

# Komplexes Spielzeug

H. Joachim Schlichting

*Wesentliche Prinzipien der Selbstorganisation komplexer Systeme werden anhand einfacher Spielzeuge untersucht und veranschaulicht. Damit sollen Anregungen gegeben werden, wie man auch mit schulischen Mitteln in die faszinierende Gedankenwelt komplexer Systeme eingeführt werden kann.*

## Physikalische und lebensweltliche Sehweise

Physikalische Inhalte und Erkenntnisse müssen für den Schüler solange künstlich und weltfremd bleiben, wie es nicht gelingt, sie auf Phänomene und Probleme der wissenschaftlich technischen und natürlichen Umwelt anzuwenden. Nicht zuletzt diesem Umstand ist die allenthalben beklagte Unbeliebtheit des Physikunterrichts zuzuschreiben.

Ein wesentliches Problem ist darin zu sehen, daß eine physikalische Betrachtung der Welt weitgehend verlangt, sie "so zu beschreiben, wie wir sie nicht erleben" [1]. Gegenstände und Erscheinungen der Umwelt tragen den physikalischen Aspekt nicht in einfacher Weise in sich. Er muß erst aus einer Vielzahl anderer Aspekte herausgearbeitet werden. Dazu sollte der Physikunterricht zumindest exemplarisch anleiten.

Eine Ursache für die Diskrepanz zwischen physikalischer und lebensweltlicher Sicht ist in der seit Galilei und Newton praktizierten drastischen Reduktion der Komplexität realer Gegenstände und Phänomene zu sehen: Vor allem durch die Beschränkung auf reibungsfreie Vorgänge und lineare Zusammenhänge werden sie bis zur Unkenntlichkeit verändert.

Dagegen beginnt sich seit einigen Jahren auch aus fachwissenschaftlicher Sicht Widerstand zu regen: Mit der "Erforschung des Komplexen" wie Nicolis und Prigogine es bezeichnen [2], hat man begonnen, gerade jene Probleme in den Blick zu nehmen, die durch den bisherigen Reduktionismus ausgeklammert und damit implizit als nichtphysikalisch angesehen wurden. Darin ist eine Chance für den Physikunterricht zu sehen. Denn einige der Fragestellungen, die sich aus dieser neuen Perspektive ergeben, stehen der lebensweltlichen Sicht näher als der klassisch-physikalischen. Begriffe wie Ordnung, Chaos und Selbstorganisation

finden allmählich Eingang in die verschiedensten naturwissenschaftlichen Bereiche.

Wir wollen hier nur jene Phänomene etwas näher betrachten, die - allgemein gesprochen - mit dem Entstehen, der Aufrechterhaltung und dem Vergehen von Ordnungsstrukturen verbunden sind und mit dem Terminus Selbstorganisation zutreffend umschrieben werden.

Zum Beispiel:

- regelmäßige Muster auf dem morgendlichen Milchkaffee (Bénardkonvektion),
- das Quietschen von Kreide an der Wandtafel,
- räumlich und zeitlich oszillierende chemische Reaktionen,
- die Muster einer strömenden Flüssigkeit,
- das Einsetzen der Lasertätigkeit,
- das Umkippen eines Ökosystems etc.

## Spielzeuge im Physikunterricht

Sowohl bei der Überwindung der Diskrepanz zwischen lebensweltlicher und physikalischer Sicht als auch zur Einführung in die Problematik der Selbstorganisation können Spielzeuge gute Dienste leisten [3].

Zum einen können Spielzeuge als Vertreter von vertrauten Alltagsgegenständen dienen. Denn: Spielzeuge sind keine physikalischen Apparate. Sie sind nicht in künstlicher Weise auf einen physikalischen Zusammenhang hin konzipiert. Der physikalische Aspekt muß ihnen, ähnlich wie anderen Gegenständen der Lebenswelt, erst "abgerungen" werden.

Zum anderen sind Spielzeuge meist relativ einfach gebaut und in ihrer Funktionsweise überschaubar. Gleichzeitig sind sie aber genügend "reichhaltig", sowohl um die Aufmerksamkeit der Schüler länger zu binden als auch gleichzeitig jene komplexen Phänomene modellhaft hervorbringen zu können, auf die wir hier zu sprechen kommen wollen. Außerdem geht von Spielzeugen in vielen Fällen eine faszinierende Wirkung auf Schüler und Lehrer aus, die für den Unterricht nutzbar gemacht werden kann.

Schließlich sind Spielzeuge meist billig und in größerer Stückzahl zu beschaffen, also auch für Schülerversuche und außerschulische Aktivitäten der Schüler geeignet.

Ein Nachteil von Spielzeugen gegenüber physikalischen Geräten wird zuweilen darin gesehen, daß die physikalischen Beschreibungen und Versuche in den meisten Fällen nur schwer über qualitative Zusammenhänge hinausgeführt werden können. Dem ist entgegenzuhalten, daß Spielzeuge ja gerade dann im Physikunterricht eingesetzt werden, wenn es darum gehen soll, den physikalischen Horizont aus dem lebensweltlichen auszuspannen und physikalisches Verständnis anzubahnen. Erst bereits Verstandenes kann gegebenenfalls mit Gewinn quantitativ präzisiert und formelmäßig zusammengefaßt werden.

## Komplexe Systeme

Ein weiteres Argument zur Rehabilitierung des Qualitativen kommt wiederum aus dem fachlichen Bereich der hier zu besprechenden komplexen Phänomene: Die Kehrseite des Verzichts auf eine derart radikale Komplexitätsreduktion, wie sie in der Beschränkung auf reibungsfreie und lineare Vorgänge zum Ausdruck kommt, ist die Unmöglichkeit, analytische und exakte Aussagen über die untersuchten Systeme zu gewinnen. Vielmehr erweist sich das folgende Schema als typisch für physikalische Untersuchungen komplexer Systeme:

- Wähle ein sehr einfaches System aus, das ein qualitativ ähnliches Verhalten zeigt! Untersuche dieses einfache System im Detail!
- Abstrahiere jene Verhaltensweisen des einfachen Systems, die als universell d.h. unabhängig von den Einzelheiten und der Aufmachung des Systems angesehen werden können!
- Wende diese universellen Charakteristika auf das komplexe System an! [4]!

