu. Diese Entropie muß zusätzlich zu der mit dem Wärmestrom aufgenommenen Entropie entsorgt werden, weil das System ansonsten daran "ersticken" würde. Es stellt sich daher zwangsläufig eine maximale Konvektionsgeschwindigkeit ein, bei der die im System erzeugte Entropie mit dem durch das System hindurch fließenden Wärmestrom gerade noch exportiert werden kann. Da - anschaulich gesprochen - mit der Rotationsgeschwindigkeit die Entropieproduktion "schneller" zunimmt als der Entropieexport, kann erstere letztere einholen und begrenzen. Es kommt zur Einregelung einer stationären Rotationsgeschwindigkeit, die in dem gleichbleibenden Muster der Konvektionszellen zum Ausdruck kommt.

Eine zufallsbedingte Zunahme der Geschwindigkeit über den stationären Wert hinaus würde zu einer größeren Entropieproduktionsrate führen, so dass der die Rotation aufrechterhaltende Temperaturgradient reduziert und damit die Rotationsgeschwindigkeit vermindert würde. Wenn umgekehrt mehr Entropie exportiert wird, als entsteht, rotieren die Flüssigkeitswirbel schneller und das System entfernt sich weiter vom thermodynamischen Gleichgewicht. Mit anderen Worten: Eine Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit führt aufgrund der über-

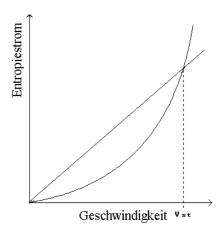


Bild 7: Zunahme des mit dem Energiestrom transportierten Entropiestroms (Gerade) und des Stroms der im System erzeugten Entropie (Kurve). v_{st} ist die stationäre Geschwindigkeit, bei der sich produzierte und exportierte Entropie die Waage halten.

proportional wachsenden Entropieproduktion zu einer Abnahme der Geschwindigkeit, was aufgrund der nunmehr geringeren Entropieproduktion zu einer Zunahme der Geschwindigkeit führt usw. Diese Art der Rückkopplung im Systemverhalten ist unmittelbarer Ausdruck der Nichtlinarität, die letztlich dafür sorgt, dass der stationäre Nichtgleichgewichtszustand der dissipativen Struktur gewissermaßen von selbst, d.h. ohne Eingriff von außen, einreguliert wird, bzw. sich selbst organisiert.

Die Flamme einer Kerze

Wir kommen noch einmal auf die Flamme der Kerze zurück. Sie ist das Paradebeispiel einer dissipativen Struktur, die von Energie <u>und</u> Materie durchströmt wird. Im stationären Zustand versorgt der Docht die Flamme mit einem flüssigen Wachsstrom, der in der Brennzone verdampft und mit dem Sauerstoff der Luft reagiert. Dabei wird Energie freigesetzt, die zur Lichtentstehung im Bereich der Kerzenflamme führt. Auf Einzelheiten soll es uns hier nicht ankommen. Erwähnt sei nur, dass die un-

vollständige Verbrennung des Wachses zur Freisetzung von Kohlenstoffteilchen führt, die in der Hitze der anfallenden Energie erglühen und nicht unwesentlich zur Helligkeit der Flamme beitragen. Was aus chemischer Sicht als Unvollkommenheit angesehen werden kann, erweist sich hinsichtlich des Zwecks der Flamme, Licht zu spenden, als Ausdruck einer jenseits fachlicher Kategorien liegenden Vollkommenheit.

Die Kerzenflamme verdankt sich einer ganzen Reihe wohlabgestimmter Regelvorgänge, bei denen Energie- und Stofftransporte, chemische Reaktionen und Phasenübergänge in subtiler Weise miteinander vernetzt sind und sich gegenseitig bedingen. Dabei fällt auf, dass die Größe der Kerzenflamme weitgehend unabhängig von der Art des Brennstoffs und des Dochts, sowie der Dicke und Form der jeweiligen Kerze ist. Dieses Phänomen, das die Kerzenflamme (bei ruhiger Luft) unbeweglich wie die Blüte einer Blume erscheinen lässt, findet in der Entropiebilanz des Prozesses eine einleuchtende Erklärung.

Wenn die Flamme entzündet wird, wächst sie sehr schnell zu ihrer endgültigen Größe an. Anders als etwa beim Hausbau, bei dem es lediglich auf die Zufuhr von Energie und Materie ankommt und im Prinzip beliebig große Bauwerke ermöglicht, geht es beim Wachstum der Flamme um Zufuhr und Abfuhr von Energie und Stoffen. Da die Flamme sichtbarer Ausdruck der in ihr ablaufenden selbsttä-





Bild 8: Die Ähnlichkeit zwischen Kerzenflammen und Blüten ist nicht nur äußerlich. Auch eine Pflanze kann als dissipative Struktur angesehen werden, die sich in einem ständigen Auf- und Abbau befindet.

tigen Vorgänge ist, fallen Abwärme und Abgase an, die entsorgt werden müssen. Selbst wenn die Flamme ihre endgültige Größe erreicht hat, müssen weiterhin Energie und Stoffe zu- und in gleichem Maße abgeführt werden. Entscheidend für die Aufrechterhaltung einer dissipativen Struktur ist die mit den inneren Vorgängen einhergehende Energiedissipation bzw. Entropieproduktion.

