

## **Struktur- und Schwellenbildung aus biologischer Sicht: Selbst-verstärkende Prozesse als treibende Kraft**

Prof.Dr. Hans Meinhardt

Vortrag, 21. April 2001, im Rahmen der  
51. Lindauer Psychotherapiewochen 2001 (www.Lptw.de)

### **Spontane Bildung von Strukturen**

Die Entwicklung eines höheren Organismus beginnt mit einer einzigen Zelle. Am Ende der Entwicklung steht eine hochkomplizierte Struktur, bei der alle Teile wie Kopf, Schwanz, Arme, Beine usw. an der richtigen Stelle gebildet worden sind. Zusammen mit Alfred Gierer, ebenfalls am Max Planck-Institut in Tübingen, habe ich den Versuch unternommen, diesen Prozeß durch eine mathematisch fundierte Modellbildung besser zu verstehen. Dabei sind wir auf generelle Prinzipien der Strukturbildung gestoßen. Strukturbildungen sind keineswegs ein Privileg der frühen Embryonal-Entwicklung. Strukturen können sich ebenso im Verhalten eines Menschen herausbilden: Bestimmte Charakterzüge können dominant werden während andere verkümmern. Dabei spielt sowohl eine innere Dynamik als auch Wechselwirkungen mit der Umgebung eine wichtige Rolle. Im folgenden möchte ich die für die biologische Struktur- und Schwellenbildung gefundenen Prinzipien darlegen und Parallelen zu psychologischen Situationen ziehen, wohl wissend daß die Übertragung von Erkenntnissen von einem Fachgebiet auf ein anderes immer ein Wagnis ist.

Bei der Entwicklung der Säugetiere ist in der Regel nach den ersten Zellteilungen noch jede Zelle in der Lage, den gesamten Organismus zu bilden. Die Differenzierung findet erst zu einem späteren Zeitpunkt statt. Ein historisch sehr früh benutztes Modellsystem für Aufklärung entwicklungsbiologischer Prozesse ist der kleine Süßwasser-Polyp Hydra. Schon 1744 hat Abraham Trembley entdeckt, daß man das Tier in kleine Stücke schneiden kann und daß aus jedem dieser Fragmente ein vollständiges Tier gebildet werden kann. Man kann sogar das Tier in einzelne Zellen zerlegen. Aus den sich dann wieder bildenden Zellenklumpen entstehen wieder lebensfähige Organismen (Abb. 1). Das zeigt, daß die Natur bei der Entwicklung von Organismen in der Lage ist, Strukturen zu bilden, wo zuvor keine Strukturen vorhanden waren.

Physiker haben früher sehr mißtrauisch auf die Biologie geschaut und sich gefragt, ob da alles mit rechten physikalischen Dingen vor sich geht. Von der klassischen Physik her erwartete man, daß alle Prozesse einer Gleichverteilung zustreben: Temperaturdifferenzen gleichen sich im Lauf der Zeit aus; wenn Milch in den Kaffee

geschüttet wird, wird diese sich verteilen und sich spontan nicht an einer bestimmten Stelle wieder vom Kaffee trennen - es sei denn, die Milch wurde sauer, was etwas mit dem zu tun hat, was im Folgenden zu beschreiben ist.

In seinem Roman „Doktor Faustus“ zeigt dagegen Thomas Mann eine erstaunliche Sensibilität für das Problem der Strukturbildung. Im 3. Kapitel beschreibt er wie der spätere Held des Romans als Kind zusammen mit anderen Kindern in das Studierzimmer des Vaters kommt. Es war ein kalter Tag und die Fenster waren voll Eisblumen. Der Vater beschreibt den Kindern sein Erstaunen darüber, daß da ein wunderbarer Formenreichtum ganz ohne jedes Zutun der Biologie entstanden war. Er plädiert dafür, die belebte und die unbelebte Natur mehr als eine Einheit zu begreifen, beides geeignet um die Ausbildung von Formenreichtum zu begreifen. „...so war, was ihn beschäftigte, die Einheit der belebten und der sogenannten unbelebten Natur, es war der Gedanke, daß wir uns an dieser versündigen, wenn wir die Grenze zwischen den beiden Gebieten allzu scharf ziehen, da sie doch in Wirklichkeit durchlässig ist, und es eigentlich keine elementare Fähigkeit gibt, die durchaus den Lebewesen vorbehalten wäre, und die nicht der Biologe am unbelebten Modell studieren könnte.“