Bei diesem Vorgehen gewinnt der qualitative Aspekt ein besonderes Gewicht. Anschauliche, grafische und geometrische Untersuchungsmethoden stehen dabei im Vordergrund. Beispielsweise lässt sich ein derart komplexes Problem wie das der Bénardkonvektion (s.o.) durch drei einfachen Differentialgleichungen 1. Ordnung (Lorenzgleichungen) erfassen. Auf diese Weise wird ein durch sehr viele Freiheitsgrade charakterisiertes System auf ein System mit nur wenigen Freiheitsgraden reduziert [5]: Das Phänomen der Bénardkonvektion kann daher einer Art Wasserrad gleichgesetzt werden, welches von einem variablen Wasserstrom in Gang gehalten wird [6]. Trotz ihrer dimen-

sionalen und phänomenologischen Verschiedenheit zeigen beide Systeme dasselbe makroskopische Verhalten. Insbesondere weisen sie dasselbe Muster der Selbstorganisation auf. Das äußerst einfache System des Wasserrades kann daher zur Modellierung von komplexen Vorgängen wie dem der Bénardkonvektion herangezogen werden.

Unter dieser Perspektive geht die im folgenden darzustellende Behandlung der einfachen Spielzeuge über den physikalischen Selbstzweck, in ein neues, interessantes Gebiet einzuführen, noch hinaus: Die Ergebnisse lassen sich übertragen auf komplexe Phänomene und Gegenstände der Umwelt und tragen zu einem vertieften Verständnis bei, das mit Mitteln des bisherigen Physikunterrichts nicht zu erreichen ist. Dies ist die eigentlich pädagogische Herausforderung der komplexen Phänomene.

Die neuartigen Phänomene erfordern wie gesagt neue Methoden. Globale energetische Betrachtungen sowie geometrische Untersuchungen im Zustandsraum sind typisch für das Vorgehen und sollen im folgenden wenigstens Ansatzweise skizzieren werden.

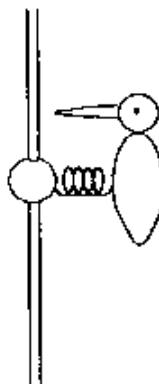
## Sich selbst organisierende Spielzeuge

Wir wollen uns im folgenden auf die Betrachtung des periodischen Aspektes komplexen Verhaltens beschränken, der für das Verständnis von Vorgängen der Selbstorganisation von Bedeutung ist. Die im folgenden skizzierten Spielzeuge sind einfache Systeme mit wenigen Freiheitsgraden. Mit ihrer Hilfe lässt sich jedoch das Verhalten der Selbstorganisation, wie es in Systemen mit sehr vielen Freiheitsgraden auftritt, auf ähnliche Weise erfassen, wie sich die makroskopische Form der Bénardkonvektion durch ein mechanisches Wasserrad darstellen lässt.

Wir werden zunächst die Funktionsweise der Spielzeuge im Hinblick auf ihre verallgemeinungsfähigen Gemeinsamkeiten skizzieren (vgl. [7]; dort weitere Literaturhinweise). Daran anschließend wird ihr Verhalten zur qualitativen Modellierung der wesentlichen Aspekte der Selbstorganisation herangezogen, wobei wir uns unter Ausnutzung der Eigenschaft der Universalität (siehe unten) mal auf das eine, mal auf das andere Spielzeug beziehen.

## Der pickende Specht

Dieses bekannte Spielzeug besteht aus einem hölzernen Vogel, der über eine Feder an einer kleinen Hülse befestigt ist. Die Hülse ist ihrerseits frei verschiebbar an einer senkrecht aufgestellten Stange

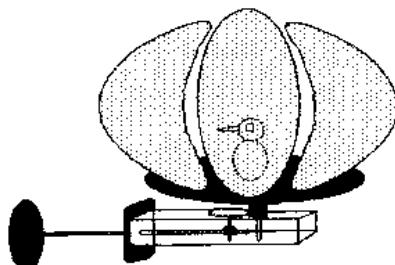


**Abb. 1:** Der pickende Specht

angebracht (siehe Abb. 1). Stößt man den Specht an, so vollführt er eine Schwingung und berührt im Takt dieser Auf- und Abbewegung mit dem Schnabel eine Stange. Dadurch entsteht das charakteristische Pickgeräusch. Gleichzeitig gleitet der Vogel ruckweise die Stange hinab, bis er den Boden erreicht und zur Ruhe kommt. Von dem gleichmäßigen, auf das rhythmische Picken abgestimmte Schwingen des Spechts geht eine Faszination aus, die sowohl die Sinne anspricht als auch das physikalische Erkenntnisinteresse herausfordert: Man kann Kinder und erwachsene Physiker gleichermaßen beobachten, wie sie den Specht immer wieder die Stange hinaufschieben, um ihn erneut in Aktion Abb. 1 zu erleben.

#### Der Vogel im Ei

Dieses Spielzeug besitzt eine drehbare Plattform, auf der sich ein kleiner Vogel befindet (Abb.2). Der Vogel wird von einer vierteiligen Schale umhüllt, welche durch ein Gummiband zusammengehalten wird. Mit Hilfe einer Schubstange kann die Plattform über Zahnräder in Drehung versetzt werden. Je nachdem, wie groß dabei die Drehfrequenz wird,



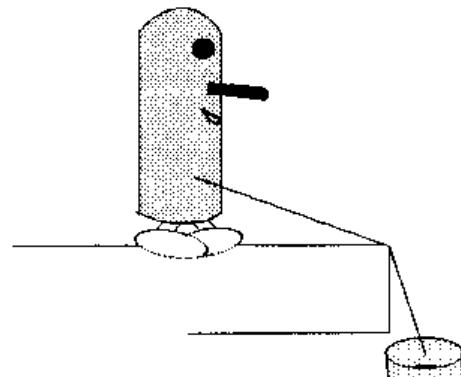
**Abb. 2:** Der Vogel im Ei

werden die vier Schalenteile auseinander klappen und den darin befindlichen Vogel freilegen, oder das Ei wird geschlossen bleiben. Eindrucksvoll ist

hier die Plötzlichkeit, mit der sich - mit einer deutlich spürbaren Rückwirkung auf die Hand - das Ei öffnet und schließlich wieder schließt.

