

# Probleme der nichtlinearen Physik und der Nichtgleichgewichtsthermodynamik

## anhand von Freihandexperimenten<sup>1</sup>

H. Joachim Schlichting, Volkhard Nordmeier

*Die krumme Linie welche die Insekten oft um unsere Lampen beschreiben wird durch die zwei zusammengesetzten Bewegungen beschrieben, vermöge welchen das Insekt die allzu große Hitze fliehen und die gemäßigte Wärme suchen will, die erste trieb sie nach der Tangente, wenn nicht die zweite sie dem Mittelpunkt näherte.*

Georg Christoph Lichtenberg

- Zündet man eine Kerze an, so nimmt die Flamme eine für alle Kerzen typische Endgröße an und behält diese bei, solange sie mit Wachs versorgt wird. Warum wird die Flamme nicht größer, wenn genügend Brennstoff zur Verfügung steht?
- Ein fallender Gegenstand wird zunächst schneller, bis er schließlich mit einer charakteristischen Endgeschwindigkeit sinkt. Warum behält er diese Geschwindigkeit bei?
- In einem Sektklar steigen Blasen auf. Warum lösen sich die Blasen genau dann, wenn sie eine bestimmte Größe erreicht haben?
- Schreckt man ein Ei unter fließendem Wasser ab, so bewegt es in auf den Wasserstrahl zu. Warum wird es nicht zur Seite weggedrängt?

Diese und andere Fragen haben eines gemeinsam: Sie werden meist nicht gestellt. Sie betreffen zwar auffällige Erscheinungen, entziehen sich aber dem klassischen physikalischen Blick. Physikalisch handelt es sich um Vorgänge, bei denen sich Systeme aus dem thermodynamischen Gleichgewicht heraus in einen stationären Nichtgleichgewichtszustand entwickeln, und diesen gegen äußere Störungen zu stabilisieren versuchen. Da der Nichtgleichgewichtszustand oft mit einer charakteristischen Struktur verbunden ist, spricht man auch von Strukturbildung.

Entscheidend für die Beschreibung der Entstehung und Aufrechterhaltung derartiger Strukturen, die nach Ilya Prigogine in Fließgleichgewichte und dissipative Strukturen differenziert werden (siehe z.B.[1]), ist das *Prinzip der Dissipation von Energie*

(Entropieprinzip oder 2. Hauptsatz der Thermodynamik). Normalerweise steht dieses Prinzip eher für das Gegenteil, den Zerfall von Strukturen, die Entwertung von Energie, den Übergang ins thermodynamische Gleichgewicht. Dabei wird jedoch der konstruktive Aspekt der Dissipation von Energie außer Acht gelassen, die Tatsache nämlich, dass durch den Übergang eines Systems ins thermodynamische Gleichgewicht ein anderes System aus dem thermodynamischen Gleichgewicht herausgetrieben und Strukturen gebildet werden können (siehe dazu z.B.[1]).

Im folgenden wollen wir den Blick auf die Strukturbildung richten und uns dabei aber auf die Frage beschränken, wie es dem System "gelingt", den stationären Zustand zu "finden" und gegen Störungen zu stabilisieren. Offenbar "weiß" ein sich aus dem thermodynamischen Gleichgewicht heraus entwickelndes System, wann es aufhören muss zu wachsen und wie es sich dagegen zu wehren hat, ins Gleichgewicht zurückzufallen. Diese "Fähigkeit" zur Selbstorganisation, wie auch manchmal gesagt wird, verdankt sich – mathematisch gesprochen – der Nichtlinearität mindestens einer der entscheidenden Variablen.