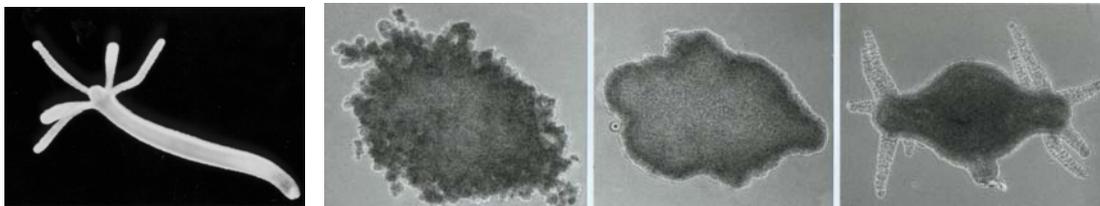


Abb. 1: Der Süßwasserpolyp Hydra, ein historisch altes Modellsystem für das Studium entwicklungsbiologischer Prozesse. Auf der einen Seite befindet sich der Kopf mit Tentakelkranz. Die gegenüberliegende Seite bildet den Fuß, ein Organ mit dem sich das Tier an Wasserpflanzen anheften kann. Nach Dissoziation in Einzelzellen können sich wieder voll lebensfähige Tiere bilden (aus [1]).

## Strukturen im Raum

In der Tat sind Strukturbildungen mehr die Regel als die Ausnahme. An einem Sommerhimmel bilden sich einzelne scharf-begrenzte Wolken. Im Lauf der Zeit hat der Regen Flußtäler ausgewaschen. Durch den Regen haben die Täler Struktur bekommen obwohl dieser mehr oder weniger gleichmäßig verteilt über der Landschaft niederging. Auch in der unbelebten Natur können also Strukturen entstehen, wo vorher keine Strukturen vorhanden waren. Ein weiteres Beispiel sind die hohen Sanddünen, die sich in Wüsten bilden. Naiv würde man annehmen, daß der Wind, aus wechselnden Richtungen kommend, allen Sand gleichverteilt. Aber die Existenz der Dünen zeigt, daß diese naive Erwartung falsch ist. An diesem Beispiel kann man sehr gut zeigen, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit eine spontane Strukturbildung auftreten kann.

Strukturen können sich bilden, wenn kleine Abweichungen von einem Gleichgewichtszustand eine solche Rückwirkung auf sich selbst haben, daß diese weiter anwachsen. Bei der Sanddüne war vielleicht ein Stein der Ausgangspunkt. Der Stein erzeugte einen Windschatten, in dem sich Sand ablagern konnte. Der abgelagerte Sand vergrößerte den Windschatten: Noch mehr Sand wird abgelagert, wodurch der Windschatten wiederum größer wird - ein sich selbst verstärkender Prozeß. Eine Struktur entsteht also, wenn Prozesse am Werk sind, die dazu führen, daß kleine Abweichungen nicht wieder verschwinden, sondern durch Rückwirkung auf sich selbst

weiter anwachsen. Das ist ein zentraler Punkt, der sich wie ein roter Faden durch die weiteren Überlegungen ziehen wird.

Für die Bildung einer neuen stabilen Struktur ist es entscheidend, daß das selbstverstärkende Anwachsen nicht ungebremst erfolgt. Damit nicht eine Explosion stattfindet, sondern ein neues Gleichgewicht gefunden wird, muß die Selbstverstärkung lokal begrenzt sein. Das geschieht, wenn die Selbstverstärkung lokal erfolgt und auf Kosten der Umgebung geht. Zum Beispiel können notwendige Komponenten aus der Umgebung entnommen und verbraucht werden. So kann der Sand, der in einer Düne abgelagert wurde, nicht mehr zum Anwachsen einer weiteren Düne beitragen. Da der Wind hinter einer Düne weniger Sand mit sich trägt, kann dort eine anfänglich gebildete Düne wieder verschwinden. Alternativ kann von einer sich bildenden Struktur eine unterdrückende Wirkung auf die Umgebung ausgehen, die den sich selbstverstärkenden Prozeß in der Umgebung hemmt. In jedem Fall bedeutet eine Strukturbildung immer ein Wettlauf zwischen verschiedenen Möglichkeiten. Einige gewinnen diesen Wettlauf, während alternative Möglichkeiten unterdrückt werden.