#### Das laufende Männlein

Dieses auch in Form von laufenden Tieren erhältliche Spielzeug ist mittels eines Fadens mit einem

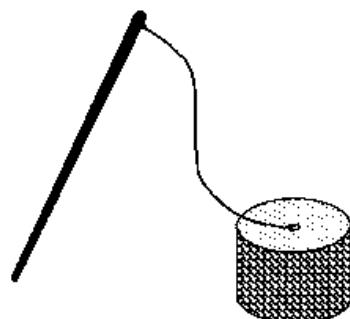


**Abb. 3:** Das laufende Männlein

Gewichtstück verbunden. Läßt man das Gewichtstück über eine Tischkante hängen und gibt dem Männlein einen leichten seitlichen Schubs, so beginnt es, auf wohlgeordnete Weise einen Fuß vor den anderen setzend, zu laufen, bis es die Tischkante erreicht hat (Abb. 3). Das Männlein ist offenbar "klug" genug, sich nicht über die Tischkante hinaus ziehen zu lassen.

#### Die knarrende Dose

Die Papiermembran eines kleinen Papplautsprechers ist über einen Faden mit einem Holzstab verbunden. Der Faden gleitet in einer aus Kunstr-



**Abb. 4:** Die knarrende Dose

harz geformten Rinne an einem Ende des Holzstabs (Abb.4). Hält man den Stab in der Hand und schleudert den Lautsprecher herum, so ertönt ein erstaunlich lautes Knarren. Das Knarren läßt sich jedoch auch dadurch erzeugen, daß man den Laut-

Lautsprecher in einer Hand hält und den Stab bei straff gespanntem Faden zwischen den Fingern der anderen Hand dreht.

### Die Zweistufenflöte

Diese Flöte kommt in verschiedenen Jahrmarktsartikeln vor (z.B. als Mundstück einer durch Pusten ausrollbaren Papierschlange) (Abb.5). Bläst man leicht in die Flöte, so hört man nur ein leichtes Rauschen. Erhöht man die Intensität des Blasens, so ertönt plötzlich ein klarer Ton. Bei weiterer Erhöhung der Blasintensität erhöht sich zunächst die Lautstärke des Tones, bis dieser - wiederum ganz plötzlich - in einen helleren Ton umspringt.

### Der Papierhubschrauber

Läßt man den leicht herzustellenden Papierhub-

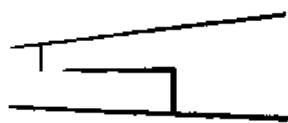


Abb. 5: Die Zweistufenflöte

schrauber [7] aus genügender Höhe fallen, so strebt er zunächst - wie ein Stein - dem Erdboden zu. Nach einer gewissen Fallstrecke erlebt man je-

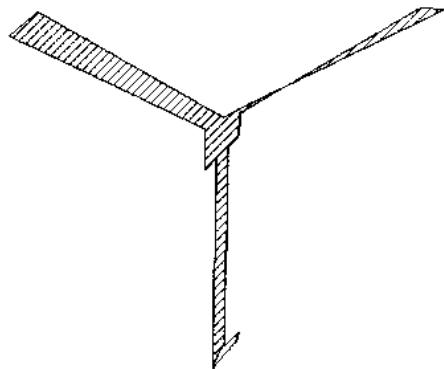


Abb. 6: Der Papierhubschrauber

doch, wie der Hubschrauber plötzlich seine Flügel entfaltet, um sich dann - gemächlich weiterfallend - gleichmäßig horizontal um die eigene Achse zu drehen (Abb.6). Erstaunlich ist vor allen die Tatsache, daß sich die Flügel von selbst öffnen, obwohl sie eigentlich von der Luftströmung zusammengedrückt werden müßten. Erstaunlich ist auch, daß sich stets der gleiche Öffnungswinkel der Flügel und dieselbe Drehgeschwindigkeit einstellen.

### Das Dampfjetboot

Das Herzstück des Bootes besteht aus einem flachen Dampfkessel, von dem zwei dünne Röhren ausgehen, die am Heck des Bootes ins Wasser ragen (Abb.7). Zum Betrieb des Bootes werden Röhren und Kessel mit Wasser gefüllt und letzterer sodann von unten mit einem Kerzenstummel ge-

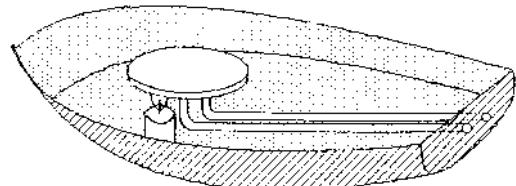


Abb. 7: Das Dampfjetboot

heizt. Nach kurzer Zeit setzt sich das Boot mit einem tuckernden Geräusch in Bewegung. Das Abb.6 Tuckern röhrt von der Bewegung einer dünnen Membran her, durch welche der Kessel abgedeckt ist. Man ist immer wieder verwundert, wie dieses äußerst einfache System ohne bewegliche feste Teile (die Membran ist an sich entbehrlich und dient nur der akustischen Untermalung) periodisch aus Wärme Bewegung zu erzeugen vermag.

### Dissipative Struktur

Worin bestehen die Gemeinsamkeiten der von den Spielzeugen hervorgebrachten Phänomene? Rein phänomenologisch gesehen zeigen sie ein über einen bestimmten Zeitraum gleichbleibendes dynamisches Verhalten, das sich gewissermaßen durch einen kreativen Akt aus dem thermischen Gleichgewicht ausgrenzt und gegen störende Einflüsse der Umwelt stabilisiert. Die "Fähigkeit" zur Initialisierung und Aufrechterhaltung einer solchen "Struktur" besitzen die Spielzeuge - wie noch zu zeigen sein wird - aus sich heraus. Daher wollen wir von Selbstorganisation sprechen, obwohl dieser Begriff strenggenommen nur für Vielteilchensysteme gilt, für die unsere Spielzeuge im oben skizzierten Sinne Modelle sind.

