

Prinzipien der Synergetik erarbeitet an Spielzeugen

Bernd Rodewald, Hans Joachim Schlichting

1. Spielzeuge als Unterrichtsobjekte

Es ist die Absicht dieses Aufsatzes, anhand von Spielzeugen deutlich zu machen, daß dem Schüler vertraute Gegenstände durchaus geeignet sind, wesentliche Begriffe der Synergetik zu erarbeiten und in die für diese Disziplin typische „ganzheitliche“ Betrachtungsweise einzuführen, welche als ein notwendiges Korrektiv für die traditionelle Sichtweise des üblichen Physikunterrichts angesehen werden kann (siehe hierzu [1]). An Spielzeugen sind die charakteristischen Phänomene der Synergetik direkt anschaulich, zum Teil hörbar und greifbar - und damit vielleicht auch anschaulicher und begreifbarer als bei den Standardbeispielen der Fachwissenschaftler. Lediglich das Versklavungsprinzip als ein kooperatives Phänomen in einem Vielteilchensystem findet hier nicht ohne weiteres seine Entsprechung, da Spielzeuge makroskopische Systeme mit nur wenigen Freiheitsgraden darstellen.

Wir können die weiter unten angesprochenen Spielzeuge hier nur kurz skizzieren und verweisen zur Vertiefung auf die angegebene Literatur. Unsere Auswahl ist dadurch gekennzeichnet, daß die Spielzeuge wegen ihres geringen Preises in Klassenstärke angeschafft werden können, daß sie leicht zu beschaffen und im Hinblick auf Experimente auch leicht handhabbar, manipulierbar und evtl. variierbar sind. Die diesen Spielzeugen zum Teil innewohnende physikalische Komplexität tritt dadurch in den Hintergrund, daß zur Erfassung der synergetischen Phänomene nur qualitative Aussagen erforderlich sind. Entscheidend sind also z. B. Monotonie, Stetigkeit... etc. einer Funktion, nicht jedoch deren absolute Werte.

Dadurch wird der experimentelle Aufwand erheblich reduziert, und bei der theoretischen Beschreibung erspart man sich eine vorschnelle Idealisierung oder zu künstliche Modellierung der zu untersuchenden Objekte.

In den folgenden Ausführungen werden wir zunächst die Spielzeuge mit ihren möglichen dynamischen Zuständen vorstellen und die Begriffe zur Kennzeichnung der Zustandseigenschaften einführen. In dem darauffolgenden Abschnitt sollen dann die Phänomene bei Strukturänderungen betrachtet werden.

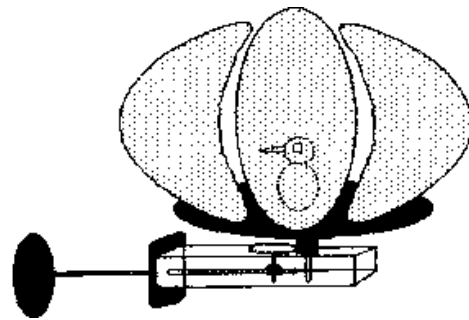
2. Die Spielzeuge und die Charakteristika ihrer dynamischen Zustände

2.1 Vorstellung der Spielzeuge und ihrer möglichen "Gestalten"

Den Vielteilchenzuständen der Synergetik, die zu einer geordneten makroskopischen Struktur führen, entsprechen bestimmte Formen oder Gestalten der Spielzeuge. Es liegt daher nahe, bei ihnen vom Gestaltparameter anstelle vom Ordnungsparameter zu sprechen. Wir geben zunächst einen Überblick über die von uns betrachteten Spielzeuge und deren Gestaltparameter

2.1.1 Der Vogel im Ei (Abb. 1a; [2], [3]):

Dieses Spielzeug besitzt eine drehbare Plattform, auf der sich ein kleiner Vogel befindet. Dieser Vogel wird von einer vierteiligen Schale umhüllt, welche ein Gummiband zusammenhält. Mit Hilfe einer Schubstange kann die Plattform über Zahnräder in



Rotation versetzt werden. Je nach dem wie groß dabei die Drehfrequenz wird, werden die vier Schalen Teile auseinanderklappen und den Vogel freilegen oder das Ei wird geschlossen bleiben. Die möglichen Bewegungszustände des Spielzeugs äußern sich also in unterschiedlichen Gestalten (geschlossen, offen) des Ei's. Man könnte daher z. B. den Durchmesser des Öffnungskreises der Schalen Teile als Gestaltparameter wählen, dessen Wert von der Drehfrequenz als Kontrollparameter bestimmt wird.

2.1.2 Der pickende Specht (Abb. 1b; [4]):

Ein Holzspecht ist über eine Feder an einer kleinen Hülse befestigt, welche über eine senkrecht stehen-

de Stange geführt wird. Gibt man dem Specht einen kleinen Schubs, so gerät er in Schwingung, welche entweder wieder abklingt oder aber in eine regelmäßige pickende Bewegung mündet, wenn der Anstoß hinreichend groß war. Im letzteren Fall bewegt sich die Hülse unter einem ständigen Wechsel von Gleiten und Haften (durch "Verkanten") ruckartig an der Stange herab.

Gestaltparameter kann hier die Vorwärtsgeschwindigkeit oder die Amplitude der quer zur Vorwärtsbewegung auftretenden Schwingung sein, welche den „wackelnden Gang“ verursacht.

2.1.4 Der Papierhubschrauber (Abb. 1d; [6]):

Sein Bau ist in [6] und [7] beschrieben. Läßt man den Papierhubschrauber aus einer beliebigen Höhe