Abb. 2: Linien auf einer Schneckenschale, die senkrecht zur Wachstumskante verlaufen. Eine Schnecke kann ihre Schale nur durch Anlagerung von neuem Material entlang der Wachstumskante vergrößern. In regelmäßigen Abständen entstehen in der Wachstumsdrüse Regionen, in denen Pigment in die Schale eingelagert wird. Diese Regionen sind zeitlich stabil. Im Laufe der Zeit entstehen die Pigmentstreifen. Nach dem Modell entsteht das periodisch Muster durch einen örtlich-begrenzten, sich selbst-verstärkenden Prozesses sowie einer antagonistischen Reaktion von größerer Reichweite. Eine hohe Konzentration des Aktivators (braun in der Simulation) ist das Signal zum Einbau von Pigment (aus [1]).

Die Einsicht in dieses Prinzip ist auch hilfreich, um soziale und politische Prozesse besser zu verstehen. Bei der Ausbildung von Machtzentren versuchen diejenigen, die sich an dem Wettlauf um Macht beteiligen, ihre Macht zu stärken und die der Mitbewerber zu beschneiden. Dies führt dazu, daß der Einfluß einiger Weniger weiter steigt, während andere an Bedeutung verlieren. Anhäufung von Macht ist also in diesem Sinne ein strukturbildender Prozeß. Kleine Anfangsvorteile und zufällige Konstellationen können einen bestimmenden Einfluß darauf haben, wer das Rennen gewinnen wird.

Ähnliche Prozesse laufen vermutlich auch in der Psyche eines Menschen ab. Im Prinzip hat jeder Mensch ein großes Repertoire an möglichen Verhaltensweisen. Dabei bilden sich bestimmte Präferenzen, Charakterzüge, aus: Mutig, hilfsbereit oder auch hilfsbedürftig. Bei dieser Auswahl aus den denkbaren Möglichkeiten spielen vermutlich wieder selbstverstärkende Prozesse eine wichtige Rolle. Wenn wir jemand als außergewöhnlich hilfsbereit erleben, so war diese Verhaltensweise vielleicht ursprünglich durch die Notwendigkeiten einer früheren Situation bedingt. Dieser Mensch fand möglicherweise nur dann Anerkennung, wenn er einfühlsam und hilfsbereit war. Das hatte Rückwirkungen auf sein weiteres Handeln: Die anfängliche Hilfsbereitschaft wurde zur Rolle, zum Charakterzug. Andere Eigenschaften wie z.B. etwas fordern, Ansprüche stellen, verkümmern. So ist das Herausbilden einer der Möglichkeiten notwendiger Weise mit der Aufgabe alternativer Möglichkeiten verbunden. Wie wir später noch sehen werden, kann eine solche innere Strukturbildung auch eine Einengung sein, deren Überwindung durchaus zusätzlicher Mechanismen bedarf, auf die später noch eingegangen werden soll.

Dieses Grundprinzip, das Zusammenspiel zwischen selbstverstärkenden und antagonistischen Prozessen wird uns noch eine Weile begleiten. Aber zunächst zurück zur Biologie: Dort wird Strukturbildung durch Substanzen kontrolliert. Auf Grund der geschilderten Überlegungen gingen wir davon aus, daß es Moleküle geben muß, die ihre eigene Produktion beschleunigen. Wir haben sie Aktivatoren genannt. Heute kennt man eine Reihe solcher Substanzen. Die Aktivatoren müssen auch dafür verantwortlich sein, daß Antagonisten in ausreichender Menge produziert werden, damit das System ein neues Gleichgewicht finden kann. Die Antagonisten haben wir als Inhibitoren bezeichnet. Diese Wechselwirkungen kann man in einen Satz von Gleichungen fassen, die die Konzentrationsänderungen in einer kleinen Zeiteinheit beschreiben. Mit einer solchen Gleichung kann man ausrechnen, wie sich, von einer Anfangsverteilung ausgehend, die Konzentrationen verändern werden. Da unsere Intuition für Prozesse, die starke Rückwirkungen auf sich selbst haben, sehr unzureichend ist, bieten Simulationen eine Möglichkeit zu prüfen, ob das erwartete mit dem tatsächlichen Verhalten der Modelle übereinstimmt. Das erfordert Simulationen dieser Reaktionen mit dem Computer, die dann auch darüber Aufschluß geben, wie gut das Modell die Beobachtungen beschreiben kann.