Beim Specht besteht diese Struktur darin, daß er - einmal angestoßen - (zunächst) nicht wieder zur Ruhe kommt, sondern eine ungedämpfte Schwingung ausführt. Damit unterscheidet er sich wesentlich von anderen einfachen realen Schwingern, die - einmal angestoßen - unter allmählicher Abnahme der Amplitude stets wieder zur Ruhe kommen. Man denke nur an einen aus einiger Höhe fallengelassenen Ball oder an eine einmal angestoßene Kinderschaukel: Das durch den Anstoß aus dem thermodynamischen Gleichgewicht her-

ausgetriebene System geht unter Verbrauch (Dissipation) der zugeführten Energie stets wieder ins thermodynamische Gleichgewicht zurück. Zwar läßt sich ein hüpfender Ball durch Prellen mit der Hand und eine Kinderschaukel durch regelmäßiges Anstoßen auch in eine Schwingung mit gleichbleibender Amplitude überführen. Dabei ist jedoch der "Eingriff" von außen nicht zu übersehen: Dem System muß nämlich Energie in passender Menge und zum passenden Zeitpunkt zugeführt werden. Das will gekonnt sein und muß i.a. durch Übung erlernt werden. Nicht so beim Pickspecht. Er benötigt offenbar kein intelligentes Wesen; er organisiert seine Energieversorgung selbst, vorausgesetzt, ihm wird ein entsprechendes Energiereservoir zur Verfügung gestellt, aus dem er schöpfen kann. Dies geschieht durch Hochschieben des Spechts an der Stange. Dadurch wird ihm Höhenenergie angeboten.

Ganz ähnlich verhält es sich bei den anderen Spielzeugen. Bei der knarrenden Dose und bei der Flöte hört man die Dissipation geradezu. Aber auch die Energiezufuhr durch Herumschleudern bzw. Pusten liegt auf der Hand.

### Phasenübergangsähnliches Verhalten

Interessant ist nun, daß das Energieangebot allein nicht genügt. Außerdem muß der Specht erst einmal durch einen genügend starken Anstoß zum "Leben erweckt" werden. Der Papierflieger muß zunächst eine gewisse Strecke wie ein Stein "strukturlos" durchfallen, die Flöte muß genügend stark angeblasen werden, das Dampfjetboot hinreichend vorgeheizt, der Vogel im Ei schnell genug gedreht und das laufende Männlein einen ausreichen starken seitlichen Schubs bekommen, bevor die Struktur ganz plötzlich entsteht. Bei dieser Initialisierung muß eine energetische Schwelle überschritten werden. Es findet gewissermaßen eine Gestaltänderung statt: Aus dem (energetisch) abgeschlossenen im thermischen Gleichgewicht befindlichen System wird ein offenes, von Energie durchflossenes System fernab vom thermischen Gleichgewicht.

Eine solche Strukturänderung verläuft völlig analog wie Phasenübergänge in Vierteilchensystemen und wird daher auch als phasenübergangsähnlich bezeichnet. Charakterisiert man die Gestalt oder Struktur durch einen sog. Gestalt- oder Ordnungsparameter (z.B. Schwingungsamplitude beim Specht, Tonfrequenz bei der Flöte, Öffnungsweite der Schale beim Vogel im Ei) und die äußeren Bedingungen durch einen von außen kontrollierbaren sog. Kontrollparameter (z.B. Drehgeschwindigkeit beim Vogel im Ei, Strömungsgeschwindigkeit beim Papierhubschrauber und bei der Flöte),

so verändert sich der Ordnungsparameter mehr oder weniger plötzlich, wenn der kontinuierlich varierte Kontrollparameter einen bestimmten sog. kritischen Wert überschreitet [8]. Je nachdem wie drastisch die Änderung am kritischen Punkt ausfällt, unterscheidet man den kontinuierlichen und den diskontinuierlichen Phasenübergang (auch Phasenübergang 2. und 1. Art genannt). Beim diskontinuierlichen Phasenübergang macht der Ordnungsparameter einen endlichen Sprung, beim kontinuierlichen Phasenübergang "springt" die erste Ableitung des Ordnungsparameters nach dem Kontrollparameter, eine der spezifischen Wärme bei Vierteilchensystemen entsprechende Funktion. Eine Besonderheit des diskontinuierlichen Phasenübergangs besteht im sog. Hystereseverhalten des Systems. Damit ist gemeint, daß der Phasenübergang bei zwei verschiedenen kritischen Werten des Kontrollparameters erfolgt, wenn man ihn von verschiedenen Seiten aus überschreitet, von hohen oder niedrigen Werten kommend. Beispielsweise erfolgt das Öffnen der Schale des Vogels im Ei bei einer höheren Drehgeschwindigkeit als das Schließen. Das Spielzeug "erinnert" sich gewissermaßen daran, von welcher Seite es sich dem kritischen Punkt nähert. Bei der Flöte haben wir es sogar mit zwei phasenübergangsähnlichen Vorgängen zu tun: kein Ton → tiefer Ton → hoher Ton.

### Energieentwertung als Antrieb

Wir sagten, daß die jeweils aktiven Spielzeuge von Energie durchflossen sind. Die mit sich selbst gleichbleibende Struktur demonstriert auf eindrucksvolle Weise, daß die Energie innerhalb des Systems konstant ist. In der Tat kann man in allen Fällen beobachten, daß die aktiven, schwingenden, laufenden, drehenden, quietschenden Spielzeuge hochwertige Energie aufnehmen und aufgrund ihrer Aktivität anfallende minderwertige Wärme an die Umgebung abgeben. Die in diesem Vorgang zum Ausdruck kommende Energieentwertung (Dissipation) bedingt gewissermaßen den Antrieb des Systems. Deswegen werden die Systeme in Anlehnung an Prigogine [9] auch dissipative Strukturen genannt. Darin daß gerade die Reibung, die Dissipation, also das die Struktur tendenziell Zerstörende den Antrieb, bzw. die Aufrechterhaltung der Struktur bedingt, mag man eine Paradoxie sehen. Sie läßt sich jedoch rein anschaulich durch den Hinweis aufheben, daß hier die durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik beschriebene universelle Tendenz ins Chaos gewissermaßen auf einen nützlichen Umweg gezwungen wird. (Ausführlichere Darlegungen dazu findet man in [10] u. [11]).

## Selbstorganisation

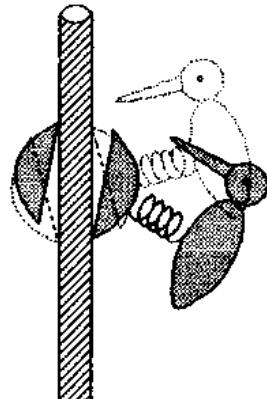
Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Spielzeuge ihre Energieversorgung selbst organisieren. Zu klären bleibt die Frage, woher die Systeme "wissen"

- wieviel Energie sie zu welchem Zeitpunkt aus dem Reservoir der ihnen angebotenen Energie aufnehmen müssen,
- wie Störungen abgebaut werden, sowie
- welche Größe die die Individualität des Systems bestimmenden Variablen (z.B. Frequenz, Öffnungswinkel, Amplitude) annehmen und wie sie immer wieder eingeregelt werden.