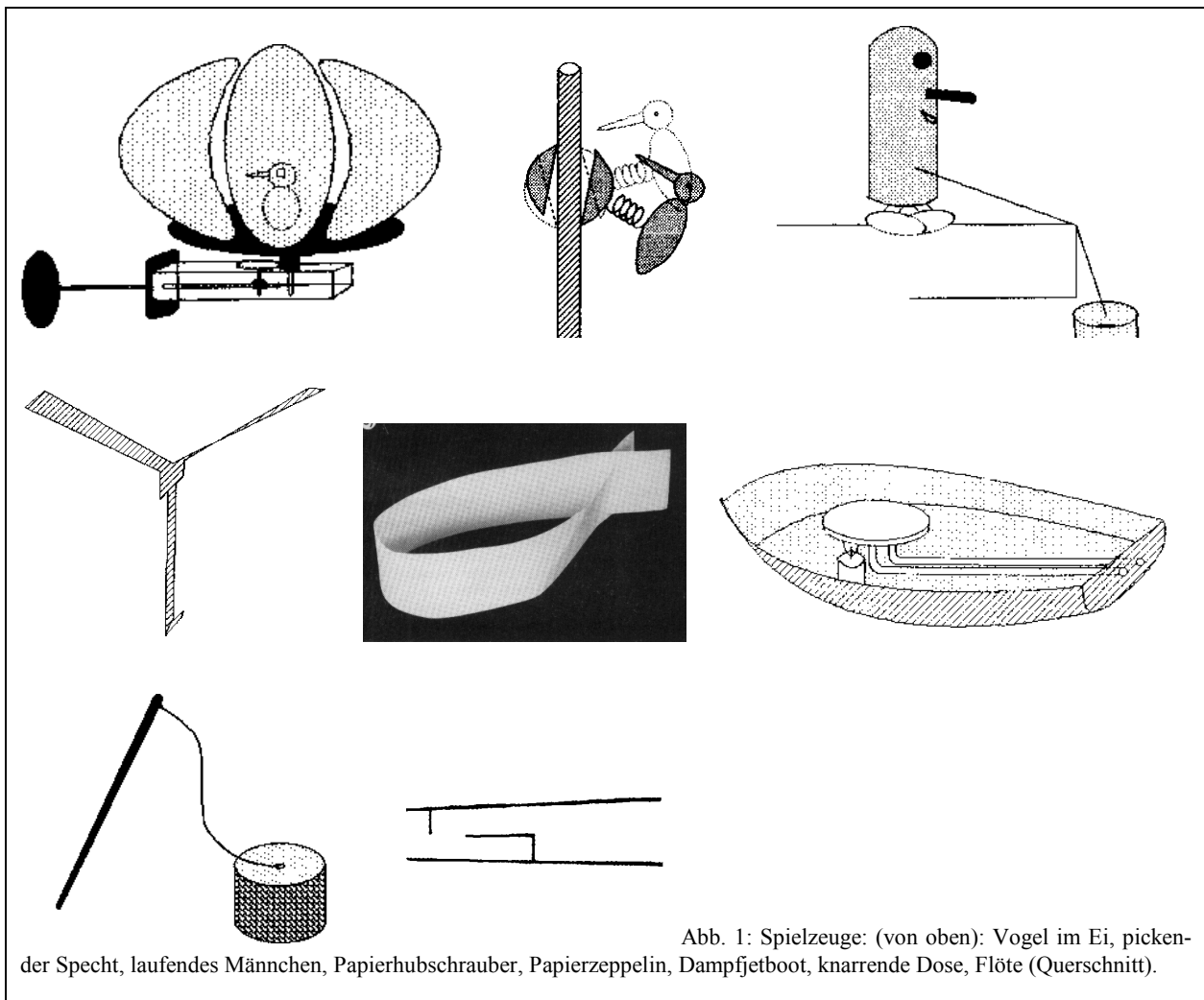


Abb. 1: Spielzeuge: (von oben): Vogel im Ei, pickender Specht, laufendes Männchen, Papierhubschrauber, Papierzeppelin, Dampfjetboot, knarrende Dose, Flöte (Querschnitt).

Dieses Spielzeug besitzt also die Ruhe und die periodische Bewegung als mögliche Zustände, welche sich durch die stationäre Schwingungsamplitude als Gestaltparameter unterscheiden lassen.

2.1.3 Die wandernden Männchen:

Dieses Spielzeug gibt es auch in Form eines laufenden Elefanten, wackelnden Hundes u. ä. (Anleitung zum Selbstbau in [5]). Die Männchen werden von einem an der Tischkante herunterhängenden Gewicht gezogen. Dabei bewegen sie sich mit pendelnden Beinbewegungen vorwärts - allerdings nur, wenn sie zuvor einen hinreichend großen, seitlichen Anstoß bekommen haben.

fallen, so gerät er von selbst in eine Drehbewegung, zu welcher ein ganz bestimmter Öffnungswinkel zwischen den Flügeln gehört.

Der Papierhubschrauber besitzt damit eine zeitliche und räumliche Gestalt, welche sich durch die Angabe der drei Parameter Sinkgeschwindigkeit, Drehfrequenz und Öffnungswinkel charakterisieren läßt. Diese drei Größen definieren den Gestaltparameter, welcher bei diesem Spielzeug also durch ein Tripel von Beobachtungsdaten gegeben ist.

2.1.5 Der Papierzeppelin:

Dieses dürfte eines der einfachsten Papierflieger sein. Er besteht aus einem Streifen Papier, welcher wie in Abb. 2 an beiden Enden eingeschnitten wird,

so daß der Streifen hier zusammengesteckt werden kann (nach [8]). Zum Flug wird der Zeppelin wie der Papierhubschrauber einfach fallengelassen. Er geht rotierend mit seitlicher Abdrift zu Boden.

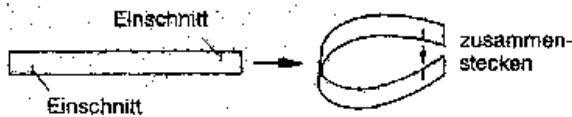


Abb. 2^: Bau des Papierzeppelin

Auch hier ist der Gestaltparameter durch ein Tripel von Kenngrößen gegeben: durch die Sinkgeschwindigkeit, die Driftgeschwindigkeit und die Drehfrequenz.

2.1.6 Das Dampf-Jet-Boot ([9], [10]):

Das Herzstück des Bootes besteht aus einem flachen Dampfkessel, von dem zwei dünne Röhren ausgehen und am Heck des Bootes ins Wasser ragen. Zum Betrieb des Bootes werden Röhren und Kessel mit Wasser gefüllt und letzterer sodann von unten mit einer Kerze oder etwas Esbit geheizt. Nach kurzer Zeit setzt sich das Boot mit einem tuckernenden Geräusch in Bewegung. Das Tuckern rührt von der Bewegung einer dünnen Membran her, welche die Oberseite des Kessels bildet. Diese Bewegung ist Indiz einer Schwingung der Wassersäule in den Röhren, mit deren Frequenz Wasser an den Rohrenden ausgestoßen und angesaugt wird. Damit wird auch für dieses Beispiel die Amplitude der Schwingung zu einem möglichen Gestaltparameter, dessen Größe durch die zugeführte Wärmemenge und die Wärmeverluste kontrolliert wird.

2.1.7 Die knarrende Dose:

Ein als Dose geformter Resonanzkörper aus Pappe ist über einen Faden mit einem Holzstab verbunden. Dieser Faden ist am Stab als relativ lockere Schlinge geknüpft, so daß man die Dose mit dem Faden um den Stab schleudern kann. Dabei entsteht ein knarrendes Geräusch, wie man es in ähnlicher Form auch z. B. von Holztüren kennt. Das gleiche passiert, wenn man die Dose hält, den Faden strafft und dafür den Holzstab in der Schlinge dreht.