Selbstorganisation, Nichtlinearität, Rückkopplung, das sind Vokabeln, die auf kompliziertere physikalische Fragestellungen der nichtlinearen Physik verweisen. Sie sind aber zum Verständnis von zahlreichen Alltagsphänomenen von ebenso großer Bedeutung. Die Frage, warum derartige Probleme erst jetzt Beachtung finden, soll hier nur mit dem Hinweis auf eine Episode des türkischen Hodscha Nasreddin beantwortet werden. Dieser wurde von seinem

---

<sup>1</sup> Erschienen in: Physik in der Schule 38/6 (2000), S. 420 - 424

Nachbarn gefragt, was er vor der Tür seines Hauses suche. Er antwortete, dass er seinen Ring suche, den er im Hause verloren habe. Denn draußen könne er wegen der Helligkeit besser sehen.

Anhand einiger einfacher Freihandversuche soll die Rolle der Nichtlinearität bei Nichtgleichgewichtszuständen skizziert werden.

### Strömende Fluide als Nichtgleichgewichtsstrukturen

Ein (möglichst) durchsichtiger Plastikbecher wird mit einem kleinen Loch im Boden versehen. Man hält das Loch mit einem Finger zu und stülpt den Becher überkopf unter Wasser, so daß die Luft im Becher bleibt. Während man den Becher auf den Boden gedrückt hält, gibt man das Loch frei. Sofort steigt ein Strom von Luftblasen auf. Jetzt kann man den Becher loslassen. Erstaunlicherweise bleibt er auf dem Boden haften. Während die Luft langsam entweicht, steigt der Wasserspiegel im Becher an (Bild 1).

Der Becher verharrt also im thermodynamischen Nichtgleichgewichtszustand, in den wir ihn "gewaltig" gebracht haben. Dabei spielt die Dissipation von Energie die entscheidende Rolle. Sie führt zum allmählichen Sinken des Schwerpunktes des Ge-

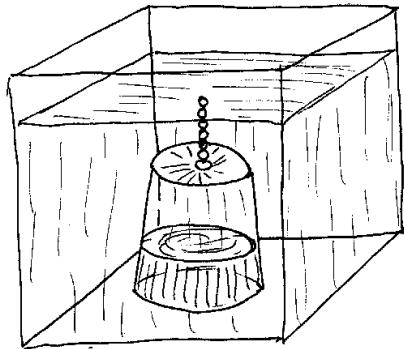


Bild 1: Solange ausreichend Luft im Becher ist, bleibt er am Boden des mit Wasser gefüllten Gefäßes haften.

samtsystems und findet in den entweichenden Luftblasen ihren sichtbaren Ausdruck. Dieser Nichtgleichgewichtszustand ist relativ stabil. Stört man ihn, indem man beispielsweise versucht den Becher anzuheben, so spürt man einen deutlichen Widerstand. Schnürt man dem System jedoch die Luft ab, indem man das Loch im Becher mit dem Finger zuhält, steigt der Becher wie ein Ball auf, den man unter Wasser loslässt, und das System kehrt sprungartig in das ursprüngliche thermodynamische Gleichgewicht zurück.

Ohne einen solchen Eingriff bleibt das System so lange "am Leben", wie der perlenkettenartige Strom von Luftblasen aufsteigt. Erst wenn das Luftvolumen im Innern allmählich zur Neige geht, versiegt der Blasenstrom und kommt plötzlich völlig zur Ruhe. In diesem Moment löst sich der Becher vom Boden und steigt zur Wasseroberfläche auf, um dort den Rest der Luft auf einmal freizugeben.

### Aerodynamische Varianten

Um dem Mechanismus dieses Phänomens auf die Spur zu kommen, betrachten wir ein weiteres Freihandexperiment, das zunächst keine Gemeinsamkeiten mit dem letzteren zu haben scheint, schon weil es völlig ohne Wasser auskommt.

