

# Selbstorganisation, Strukturbildung und Wahrnehmung – Versuche mit dem singenden Rohr

Manfred Euler

*„Die schöpferisch träumende Natur träumte hier und dort dasselbe, und durfte von Nachahmung die Rede sein, so gewiß nur von wechselseitiger.“*

Thomas Mann, Dr. Faustus

**W**as hat ein Rohr, das man aufheizt und das plötzlich Töne aussendet, mit Lebensvorgängen zu tun? Tatsächlich lässt dieses einfache Experiment bereits tiefere Einsichten in grundlegende Prinzipien der Selbstorganisation zu, die auch für weitaus komplexere biologische Systeme relevant sind. Insbesondere zeigt es, wie eine notwendige Bedingung für Lebensprozesse, nämlich dem thermischen Gleichgewicht und dem Tod zu entgehen, mit einer anderen grundlegenden Lebensfunktion, der Fähigkeit die Umwelt wahrzunehmen und auf sie einzuwirken, untrennbar verknüpft ist.

## Brücke zwischen Physik und Biologie

Unter Selbstorganisation versteht man die Fähigkeit von Systemen, ihre innere Ordnung ohne äußere Steuerung selbsttätig zu entwickeln und aufrechtzuerhalten. Die damit einhergehende Fähigkeit zu komplexem, adaptivem Verhalten stellt ein zentrales Merkmal lebender Systeme dar. Andererseits finden sich Prozesse der Selbstorganisation in der unbelebten Natur in weit auseinander liegenden Erfahrungsbereichen. Man kann daher in der Selbstorganisation ein wichtiges Brückenkonzept sehen, das Phänomene der unbelebten und der belebten Natur verbindet

und das möglicherweise eine Schlüsselrolle für das Verständnis von Leben und Bewusstsein spielt.

In diesem Zusammenhang bemerkt Winnacker unter dem Stichwort „Herausforderung und Mängel unseres Forschungssystems“ [13]: „Die Physik ist durch die Biologie herausgefordert, Systeme hoher Komplexität fernab des thermischen Gleichgewichts, wie das Gehirn, theoretisch zu beschreiben. Neben den Gesetzen der Thermodynamik, die zur Beschreibung solcher Systeme alleine nicht ausreichen, bedarf es hier der Analyse von Prozessen der Selbstorganisation, deren bislang nicht verstandene Regeln in den Bausteinen der Systeme selbst verschlüsselt sind“. Auf welche physikalischen Konzepte und deren tiefergehendes Verständnis muss man stärker fokussieren, wenn man diese Herausforderung annimmt und eine zukunftsorientierte Erschließung und Vermittlung dieser Brücke zwischen Physik und Biologie ins Auge fasst?

Im vorliegenden Artikel soll das elementare Komplex, das heißt die Betrachtung einfacher physikalischer Systeme mit komplexem Verhalten, dazu genutzt werden, eine Brücke zum wirklich Komplexen zu schlagen, zu biologischen Systemen und ihren Eigenschaften. Zur Veranschaulichung dient ein leicht nachvollziehbares Experiment mit überraschenden Eigenschaften, das Phänomene der Thermodynamik fern vom Gleichgewicht und der nichtlinearen Dynamik hörbar und meßbar macht und das (hoffentlich!) Einsichten fördern kann, die uns die Schulphysik bisher kaum nähergebracht hat. Es zeigt Minimalbedingungen auf, unter denen Prozesse der Selbstorganisation auftreten, und gibt darüber hinaus erste Einblicke in deren kreative Kraft und Anpassungsfähigkeit, die für biologische Systeme von zentraler Bedeutung sind.

## Was ist aus physikalischer Sicht Leben?

„Was ist Leben?“ ist der Titel eines populären Buches, in dem Schrödinger aus der Sicht eines theoretischen Physikers zentrale Probleme der Biologie seiner Zeit diskutiert [12]. Dieses auch heute noch lesenswerte kleine Werk hat einen enormen Einfluss auf die Entwicklung der Molekularbiologie ausgeübt. Ausgehend von dem Prinzip „Ordnung aus Ordnung“ zeigt Schrödinger, dass die Erbinformation auf molekularer Ebene in einer Art

So blüht man Klar, wie felten nur,  
Ins innre Walten der Natur. —



Abb. 1. Das innere Walten der Natur nach Wilhelm Busch mit einer wesentlichen Ergänzung.

„aperiodischem Kristall“ gespeichert sein sollte, eine Vorhersage, die später durch die Strukturaufklärung der DNA bestätigt worden ist. Mit dem *Ordnung aus Unordnung-Prinzip* erklärt er, wie Organismen ihre hoch geordnete Struktur aufrechterhalten, scheinbar im Widerspruch zum zweiten Hauptsatz der Wärmelehre. Nach diesem laufen Prozesse von selbst immer nur in Richtung größerer „Unordnung“ (Entropiezunahme) ab. Wie kann gegenläufig dazu biologische Ordnung und Vielfalt entstehen? Ist Leben (und darüber hinaus Bewusstsein) im Einklang mit physikalischen Gesetzen, oder sind im lebenden Organismus vielleicht sogar neue Gesetze zu erwarten?

Für die lebende Materie ist es von zentraler Bedeutung, dem thermischen Gleichgewicht und damit dem Tod zu entgehen. Man betrachtet Lebewesen als offene Systeme, die auf die Aufnahme von (freier) Energie aus der Umgebung angewiesen sind und die Entropie an die Umgebung exportieren. Ein Energiestrom treibt Stoffwechselprozesse an, die aktiv den Organismus vom tödlichen Gleichgewicht fernhalten. Dabei stellt sich ein neues dynamisches Fließgleichgewicht jenseits des thermischen Gleichgewichts ein. Für ein tieferes Verständnis biologischer Phänomene wird es daher notwendig sein, die physikalische Perspektive auf Prozesse fern vom Gleichgewicht zu richten. Darüber hinaus stellt die Thermodynamik nur eine Zugangsweise dar, die vor allem mit Perspektiven der System- und Informationsdynamik zu verbinden ist, um biologisch relevante Aussagen zu erhalten.

Abbildung 1 zeigt, wie Wilhelm Busch sich das „innere Walten der Natur“ vorstellte, welches dem jungen Maler Klecksel erlaubt, zu wachsen und zu gedeihen. Allerdings ist im Original nur die halbe Wahrheit gezeichnet – dort fehlt der wesentliche Aspekt der Offenheit. Die Komponente, die diesem Umstand Rechnung trägt, ist vom Autor nachträglich hinzugefügt worden, was Busch verzeihen möge. Die Konzepte „Offenheit“ und „Fließgleichgewicht“ werden mit dieser Ergänzung augenfällig, und es gibt eine unmittelbare Entsprechung dieses Bildes zur thermodynamischen Sichtweise, die in Abbildung 2 gezeigt ist.

Energie durchströmt das System. Beim Eintritt in den Organismus ist der Energieträger, die Nahrung, in einem Zustand höherer Ordnung als beim Verlassen desselben. Die Ener-

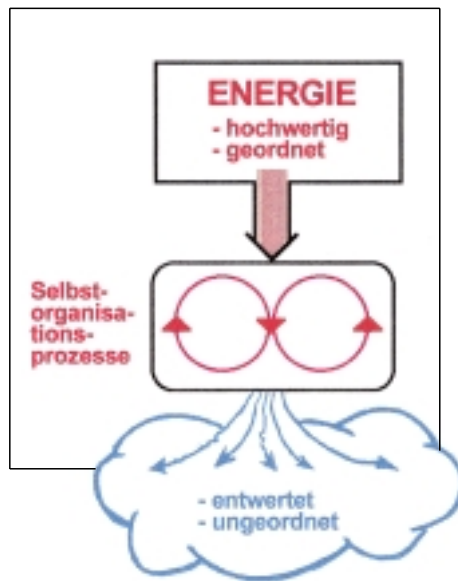


Abb. 2. Fließgleichgewicht und Energieentwertung bei Prozessen der Selbstorganisation in offenen Systemen.

gie wird durch irreversible Prozesse im Lebewesen entwertet, zerstreut, dissipiert. Dadurch wird mehr Entropie an die Umgebung abgegeben als aufgenommen worden ist. Durch die Offenheit des Systems und durch den Export von Unordnung an die Umgebung wird der zweite Hauptsatz insgesamt nicht verletzt, obwohl sich in dem Teilsystem „Organismus“ Strukturen bilden und die Ordnung zunimmt [9, 10].