Bei dieser letzten Form der Tonerzeugung zeigt sich insbesondere, daß die Reibung zwischen dem schlingenförmigen Faden und dem Stab hinreichend groß sein muß, damit überhaupt ein Ton entstehen kann. Damit wird dessen Lautstärke bzw. die Amplitude der tonerzeugenden Fadenschwingung zu einem Gestaltparameter. Die Anregung dieser Schwingung im Faden durch den drehenden Stab erfolgt durch den Mechanismus der sog. trockenen Reibung [11]; siehe auch weiter unten).

2.1.8 Die Flöte ([12]):

Diese Flöte ist ein in verschiedener Ausstattung vorkommender Jahrmarktsartikel (z. B. als sich ein- und ausrollende Schlange), welche einen sog. Schneidenton erzeugt. Dieser entsteht dadurch, daß Luft aus einer Öffnung auf eine scharfe Kante geführt wird. Bei dieser Flöte sind verschiedene Tonhöhen möglich. In Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit der Luft als Kontrollparameter entsteht entweder kein Ton, ein tiefer Ton oder ein hoher Ton. Die Tonfrequenz stellt damit einen geeigneten Gestaltparameter dar.

Unsere hiermit abgeschlossene Übersicht über die Spielzeuge legt ohne nähere Untersuchungen und Überlegungen bereits erste synergetische Begriffsbildungen nahe:

Die hier angesprochenen Spielzeuge realisieren eine oder mehrere dynamische Strukturen. Diese können durch einen (oder mehrere) Gestaltparameter erfaßt werden. Sein Wert hängt i. a. von Kontrollparametern ab, durch welche die Einwirkung der "Umwelt" auf das System erfaßt wird.

In den weiteren Überlegungen zur Synergetik werden wir exemplarisch vorgehen und damit bei den verschiedenen zu diskutierenden Aspekten immer nur auf eine kleine, jedoch wechselnde Auswahl der vorgestellten Spielzeuge zurückgreifen. Entsprechende Überlegungen zu den meisten anderen Spielzeugen findet man in der angegebenen Literatur.

2.2 Fließgleichgewicht und dissipative Struktur

Wir betrachten die stationären Zustände der Spielzeuge - Zustände also, in denen die Gestaltparameterwerte konstant bleiben. In dieser Situation muß z. B. dem "Vogel im Ei" ständig Rotationsenergie zugeführt werden, um die Reibungsverluste auszugleichen, durch die sich der Radius des Öffnungskreises sonst verringern würde. Die Energiezufuhr ermöglicht hier also erst die Aufrechterhaltung der dynamischen Struktur. Diese ist dann stationär, wenn genauso viel Energie zugeführt wird, wie gleichzeitig durch Reibungsmechanismen als Wärme wieder abgegeben wird.

Ähnlich wird bei den "wandernden Männchen" im stationären Zustand über das absinkende Gewichtstück ständig potentielle Energie zugeführt und letztlich als Reibungswärme wieder abgegeben; und beim Dampf-Jet-Boot strömt Wärme bei hoher Temperatur in das System hinein und Wärme bei niedriger Temperatur wieder heraus. Abb. 3 stellt diese Energieflüsse schematisch dar. Die Quantität der pro Zeiteinheit durch das System fließenden Energie bleibt konstant, ihre Qualität jedoch wird

verändert: Hochwertige Energie wird zu minderwertiger Energie „entwertet“ (Dissipation).

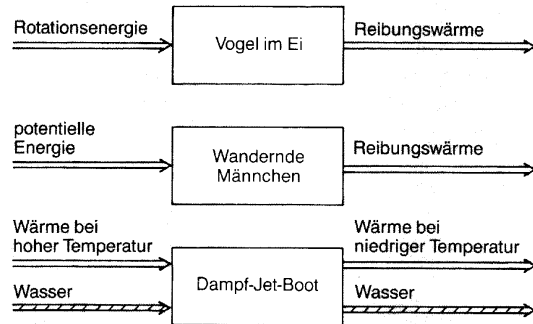


Abb. 3: Beispiele für Fließgleichgewichtsstrukturen

Das Boot ist darüber hinaus nicht nur von Energie, sondern auch von Materie durchflossen, da bei diesem eine bestimmte Wassermenge ständig ausgestoßen und wieder angesaugt wird. Ein solches System wird daher in der Thermodynamik als offen bezeichnet. In der Synergetik wird der Begriff des „offenen Systems“ jedoch oft auch bereits dann benutzt, wenn nur ein Energiedurchfluß vorliegt.

Wir fassen zusammen:

Systeme mit dynamischen Strukturen sind notwendigerweise offen, denn diese werden durch Zufuhr von Energie und evtl. Materie erst aufgebaut. Im stationären Zustand liegt ein Fließgleichgewicht vor, bei dem sämtliche zugeführte Energie auch wieder dissipiert wird. Die dabei realisierten Zustände werden daher auch als dissipative Strukturen bezeichnet.

2.3 Selbstorganisation und Stabilisation durch Rückkopplungen

Bemerkenswert an den Spielzeugen ist, daß sich ihre dissipativen Strukturen von selbst einstellen und stabilisieren. Wir erläutern diese Tatsache am Beispiel des „pickenden Spechts“, dessen prinzipieller Aufbau in Abb. 4 wiedergegeben ist.

Nehmen wir an, der Specht schwingt mit einer hinreichend großen Amplitude um seine Ruhelage (z. B. nach einem kurzzeitigen Anstoß), so daß er in den Bereich kommt, in dem die Hülse an der Stange herabgleiten kann. Ist die Schwingung kräftig genug, so wird die Verweilzeit in gleitender Position (Position ① in Abb. 4) so groß sein, daß die in dieser Zeit gewonnene potentielle Energie die pro Periode auftretenden Reibungsverluste überkompensieren kann. Dann wächst die Amplitude der Schwingung an, was zur Folge hat, daß in der nächsten Periode die Zeit des Gleitens und demzufolge die Zufuhr weiterer potentieller Energie noch

größer wird, was wiederum die Amplitude erhöht usw.

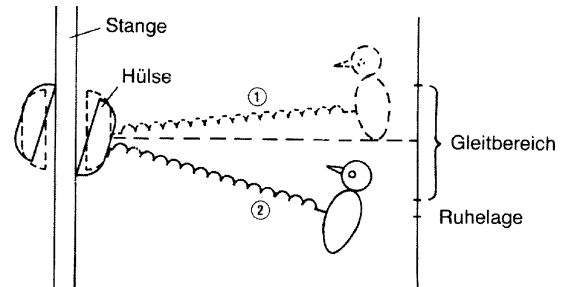


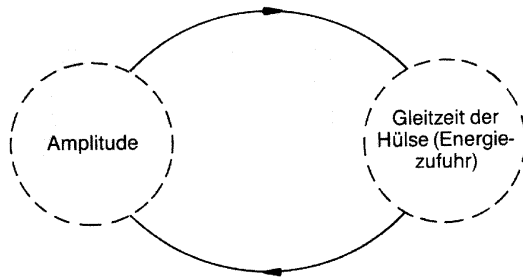
Abb. 4: Der pickende Specht (nicht maßstabsgerecht). 1): Gleitposition, 2): Haftposition.