Ein Streifen Papier wird an den Enden so abgeknickt,

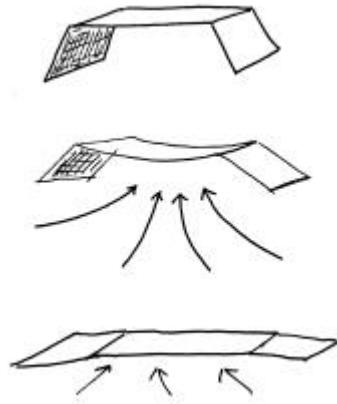


Bild 2: Bläst man unter die Papierbrücke hindurch, so schmiegt sie sich an den Boden an.

daß es eine Art Brücke bildet (Bild 2). Versucht man die Brücke wegzublasen, indem man darunter herbläst, so erreicht man merkwürdigerweise das Gegenteil. Weit davon entfernt, zum Spielball des starken Luftstroms zu werden, knickt der Papierstreifen ein, und schmiegt sich mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit der Luft immer mehr an den Boden an, gerade so als wollte es sich dem Luftstrom entziehen. Wird die Stärke des Luftstroms vermindert, so faltet sich die Brücke aufgrund der rückwirkenden elastischen Kräfte des Papierstreifens wieder in die alte Form zurück.

Dieser Versuch ist in zahlreichen Varianten in der Literatur zu Freihandversuchen zu finden. Eine dieser Varianten sei hier skizziert, weil sie den Konflikt zwischen Erwartung und Resultat noch drastischer vor Augen führt. Man bläst kräftig durch das Loch einer Garnrolle (u.ä.) gegen eine Postkarte, die man flach vor die andere Seite der Öffnung hält. Anstatt weggeblasen zu werden, schmiegt sie sich fest an der

Garnrolle an und „versucht“ den Luftstrom abzuschnüren. (Der Versuch wird wesentlich vereinfacht, wenn man die Karte in der Mitte mit einer Nadel oder Heftzwecke durchsticht, deren Ende in das Loch der Rolle ragt und auf diese Weise ein seitliches Verschieben der Karte verhindert.

### Druckabnahme in beschleunigten Fluiden

Immer dann, wenn Fluide, also Gase oder Flüssigkeiten, durch eine Verengung getrieben werden, so rufen sie einen Unterdruck gegenüber dem allgemeinen äußeren Luftdruck hervor, der dann zu den



Bild 3: Der Tischtennisball „versucht“ den Hals der halben Pet-Flasche zu verschließen.

beobachteten Kraftwirkungen führt. Das hierin zum Ausdruck kommende physikalische Prinzip (fachwissenschaftlich auch Bernoulli-Prinzip genannt), äußert sich in zahlreichen Alltagsphänomenen. Man denke etwa an die Zerstäubung von Parfüm, indem ein Luftstrom über ein in die Flüssigkeit ragendes Rohr geleitet wird, an den Zug eines Kamins oder an die anziehende Wirkung zwischen einem Wohnwagengespann und einem Lastwagen, wenn diese sich bei einem Überholmanöver nahe kommen.

Wenn der Strom eines Fluids eine Verengung passiert, muß die Strömungsgeschwindigkeit zwangsläufig zunehmen, weil dieselbe Stoffmenge, die vorher durch einen breiten Querschnitt strömte, nunmehr in derselben Zeit durch einen viel schmäleren hindurch muß. Die auf diese Weise an der Verengung beschleunigten Fluidteilchen können aus Trägheit nicht so schnell durch die nachfolgenden Teilchen ersetzt werden, wie sie ihren Platz verlassen. Die dadurch bedingte „Verzögerung“ bewirkt eine lokale Verringerung der Dichte des Stroms und infolgedessen eine entsprechende Druckabnahme. Das bei nichtbeschleunigten Strömungsvorgängen herrschende Gleichgewicht mit dem äußerem Luftdruck wird zugunsten des letzteren gestört, so dass im vorliegenden Fall der Plastikbecher, die Papierbrücke, die Postkarte unter Druck gerät und in die Strömung hinein gepreßt wird. Und das ist genau

der Effekt, durch den die genannten Phänomene hervorgerufen werden.