Soviel zur allgemeinen thermodynamischen Sicht von Bedingungen, unter denen Selbstorganisation möglich ist. Lassen sich diese Prinzipien an einem konkreten Modell noch besser begreifbar machen und veranschaulichen? Kann man ähnlich allgemein gültige Aussagen auch für die dynamischen Prozesse treffen, die der Selbststrukturierung zugrunde liegen und den Organismus am Leben halten?

### Ein Experiment zur Selbstorganisation

Nichtlinearitäten sind für die Aufrechterhaltung eines dynamischen Fließgleichgewichts fern vom tödlichen thermischen Gleichgewicht wesentlich. Um ihre zentrale Rolle besser zu verstehen, wird als „Ersatz“ für den Maler Klecksel ein einfaches physikalisches Modellsystem betrachtet, das man in das thermische Ungleichgewicht treibt. Man nehme ein Glas- oder Metallrohr (Länge etwa

60 cm, Durchmesser etwa 5 cm; beide Abmessungen sind unkritisch), führe ein Metallgitter (zum Beispiel ein Fliegengitter oder ähnliches) etwa 10–15 cm von unten in das Rohr ein und heize es mit einem Bunsenbrenner bis zur Rotglut auf. Sobald man den Brenner wegnimmt, beginnt das Rohr kräftig und laut zu tönen. Dieses singende Rohr heißt nach seinem Entdecker Rijke-Rohr [11]. Die meisten Menschen, die das Experiment zum ersten Mal sehen, erleben den recht laut und lang erklingenden Ton als eine große Überraschung, denn man erwartet keinerlei akustische Aktion.

Dem Rohr wird gewissermaßen „akustisches Leben“ eingehaucht, indem ein Energiestrom selbsterregte Schwingungen antreibt. Während die einmal angeregten Schwingungen des Rohres ohne weitere Energiezufuhr „aussterben“ würden, indem sie in das thermische Gleichgewicht übergehen, ist sein „Singen“ das Ergebnis eines Rückkopplungsvorgangs, der durch das thermische Ungleichgewicht an dem zur Rotglut erhitzten Gitter angetrieben wird.

Diese anthropomorphe Sprechweise vom Leben und Tod akustischer Strukturen drückt mehr aus als nur eine sprachliche Oberflächenanalogie. Im thermodynamischen Bild zeigen sich die tieferen strukturellen Zusammenhänge zu Phänomenen des Lebens und zur biologischen Strukturbildung. Das Modell der thermisch angeregten akustischen Schwingung des Rijke-Rohres (Abbildung 3) ist von der gleichen Gestalt wie die thermodynamische Sicht von Lebensprozessen (Abbildung 2). In beiden Fällen handelt es sich um offene Systeme, die von Energieströmen aus dem thermischen Gleichgewicht getrieben werden und die ihre Struktur beziehungsweise ihr geordnetes Verhalten via Selbstorganisation über interne Rückkopplungsprozesse aufrechterhalten.

Das heiße Gitter treibt einen Luftstrom an. Damit gibt es Wärme über Wärmeströmung (Konvektion) an die Umgebung ab, und die Unordnung erhöht sich insgesamt, ganz im Einklang mit dem oben erwähnten 2. Hauptsatz der Wärmelehre. Ein Teil der Energie kann aber in interne Rückkopplungsprozesse eingespeist werden und so zu einer Selbststrukturierung beitragen. Im singenden Rohr geschieht dies dadurch, dass die Gesamtheit der Luftmoleküle zu geordneten, kohärenten Bewegungen, zu Schwingungen, angetrieben wird. Diese überlagern sich der ungeordneten

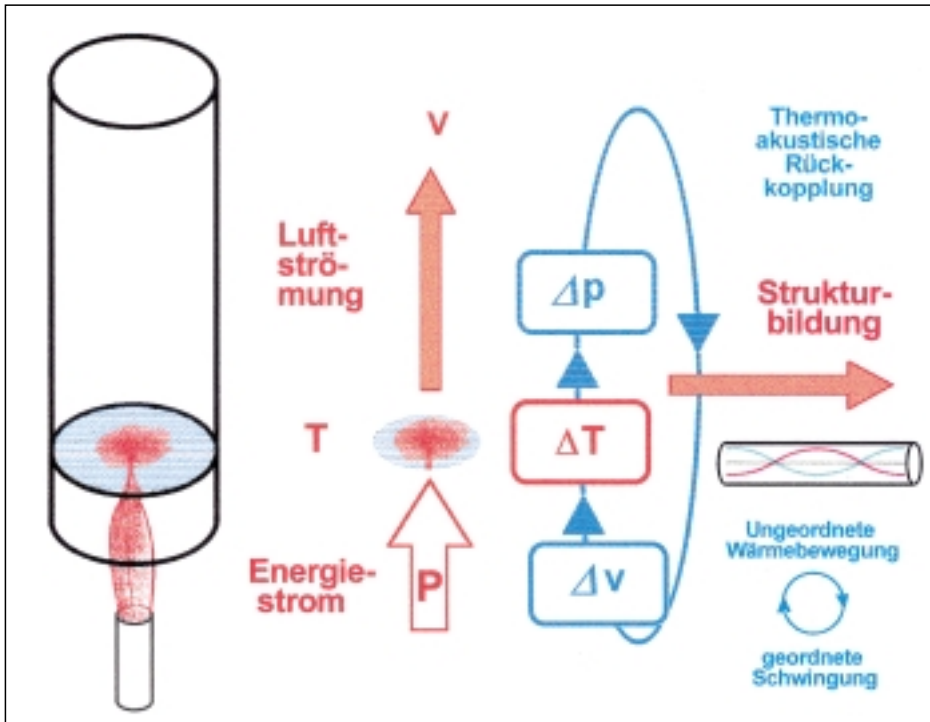


Abb. 3. Das singende Rohr (Rijke-Röhre). Durch thermo-akustische Rückkopplung wird Energie vom heißen Gitter auf Schwingungen der Luftsäule im Rohr übertragen. Die Schwingung erhält sich selbsttätig aufrecht, wenn Wärmezufuhr und Druck ( $p$ ) in Phase sind.  $v$  – Geschwindigkeit;  $T$  – Temperatur.

Wärmebewegung der Luftteilchen sowie der Aufwärtsbewegung durch die Wärmeströmung.

### Nichtlineare Rückkopplungen sind nötig

Wie das singende Rohr zeigt, bedarf es nur des geeigneten Zusammenspiels weniger Komponenten, um Prozesse der Selbstorganisation in Gang zu setzen. Neben der Offenheit sind Rückkopplungsprozesse und Nichtlinearitäten nötig. Die Rückkopplung kommt folgendermaßen zustande (Abbildung 3): Die Luft strömt bei starker Erhitzung nicht gleichförmig am erhitzten Gitter vorbei; es kann zu Verwirbelungen kommen, wodurch sie länger in Gitternähe bleibt und sich stärker aufheizt. Die Temperaturzunahme  $\Delta T$  führt zu einer Ausdehnung und zu einem Druckanstieg. Der Druckpuls ( $\Delta p$ ) breitet sich als Schallwelle aus und kann nach Reflexion an den Rohrenden so zu einer Schnelleänderung  $\Delta v$  der Luftteilchen führen, dass diese wiederum länger in Gitternähe bleiben, sich stärker aufheizen und den Druckpuls verstärken. Geschieht diese Rückkopplung zwischen Druck und Schnelle im

richtigen Takt und mit der richtigen Phase, so kommt es zu einer selbsterregten Schwingung. Es bildet sich eine stehende Schallwelle aus; das Rohr tönt.