Allerdings ist dieses Wachstum begrenzt: Bei sehr großer Amplitude schwingt der Specht soweit über den Gleitbereich hinaus, daß die Zeit der Haftphase größer und die der Gleitphase wieder kleiner wird. Ein weiteres Anwachsen der Amplitude hätte daher zur Folge, daß die Reibungsverluste gegenüber dem Energiegewinn schließlich überwiegen, so daß die Amplitude automatisch wieder kleiner werden müßte.

Die Größe der Amplitude steuert also die Zufuhr von Energie, und die zugeführte Energie steuert das Wachstum der Amplitude. Damit liegt ein Regelkreis mit Rückkopplungen vor, wie er in Abb. 5a dargestellt ist. Ob dabei die Rückwirkung auf die Amplitude „aufschaukelnd“ oder „dämpfend“ wirkt, hängt dabei - wie oben dargestellt - von der bereits vorhandenen Größe der Amplitude ab, welche schließlich einen ganz bestimmten konstanten Wert einnehmen wird. Eine kurzzeitige Dämpfung der Schwingung würde diese wieder bis zu dem stationären Zustand aufschaukeln, und eine kurzzeitige Verstärkung würde wieder gedämpft werden.

Abb. 5b verdeutlicht, daß ein sich selbst steuerndes (organisierendes) System auch komplexere Regelkreise besitzen kann. So entsteht der Schneidenton bei der Flöte dadurch, daß eine Störung der Luftströmung an der Ausströmöffnung eine Luftschwingung an der Schneide verursacht, und diese Schwingung erzeugt ein Schallfeld, das wiederum auf die Strömung an der Austrittsöffnung zurückwirkt und dort eine neue wirbelartige Störung anfährt. Offensichtlich muß die Frequenz des sich ausbildenden Tones auf die Strömungsgeschwindigkeit der Luft „abgestimmt“ sein. Denn die Frequenz bestimmt den Takt, in dem die Wirbel an der Öffnung entstehen und die Strömungsgeschwindigkeit die Zeit, nach der diese Wirbel die Schneide erreichen und dort die abklingenden Schallschwingungen wieder „anstoßen“. Bekanntlich muß dieser Anstoß eine ganz bestimmte Phasenlage zur Schwingung haben, damit sich ein stationärer Zustand ausbilden kann.

a) Der pickende Specht



b) Die Flöte

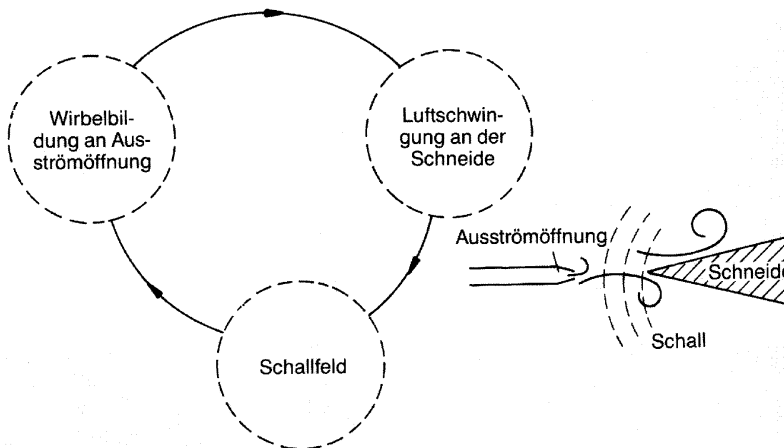


Abb. 5: Beispiele für Rückkopplungsmechanismen

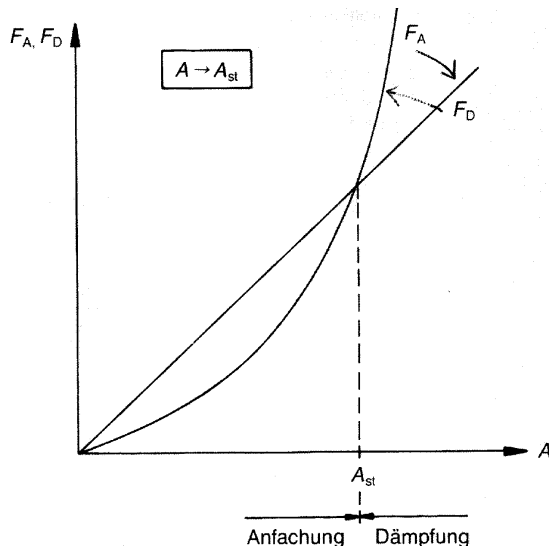


Abb. 6: Der Betrag von Anregungskraft F_A und Dämpfungskraft F_D beim Dampf-Jet-Boot. A_{st} bezeichnet die Amplitude des stationären Zustands.

Als Ergebnis dieses Abschnittes halten wir fest:

Die Spielzeuge bauen "von sich aus" ihre jeweilige dynamische Struktur auf. Diese sog. Selbstorganisation erfolgt durch interne Rückkopplungsmechanismen, welche auch für die Stabilisation (d. h. Dämpfung zufälliger Störungen) der jeweiligen Struktur verantwortlich sind.

2.4 Nichtlinearitäten

Man kann das Zusammenspiel aufschaukelnder und dämpfender Rückkopplungen auch von der Seite der jeweils im System wirksamen Kräfte betrachten, um die notwendigen Voraussetzungen für die Selbstorganisation zu erfahren.

Wir diskutieren hierzu das Dampf-Jet-Boot und betrachten die dort wirksamen, über eine Periode der schwingenden Wassersäule gemittelten Kräfte als Funktion der Schwingungsamplitude A . Auf diese Wassersäule wirkt einerseits die mit der Verdampfung und Kondensation von Wasser zusammenhängende Anregungskraft vom Betrage $F_A = \gamma \cdot A$ und andererseits die Dämpfungskraft vom Betrag $F_D = \alpha \cdot A^2 + \beta \cdot A$, welche einen mit dem Ausstoßen der Wasserjets ($\sim A^2$) und einen mit dem Strömungswiderstand ($\sim A$) zusammenhängenden Anteil besitzt (α , β und γ sind geeignete Proportionalitätskonstanten; Details in [9]).

Die Darstellung dieser Kräfte in Abb. 6 zeigt, daß Amplituden $A < A_{st}$ wegen $F_A > F_D$ stets anwachsen und Amplituden $A > A_{st}$ wegen $F_A < F_D$ stets verringert werden, so daß sich ein stabiler stationärer Zustand bei $A = A_{st}$ mit $F_A = F_D$ einstellen muß.