### Nichtlineares Regelverhalten

Interessanterweise haben wir es hier mit Vorgängen zu tun, bei denen die Wirkung der eigenen Ursache entgegen gerichtet ist. Indem der Becher in das unter ihm hinweg strömende Wasser hineingedrückt wird, kommt es zu einer weiteren Abschnürung der Strömung. Dadurch verstärkt sich aber die Beschleunigung des Wassers, wodurch der Becher noch stärker in den Strom gepreßt wird und so weiter. Denkt man diese Wirkungskette naiv zu Ende, so könnte man zu dem Schluß gelangen, daß sich der Strom selbst „stranguliert“ und zum Erliegen kommt. Das passiert natürlich nicht, denn ebenso klar dürfte sein, daß ohne Strömung der beobachtete Effekt gar nicht auftreten würde.

Wie kommt man aus diesem gedanklichen Dilemma heraus? Indem man sich zunächst einmal klar macht, wie man hineingekommen ist, nämlich durch lineare Extrapolation der Wirkungskette. Dabei wurden die

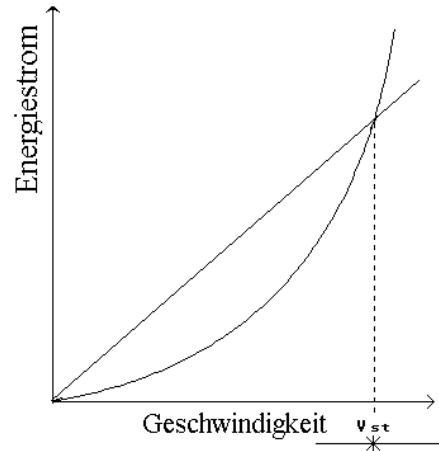


Bild 4: Linear wachsender Energiestrom des strömenden Fluids und nichtlinear wachsender Energiestrom der durch innere Reibung dissipierten Energie „treffen“ sich bei einer stationären Geschwindigkeit.

Reibungskräfte in der Flüssigkeit und zwischen Flüssigkeit und Rändern, von vornherein außer Acht gelassen. Das ist „normalerweise“ problemlos möglich. In diesem Fall spielen Dissipationsvorgänge aber eine entscheidende Rolle. Sie begrenzen die ansonsten unaufhaltsam – und damit in eine Paradoxie – wachsende Strömungsgeschwindigkeit auf einen stationären Wert hin. Mit zunehmendem Druck nimmt die Geschwindigkeit und damit die kinetische Energie des strömenden Fluids zu. Indem die Energiedissipation noch „schneller“ (d.h. mit höherer Potenz, also nichtlinear) mit dem Druck wächst, vermag der Strom der dissipierten Energie

den Strom der auf das fließende Wasser übertragenen Energie "einzuholen" und auf einen stationären Wert einzuregeln. Damit zeigt dieses so einfach erscheinende System ein subtiles Regelverhalten, das für nichtlineare Systeme typisch ist: Wenn die Geschwindigkeit größer wird, wächst der Druck und stranguliert den Strom. Infolgedessen wächst der Strömungswiderstand und verringert die Geschwindigkeit usw. Kurzum: Wenn die Geschwindigkeit größer wird, dann wird sie kleiner, dann wird sie größer usw. Das ist eine typische Rückkopplungsschleife zur Einregelung eines stationären Zustandes.

### Gleich große Blasen

Die bisherige Betrachtung ließ den Strom von Luftblasen außer acht, der durch das Loch im Plastikbecher entweicht. Warum verlässt die Luft den Becher in Form von einzelnen Blasen? Warum sind die Blasen in etwa gleich groß? Durch die hydrostatische Druckdifferenz zwischen dem oberen und unteren Wasserniveau der eingesperrten Luftsicht wird wie eine Art Luftballon ein "Lufttropfen" im Wasser aufgeblasen. Die für die Ausbildung der Grenzschicht nötige Energie wird gespeist durch die abnehmende potentielle Energie des Wassers. Zwar bleibt das Niveau des Wassers zunächst gleich, weil die entstehende Blase oben genau so viel Wasser hochdrückt, wie unten Wasser in den Becher eindringt. Da das eine unten das andere oben geschieht, sinkt aber insgesamt der Schwerpunkt des Wassers.