Durch die positive Rückkopplung würde die Schwingung theoretisch unbegrenzt anwachsen. In der Praxis kommt es dagegen immer zu einer Begrenzung des Wachstums durch nichtlineare Effekte. Im einfachsten Fall besorgt dies eine Nichtlinearität vom Sättigungstyp. Mit zunehmender Amplitude der Schwingung wird dem Gitter mehr Wärme entzogen, die nachgeliefert werden muss. Die Geschwindigkeit des Wärmetransports beschränkt die Stärke des Energiestroms vom heißen Gitter an die Luft. Damit kommt es mit zunehmender Amplitude zu einem Engpass im Energienachschub. Der geordnete Zustand wächst immer langsamer an.

Abbildung 4 zeigt den Einschwingvorgang des Rohres. Die Amplitude des Schallsignals wächst s-förmig in Abhängigkeit von der Zeit an. Nach einem anfänglichen exponentiellen Anstieg verlangsamt sich die Zunahme, und die Amplitude strebt einem stationären Wert zu. Zunächst ist die Änderungsrate der Am-

plitude der jeweiligen Amplitude proportional. Es handelt sich um eine lineare positive Rückkopplung, die zum exponentiellen Wachstum führt (linearer Anstieg in der logarithmischen Darstellung). Abweichungen von der Linearität führen mit zunehmender Amplitude zu einem geringeren Wachstum und zum Abflachen der Kurve. Im stationären Zustand ändert sich schließlich die erreichte Amplitude nicht mehr. Es stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht ein. Im zeitlichen Mittel wird ebenso viel Energie in die Schwingung gepumpt, wie diese an die Umgebung abgibt. Am Verlauf der Wachstumskurve erkennt man also, dass lineare und nichtlineare Prozesse zusammenwirken und dass Nichtlinearitäten für das Einstellen eines dynamischen Fließgleichgewichtes wesentlich sind.

Der geordnete Schwingungszustand des tönenden Rohres wächst in einer Weise an, wie das viele biologische Systeme auch tun. Der in Abbildung 4 gezeigte Amplitudenverlauf ist typisch für Wachstumsprozesse bei begrenzten Ressourcen und wird als logistisches Wachstum bezeichnet. Die Differentialgleichung, die diesen Vorgang wie auch viele andere Prozesse von biologischem oder wirtschaftlichem Wachstum beschreibt, heißt Verhulst-Gleichung [8].

### Vom Einfachen zum Komplexen

Der konkrete Einschwingvorgang soll nun als allgemeines Modell für Zustandsänderungen in offenen Systemen dienen. Man verwendet dazu ein mechanisches Modell und diskutiert die dynamischen Prozesse in Analogie zu Bewegungsvorgängen von Körpern in geeignet geformten „Energiegebirgen“ wie etwa bei einer Berg- und Talbahn (Kasten 1 und Abbildung 5).

Derartige Energielandschaften geben eine Übersicht über die Entwicklung der Verhaltensmöglichkeiten, wenn man weitere Parameter des Systems verändert. Insbesondere lässt sich der Übergang vom thermischen Gleichgewicht zum dynamischen Fließgleichgewicht veranschaulichen. Abbildung 6 (links) zeigt, wie sich die Zustandslandschaft der Amplitude eines selbsterregten Oszillators entwickelt, wenn man die Stärke des zugeführten Energiestroms (Heizleistung  $P$  am Gitter) erhöht. Das zugrunde liegende mathematische Modell ist der Van der Pol-Oszillator [2]. Ursprünglich konzipiert für elektromagnetische Schwingungen in der Radio-



technik gibt dieses Modell auch wesentliche Aspekte im Verhalten des Rijke-Rohres wieder.

Bei geringer Leistung des Antriebs befindet sich das Energieminimum im Nullpunkt. Stößt man das System aus dieser stabilen Gleichgewichtslage, so kehrt es immer wieder dorthin zurück. Dies entspricht Prozessen, die im oder in der Nähe des thermischen Gleichgewichts stattfinden: Jede Schwingung ist gedämpft. Ihre Amplitude klingt infolge von Energieabgabe an die Umgebung ab.

Übersteigt die zugeführte Leistung  $P$  einen kritischen Wert, dann ändert sich das Verhalten dramatisch. Der zunächst stabile Nullpunkt entwickelt sich zu einem instabilen Berggrat, und es zweigen zwei Täler ab. Abhängig von dem äußeren Parameter  $P$  entfaltet sich ein neuer stabiler Zustand bei einer endlichen Amplitude. Dieser entspricht dem Fließgleichgewicht im offenen, energiedurchströmten System. Trägt man die Amplitude in Abhängigkeit von der Stärke des zugeführten Energiestroms auf, so erkennt man, dass die Schwingungen erst jenseits einer Schwelle  $P_{\text{krit}}$  einsetzen (Abbildung 6, rechts).

Das Überschreiten des kritischen Punktes macht sich folgendermaßen bemerkbar: Beim Annähern an  $P_{\text{krit}}$  reagiert das System zunehmend empfindlicher auf äußere Einflüsse. Schwankungen werden immer weniger gedämpft. Stärke und Lebensdauer dieser Fluktuationen nehmen zu, bis schließlich jenseits von  $P_{\text{krit}}$  die Luftmoleküle im gesamten System an einer kohärenten Bewegung teilnehmen, deren Lebensdauer theoretisch unendlich groß ist.

Diese Betrachtungsweise von Selbstorganisationsvorgängen wurde in der Synergetik am Laser vorangetrieben und ihre Anwendung unter anderem auch für biologische Prozesse in einer Reihe von Arbeiten vorgestellt [6].

Für ein tieferes Verständnis des Lasers benötigt man allerdings grundlegende Kenntnisse der leider aus prinzipiellen Gründen unanschaulichen Quantenphysik. Es ist daher bemerkenswert, dass man die abstrakten mathematischen Prinzipien der Selbstorganisation in ihren konkreten und zum Teil überraschenden Auswirkungen an einem ganz einfach herzustellenden und vollständig klassisch begreifbaren Modellsystem aus der Alltagswelt wie dem Rijke-Rohr demonstrieren und untersuchen kann.

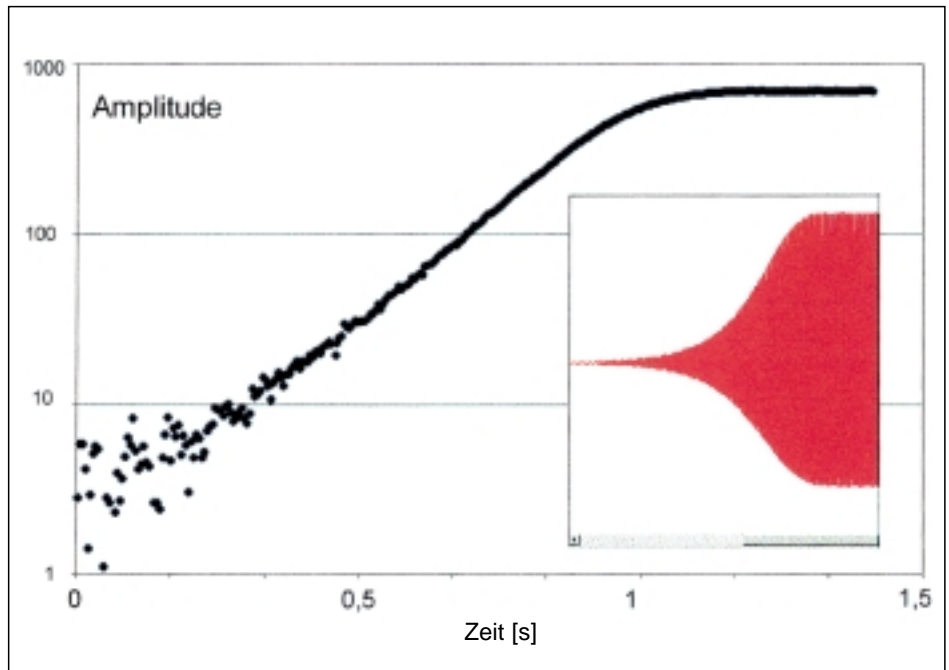


Abb. 4. Anwachsen der Amplitude beim singenden Rohr in logarithmischer Darstellung. Der Einschub zeigt den Schwingungsverlauf in linearer Skala bei geringer zeitlicher Auflösung.