Voraussetzung für die Existenz dieses stationären Zustands ist offensichtlich ein unterschiedlich schnelles Wachstum der konkurrierenden Kräfte mit A , so daß sich (mindestens) ein Schnittpunkt ergibt. Dieses bedeutet, daß mindestens eine der Kräfte nichtlineare Funktion von A sein muß. Anderenfalls würde eine Schwingung entweder stets gedämpft werden (Abb. 7a) oder sich bis zur Selbstzerstörung des Systems aufschaukeln (Abb. 7b).

Eine sich selbst organisierende Struktur wird insbesondere dann möglich, wenn eine der Kräfte als Funktion des Gestaltparameters oberhalb eines bestimmten Parameterwertes wieder abnimmt, der zugehörige Graph also dort monoton fällt und damit eine sog. „negative Charakteristik“ besitzt. Dieses ist ~: B. beim Papierhubschrauber im Hinblick auf den Öffnungswinkel α zwischen den Flügeln als Gestaltparameter der Fall.

Abb. 8 veranschaulicht die für die Flügelstellung wirksamen Drehmomente M_L und M_Z als Funktion

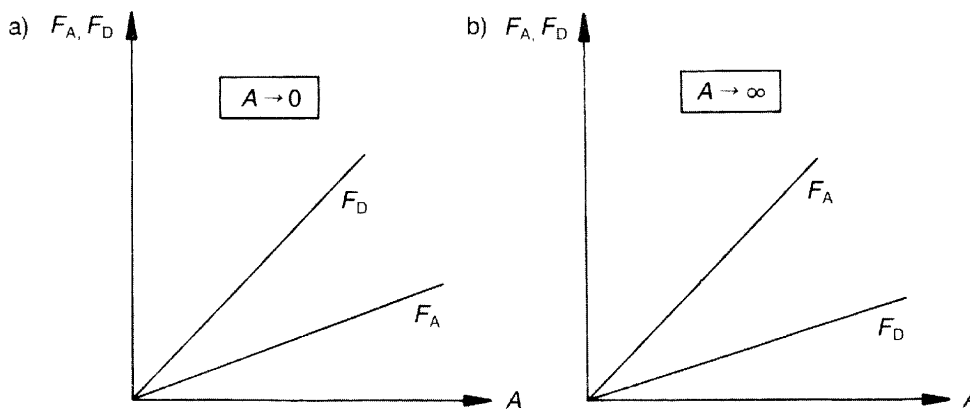


Abb. 7: Die möglichen Situationen beim Vorhandensein linearer Kräfte

des Parameters α (die Drehmomente sind als „verallgemeinerte Kräfte“ zu interpretieren).

Das Moment M_L kommt durch die auf den Flügel aufrallende Luft zustande. Die Stöße der Luftpartikel haben nämlich zweierlei Wirkung: Sie fachen zum einen die Rotation des Hubschraubers an und versuchen zum anderen, die Flügel wieder zusammenzudrücken. Letzteres wird durch das Drehmoment M_L quantitativ erfaßt. M_L wächst offensichtlich mit α , da die aufrallende Luft dann mehr „Angriffsfläche“ besitzt und damit ein höheres Gesamtdrehmoment entwickeln kann.

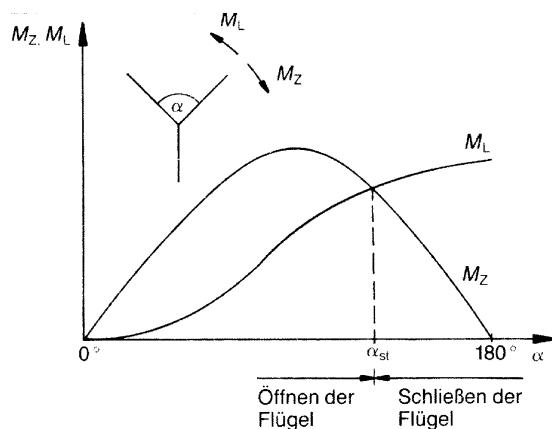


Abb. 8: Drehmomente am Flügel des Papierhubschraubers.

Das Drehmoment M_Z ist ein Trägheitseffekt und kommt aus der Sicht des mitbewegten Beobachters durch das Wirken der Zentrifugalkraft zustande. Genauso wie diese Kraft wächst auch das Moment M_Z zunächst mit zunehmendem Öffnungswinkel α der Flügel. Nach Erreichen eines Maximums wird M_Z jedoch wieder kleiner und würde bei vollständig geöffneten Flügeln sogar wieder verschwinden. Dieses liegt daran, daß an dem Moment M_Z , welches die Flügel zu öffnen sucht, nur die Komponente der horizontal weisenden Zentrifugalkraft betei-

ligt ist, welche senkrecht zur Flügelfläche steht, und diese Komponente wird natürlich umso kleiner, je näher die Flügel selbst der horizontalen Lage kommen. M_L besitzt damit die angesprochene negative Charakteristik und sichert damit die Existenz eines stationären, sich selbst organisierenden Öffnungswinkels α_{st} (Details dieser Über-

legungen in [6].

Wir halten fest:

Sich selbst organisierende Strukturen werden möglich durch das Vorhandensein nichtlinearer Kräfte (bzw. Größen, die in einem verallgemeinerten Sinne als Kräfte angesehen werden können).

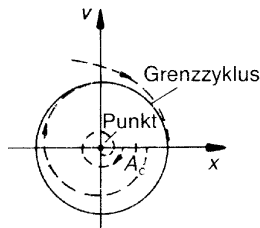
2.5 Die Phasenraumdarstellung

Die Entwicklung sich selbst organisierender Systeme läßt sich natürlich auch im Phasenraum betrachten und führt dort zu einer Klassifikation der dissipativen Strukturen als Endzustände der Entwicklung.

Für die wandernden Männchen bedeutet die Phasenraumdarstellung eine gleichzeitige Registrierung von Auslenkung x und Geschwindigkeit v der Querschwingung, ohne die eine Vorwärtsbewegung nicht möglich wäre. Abb. 9a gibt eine solche Messung schematisch wieder: Die Tatsache, daß ein kleiner seitlicher Anstoß des Spielzeuges (kleiner als A_c) über eine gedämpfte Schwingung wieder zur Ruhe kommt, wird im Graphen durch eine enger werdende Spirale dargestellt, die in einem Punkt mündet. Die Tatsache, daß ein hinreichend großer Anstoß (größer als A_c) zu einer stabilen Schwingung führt, zeigt sich im Graphen als sich aufweitende Spirale, die in einer geschlossenen Kurve mündet, welche als Grenzyklus bezeichnet wird.