Mit Beginn des Blasenwachstums wächst in Konkurrenz zur Oberflächenenergie der Einfluß der potentiellen Energie, die mit der Verdrängung bzw. dem Anheben des Schwerpunkts des Wassers verbunden ist. Während die Oberflächenenergie proportional zum Quadrat des Radius, die potentielle Energie aber kubisch mit dem Radius wächst, holt letztere schließlich erstere ein. Wenn beide Tendenzen gleich groß sind, schnürt sich die Luftblase ab und steigt auf, während sich eine neue Blase zu bilden und der Vorgang von vorne beginnt. Auch hier wieder ist die Tatsache entscheidend, dass zwei gegenüberwirkende Tendenzen (man spricht auch von verallgemeinerten Kräften) unterschiedlich "schnell", d.h. nichtlinear bezüglich einer bestimmten Größe, hier dem Radius der Luftblasen, anwachsen. Da die Bedingungen bei der Bildung zweier zeitlich aufeinanderfolgender Blasen in etwa konstant bleiben, sind sowohl die Blasengröße als auch der Abstand zwischen je zwei Blasen in etwa gleich groß. In Wirklichkeit ändern sich die Bedingungen kontinuierlich, weil mit jeder entweichenden Blase die Luftsicht und damit die treibende Druckdifferenz zwischen oberem und unterem Wasserniveau

abnimmt. Das merkt man insbesondere zum Ende des Vorgangs, wenn die Blasenbildung zum Erliegen kommt und der Becher mit der Restluft als ganzes aufsteigt.

### Perlenketten aus Blasen

Wenn die Wasserschicht über dem Plastikbecher genügend groß ist, kann man einen weiteren stationären Vorgang beobachten. Die Luftblasen steigen perlenkettenartig im Wasser auf. Schnurgerade in gleichem Abstand und mit konstanter Geschwindigkeit treibt es die Luftblasen dahin zurück, wo sie herkommen: zur Atmosphäre. Warum strömt die Blasenkette gleichförmig? Nachdem sich die Blase abgelöst hat unterliegt ihr Auftrieb der Schwerkraft und führt zu einer Beschleunigung der Blasen. Die kinetische Energie der Blasen nimmt pro Zeiteinheit proportional zur Geschwindigkeit zu. Sobald sich die Blasen in Bewegung gesetzt haben, baut sich aufgrund des Strömungswiderstandes ein Energiestrom von den Blasen zum umgebenden Wasser auf, der jedoch je nach den konkreten Bedingungen quadratisch bis kubisch, also nichtlinear mit der Geschwindigkeit wächst. Auf diese Weise kommt es sehr schnell zu einer Begrenzung der Geschwindigkeitszunahme. Die aufsteigenden Blasen nehmen im stationären Grenzfall genau so viel Energie auf wie abgeben und regeln eine konstante Geschwindigkeit ein.

Noch eindrucksvoller als im vorliegenden Fall sind die schnurgeraden Perlenketten der  $\text{CO}_2$ -Blasen im Sektglas. Betrachtet man diese aber genauer, so stellt man sowohl eine Zunahme der Blasengröße als auch eine Zunahme des Abstandes zwischen benachbarten Blasen fest. Die Ursache ist nicht in der Abnahme des hydrostatischen Drucks zu sehen, den die Blasen mit zunehmender Höhe spüren. Nach dem Boyle- Mariotteschen Gesetz würde eine Verdopplung des Blasenvolumens, also eine etwa eine Zunahme des Blasenradius um ein Viertel, eine Druckabnahme auf die Hälfte bedingen. Da der hydrostatische Druck bei einem Aufstieg von 10 cm aber nur zu einer Abnahme des hauptsächlich durch die auflastende Atmosphäre bedingten Gesamtdrucks um etwa 1% führen. Der Hauptgrund für die sichtliche Blasenwachstum mit dem Aufstieg ist die Aufnahme weiterer Gasteilchen aus der Lösung. Mit der dadurch bedingten Volumenzunahme wachsen auch der Auftrieb und damit die Abstände zwischen den Blasen.