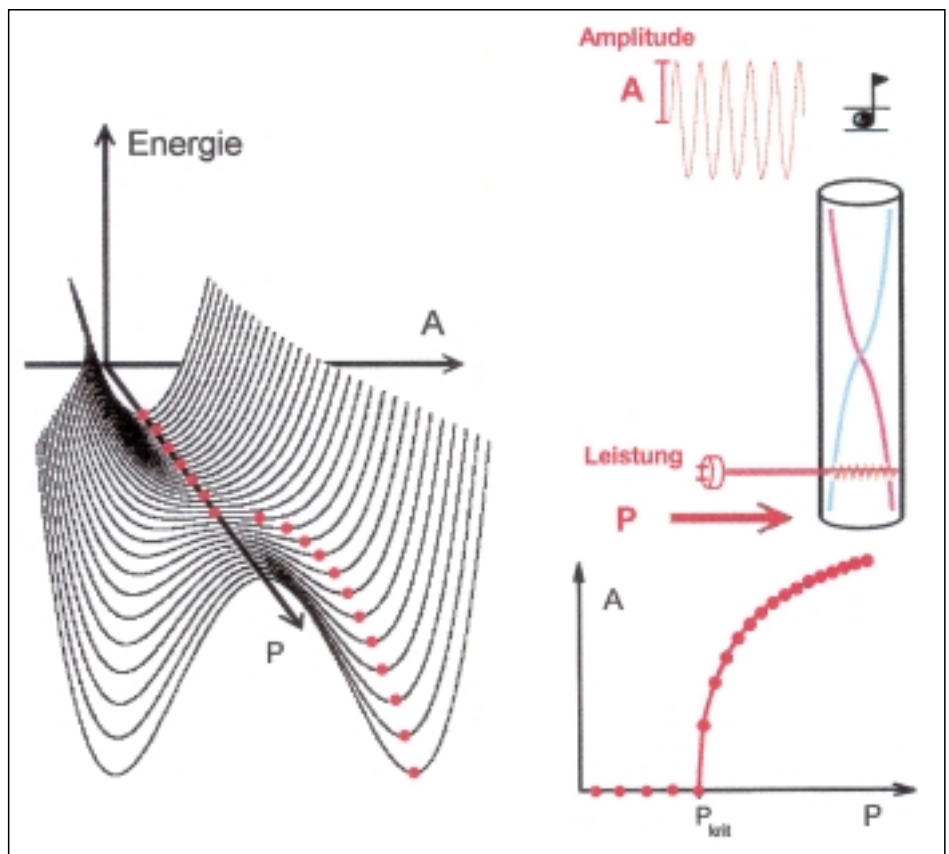


Abb. 6. Energiediagramm und Amplitude eines selbsterregten Oszillators (Van der Pol-Oszillator) in Abhängigkeit vom zugeführten Energiestrom.  $P$  – Leistung.

## Von der Selbstorganisation zur Wahrnehmung

Modelle sind dann tragfähig, wenn sie Vorhersagen liefern, die über den ursprünglichen Rahmen hinausweisen, für den sie konzipiert wurden. Das erweckt den Eindruck, als könnten manche Modelle mehr hergeben als das, was bei der Modellbildung hineinge-

steckt wurde. Eine solche Überschussbedeutung entwickelt auch die Rijke-Röhre. Mit der Fähigkeit, einen geordneten internen Zustand, eine kohärente Bewegung (Schwingung) bei einer riesigen Zahl von Luftmolekülen anzufachen und aufrechtzuerhalten, gehen weitere Prozesse einher, die biologisch als Wahrnehmungsvorgänge interpretierbar sind. Abhängig von dem, was in der Umwelt

geschieht und sich über Schallschwingungen bemerkbar macht, ändert das System seinen inneren dynamischen Zustand und entfaltet neue Verhaltensweisen. Auch dabei spielen Nichtlinearitäten eine wesentliche konstruktive Rolle.

Man betrachtet dazu die Wechselwirkung von zwei Röhren, deren Länge sich geringfügig unterscheidet. Bei großem Abstand und entsprechender geringer Kopplung agieren beide als unabhängige Systeme. Ihre Schallsignale überlagern sich annähernd ungestört. Infolge des geringen Frequenzunterschieds beider Röhren hört man einen in seiner Lautstärke auf- und abschwelenden Ton, eine Schwebung, wie man sie auch bei zwei leicht verstimmten Musikinstrumenten hört, die nahezu den gleichen Ton spielen. Nähert man dagegen die Rohrenden einander an und bringt die Röhren so in eine stärkere Wechselwirkung, dann verschwindet plötzlich die Schwebung. Beide Systeme erklingen im Unisono, im perfekten Gleichtakt. Sie verhalten sich wie eine Einheit, ihre Schwingungen sind kohärent. Die stärkere Röhre gibt den Takt vor, die schwächere nimmt ihn wahr und schwingt darauf ein.

Derartige Kopplungsexperimente sind erheblich leichter durchzuführen, wenn man nur ein einzelnes Rijke-Rohr benutzt, das man durch die Schallsignale eines Lautsprechers von außen antreibt. Um stabile Messergebnisse zu erhalten, muss die Röhre einen Dauerton erzeugen, indem man sie kontinuierlich, beispielsweise durch den Einbau der Heizwicklung eines Föns, elektrisch heizt. Abbildung 7 zeigt die Frequenzen, die als Ergebnis der Kopplung zwischen dem externen Antrieb durch den Lautsprecher (Frequenz  $f_a$ ) und der internen Röhrenschwingung ( $f_i$ ) entstehen. Dargestellt sind farblich codierte Frequenzspektren für aufeinanderfolgende Zeitpunkte. Im Experiment nimmt die Frequenz des Lautsprechers linear mit der Zeit zu. Man erkennt die konstante Frequenz  $f_i$  der Röhre und die aufwärts gleitende Frequenz  $f_a$  des Lautsprechers. Infolge von Nichtlinearitäten werden neben den Grundschwingungen auch Oberschwingungen erzeugt (zum Beispiel  $2f_a$ ,  $3f_a$ ,  $2f_i$ ).

Liegen die Frequenzen des Lautsprechers und der Röhre hinreichend weit auseinander, so koexistieren beide Signale (zwei Linien bei  $f_a$  und  $f_i$ ). Allerdings schwingt die Röhre nicht völlig unbeeinflusst vom Lautsprecher. Sie „spürt“ die Anwesenheit eines anderen

### Kasten 1:

## Selbstorganisation in offenen Systemen – ein mechanisches Bild

Das Anwachsen des geordneten Zustands (Schwingungen der Rijke-Röhre) durch Prozesse der Selbstorganisation wird auf ein einfacheres mechanisches Modell abgebildet, das der Anschauung leichter zugänglich ist als das Verhalten des offenen Systems fern vom Gleichgewicht. Man vergleicht dazu die Zunahme der Schwingungsamplitude mit der Bewegung eines Teilchens in einer Gebirgslandschaft. Die jeweilige Höhe ist ein Maß für die Lageenergie. Die Schwerkraft treibt den Körper den Hang hinab. Diese beschleunigte Bewegung soll gebremst werden durch eine zusätzliche starke Reibungskraft, die der Geschwindigkeit proportional ist (wie die Bewegung in Öl oder Sirup). Der Körper gleitet den Hang hinab und erreicht schließlich den tiefsten Punkt, das Energieminimum, wo er zur Ruhe kommt. Wegen der starken zur Geschwindigkeit proportionalen Reibung hängt die jeweils erreichte Geschwindigkeit nur von der Neigung des Hanges ab.