Punkt und Grenzyklus kennzeichnen aufgrund der Geometrie im Phasenraum verschiedene Typen von stationären Zuständen. Daß dabei ein Grenzyklus nicht unbedingt eine kreisförmige Gestalt haben muß, zeigt das Beispiel der knarrenden Dose in Abb. 9b. Dargestellt ist dort die Anfachung einer Schwingung im Faden durch eine Drehung des Stabes. Dieser führt den Faden der Schlinge aufgrund der Haftreibung zunächst mit, so daß sich das Fadenstück zwischen Schlinge und Dose spannt; die-

a) Die wandernden Männchen



b) Die knarrende Dose

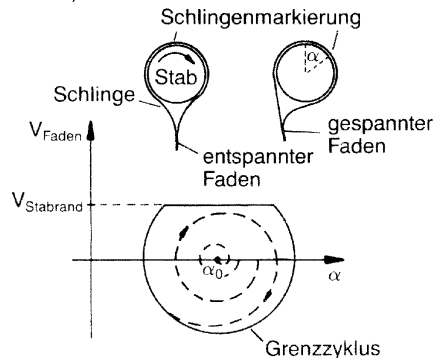


Abb. 10: Darstellung von Systementwicklungen im Phasenraum

ser Bewegungsteil ist in Abb. 9b durch den Geradenabschnitt des Grenzyklus wiedergegeben. Bei diesem Vorgang wächst jedoch die Rückstellkraft des Fadens, der Stab kann schließlich die Schlinge nicht weiter mitführen, Gleitreibung setzt ein und die Schlinge schwingt wieder in ihre Ausgangslage zurück, wodurch das Fadenstück zwischen Schlinge und Dose wieder entspannt wird; dieser Teil der Bewegung ist durch den bogenförmigen Teil des Grenzyklus wiedergegeben. Ist allerdings die Reibung zwischen Stab und Schlinge nicht groß genug, so kann keine Schwingung und damit kein Ton entstehen. Die Schlinge wird dann lediglich um einen Winkel α_0 statisch ausgelenkt.

In der Synergetik hat sich für derartige stabile Zustände der Begriff des Attraktors eingebürgert:

Die stabilen Endzustände eines sich selbst organisierenden Systems heißen Attraktoren. In den genannten einfachen Fällen der Spielzeuge werden sie im Phasenraum durch Punkte oder Grenzyklen repräsentiert.

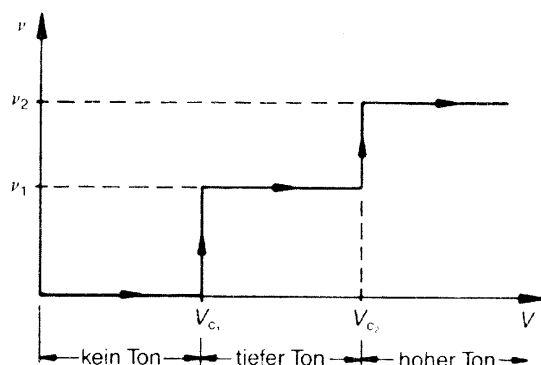


Abb. 9: Abhängigkeit der Frequenz von der Strömungsgeschwindigkeit v der Luft bei der Flöte (bei schrittweiser Erhöhung von v).

3. Phänomene bei Strukturänderungen

Die hier angesprochenen Spielzeuge haben mindestens zwei Attraktoren, z. B. "Ruhe" und "periodische Bewegung". Durch Veränderung der Randbedingungen für das jeweilige Objekt können zwischen diesen stationären Zuständen Übergänge stattfinden. Dabei treten Phänomene auf, welche für Phasenübergänge charakteristisch sind. Diese haben daher in der Synergetik eine zentrale Bedeutung.

3.1 Die kritischen Punkte

Der vorherige Abschnitt hat bereits deutlich gemacht: Die wandernden Männchen benötigen eine seitliche Auslenkung, die einen Mindestwert (nämlich A_c) überschreitet, damit ein Übergang vom Zustand der Ruhe in den qualitativ davon völlig verschiedenen Zustand der Vorwärtsbewegung stattfinden kann. Bei der knarrenden Dose muß (bei vorgegebener Drehgeschwindigkeit des Stabes) ein bestimmter Wert der Stab-Schlingen-Reibung überschritten werden, damit ein Ton einsetzt, und unterschritten werden, damit der Ton aufgehoben wird.

Ähnlich beobachtet man z. B. bei der Flöte derartige kritische Werte für den Kontrollparameter, bei deren Überschreiten sich die dynamische Struktur des Systems ändert. In Abb. 10 ist dieser Sachverhalt angedeutet: Bei den kritischen Strömungsgeschwindigkeiten v_{c1} und v_{c2} der Luft liegen die Zustandsübergänge „kein Ton“ $\rightarrow$ „tiefer Ton“ bzw. „tiefer Ton“ $\rightarrow$ „hoher Ton“.

Diese Beispiele machen exemplarisch deutlich:

Es existieren sog. kritische Punkte, an denen sich die Struktur des Systems plötzlich ändert. Nur kleine Veränderungen z. B. eines Kontrollparameters führen dort zu qualitativ großen Veränderungen im Verhalten / in der Gestalt des Systems („Umschlagen von Quantität in Qualität“).

3.2 Symmetriebrechung

Läßt man den Papierzeppelin fallen, so beginnt seine Abwärtsbewegung mit der Drehfrequenz $\omega = 0$ und der Driftgeschwindigkeit $v_d = 0$. Dieser Flugzustand ist jedoch instabil: Der Papierzeppelin beginnt zu drehen ($\omega \neq 0$) und seitlich abzuweichen ($v_d \neq 0$). Bemerkenswert ist, daß es vom Zufall abhängt, ob sich eine Rechtsdrehung oder eine Linksdrehung einstellt und demzufolge, welche der beiden entgegengesetzt gerichteten Driftbewegungen auftritt.

Das Spielzeug besitzt also spiegelsymmetrisch zueinander liegende Entwicklungsmöglichkeiten, was

üblicherweise durch ein Diagramm mit Gabelung (Bifurkation) dargestellt wird (Abb. 11a). Dadurch, daß jedoch nur eine dieser Möglichkeiten auch realisiert werden kann, wird im konkreten Fall diese Symmetrie „gebrochen“. Dieses heißt genauer: Der Bewegungszustand $(-\omega, -v_d)$ z. B. geht bei Spiegelung nicht in sich selbst (was Spiegelsymmetrie bedeuten würde), sondern in $(+\omega, +v_d)$ über. Lediglich der instabile Anfangszustand $(\omega = 0, v_d = 0)$ besitzt diese Symmetrie, da er bei Spiegelung in sich selbst abgebildet wird (Abb. 11b).