Im folgenden sollen einige Eigenschaften des Modells beschrieben werden. Wenn das Feld, in der die Reaktion stattfinden kann, klein ist (im Verhältnis zur Reichweite der Signalmoleküle), so kann nur ein Maximum am Rand des Feldes gebildet werden. In Zellen, die einer hohen Konzentration ausgesetzt sind, können andere genetische Informationen des Erbgutes abrufen werden. Die gebildeten Konzentrationsverteilungen stellen also eine Information für die Zellen bereit, wo diese sich im Zellverband befinden. Heute sind viele Systeme bekannt, wo von einer solchen Positionsinformation Gebrauch gemacht wird. Dagegen entstehen mehrere Maxima wenn die Reichweite der Inhibition nicht das ganze Feld überdeckt. Solche Verteilungen von Signalmolekülen werden gebraucht, um periodische Strukturen wie Borsten, Federn und Haare anzulegen. Die Streifen auf den Schalen tropischer Meeresschnecken können ebenfalls so gebildet werden (Abb. 2).

Schneidet man der Hydra den Kopf ab, so bildet sich ein neuer. Das beschriebene Modell kann eine solche Regeneration erklären. Wenn die aktivierte Region entfernt wird, sinkt die Inhibition bis die Selbstverstärkung erneut einsetzt. Die von der neu aktivierten Region ausgehende Inhibition führt zu einem neuen Gleichgewicht. Damit ist in dem verbleibenden Gewebe ein neues Signal zur Kopfbildung gebildet worden. Solche Regelprozesse sind auch aus sozialen Wechselwirkungen bekannt. Wenn ein Machtzentrum im weiteren Sinne verschwindet, wird ein neues entstehen, wobei

rivalisierende Gruppen oder Personen versuchen werden, sich gegenseitig zu verdrängen. In der Regel wird es nur einen Gewinner geben. Rivalisierende Auseinandersetzungen nach Verlust eines Machtzentrums können lang anhaltend sein und z.B. zu bürgerkriegsähnlichen Zuständen führen.

### **Überschreiten einer Schwelle: der Funke am Pulverfaß**

Oft muß eine Schwelle überschritten werden, um einen bestimmten Vorgang auszulösen. Umgangssprachlich wird das durch Redensarten ausgedrückt wie: „der Funke am Pulverfaß“ oder „der Tropfen, der das Faß zum Überlaufen bringt“. Im Sinne der vorgestellten Theorie entsteht eine solche „revolutionäre Situation“, wenn das unmittelbare Einsetzen der selbstverstärkenden Prozesse durch eine gewisse Grund-Inhibition unterdrückt wird. Entweder wird diese Grund-Inhibition durch ein äußeres Ereignis überwunden oder sie sinkt langsam ab, bis das Aufschaukeln spontan einsetzt. Danach entwickelt in beiden Fällen der Prozeß seine eigene, nicht-umkehrbare Dynamik.

### **Strukturen in der Zeit**

Bisher haben wir die Bildung von Strukturen im Raum betrachtet, wobei „Raum“ nicht nur in der realen physikalischen Bedeutung gemeint war. Die gebildeten Strukturen waren zeitlich stabil. Wichtig sind aber auch Strukturen in der Zeit. Im psychologischen Bereich kann das extreme Formen annehmen, z.B. im Wechsel zwischen manischen und depressiven Phasen. Konjunkturelle Schwankungen können schwer lösbare Probleme nach sich ziehen. Wenn beispielsweise in einer Flaute Firmen schließen müssen, gehen Arbeitsplätze verloren, die beim nächsten Aufschwung nicht automatisch wiederentstehen. Obwohl diese Schwankungen unerwünscht sind, sind sie offenbar schwer zu vermeiden.