Da sich der Stoffwechsel auf das gesamte Volumen der Flamme bezieht, kann man davon ausgehen, dass die Entropieproduktion ΔS_i proportional zum Volumen der Flamme bzw. r^3 ist, wobei r die Flammengröße charakterisiert:

$$\Delta S_i = \varphi r^3$$

mit ϕ als dimensionsbehaftete Proportionalitätskonstante. Es muß also ständig mehr Entropie exportiert werden, als mit der aufgenommen Materie importiert wird. Die Flamme würde ansonsten an der Entropie "ersticken". Da Entropiezunahme anschaulich Ausgleich von Differenzen und Intensitäten bedeutet, würden die Lebensbedingungen zunehmend eingeschränkt werden.

Die Differenz der durch die Oberfläche der Flamme zu- und abfließenden Entropie ΔS_e kann als proportional zur Oberfläche bzw. r^2 angesehen werden:

$$\Delta S_e = \tau r^2$$
,

mit τ als dimensionsbehaftete Proportionalitätskonstante. Die Entropiebilanz der Flamme beträgt demnach:

$$\Delta S = \Delta S_i + \Delta S_e$$
.

Im stationären Zustand gilt:

$$\Delta S = \varphi r_s^3 - \tau r_s^2 = 0.$$

Dann hat die Flamme ihre maximale Größe $r=r_s=\tau/\phi$ erreicht. Solange r klein ist, gilt $\Delta S<0$, und die Flamme kann weiter wachsen. Bei größeren Werten von r ist hingegen $\Delta S>0$, dann staut sich in der Flamme überschüssige Entropie, die zu einer Einschränkung der "Lebensbedingungen" und damit zu einer Verkleinerung der Flamme führen würde.

An dieser Stelle sei noch einmal auf die Erschließungsmächtigkeit der thermodynamischen Argumentation hingewiesen: Man kann auch ohne Kenntnis der komplizierten physikalischen und chemischen Vorgänge Aussagen über die Begrenzung der Flammengröße machen. Die Aussagen sind sogar so allgemein, dass man auf ganz ähnliche Weise begründen kann, warum sich bei der Bénardkonvektion statt einer einzigen zahlreiche in etwa gleich große kleinere Konvektionszellen ausbilden. Diese "Zellteilung" findet man mutatis mutandis auch in der Biologie wieder. Die Entwicklung größerer Lebewesen war u.a. nur dadurch möglich, dass die Natur Vielzeller hervorbrachte.

Fazit

Mit einfachen thermodynamischen Überlegungen lässt sich zeigen, dass Strukturen in der belebten und unbelebten Natur nicht nur im Einklang mit dem Entropieprinzip stehen, sondern gewissermaßen dadurch erst ermöglicht werden. Indem Syste-

me ins thermodynamische Gleichgewicht übergehen, können andere Systeme aus dem thermodynamischen Gleichgewicht herausgetrieben und als sich selbst organisierende Struktur stabilisiert werden. Dabei wird deutlich, dass die aus Nichtgleichgewichtsstrukturen bestehende Wirklichkeit als dynamischer Prozess betrachtet werden kann: Sie entsteht jeden Augenblick neu. M.a. W.: "Der Wechsel ist das Beständige" (A. Schopenhauer).

Literatur

- [1] Energieentwertung ein qualitativer Zugang zur Irreversibilität. PdN-Ph (in diesem Heft)
- [2] Schlichting, H. Joachim: Von der Energieentwertung zur Entropie. PdN-Ph (in diesem Heft)
- [3] Boysen, Gerd et al.: Oberstufe Physik, Band1. Berlin: Cornelsen 1997, S. 146
- [4] De Groot, S. R.; Mazur, P: Grundlagen der Thermodynamik irreversibler Prozesse. Mannheim: BI 1969
- [5] Zeiger; Klaus; Nordmeier, Volkhard; Schlichting, H.Joachim: Flußnetzwerke Strukturbildung in der natürlichen Umwelt. In: Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hrsg.): Didaktik der Physik. 1999, S. 513- 518
- [6] Schlichting, H. Joachim; Bachhaus, Udo; Küpker, H.G: Chaos beim Wasserrad ein einfaches mechanisches Modell für das Lorenzsystem. Physik und Didaktik 19/3, 196-219 (1991)