Ihre Beantwortung zielt auf die Darstellung des internen Regelmechanismus des Systems ab. Das soll am Beispiel des Spechts etwas ausführlicher dargestellt werden. Dazu ist es hilfreich, den Pickvorgang gewissermaßen in Zeitlupe ablaufen zu lassen: Anstatt den Specht frei schwingen zu lassen, was sich wegen der Schnelligkeit der Bewegung der direkten Beobachtung entzieht, simuliert man die Schwingung, indem man den Specht mit der Hand dem Schwingungsmuster entsprechend führt. Dabei kann folgendes festgestellt werden:

- In Ruhestellung wird die Feder durch die Masse des Spechts nach unten gedrückt. Dadurch wird die Hülse an der Stange verkantet und aufgrund der so bewirkten Haftreibung fixiert.
- Bewegt man den Specht nach oben, so löst sich die Verkantung. Die Haftreibung wird aufgehoben, und der Specht gleitet unter dem Einfluß der Schwerkraft an der Stange hinab. Dieser Vorgang wird jedoch bald wieder unterbrochen, weil die weitere Bewegung des Spechts nach oben zu einer erneuten Verkantung führt. Dabei wird gleichzeitig die Feder gespannt, eine entsprechende rücktreibende Kraft aufgebaut und schließlich eine Bewegungsumkehr erzwungen.
- Der nun nach unten schwingende Specht löst wieder die Verkantung, beginnt abermals zu rutschen, bis eine erneute Verkantung das Rutschen unterbricht. Der Vorgang kann von neuem beginnen.

Nach jedem Wechsel zwischen Gleiten und Haften erfolgt eine Energieübertragung auf den schwingenden Specht: Jedesmal, wenn eine Verkantung einsetzt, wird die Hülse abgebremst. Hfolge der Trägheit wirkt auf den beweglich an der Hülse angebrachten Specht eine ähnliche Kraft, wie man sie beispielsweise in einem plötzlich bremsenden Bus stehend erleben kann: Der Specht erhält eine zusätzliche Beschleunigung, aufgrund derer er einen Teil der Energie aufzunehmen vermag, die



**Abb. 8** Schema zur Erläuterung des Haft- und Gleitmechanismus beim pickenden Specht

durch das Gleiten verfügbar wurde. Damit kann die während der Schwingung verbrauchte (dissipierte) Energie, die sich ansonsten in einer Abnahme der Amplitude bemerkbar machen würde, wieder ersetzt werden.

Daß der Energieersatz gerade im passenden Moment erfolgt, kann man sich folgendermaßen klarmachen: Bei der "oberen" Verkantung (siehe Abb. 8) erfährt der nach oben schwingende Specht eine Beschleunigung nach oben; und bei der "unteren" Verkantung erfährt der nach unten schwingende Specht eine Beschleunigung nach unten. Da die "obere" Verkantung - wie wir uns oben klargemacht haben - als eine Folge der Schwingung nach oben und die "untere" Verkantung als eine Folge der Schwingung nach unten angesehen werden kann, wird der Zeitpunkt der Energieübertragung durch die Schwingung selbst bestimmt. Damit ist aber auch bereits erklärt, wieso der Energieübertrag vom Vorgang des Gleitens auf den Vorgang des Schwingens gerade passend ist, d.h. genau die während einer Schwingungsperiode verbrauchte Energie ausgeglichen wird: Nimmt nämlich die Amplitude infolge von Reibung (Energieverlust) ab, so verlängert sich die Gleitzeit der Hülse. Denn eine kleinere Amplitude bedingt, daß sich die Phase der Schwingungsrichtungsumkehr, (in der die Geschwindigkeit besonders klein ist und die daher verhältnismäßig lange dauert), besonders stark mit der Phase des Gleitens überlappt. Eine längere Gleitzeit hat jedoch eine größere Beschleunigung und damit bei der anschließenden Verkantung eine größere Energieübertragung auf den Schwingen sowie eine entsprechende Vergrößerung der Amplitude zur Folge. Eine Zunahme der Amplitude über den stationären Wert hinaus bewirkt nun nach demselben Schema eine Verkürzung der Gleitzeit, was wiederum eine Verkleinerung der Energieübertragung und eine Abnahme der Amplitude bedingt usw.

Für die anderen Systeme lassen sich ähnlich einfache Regelvorgänge entdecken. In jedem Fall verdankt sich die bemerkenswerte dynamische Stabilität der Struktur einem subtilen Wechselspiel zwischen Energiedissipation und Energieaufnahme.

## Rückkopplung

Ein solches Regelverhalten der Spielzeuge ist durch eine Sequenz von Vorgängen gekennzeichnet, die gewissermaßen im Kreise laufen. Sie seien für einige der Spielzeuge kurz skizziert:

Pickspecht: Vergrößerung der Gleitzeit → Vergrößerung der Beschleunigung → Vergrößerung der Energieübertragung auf den Schwinger → Vergrößerung der Schwingungsamplitude → Verkleinerung der Gleitzeit → Verkleinerung der Beschleunigung → Verkleinerung der Energieübertragung auf den Schwinger → Verkleinerung der Amplitude ... Insgesamt gilt also: Vergrößerung der Amplitude → Verkleinerung der Amplitude.

Dampfjetboot: Entstehung von Dampf und Aufbau eines Dampfdrucks → Austreiben von Wasser aus den Röhren → Kondensation von Dampf an den kalten Wänden der Röhren → Dampfdruckerniedrigung in den Röhren und im Kessel → Einsaugen von Wasser und erneuter Dampfdruckaufbau ... Insgesamt gilt also: Erhöhung des Dampfdrucks → Erniedrigung des Dampfdrucks.

Papierhubschrauber: Vergrößerung der Sinkgeschwindigkeit → Vergrößerung der Drehfrequenz → Vergrößerung des Öffnungswinkels → Verkleinerung der Sinkgeschwindigkeit → Verkleinerung der Drehfrequenz → Verkleinerung des Öffnungswinkels → Vergrößerung der Sinkgeschwindigkeit ... Insgesamt gilt: Vergrößerung der Sinkgeschwindigkeit → Verkleinerung der Sinkgeschwindigkeit.