Abb. 3: Strukturen in der Zeit entstehen, wenn eine sich selbst-aufschaukelnde Reaktion durch eine langsame oder verzögerte Gegenreaktion gegengeregelt wird. Wird z.B. die selbst-aufschaukelnde Produktion eines Aktivators über eine Substanz inhibiert, die eine längere Lebensdauer hat als der Aktivator, so fängt ein solches System an zu oszillieren. Die Streifen parallel zur Wachstumskante auf der Schale der Meeresschnecke sind durch ein entsprechendes An- und Abschalten der Pigmentproduktion entstanden (aus [1]).

Der gleiche Mechanismus, der die Bildung räumlicher Strukturen ermöglicht, kann auch zu Strukturen in der Zeit führen. Ein regelmäßiges Auf und Ab tritt immer dann auf, wenn ein selbst-aufschaukelnder Prozeß mit einer antagonistischen Reaktion gekoppelt ist, die relativ langsam oder verzögert abläuft. So kann zunächst ein lawinenartiges Aufschaukeln stattfinden. In dieser Zeit bilden sich die Komponenten der Gegenreaktion aus, was dann zu einem plötzlichen Abbruch führt. Am Beispiel der Konjunkturschwankungen läßt sich das gut erklären: Eine ansteigende Konjunktur verstärkt sich selbst, denn es wird mehr investiert und das fördert wiederum den weiteren Aufschwung. Diese Phase ist jedoch zeitlich begrenzt. Irgendwann sind die

Lager voll, es wird vorsichtiger investiert und die Spirale dreht sich um. Der langsame Abbau dieser antagonistischen Komponenten erzwingt eine refraktäre Phase. Erst nach dieser erzwungenen Pause kann ein neues Aufschaukeln stattfinden. In der Simulation Abb. 3 entsteht eine Oszillation, weil der Inhibitor eine längere Lebensdauer hat als der Aktivator.

Das Einsetzen von Oszillationen kann auch in einer alltäglichen Situation beobachtet werden. Eine dünne Kerze brennt gleichmäßig, weil von allen Seiten genügend Sauerstoff an die Flamme kommt. Wenn dagegen eine dicke Kerze eine Weile brennt, bildet sich ein Loch im Wachs. Ist es tief genug, beginnt die Flamme zu flackern. Durch die Tiefe des Loches kann Sauerstoff nicht mehr von der Seite zur Flamme gelangen und die heißen aufsteigenden Verbrennungsgase behindern die Zufuhr von Sauerstoff von oben. Die Flamme wird kleiner, verbraucht dadurch weniger Sauerstoff und es steigen wenige Gase auf. So kann sich die Sauerstoffkonzentration erholen: Die Flamme wird wieder größer, und der Vorgang beginnt von neuem.

Muster in der Zeit sind nicht immer unerwünscht. Der Schlaf-Wach-Rhythmus ist ein Beispiel. In anderen Bereichen ist der Vorteil eines pulsartigen Verlaufes weniger einsichtig. Der Krankheitsverlauf nach einer Grippe-Infektion ist dafür ein Beispiel. In den ersten Tagen vermehren sich die Viren lawinenartig, wir werden krank. Unser Immunsystem braucht ca. eine Woche, um den gesunden Zustand wiederherzustellen. Man könnte das als einen Konstruktionsfehler betrachten. Könnte das Immunsystem nicht schneller reagieren, so daß wir nicht erst krank würden? Dann aber würde es zu einem Gleichgewicht zwischen der Bildung neuer Viren und deren Vernichtung kommen. Der Organismus würde das Virus nie wieder los, er müßte zeitlebens gegen das Virus kämpfen. Dagegen werden durch die zeitliche Verzögerung zunächst genügend Abwehrkräfte aufgebaut, die dann relativ schlagartig zum Zusammenbruch der Viruspopulation führen. Es ist also eine viel bessere Strategie, einmal die Krankheit zu durchlaufen und dann Ruhe zu haben. Ob eine permanente Oszillation oder nur ein einzelner Ausbruch stattfindet hängt davon ab, ob wir einer gewissen Menge von Viren ausgesetzt sind, die das Aufschaukeln wieder in Gang setzt beginnen kann und ob eine langzeitliche Komponente des Immunsystems einige Viren auch ohne Krankheitsausbruch abfangen kann.