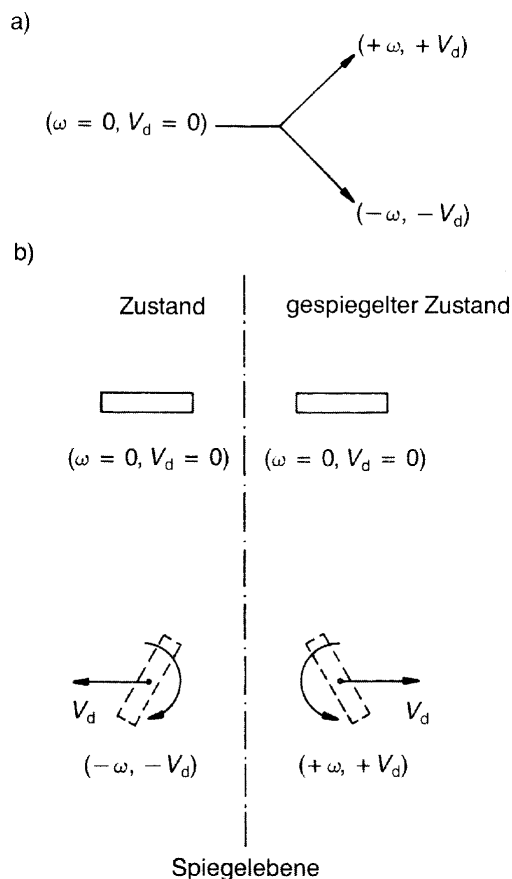


Abb. 11: Zur Symmetrie der möglichen Zustände des Papierzeppelin a) Darstellung der symmetrisch zueinander liegenden Entwicklungsmöglichkeiten des Systems im Verzweigungsdiagramm, b) Veranschaulichung der Spiegelsymmetrie.

Diese am Papierzeppelin leicht zu beobachtende Symmetriebrechung ist für die Strukturänderung in synergetischen Systemen typisch:

Am kritischen Punkt tritt eine Gabelung (Bifurkation) der Entwicklungsmöglichkeiten des Systems auf. Die Symmetrie zwischen den dort möglichen Zuständen wird durch die real angenommene Struktur gebrochen. Die Auswahl (Selektion) des jeweils realisierten Zustands ist zufallsbedingt.

Der hier angesprochene Zufall ist prinzipiell nicht ausschaltbar und wird daher in der Synergetik zu einem zentralen Begriff. Seine dortige Bedeutung kann durch die angesprochenen Spielzeuge allerdings kaum ermessen werden, da bei den übrigen bereits aufgrund ihrer Konstruktion der Symmetriebruch entschieden und damit der Zufall ausgeschlossen ist. Diese Lücke läßt sich jedoch durch andere einfache mechanische Beispiele leicht schließen (siehe [1]).

3.3 Kritische Divergenz der Antwortfunktion

Die Kontrollparameter bestimmen die jeweils realisierte dissipative Struktur. Dieser allein kann man nicht ansehen, wie weit das System vom kritischen Punkt entfernt ist, so daß man bei weiterer Veränderung der Kontrollparameter mit einer plötzlichen Änderung der Zustandseigenschaften rechnen müßte. Eine solche Information kann mitunter jedoch sehr hilfreich sein. Man denke nur an das Ökosystem, welches man rechtzeitig vor dem „Umkippen“ bewahren möchte; das „Umkippen“ bedeutet synergetisch das Überschreiten des kritischen Punktes.

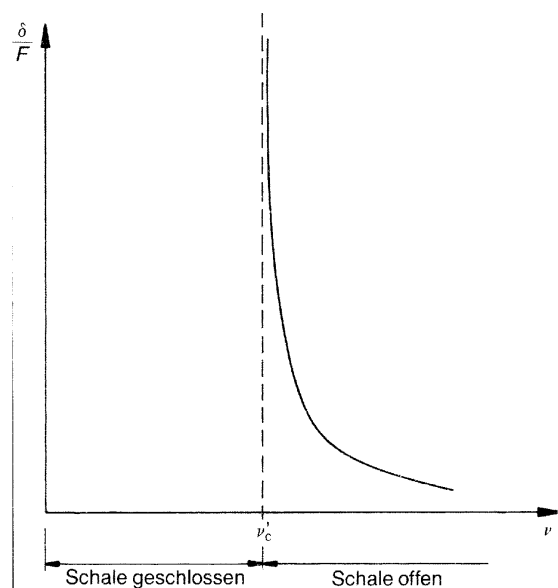


Abb. 12: Die Antwortfunktion als Funktion der Drehfrequenz beim „Vogel im Ei“.

Man kann ein synergetisches System jedoch „befragen“, indem man den jeweils realisierten Zustand kurzzeitig etwas stört. Das System „antwortet“ dann mit einer ganz bestimmten, von der Nähe zum kritischen Punkt abhängigen Reaktion.

Beim „Vogel im Ei“ kann man z. B. den Zustand der geöffneten Schale dadurch stören, daß man den Durchmesser des Öffnungskreises durch eine äußere Kraft um einen kleinen Betrag δ verringert. Man mißt die hierzu erforderliche, von der Drehfrequenz

ν abhängige Kraft F und betrachtet dann die „spezifische Wirkung“ $\frac{\delta}{F}$ als Funktion von ν [2]. Abb.

12 zeigt $\frac{\delta}{F}$ in der Nähe des kritischen Punktes ν_c , bei dessen Unterschreiten das Ei zusammenklappt.

$\frac{\delta}{F}$ beschreibt die „Antwort“ des Systems auf Störungen. Sie besteht in einer Divergenz dieser Funktion am kritischen Punkt und bringt die Beobachtung zum Ausdruck, daß die Schale des Ei's mit Annäherung an den kritischen Punkt zunehmend "weich" wird. Umso länger dauert dann die Wiederherstellung der ungestörten Gestalt nach Wegnahme der äußeren Einwirkung.

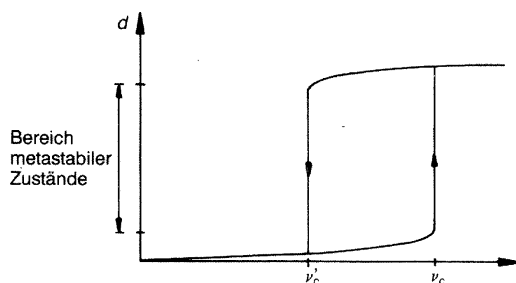


Abb. 13: Messung des Gestaltparameters d in Abhängigkeit von der Drehfrequenz beim „Vogel im Ei“.

Die Nahe des Systems zum kritischen Punkt läßt sich durch das Antwortverhalten des Systems auf Störungen testen: Die jeweilige Antwortfunktion (Response-Funktion) divergiert am kritischen Punkt („kritische Divergenz“), das System wird „weich“ Störungen werden zunehmend langsamer abgebaut (sog. „critical slowing down“).

Die Antwortfunktion ist also ein Indikator für die Stabilität des Zustands.