### Nichtlinearität steuert Papierhubschrauber

Läßt man einen mit wenigen Handgriffen präparierten Papierstreifen fallen, so verhält er sich ganz anders als man es von fallenden Gegenständen erwar-

tet. Nach einer kurzen Beschleunigungsstrecke entfaltet dieser Papierhubschrauber seine Flügel in den Luftstrom hinein und sinkt gleichmäßig rotierend zu Boden [3]. Der Hubschrauber findet sich also in einen stationären Nichtgleichgewichtszustand ein, den er so lange beibehält, wie er von Energie durchflossen ist. Um sich ein Bild davon zu verschaffen, wie der Hubschrauber, die Rotationsstruktur einregelt, betrachten wir die Mechanismen, die die Rotation bestimmen.

Entscheidend für den abrupten Wechsel der Bewe-

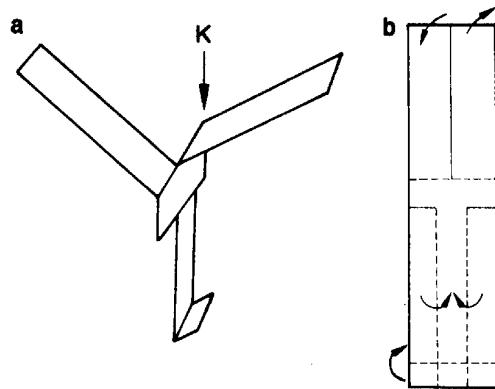


Bild 5: Der Papierhubschrauber rotiert mit ausgebreteten Flügeln um die senkrechte Achse (rechts). Anleitung zur Konstruktion aus einem Papierstreifen.

gungsfigur ist der Symmetriebruch, der mit der Spreizung der Flügel einhergeht. Dadurch dass die Flügel gegeneinander versetzt sind, wird der anfängliche Bewegungszustand des senkrechten Sturzfluges instabil. Bereits kleinste, durch zufällige Störungen hervorgerufene Auslenkungen lassen Luftkräfte wirksam werden, die ein Drehmoment  $M_z$  um die senkrechte Achse bewirken und dazu führen, dass der Hubschrauber um diese Achse zu rotieren beginnt. Da sich die Flügel aus Trägheit in der jeweils eingenommenen Richtung weiterbewegen "wollen", aufgrund der Verbindung der Flügel mit dem sinkenden Rumpf des Hubschraubers daran jedoch gehindert werden, indem sie eine zum Zentrum gerichtete Kraft (Zentripetalkraft) erfahren, kommt es zu einer Spreizung der Flügel, die umso größer ist, je schneller sie sich drehen.

Dem Wachstum der Drehgeschwindigkeit sind aber Grenzen gesetzt. Zum einen nimmt das Drehmoment  $M_z$  mit wachsendem Öffnungswinkel  $\alpha$  immer langsamer zu, erreicht ein Maximum und nimmt dann wieder ab. Es würde bei vollständig geöffneten Flügeln (horizontale Ausrichtung) sogar ganz verschwinden.

Der Grund für dieses Verhalten ist darin zu sehen, dass an dem Drehmoment  $M_z$ , welches die Flügel öffnet, nur die senkrecht zur Flügelfläche orientierte Komponente der horizontal nach innen wirkenden Zentripetalkraft beteiligt ist. Und diese Komponente wird natürlich umso kleiner, je mehr sich die Flügel der horizontalen Lage nähern (Bild 5).

Zum anderen wächst mit zunehmendem Öffnungswinkel  $\alpha$  und infolgedessen größer werdender "Angriffsfläche" für die Luftströmung die Luftwider-