Diese Zeitverzögerung spielt bei vielen Prozessen eine verhängnisvolle Rolle. Wenn der übermäßige Ausstoß von Treibhausgasen sehr schnell negative Effekte hätte, vor allem für diejenigen, die sie produzieren, wäre es sicher viel leichter einen Konsens zu ihrer Verringerung zu erreichen. So kommt es erst sehr verzögert zu den kritischen Situationen, dafür aber prägen sich diese um so heftiger auf. Sie treffen vermutlich nicht mehr diejenigen, die maßgeblich zu dem Problem beigetragen haben.

Wenn im psychologischen Bereich Schwankungen auftreten, die unerwünscht sind, dann stellt sich, von diesen Mechanismen ausgehend, die Frage: Welches sind die selbst-aufschaukelnde Komponenten und wodurch werden diese begrenzt. Die Ausbrüche lassen sich sicher nicht dadurch verhindern, daß man versucht, die antagonistische Reaktion zu vermeiden, z.B. in dem man Ärger in sich hineinfrisst, anstatt schnell und angemessen zu reagieren. Der Ausbruch wäre nur noch heftiger.

## **Ausbildung ordnender Hierarchien**

Wie oben beschrieben, kann in einem sich entwickelnden Gewebe entweder ein Maximum oder es können mehrere Maxima entstehen (Abb. 2). Das hängt von der Ausdehnung des Gewebes und der Reichweite der inhibitorischen Substanzen ab.

Wenn während des Wachstums bestimmte Abstände überschritten werden, können neue Zentren entstehen. Das ist sinnvoll, zum Beispiel, bei der Anlage neuer Blätter auf einem wachsenden Sproß. Für die frühe Entwicklung eines Organismus ist das aber ein Problem. In einer Hühnerei soll sich nur ein Embryo entwickeln. Durch experimentelle Manipulationen konnte man zeigen, daß anfänglich auch Platz für mehrere Embryonen vorhanden gewesen wäre. Diese hätten sich aber in der späteren Entwicklung im engen Ei gegenseitig behindert. Die Biologie hat es offenbar geschafft, daß in der Regel nur ein Embryo entsteht.

Auch im sozialen Miteinander ist es oft wünschenswert, daß nur ein organisierendes Zentrum entsteht, und daß nicht dauernde Machtkämpfe zwischen verschiedenen Zentren stattfinden. An einem solchen anthropomorphen Beispiel kann gut erklärt werden, welche Wechselwirkungen notwendig sind, um die Bildung nur eines organisierenden Zentrums zu erreichen. Jemand im Zentrum der Macht, ein Kanzler, ein Präsident usw. will in der Regel seine Macht sichern und hindert andere in seiner Umgebung, diese Macht zu übernehmen, d.h. es gibt Selbst-Verstärkung und Inhibition wie beschrieben. Jedoch braucht beispielsweise ein Kanzler nicht jeden daran zu hindern, Kanzler zu werden, denn es gibt nur wenige potentielle Kandidaten, die die Macht übernehmen könnten. Neben der Inhibition geht von einem Machtzentrum noch ein zweiter, zunächst widersprüchlich erscheinender Einfluß aus: Es fördert in der unmittelbaren Umgebung die Kompetenz, die Macht, wenn notwendig, zu übernehmen. Nur wer dicht am Machtzentrum war hat genügend Vorsprung, um ein solches Rennen zu gewinnen. Jemand, der weit weg von einem Machtzentrum ist, hat keine Chance. Deshalb ist auch kein besonderer Aufwand notwendig, um ihm an der Übernahme der Macht zu hindern - es sei denn, es tritt eine revolutionäre Situation auf, wo neue Machtzentren entstehen können. Warum aber heben Förderung und Inhibition sich nicht gegenseitig auf? Beide Prozesse laufen in anderen Zeitskalen ab. Die Inhibition muß ein schnell reagierender Prozeß sein. Wenn das Machtzentrum vakant wird, muß sofort gehandelt werden um ein Vakuum zu vermeiden. Dagegen ist eine Veränderung in der in der Fähigkeit, die Macht zu übernehmen ein langsamer Prozeß. Damit legt das System fest oder schränkt zumindest stark ein, wer gegebenenfalls das Rennen machen wird.