Das Energiediagramm in Abbildung 5 ist wie ein W geformt, gerade so, dass die Bewegung der Kugel das Wachstum der Amplitude beim Einsetzen der Schwingung wiedergibt. Zunächst tönt das erhitzte Rohr noch nicht. Die Amplitude ist Null. Dies entspricht der auf der Bergkuppe in der Mitte liegenden Kugel. Diese Lage ist jedoch nicht stabil. Winzige Schwankungen lenken die Kugel aus ihrem instabilen Gleichgewicht aus. Die Kraft, welche die Kugel den Hang hinab treibt, wächst zunächst proportional zur Auslenkung an, was zum exponentiellen Anwachsen des Weges in Abhängigkeit von der Zeit führt. Mit zunehmender Auslenkung kommen Nichtlinearitäten zum Zug und verringern

die treibende Kraft, ausgedrückt durch das Abflachen des Hanges. Schließlich kommt die Kugel im Tal zur Ruhe. Diese neue Lage entspricht dem stationären Wert der Amplitude, auf den die Röhre einschwingt.

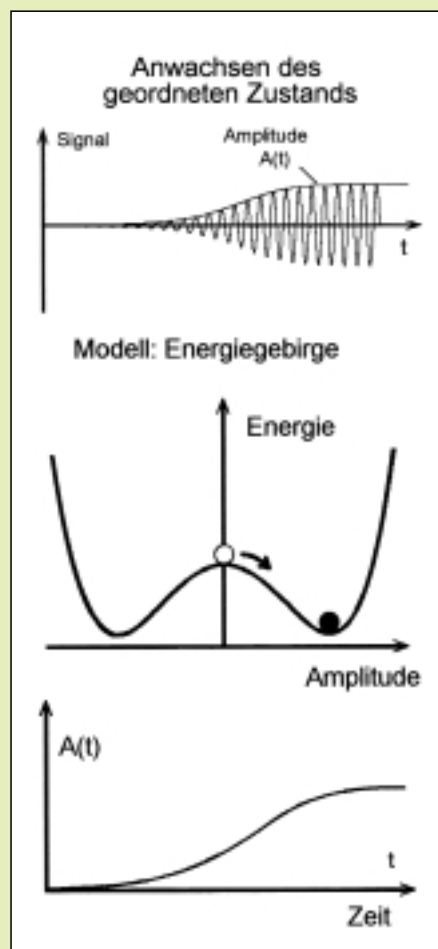


Abb. 5. Wachstum der Amplitude (A) als stark gedämpfter Bewegungsvorgang in einem W-förmigen Energiegebirge.

Signals, indem sie aus  $f_a$  und  $f_i$  neue Signale erzeugt, die „Kombinationstöne“ (wie  $2f_i - f_a$ ,  $2f_a - f_i$ ,  $f_a + f_i$ ). Nähern sich  $f_a$  und  $f_i$  weiter an, bis sie ungefähr übereinstimmen, dann verschwindet plötzlich die Differenz zwischen außen und innen. Die Röhre hat das äußere Signal gewissermaßen verinnerlicht. Anders als eine in Resonanz mitschwingende Klaviersaite ist sie allerdings nicht passiv darauf eingeschwungen, sondern sie bildet die Schwingung aktiv nach. Dies kann sie innerhalb eines Frequenzbereichs, dessen Breite unter anderem von der Stärke des antreibenden Signals abhängt.

Auch diese Veränderungen des inneren dynamischen Zustands in Abhängigkeit von äußeren Signalen lassen sich wiederum als Übergänge in einer Zustandslandschaft beschreiben, die je nach Parameter (zum Beispiel Frequenz, Kopplungsstärke) zu verschiedenartigem Verhalten führt. In diesem Fall wird allerdings nicht die Amplitude, sondern die Phase der inneren Schwingung relativ zum äußeren Antrieb betrachtet (Kasten 2). Phasenänderungen entsprechen der Bewegung eines Teilchens auf einem geeigneten Waschbrett oder einer Buckelpiste.

## Absage an das thermische Gleichgewicht

Das tönende Rohr ist ein bemerkenswert einfach zu realisierendes Beispiel für ein offenes System, das Eigenschaften zeigt, die auch für lebende Systeme charakteristisch sind. Durch „Metabolismus“ (Stoff- und Energieaustausch mit der Umgebung) wird es aus dem thermischen Gleichgewicht getrieben. Dabei geht es in einen geordneten Schwingungszustand über, der sensibel auf Signale der Umwelt reagiert, sie verstärkt, nachbildet, aber auch verändert. Die nichtlineare Dynamik der angetriebenen Rijke-Röhre kann vereinfacht durch das zeitliche Verhalten von Amplitude und Phase beschrieben werden. Die Änderung dieser beiden Größen bei einer Änderung von Kontrollparametern der Außenwelt (beispielsweise Energiestrom, Amplitude oder Frequenz der äußeren Signale) lässt sich anschaulich als Bewegungsvorgang in Energiediagrammen beschreiben. Die zugrunde liegenden Bewegungsgleichungen lassen sich biologisch interpretieren und spielen bei Wachstumsvorgängen und bei Prozessen der Signalverarbeitung und der Wahrnehmung eine Rolle.

Das singende Rohr zeigt, wie die Verschwörung des thermischen Gleichgewichts

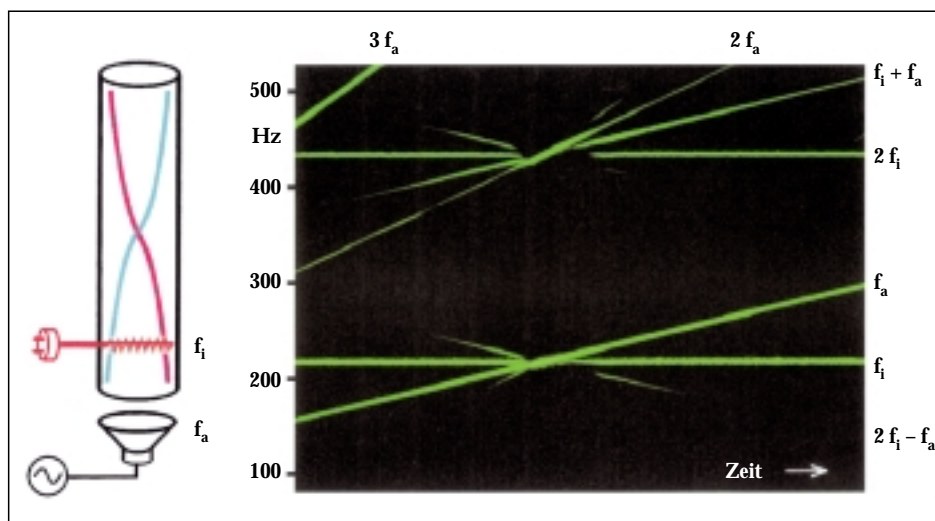


Abb. 7. Frequenzspektren einer Rijke-Röhre im Dauerbetrieb, die von einem Lautsprecher angetrieben wird, dessen Frequenz  $f_a$  linear in der Zeit ansteigt.  $f_i$  – interne Röhrenschwingung.

außer Kraft gesetzt werden kann. Diese lebens- und ordnungsfeindliche Verschwörung ist durch das Zusammenspiel zweier gegenläufiger Tendenzen gekennzeichnet:

- Stillstand durch irreversible Prozesse (Energieabgabe durch Reibung, Dissipation)
- Zerfall von Strukturen durch ungeordnete Wärmebewegung (Antrieb durch Rauschen, Fluktuation).

Theoretisch drückt sich das thermische Gleichgewicht in abgeschlossenen Systemen in der Gleichheit von Fluktuation und Dissipation aus. In offenen Systemen kann diese Verstrickung von Gleichgewicht und Wärmetheorie, von Dissipation und Fluktuation, fast wie in einem Wunder aufgehoben, umgedreht und konstruktiv gewendet werden.