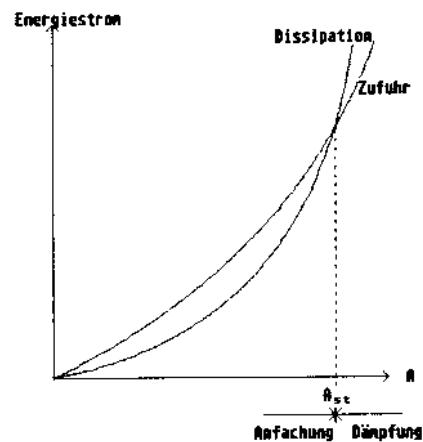
Laufende Männlein: Vergrößerung der seitlichen Auslenkung → Vergrößerung der Schrittweite → Verkleinerung der Schrittzahl → Verkleinerung der Laufgeschwindigkeit → Verkleinerung der seitlichen Auslenkung → Verkleinerung der Schrittweite ... Kurz: Vergrößerung der Schrittweite → Verkleinerung der Schrittweite.

Logisch gesehen beschreiben solche Sequenzen einen circulus vitiosus. Als Kausalbeziehung sind sie jedoch völlig in Ordnung. Sie beschreiben gerade die für die Selbstorganisation konstitutive Rückkopplung: Das System vermag aufgrund der Rückkopplung ständig seine internen Verhaltensmöglichkeiten abzutasten und stets wieder mit den herrschenden Randbedingungen in Einklang zu bringen. Damit erklärt sich auch die Fähigkeit ei-

nes sich selbst organisierenden Systems, äußere Störungen abzubauen, die zu einer Vergrößerung oder Verkleinerung einer Systemgröße führen. Denn die Rückkopplung spürt Störungen aufgrund des oben erörterten Schemas sofort auf und baut sie momentan wieder ab. Lediglich Störungen, die so groß sind, daß eine der Systemgrößen unter den für die Entstehung der Struktur entscheidenden (kritischen) Wert (siehe oben) gedrückt wird, unterbrechen den Rückkopplungskreis und führen zum "Absterben" der Struktur.

## Nichtlinearität

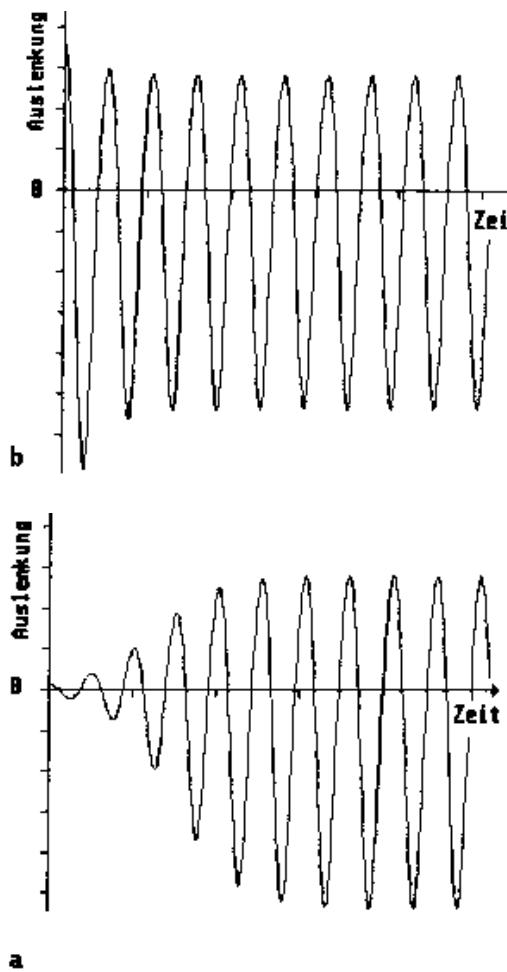
Damit ein System überhaupt in der Lage ist, einen für die Selbstorganisation entscheidenden Rückkopplungsmechanismus aufzubauen, muß es über zwei konkurrierende Größen verfügen, aufgrund derer die wesentlichen Systemvariablen sowohl vergrößert als auch verkleinert werden können. Als solche Größen können Energiedissipation und Energieaufnahme angesehen werden. Indessen reicht ihr bloßes Vorhandensein nicht aus. Sie müssen darüberhinaus in der Lage sein, sich gegenseitig zu begrenzen. Anschaulich gesprochen müssen sie sich gegenseitig überholen können. Ein Abb.9 solches Verhalten ist nur möglich, wenn im Falle des Spechtes beispielsweise die Dissipation stärker mit der Amplitude zunimmt als die Energieaufnahme. Mathematisch gesehen hat man es mit einer Nichtlinearität zu tun, weil die die Dynamik eines sich selbst organisierenden Systems beschreibende Bewegungsgleichung mindestens eine nichtlineare, also z.B. quadratische Variable enthalten muß. So läßt sich beispielsweise das Verhalten des Dampfjetbootes durch die folgende Differentialgleichung beschreiben:



**Abb. 9** Die gemittelten Energieströme aufgrund der Energiedissipation und Energiezufuhr als Funktion der Amplitude beim Dampfjetboot. Durch das Gegeneinanderwirken von Anfachung und Dämpfung wird die stationäre Amplitude  $A_{st}$  eingeregelt (willkürliche Einheiten)

$$\ddot{x} + w^2 x - g \dot{x} + d \dot{x} \cdot q(x) = 0$$

(Dabei sind wir davon ausgegangen, daß das Wasser in den Röhren des Bootes eine erzwungene (gedämpfte) Schwingung vollführt ( $\omega$  ist die Eigenfrequenz der schwingenden Wassersäule). Die Dämpfung enthält neben dem üblichen Term proportional zur Geschwindigkeit  $\beta \dot{x}/dt$  einen nur während der Halbperiode des Wasserausstoßens ( $T(\dot{x}/dt)=1$  für  $\dot{x}/dt > 0$ , sonst 0) wirkenden nichtlinearen Term proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit  $\delta(\dot{x}/dt)^2 \theta(\dot{x}/dt)$ . Die kontinuierliche Dampferzeugung wird durch einen Antriebsterm proportional zur Geschwindigkeit  $a_x$  berücksichtigt,



**Abb. 10:** Einregelung der Schwingung der Wassersäule beim Dampfjetboot auf stationäre Amplitude. a) bei kleiner, b) bei großer Anfangsauslenkung

tigt, der mit  $\beta \dot{x}/dt$  zu  $\gamma \dot{x}/dt = (\alpha - \beta) \dot{x}/dt$  zusammengezogen wurde).