### **Muster, die sich selbst zerstören – und warum das sehr hilfreich sein kann**

Die Ausbildung von Strukturen ist ein wichtiger Schritt. Aber eine einmal ausgebildete Struktur kann auch Zwang bedeuten. Für das menschliche Miteinander ist der Wechsel der Generationen eines der notwendigen Komponenten, um möglicherweise verkrustete Strukturen wieder verändern zu können - Strukturen, die früher vielleicht einmal einen großen Fortschritt bedeutet haben. In der Biologie spielt der permanente Zyklus von Aufbau und Zerstörung eine wichtige Rolle. Ein Beispiel dafür ist das Ausrichten von Zellenbewegungen auf ein Signalzentrum hin. Zur Abwehr von Entzündungen müssen Leukozyten ihren Weg zu einem Entzündungsherd finden. Vom diesem werden Stoffe abgegeben, die von den Leukozyten als Signale benutzt werden, um ihre Bewegung auszurichten. Dazu muß eine Zelle in der Lage sein minimale Unterschiede auf ihrer Oberfläche zu messen. Man kann dieses Weg-Suchen und -Finden mit folgendem Modell beschreiben: Durch Selbstverstärkung und Inhibition werden interne Signale dicht an der Zell-Oberfläche gebildet, die der Zelle anzeigen, in welche Richtung Fortsätze auszustrecken sind. Die minimalen externen Signale sind bestimmend, welche Region auf der Zelle diesen Wettlauf gewinnt. Nachdem diese internen Signale aufgebaut worden sind, müssen diese wieder verschwinden. Nur so hat die Zelle die Chance neue Signale aufzubauen, die die Zelle gegebenenfalls in eine andere Richtung weisen.

Ähnliche Prozesse spielen auch bei der Bildung von Blatt- oder Samenanlagen eine Rolle (Abb. 4), auch wenn die Prozesse äußerlich ganz verschieden erscheinen. Bei vielen Blütenpflanzen werden die neuen Blätter jeweils versetzt hinter dem wachsenden Sproß angelegt. Die Blätter erscheinen entlang von Spiralen angeordnet. Dazu muß jeweils ein Signal für ein Blatt entstehen, wieder verschwinden und an versetzter Stelle wieder erscheinen. Dahinter steckt die Umkehrung des oben beschriebenen Prinzips der Stabilisierung. Ein einmal gebildetes Signal baut die Fähigkeit, das Signal zu bilden oder zu erhalten, wieder ab: Das Signal verschwindet wieder. Damit wird die Möglichkeit geschaffen, daß es an neuer Stelle neu entstehen kann. Nicht nur die Bildung sondern auch das Verschwinden der Signale ist wichtig. Die Natur macht je nach den Erfordernissen von beiden Gebrauch.