Mit Blick auf biologische Systeme kann man feststellen, dass darüber hinaus diejenigen dynamischen Prozesse weiterführende Funktionen entwickeln, die eine Differenz zwischen innen und außen aufrechterhalten und den Organismus vom tödlichen Gleichgewicht fernhalten. Was auf der Ebene von Materie und Energie an raum-zeitlichen Ordnungsstrukturen entsteht, entfaltet auf der Ebene von Information neue Bedeutung. Die Prozesse, welche die Dämpfung außer Kraft setzen und in scheinbarem Gegensatz zur Irreversibilität eine andauernde geordnete Bewegung ermöglichen, erlauben es zugleich, Vorgänge und Ereignisse der Außenwelt in-

tern nachzubilden. Indem so das Außen im Inneren repräsentiert werden kann, schaffen sie die Voraussetzung für Wahrnehmungsprozesse und interne Modellbildung.

## Biologische Beispiele

Die biologische Evolution hat insofern erfolgreich Physik gelernt, als sie diese Prinzipien auf ganz unterschiedlichen Ebenen nutzt. Betrachtet man etwa biologische Rezeptororgane wie das Ohr, so zeigt sich, dass sein Leistungsvermögen ganz wesentlich darauf beruht, die Nachteile des thermischen Gleichgewichts zu umgehen. Das Innenrohr von Säugetieren ist kein passives, sondern ein autonomes, offenes, energiedurchströmtes System, das wie die Rijke-Röhre selbsttätig schwingt. Es verstärkt Schallsignale mechanisch. Dabei spielen Nichtlinearitäten eine wesentliche Rolle (beispielsweise Phasenkopplungs-/Einrasteffekt). Durch die Entdämpfung erzielt es eine hohe Trennschärfe für benachbarte Frequenzen. Zusätzlich unterdrückt es dadurch Rauschen und vergrößert seine Empfindlichkeit. Der Preis dafür liegt in seiner nichtlinearen Arbeitsweise: Man kann beim Gehör einige jener Kombinationsprodukte per Selbstbetrachtung an sich selbst wahrnehmen, die auch von der angetriebenen Rijke-Röhre erzeugt werden [4].

Das, was das singende Rohr tut, wenn es mit akustischen Signalen der Außenwelt wechselwirkt, zeigt bereits wesentliche Grundzüge einer Informationsdynamik, die auf ganz un-



terschiedlichen biologischen Ebenen bedeutsam ist und die es erlaubt, externe dynamische Prozesse nicht nur zu verstärken, sondern auch intern nachzubilden und zu verar-

beiten. Das äußere Signal verändert (moduliert) das innere Signal. Phasenkopplungseffekte spielen immer dann eine wichtige Rolle, wenn die zeitliche Struktur von Signalen re-

präsentiert wird (wie beim Periodizitätsprinzip im Gehör) und wenn es auf den genauen Zeitpunkt der Nervensignale ankommt (wie beim Richtungshören). Das „Schieben“ der Phase und damit die Verschiebung des Zeitpunkts dynamischer Abläufe liefert ein Modell dafür, wie Ereignisse in der Zeit und sogar die Zeit selbst intern repräsentiert werden. Die interne Zeit wird verschiebbar und plastisch. Sie kann in gewissen Grenzen angepasst und „zurechtgerückt“ werden. Diese Prozesse spielen bei der Empfindung von Zeitlichkeit über einen weiten Bereich von Zeitskalen, beginnend vom Sub-Millisekundenbereich, eine wichtige Rolle [3].

In einer allgemeinen Sichtweise geht es bei der biologischen Informationsverarbeitung immer darum, dass ein offenes, aktives Substrat seine internen raum-zeitlichen Muster als Ergebnis äußerer und innerer Signale ändert. Mentale Prozesse entsprechen raum-zeitlichen Aktivitätsmustern im Gehirn, resultierend aus der mehr oder minder kohärenten Aktivität einer riesigen Zahl von Neuronen, die sich in charakteristischer Weise abhängig von äußeren sensorischen Einflüssen oder inneren Tätigkeiten (Gedanken, Intentionen, Emotionen) ändern. Die Anpassungsfähigkeit in der Zeit, wie sie von den Phasenmodulations- und Kopplungseffekten des singenden Rohres modelliert wird, ist dafür eine Voraussetzung. Sie findet sich auf der untersten zellulären Stufe auf der Ebene von Membranschaltern, deren Schaltzeitpunkte durch Signale gesteuert werden. Auf der Ebene des Nervensystems basiert beispielsweise die Codierung und Übertragung von Informationen durch neuronale Signale ganz wesentlich darauf, dass der Rhythmus neuronaler Aktionspotentiale in Abhängigkeit von äußeren Signalen („Antrieb“) moduliert wird. Auf der Ebene des Gehirns spielt die Synchronisierung von Nervensignalen und die kohärente Aktivität neuronaler Ensembles eine wichtige Rolle beispielsweise bei der Gruppierung zusammengehöriger Information (Bindungsproblem).

### Neue Physik im lebenden Organismus?

In dem eingangs erwähnten Buch bemerkt Schrödinger: „... nach allem, was wir von der Struktur der lebenden Materie gehört haben, müssen wir darauf gefaßt sein, daß sie auf eine Weise wirkt, die sich nicht auf die gewöhnlichen physikalischen Gesetze zurückführen läßt.“ Er begründet diese Überzeu-

#### Kasten 2:

## Informationsdynamik als „Phasenschiebung“

Man betrachtet den jeweiligen Schwingungszustand (Phase) eines Oszillators bezogen auf ein periodisches externes Signal. Bei der linearen Überlagerung (Addition) beider Schwingungen wird die Phase nicht beeinflusst. Jede Schwingung folgt „unbeirrt“ ihrem eigenen Rhythmus. Im Bild der Zustandslandschaft wird dies durch einen Abhang konstanter Neigung dargestellt (Abbildung 8a). Die resultierende konstante Driftgeschwindigkeit des Körpers entspricht dem konstanten Frequenzunterschied beider Schwinger, der zu einer festen Schwebungsfrequenz führt.

Infolge der Nichtlinearität ist die Schwingung der Rijke-Röhre jedoch anpassungsfähig und modulierbar. Sie schwingt schneller oder langsamer, je nachdem, ob das externe Signal „zieht“ oder „hemmt“. Diese nichtlineare Wechselwirkung zwischen dem äußeren und dem inneren Signal verformt die Zustandslandschaft: Der glatte Hang wird wie eine Buckelpiste oder ein Waschbrett gewellt, wobei die Amplitude der Welligkeit mit der Stärke des antreibenden Signals zunimmt. Die mittlere Neigung des Hangs hängt dagegen nur von dem Frequenzunterschied der beiden Schwinger ab [7]. Bei geringer Stärke des äußeren Signals ist der Hang nur schwach wellig, und die Kugel gleitet mit nahezu konstanter Geschwindigkeit. Es kommt zur Schwebung mit einer annähernd konstanten Schwebungsfrequenz. Vergrößert man die Antriebsstärke, so wird die Welligkeit größer, bis sie schließlich so groß wird, dass die Kugel in einem Minimum der Buckelpiste liegenbleibt (Abbildung 8b). Die Schwebung verschwindet, und es tritt Phasenkopplung ein. Das äußere Signal synchronisiert die inneren dynamischen Prozesse.

Vergrößert man nun wieder die Frequenzdifferenz  $\Delta f = f_i - f_a$ , so wird das Waschbrett stärker gekippt. Die in einer Mulde gefangene Kugel kann jenseits eines kritischen Neigungswinkels erneut gleiten (Abbildung

8c). Die Phasenkopplung hört auf, und es kommt wieder zu einer Überlagerung beider Signale. Die Synchronisierung kann also nur innerhalb eines Frequenzbereichs bestehen. Sie verschwindet, wenn  $\Delta f$  zu groß wird. Die Welligkeit des Waschbretts hat einen weiteren hör- und messbaren Effekt. Sie bewirkt periodische Phasenänderungen, die einer Frequenzmodulation entsprechen und die sich als Kombinationsfrequenzen bemerkbar machen. In diesem „Buckelpisten-“ oder „Waschbrett-Bild“ lassen sich die komplexen Antriebs- und Kopplungseffekte bei selbsterregten Oszillatoren (vergleiche Abbildung 7) anschaulich deuten.