Jede noch so kleine Auslenkung der Wassersäule schaukelt sich zu einer Schwingung konstanter Amplitude auf (Abb. 10a). Selbst wenn die Anfangsauslenkung größer als die stationäre Ampli-

tude wäre, würde sie schnell auf diese zurückgeregelt werden (Abb. 10b). Schematisch lässt sich das Regelverhalten an Abb. 9 nachvollziehen. Dort ist für das Beispiel des Dampfjetboots - die Energie-dissipation und die Energieaufnahme (genauer: im Mittel dissipierter und aufgenommener Energie-strom) als Funktion der Amplitude aufgetragen. Diese Größen lassen sich formal aus der obigen Bewegungsgleichung gewinnen, indem man durch Multiplikation mit  $dx/dt$  und Integration über die Zeit zunächst eine Energiebilanzgleichung erhält. Der darin enthaltene Dissipations- und Anre-gungsterm wird anschließend jeweils unter der näherungsweisen Voraussetzung, daß die Schwingung harmonisch ist, über eine Periode gemittelt und kann dann als Funktion der Amplitude aufgetragen werden, wie in Abb. 9 geschehen. Man sieht sofort: Eine Zunahme der Amplitude über den stationären Wert hinaus bedingt ein Überwiegen der Dissipation über der Energieauf-nahme. Dies geht aber zwangsläufig mit einer Ver-kleinerung der Amplitude einher. Eine Verklei-nung der Amplitude unter den stationären Wert führt andererseits jedoch wegen der stärkeren Abnahme der dissipierten Energie als der aufge-nommenen Energie wieder zu einer Vergrößerung der Amplitude, usw. Auf diese Weise sorgt die Nichtlinearität dafür, daß Abweichungen vom stationären Wert der Systemvariablen stets diese Abweichungen aufhebende Tendenzen hervorruft und die strukturelle Stabilität des Systems be-dingt.

### Systemverhalten im Zustandsraum

Neben energetischen Betrachtungen spielen geo-metrische Untersuchungen des komplexen Systemverhaltens eine wichtige Rolle. Geometrisie-rung bedeutet immer auch größere Anschaulich-keit, was im Hinblick auf den größeren Schwierig-keitsgrad solcher Systeme nur begrüßt werden kann. Allerdings spielt sich die Geometrie im sog. Zustandsraum ab, der in der herkömmlichen Phy-sik weitgehend unbekannt ist. Obwohl die Zu-standsraumbetrachtung für die noch relativ einfachen Spielzeuge keine wesentlichen neuen Er-kennnisse bringt, kann sie als einfache Vorberei-tung für die Betrachtung von noch komplexeren Systemen, die auch chaotisches Verhalten zeigen können, angesehen werden.

Die Verhaltensmöglichkeiten eines Systems, die Dynamik, wird beschrieben durch Bewegungsgleichungen, Differenzen- oder Differentialgleichungen. Kennt man den Anfangszustand, d.h. die Werte aller unabhängigen Variablen zu einem be-stimmten Zeitpunkt, so lässt sich damit die zeitliche Entwicklung des Systems, also jeder zukünftige

Zustand voraussagen. Repräsentiert man einen Zustand durch einen Punkt in einem von den Variablen aufgespannten sog. Zustandsraum, so stellt sich das zeitliche Verhalten des Systems durch (kontinuierliche oder diskrete) Punktfolgen, sog. Trajektorien im Zustandsraum dar. Ziel der physikalischen Untersuchungen ist es, einen möglichst umfassenden Überblick über den Verlauf der Gesamtheit der Trajektorien im Zustandsraum zu erhalten.

Die Struktur unserer Spielzeuge wird sich dann im (zeitlichen) Grenzverhalten solcher Trajektorien widerspiegeln. In der Tat entwickeln sich die Trajektorien zu räumlich begrenzten, zeitlich konstanten für das jeweilige System charakteristischen Figuren, sog. Attraktoren.

Ein solcher Zustandsraum lässt sich beispielsweise für das Dampfjetboot aufspannen, wenn man die Geschwindigkeit  $dx/dt$  der Flüssigkeitssäule gegen die Auslenkung  $x$  aufträgt. Wir haben dies in Abb. 11 für drei verschiedene Fälle getan: In Abb. 11a wurde der Fall eines zu kleinen Antriebs dargestellt. Es zeigt sich, daß jede Schwingung zur Ruhe kommt, was sich im Zustandsraum (in diesem Fall auch Phasenraum genannt) durch eine sich auf einen Punkt zusammenziehende Spirale ausdrückt. Ein solcher Punktattraktor beschreibt also das Zur-Ruhe-Kommen eines dissipativen Systems. In Abb. 11b und c wurden die Daten der in Abb. 9 dargestellten Schwingungen aufgetragen. In beiden Fällen läuft die Trajektorie aus verschiedenen Einzugsbereichen kommend schließlich in sich selbst zurück; sie geht in einen sog. Grenzzyklus über.

Punkt und Grenzzyklus sind die einfachsten Attraktoren, die das stationäre Grenzverhalten dissipativer Systeme beschreiben. Komplizierteres Systemverhalten führt zu entsprechend komplizierteren Attraktoren. Ein solches Verhalten ist aber nur in Systemen mit einer etwas reichhaltigeren Dynamik möglich, was in einer entsprechend höheren Dimension der zugehörigen Zustandsräume zum Ausdruck kommt. Wie sich nämlich unmittelbar aus der Geometrie im Zustandsraum ablesen lässt, würde jede topologisch kompliziertere Figur eines Attraktors im Zweidimensionalen zu Überschneidungen der Trajektorien führen, wodurch die Eindeutigkeit der Bewegungsgleichung verletzt wäre. Deshalb tritt beispielsweise chaotisches Verhalten erst in Systemen auf, die einen mindestens dreidimensionalen Zustandsraum besitzen.