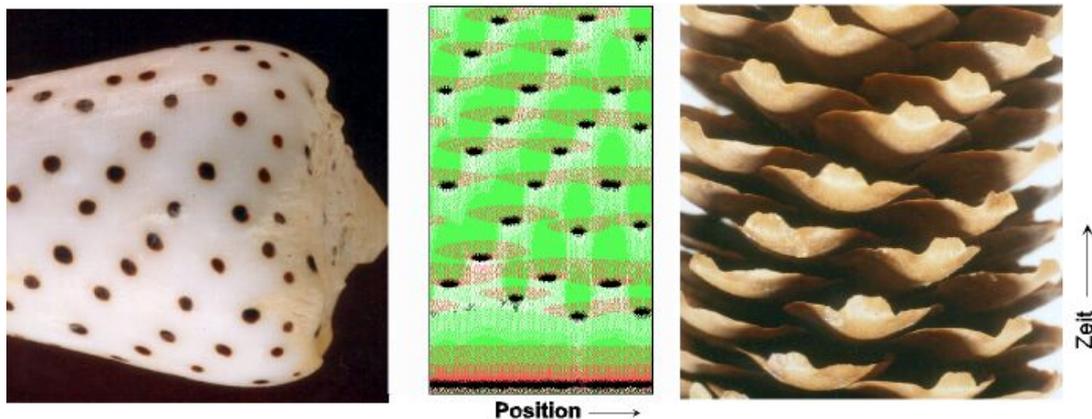


Abb. 4: Versetzte Punktreihen auf Schneckenschalen und versetzte Samenanlagen bei Tannenzapfen. Nach dem Modell basieren beide Prozesse auf einem gemeinsamen Prinzip: Eine sich selbst aufschaukelnde Reaktion (schwarz) wird durch zwei inhibitorische Prozesse reguliert. Eine langreichweitige Inhibition (rot) sorgt für eine Lokalisation des Signals und dessen Unterdrückung in der Umgebung, ein langanhaltende Inhibition (grün) bringt das Signal wieder zum Verschwinden und schafft damit die Voraussetzung, daß neue Signale entstehen können. Sie erscheinen an versetzter Stelle wo die Konzentration beider hemmenden Stoffe gering ist. Im Lauf der Zeit entstehen Signale, die entlang schräg verlaufender Linien angeordnet sind (aus [1]).

Die Notwendigkeit, im sozialen Miteinander alte Strukturen zu zerstören, um neue aufbauen zu können, hat Mircea Eliade in seinem Buch „Mythen, Träume und Mysterien“ beschrieben [2]: „Aber wir wissen ja, daß für alle archaischen und überlieferungsgebundenen Kulturen die symbolische Rückkehr zum Chaos notwendige Voraussetzung jeder Neuschöpfung ist“. ... „Alle Martern, Trancezustände oder Einweihungsriten, welche diese Rückkehr zum Chaos hervorrufen oder fortführen, bedeuteten ... Phasen eines mystischen Sterbens und Auferstehens und damit letztlich die Geburt einer neuen Persönlichkeit“.

## Zusammenfassung

Strukturbildungen treten auf, wenn Prozesse involviert sind, die sich selbst verstärken und das Auftreten ähnlicher Prozesse in der Nachbarschaft unterdrücken. Diese Musterbildung ist nicht an den physikalischen Raum gebunden. Sie ermöglicht die Realisation bestimmter Möglichkeiten, während alternative Möglichkeiten unterdrückt werden. Strukturen in der Zeit treten auf, wenn die antagonistischen Prozesse relativ zu den selbst-verstärkenden Komponenten zu langsam erfolgen. Nach einer Zeit des Aufschwunges folgt eine Phase des Abschwunges. Einmal gebildete Strukturen können auch eine Verkrustung bedeuten. Der Aufbau neuer Strukturen wird ermöglicht, wenn

einmal gebildete Strukturen wieder destabilisiert werden. Die Kombination und Verkettung vieler solcher Prozesse erlaubt die Bildung sehr komplexer Strukturen. Eine mathematisch fundierte Modellbildung erleichtert das Verständnis dieser komplexen Prozesse.

### **Literatur:**

[1] Eine ausführliche Darstellung strukturbildender Prozesse ist in dem Buch Meinhardt: „Wie Schnecken sich in Schale werfen“, Springer Verlag ISBN 3-540-61945-3 zu finden. Dem Buch beigelegt ist eine Diskette, die solche Simulationen auf dem eigenen PC erlauben. Die Abbildungen sind diesem Buch entnommen.

Eine detaillierte Beschreibung dieser und weiterer Modelle ist unter <http://www.eb.tuebingen.mpg.de/abt.4/meinhardt/theory.html> zu finden.

[2] Mircea Eliade: Mythen, Träume und Mysterien. Otto Müller Verlag, Salzburg, 1961, Seite 119.

Prof.Dr. Hans Meinhardt  
Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie  
Spemannstraße 35 IV  
D-72076 Tübingen

e-mail [hans.meinhardt@tuebingen.mpg.de](mailto:hans.meinhardt@tuebingen.mpg.de)