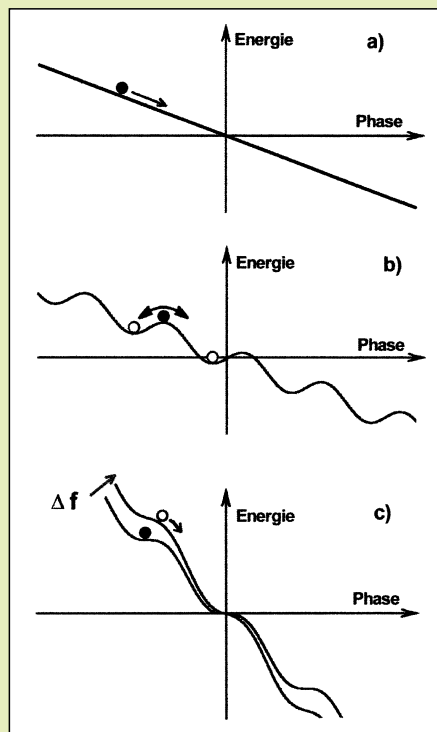


Abb. 8. Phasenkopplungsexperimente im Energiediagramm. (a) lineare Überlagerung – keine Kopplung; (b) Phasenkopplung bei geringer Frequenzverstimung  $\Delta f = f_i - f_a$ ; (c) Ende der Kopplung bei zunehmender Verstimung  $\Delta f$ .

gung nicht damit, dass etwa eine „neue Kraft“ oder ähnliches nötig ist, sondern damit, dass Organismen erheblich komplexer aufgebaut sind als die Systeme, die Physiker gewöhnlich im Labor untersuchen. Lebensvorgänge zeigen eine „... bewundernswerte Regelmäßigkeit und Ordnung, die in der unbelebten Natur nicht ihresgleichen findet.“ Er dachte dabei insbesondere an einen neuen Gesetzestyp für diese organismische Ordnung, welcher der Quantenphysik näher als der klassischen Physik steht. Insofern ist es eine bemerkenswerte Tatsache, wenn bereits sehr einfache Systeme unserer klassischen Alltagswelt kohärentes Verhalten und, je nach „Umwelteinflüssen“, weitere komplexe Verhaltensmuster entwickeln, die man auch im Bereich des Lebendigen findet.

Dies alles zeigt, in welche Richtung man die „gewöhnlichen physikalischen Gesetze“ weiter denken muss. In dieser „neuen Physik“ sind keine neuen Gesetze nötig, wohl aber muss man die gewohnte Perspektive der elementaren Physik, die sich auf lineare Prozesse sowie Gleichgewichtsnähe konzentriert, verlassen. In dem komplementären Zusammenspiel von Linearität und Nichtlinearität, von Offenheit und Geschlossenheit (Rückkopplung) entfalten sich höchst komplexe dynamische Verhaltensweisen, die unsere Intuition herausfordern. Dennoch ist diese Komplexität nicht nur abstrakt-mathematisch, sondern in einer durchaus anschaulichen Bildersprache beschreibbar, einer Sprache, die sogar die Domäne des Materiellen und der geistigen Prozesse überbrückt. Die internen informationstragenden Freiheitsgrade entwickeln sich offenbar nach ganz analogen Mustern abhängig von inneren und äußeren Parametern, wie es bereits in einfachen offenen Systemen der Fall ist (Abbildung 9).

Das singende Rohr entfaltet in Abhängigkeit von der Stärke des zugeführten Energiestromes oder von der Amplitude und der Frequenz externer Signale neue Verhaltensweisen, die sich buchstäblich als Faltungsvorgänge in einer Zustandslandschaft theoretisch beschreiben lassen. Interessanterweise führt die theoretische Analyse dieser Prozesse zu Bildern, die wir in unserer Sprache mehr oder weniger bewusst schon immer benutzt haben [5]. *Complicare* (lateinisch) bedeutet zusammenfallen. Komplex oder kompliziert ist also das, was mehrfach zusammengefallen ist. Einfach und simpel (simplex) ist dagegen das einfach Gefaltete.

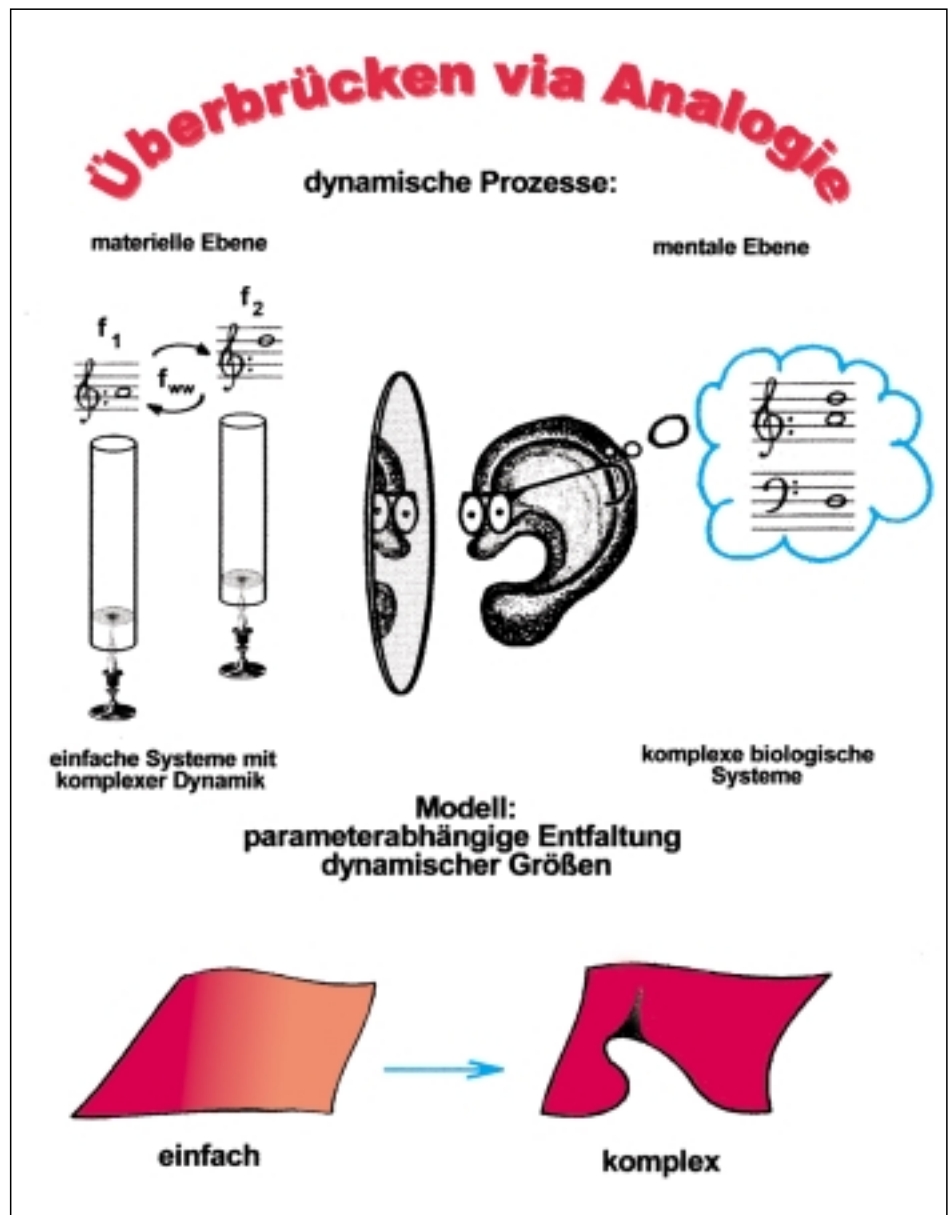


Abb. 9. Einfache Systeme als Modelle komplexer biologischer Prozesse. Analog zur Entstehung neuer Wechselwirkungsprodukte  $f_{ww}$  auf materieller Ebene bei der Kopplung zweier Rijke-Röhren werden auf mentaler Ebene bei der Überlagerung zweier Töne neue Kombinationstöne wahrnehmbar. Das mathematische Modell der parameterabhängigen Entwicklung komplexer Systemzustände überbrückt beide Phänomenbereiche und lässt sich durch das Bild der Faltung ausdrücken.