## Modellverhalten der Spielzeuge

Es wurde bereits eingangs darauf hingewiesen, daß die Spielzeuge nur jene Aspekte der Selbstor-

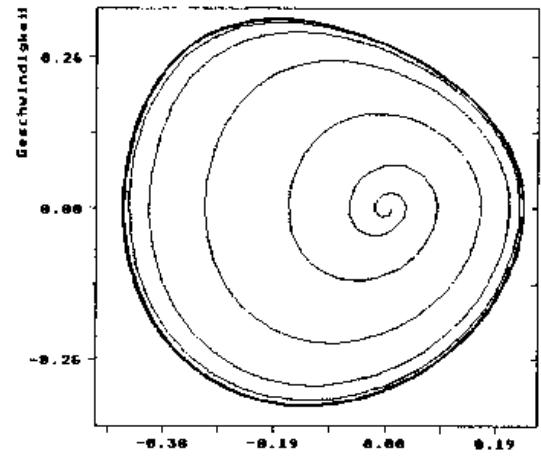


Abb. 11a

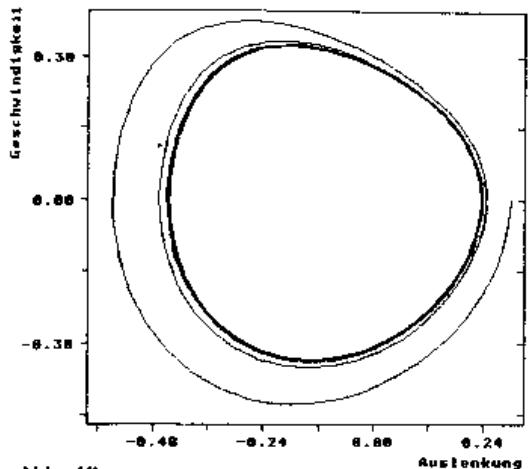


Abb. 11b

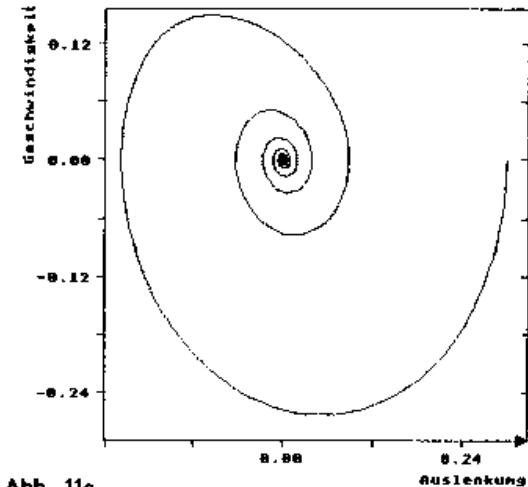


Abb. 11c

Abb. 11: Zustandsraumdarstellung der Geschwindigkeit als Funktion der Auslenkung a) ohne Antrieb (die Schwingung kommt zur Ruhe), b) und c) mit Antrieb: b) bei kleiner Auslenkung und c) bei großer Auslenkung (die Schwingung stellt sich auf einem stationären Grenzzyklus ein)

ganisation von Vielteilchensystemen zu modellieren in der Lage sind, die sich bei einer Beschränkung auf eine makroskopisch auffällige Verhaltensweise ergeben. Nicht erörtert werden konnten

jene Probleme, die mit der Frage zusammenhängen, wie beispielsweise die zahlreichen, teilweise widerstreitenden Bewegungen realer komplexer Systeme gewissermaßen ausgehungert werden bis schließlich das Verhalten von sehr vielen Freiheitsgraden auf wenige reduziert werden und welche Rolle die Dissipation sowie Fluktuationen dabei spielen.

Als Kernstück der Selbstorganisation haben wir die zirkuläre Kausalsequenz erkannt, in der die Rückkopplung zum Ausdruck kommt. Ein solcher Zirkel ist daher nicht vitiös sondern virtuos, kreativ, indem er weit über das vorliegende elementare Anwendungsbeispiel hinausweist und letztlich "einen Schlüssel zum Verständnis von natürlichen Systemen ... und ihrer reichhaltigen Formenwelt" darstellt [12]. So gesehen haben wir es hier nicht nur mit interessanten Spielzeugen zu tun, sondern mit einfachen Modellen zur physikalischen Erklärung vieler Erscheinungen der Selbstorganisation im Bereich der natürlichen Umwelt. Wenn man sich der extrem reduktionistischen Sicht eingedenkt bleibt, die mit dieser Modellierung verbunden ist, so ließe sich das dynamische Systemverhalten der einzelnen Spielzeuge beispielsweise mit den Lebensäußerungen von Lebewesen vergleichen. Hier wie dort müssen diese erst einmal durch eine Art Phasenübergang aus dem thermodynamischen Gleichgewicht hervorgebracht und sodann bis zum Tode durch Dissipation (Aufnahme hochwertiger und Abgabe minderwertiger Energie) aufrechterhalten und gegen äußere Störungen stabilisiert werden.

## Literatur

- [1] C.F.v. Weizsäcker: Die Tragweite der Wissenschaft. Stuttgart: Hirzel 1966, S.107.
- [2] G. Nicolis, I.Prigogine: Die Erforschung des Komplexen. München: Piper 1987.
- [3] H.J. Schlichting: Learning Mechanics with Toys. In: P. Lijnse (ed.): The many faces of teaching and learning mechanics. Utrecht 1985.
- [4] L.P. Kadanoff: Roads to chaos. Physics Today 12,46 (1983).
- [5] E. Lorenz: Deterministic Nonperiodic Flow. Journal of Atmospheric Sciences 20, 448 (1963).
- [6] H.J. Schlichting, U. Backhaus, H.G. Küpker: Ein unberechenbares Wasserrad. Erscheint in: W. Kuhn (Hrsg.): Vorträge der Frühjahrstagung der DPG, Bonn 1989.
- [7] B. Rodewald, H.J. Schlichting: Prinzipien der Synergetik - erarbeitet an Spielzeugen.
- Praxis der Naturwissenschaften-Physik 35/4, 33 (1986).
- [8] H.J. Schlichting, B. Rodewald: Zum kritischen Verhalten eines invertierten Pendels. Physik und Didaktik 15/1, 38 (1987).
- [9] I. Prigogine, I. Stengers: Dialog mit der Natur. München: Piper 1983, S.152.
- [10] H.J. Schlichting: Energie und Energieentwertung in Naturwissenschaft und Umwelt. Heidelberg: Quelle & Meyer 1983.
- [11] H.J. Schlichting, U. Backhaus: Energieentwertung und der Antrieb von Vorgängen. NiU-PC 35/24, 15 (1987).
- [12] F. Varela: Der kreative Zirkel. In: Watzlawick (Hrsg.): Die erfundene Wirklichkeit. München: Piper 1984.
- [13] U. Backhaus, H.J. Schlichting: Auf der Suche nach Ordnung im Chaos. Erscheint in MNU.