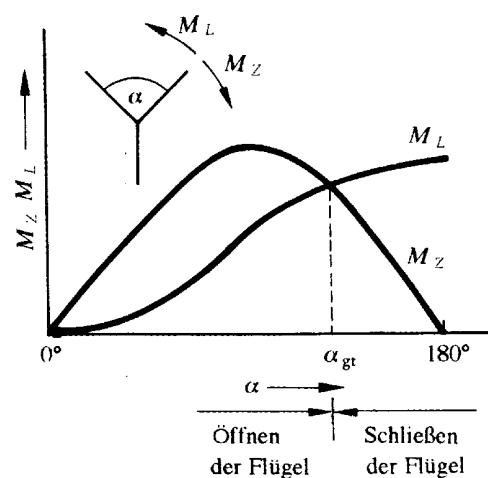


Bild 6: Darstellung der Größe der Drehmomente  $M_L$  und  $M_Z$  in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel  $\alpha$ . Bei kleinen Winkeln überwiegt zunächst das die Flügel öffnende Drehmoment  $M_Z$ . Später dominiert das die Flügel schließende Drehmoment  $M_L$ . Das Gegeneinanderwirken beider Drehmomente führt zur Einregelung eines statio-  
nären Öffnungswinkels  $\alpha_{st}$ .

standskraft, die sich in einer Verringerung der Sinkgeschwindigkeit und in einem  $M_z$  entgegenwirken den Drehmoment  $M_L$  auswirkt, das die Flügel zusammenzuklappen trachtet. Da die Abnahme der Sinkgeschwindigkeit aber die Luftwiderstandskraft reduziert, trägt sie dazu bei, dass  $M_L$  zunächst langsamer wächst als  $M_z$  (Bild 6). Mit weiter zunehmendem Öffnungswinkel  $\alpha$  nimmt  $M_z$  schließlich wieder ab, weil die für  $M_z$  entscheidende senkrecht auf der Flügelfläche stehende Kraftkomponente des horizontal wirkenden Momentes immer kleiner wird und bei horizontaler Ausrichtung der Flügel ganz verschwinden würde. Daher kann  $M_z$  von  $M_L$  "überholt" und begrenzt und auf diese Weise ein statio- närer Öffnungswinkel  $\alpha_{st}$  eingeregelt werden. Entscheidend für diesen Regelvorgang ist auch hier wieder die nichtlineare Charakteristik gegeneinander wirkender Tendenzen, die wir in diesem Fall durch die Drehmomente beschrieben haben.

## Die Kerzenflamme als nichtlineare



Bild 7: 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.

### Nichtgleichgewichtsstruktur

Die Kerzenflamme ist ein Paradebeispiel für eine sich selbst organisierende dissipative Struktur, die von Energie und Materie durchströmt wird und sich in einem stationären Nichtgleichgewichtszustand befindet [1]. In diesem 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 weitere Details soll es uns hier nicht ankommen. Erwähnt sei nur, dass die unvollständige 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 durch Nichtlinearitäten gesteuert werden. 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 errichtet werden können, geht es beim Wachstum der Flamme um Zufuhr und Abfuhr von Energie und Stoffen. Da die Flamme sichtbarer Ausdruck der in ihr ablaufenden selbsttätigen 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  $\Delta S_i$  proportional zum Volumen der Flamme bzw.  $r^3$  ist, wobei  $r$  die Flammengröße charakterisiert:

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

mit  $\varphi$  als dimensionsbehaftete Proportionalitätskonstante. Es muß also ständig mehr Entropie exportiert werden, als mit der aufgenommenen 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  $\Delta S_e$  kann als proportional zur Oberfläche bzw.  $r^2$  angesehen werden:

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

mit  $\tau$  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  $r = r_s = \tau/\varphi$  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.

## Literatur

- [1] Schlichting, H. Joachim: Energieentwertung- ein qualitativer Zugang zur Irreversibilität; Ders.: Von der Energieentwertung zur Entropie; Ders.: Von der Dissipation zur Dissipativen Struktur. Praxis der Naturwissenschaften- Physik 29/2 (2000)
- [2] Schlichting, H. Joachim, Ucke, Christian: Warum sprudelt der Sekt. Physik in unserer Zeit 24/5, 231, (1993)
- [3] Schlichting, H. Joachim, Rodewald, Bernd: Papierhubschrauber. Praxis der Naturwissenschaften- Physik 35/5, 30 (1986)