### Denken in komplexen Systemzusammenhängen

So wie die Forschung durch Systeme hoher Komplexität herausgefordert ist, muss auch unser Bildungssystem sich dieser Herausforderung stellen. Wir benötigen eine neue Unterrichtskultur, die auf ein Verständnis komplexer Systemzusammenhänge hinarbeitet. Das hier diskutierte Experiment, das eine

Vielzahl von Zugängen auf ganz unterschiedlichen Ebenen bietet und interessante Perspektiven zum Verständnis komplexer Systeme von außen und von innen eröffnet, könnte ein Mosaikstein auf diesem Weg sein.

Es macht die wichtige Bedeutung der Thermodynamik und der nichtlinearen Dynamik für Prozesse der Selbstorganisation begreifbar (und hörbar) und realisiert das Prinzip



der „Ordnung aus Unordnung“ in erstaunlich einfacher Weise. Allerdings ist die thermodynamische Perspektive der Selbstorganisation zwar notwendig, aber nicht hinreichend für ein Verständnis biologischer Selbstorganisation. Letztere baut je nach Ebene zusätzlich auf ganz spezifischen Ordnungsstrukturen auf. Insofern ist, wie Schrödinger bemerkt hat, ein weiteres Prinzip unabdingbar, das Prinzip der „Ordnung aus Ordnung“. Auf der Ebene von Zellen und Organismen sind wesentliche Informationen molekular in der DNA verschlüsselt. Ihre Ordnung ist die Grundlage der genetisch codierten Selbstorganisation. Auf der Ebene des zentralen Nervensystems beruhen Selbstorganisationsprozesse ganz wesentlich auf der inhärenten Ordnung von komplexen neuronalen Netzwerken, auf Verschaltungsmustern, die ihrerseits durch Lernprozesse imstande sind, sich selbst zu organisieren.

Trotz dieser enormen Spannweite von Phänomenen der Selbstorganisation und der spezifischen Besonderheiten des jeweiligen Systems gibt es gemeinsame Verhaltensmuster bei der Entfaltung neuer Systemzustände. Ihre generischen Grundzüge lassen sich bereits an der Rijke-Röhre untersuchen, etwa das Verhalten am kritischen Punkt und die Bedeutung von Konzepten wie Instabilität und Nichtlinearität, die das System anpassungsfähig und empfänglich für äußere Einflüsse machen.

Ein weiterer Aspekt ist bemerkenswert. Waren bis vor kurzem für die gezeigten Messungen noch teure Geräte (Frequenzanalysatoren) nötig, so sind die Experimente heute mit geringem Aufwand bereits im Heimexperiment durchführbar. Man benötigt lediglich einen Computer mit Sound-Karte und Mikrophon. Geeignete Auswertprogramme sind als Free- oder als Shareware-Produkte über das Internet erhältlich. Auch das hier benutzte Programm ist im Internet verfügbar [1]. Das Multimedia-Zeitalter stellt äußerst mächtige Analyseinstrumente bereit. Auch für die Modellierung, die nur auf einer qualitativen Ebene angesprochen wurde, gibt es entsprechende Werkzeuge. Der vorliegende Beitrag möchte zu Eigenaktivität anregen und dazu einladen, diese Möglichkeiten intelligent zu nutzen und die vielfältigen Facetten des Phänomens Selbstorganisation, das für die Physik und für die Biologie gleichermaßen eine zentrale Rolle spielt, genauer zu untersuchen.

Das singende Rohr macht uns nahezu spielerisch mit Grundprinzipien der Selbstorganisation vertraut. Es spricht sowohl Verstand als auch Gefühl unmittelbar an. Auch Verbindungen zur Musik und zur Literatur müssen dabei nicht zu kurz kommen. Das Eingangszitat zur schöpferisch träumenden Natur und sein weiteres Umfeld aus den Anfangskapiteln des Dr. Faustus von Thomas Mann geben eine Reihe interessanter Anregungen, über die Bedeutung von Parallelbildungen in der unbelebten und der belebten Natur sowie im materiellen und im geistigen Bereich nachzudenken.

### Zusammenfassung

Der Beitrag stellt einfach nachvollziehbare Experimente vor, an denen sich Prinzipien der Selbststrukturierung in offenen Systemen fern vom thermischen Gleichgewicht untersuchen lassen. Solche einfachen Systeme mit komplexem Verhalten dienen als Modelle für Strukturbildungsprozesse in weitaus komplexeren biologischen Systemen. Sie zeigen insbesondere, wie eine wesentliche Funktion lebender Organismen, nämlich das Aufrechterhalten eines Unterschieds zwischen innen und außen, bereits mit einer rudimentären Wahrnehmungsfähigkeit der Außenwelt verknüpft ist, deren dynamische Produkte sich auf vielen Ebenen biologischer Organisation wiederfinden lassen.

### Self organization, structure formation and perception – experiments with the singing tube

Simple experiments are discussed, which demonstrate principles of structure formation in open systems far from thermal equilibrium, where nonlinearities play a highly constructive role. Self-organizing physical systems of low complexity can serve as models for structure formation on biological substrates, which are by far more complex. These experiments allow to gain insights about the intimate connection between structure formation in the inanimate world and the perception of structures in biological systems. Especially the tight link between maintaining a dynamical equilibrium in open systems and the dynamics of perception processes becomes obvious.

### Literatur

- [1] Cool-Edit, Syntrillium Software Corporation, <http://www.syntrillium.com>
- [2] M. Euler (1995) Synergetik für Fußgänger I + II. Physik in der Schule 33, 189–194, 237–242.
- [3] M. Euler (1997) Sensations of temporality: Models and metaphors from acoustic perception. In: H. Atmanspacher, E. Ruhnau (Hrsg.): Time Temporality, Now. Springer, Berlin.
- [4] M. Euler (1996) Biophysik des Gehörs I + II, BIUZ 16, 163–172, 304–312, 304–322. M. Euler (1998) Lernen von und mit den Sinnen. Praxis der Naturwissenschaften Physik 47, Heft 8.
- [5] M. Gell-Mann (1994) Das Quark und der Jaguar, Piper, München.
- [6] H. Haken (1993) Synergetics, Springer, Berlin. H. Haken (1981) Erfolgsgeheimnisse der Natur. DVA, Stuttgart. H. Haken, A. Wunderlin (1991) Die Selbststrukturierung der Materie. Vieweg, Wiesbaden. H. Haken, M. Haken-Krell (1992) Erfolgsgeheimnisse der Wahrnehmung. DVA, Stuttgart.
- [7] P. Hänggi, P. Riseborough (1983) Dynamics of nonlinear dissipative oscillators. American Journal of Physics, 51, 347–352.
- [8] T. Modis (1994) Die Berechenbarkeit der Zukunft. Birkhäuser, Basel.
- [9] G. Nicolis, I. Prigogine (1987) Die Erforschung des Komplexen. Piper, München.
- [10] I. Prigogine (1980) Vom Sein zum Werden. Piper, München.
- [11] P. L. Rijke (1859) Annalen der Physik und Chemie 107, 339.
- [12] E. Schrödinger (1944) What is Life? Cambridge Univ. Press, Cambridge. Dt.: Was ist Leben? (1987) Piper, München.
- [13] E.-L. Winnacker (1998) Herausforderungen und Mängel unseres Forschungssystems. Physikalische Blätter 54, 397.

### Zum Autor

Der Autor ist den Lesern aus BIUZ 26 (1996), 163–172 und 304–312 bekannt. Im Jahr 1997 wechselte er an das Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) an der Universität Kiel, wo er die Abteilung Didaktik der Physik leitet. Zugleich lehrt er Didaktik der Physik an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

### Anschrift

Prof. Dr. M. Euler, Inst. für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Univ. Kiel, Olshausenstr. 62, D-24098 Kiel.  
E-mail: euler@ipn.uni-kiel.de