3.4 Hysterese und Metastabilität

Bei der Flöte ändert sich nach Abschnitt 3.1 der Gestaltparameter (d , i. die Frequenz) an den kritischen Punkten sprunghaft. Unter Spielzeugen findet man derartige diskontinuierliche Zustandsänderungen häufig - zum Beispiel auch beim „Vogel im Ei“. Abb. 13 gibt unsere Beobachtungen an diesem Spielzeug wieder (experimentelle Details in [2]). Dabei haben wir den Durchmesser d des Öffnungskreises (d , i. der Gestaltparameter) nicht nur für größer werdende Drehfrequenzen (d , i. der Kontrollparameter), sondern auch für wieder abnehmende Frequenzwert registriert.

Man beobachtet die vom Ferromagnetismus her bekannte Erscheinung der Hysterese. Während nämlich das Ei bei der kritischen Drehfrequenz ν_c auf-

klappt, schließt es bei anschließender Erniedrigung der Drehfrequenz erst später, nämlich bei der niedrigeren kritischen Frequenz $\nu_c' < \nu_c$. Dies hat zur Folge, daß die Zustände im Frequenzbereich $\nu_c' < \nu < \nu_c$ („geöffnetes Ei“ bzw. „geschlossenes Ei“) nicht gegenüber beliebig großen Störungen stabil sind, sondern bei hinreichend starker kurzzeitiger Beeinflussung in den jeweils anderen Zustand "umklappen" können (Metastabilität). Welcher der beiden Zustände hier vom System eingenommen wird, hängt von seiner Vorgeschichte ab (ob vorher $\nu > \nu_c$ oder $\nu < \nu_c'$ war). Sie wird demzufolge rekonstruierbar („Erinnerungsfähigkeit“ des Systems).

Dieses zeigt, daß die Spielzeuge nicht nur generelle Phasenübergangscharakteristika (wie Symmetriebrechung und kritische Divergenz) besitzen, sondern z. T. auch Erscheinungen aufweisen, welche nur bei ganz bestimmten Arten von Phasenübergängen auftreten. Im genannten Beispiel ist es der diskontinuierliche Phasenübergang, wie er z. B. beim Ferromagneten und beim Verdampfen und Kondensieren von Wasser auftritt.

Einige Strukturübergänge verlaufen analog zu einem diskontinuierlichen Phasenübergang (Phasenübergang 1. Art.) Es tritt also die Erscheinung der Hysterese auf, das System besitzt ein Erinnerungsvermögen, metastabile Zustandsbereiche und Analogie zur latenten Wärme.

Andere in der Synergetik diskutierte Strukturübergänge besitzen Parallelen zum kontinuierlichen Phasenübergang (Phasenübergang 2. Art). Auch hierfür lassen sich einfache mechanische Systeme als Analogiebeispiele finden (siehe [1]).

4. Abschließende Bemerkungen

Spielzeuge werden schon seit langem als motivierende Objekte für den Physikunterricht diskutiert. Diese Diskussionen orientieren sich allerdings an der traditionellen Betrachtungsweise der klassischen Schulphysik. Mit obigen Ausführungen haben wir den Versuch unternommen, diese vertrauten Objekte aus dem neuen Blickwinkel der Synergetik zu betrachten.

Unsere Ausführungen mußten dabei notwendigerweise die Form eines Übersichtsartikels annehmen. Wir wollten damit auch deutlich machen, daß es nicht nur einige wenige exotische Spielzeuge mit synergetischen Eigenschaften gibt, sondern daß eine Vielzahl von Spielzeugen Aspekte der Selbstorganisation aufweist. Auch die von uns vorgestellte Auswahl stellt hierfür nur einen Ausschnitt dar. Es sei darauf hingewiesen, daß darüber hinaus auch eine Beschränkung auf Spielzeuge als Unterrichtsobjekte keineswegs notwendig ist, analoge Überlegungen lassen sich auch für eine Vielzahl von Gegenständen

den unserer technischen und natürlichen Umwelt anstellen (siehe [11, [13]).

Wir konnten auf eine detaillierte methodische Aufbereitung der von uns dargelegten Inhalte für den Unterricht kaum eingehen. Der Leser findet eine solche, bis in einzelne Unterrichtsschritte zerlegte methodische Umsetzung in [2], wo nahezu alle hier angesprochenen Aspekte der Synergetik exemplarisch an einem Spielzeug, dem "Vogel im Ei", behandelt werden. Die Darstellung in [2] zielt auf einen Unterricht in der Sekundarstufe 1 hin und demonstriert damit gleichzeitig einige Möglichkeiten der Elementarisierung. Möglichkeiten der Vertiefung dieser synergetischen Untersuchungen am „Vogel im Ei“ für die Sekundarstufe 11 und den Anfangsunterricht in der Hochschule sind in [3] dargestellt.

Literatur

- [1] *B. Rodewald*.- Phasenübergangsähnliche Phänomene in der Mechanik - ein Gegenstand zur Einführung synergetischer Grundbegriffe im Schulunterricht. Praxis der Naturw. - Physik 32 (1983), S. 35
- [2] *B. Rodewald, H. J. Schlichting*: Ein Spielzeug zur Veranschaulichung von Katastrophen in Ökosystemen. NiU-P/C 32 (1984), S. 294
- [3] *B. Rodewald, H. J. Schlichting*: A catastrophic toy. Am. L Phys. 53 (1985), S. 1172
- [4] *R. Rodewald, H. J. Schlichting*: Der pickende Specht - ein Spielzeug, das Reibung konstruktiv nutzt. In: *A. Scharmann et al.* (Hrsg.): DPG-Fachausschuß Didaktik der Physik, Vorträge der Frühjahrstagung 1983 Gießen. Gießen 1983, S. 50
- [5] *J. Wittmann*: Trickkiste 1. München: bsv 1983
- [6] *B. Rodewald, H. J. Schlichting*: Papierhubschrauber. Praxis d. Naturw. - Physik 35 (1986), (im Druck)
- [7] *L. Mander G. Dipple, H. Gossage*: Papierflieger. Modelle zum Selberfalten: München: dtv 1982 (Taschenbuchausgabe)
- [8] *M. Feldmann*: Papierflieger. Flugobjekte zum Falten, Trimmen und Fliegenlassen. München: Heyne Verlag 1980
- [9] *H. J. Schlichting, B. Rodewald*: Physikalische Phänomene am Dampf-Jet-Boot. Praxis d. Naturw-Physik (im Druck)
- [10] *R. S. Mackay*.- Boat Driven by Thermal Oscillations. Am. L Phys. 26 (1958), S. 583
- [11] *H. Kauderer*: Nichtlineare Mechanik. Berlin 1958
- [12] *R. C. Chanaud*: Aerodynamic whistles. Sci. Am. 222, Jan. 1970, S. 40
- [13] *H. J. Schlichting, B. Rodewald*.- Über die konstruktive Rolle der Reibung. In: *A. Scharmann et al.* (Hrsg.): DPG-Fachausschuß Didaktik der Physik, Vorträge der Frühjahrstagung 1983 Gießen. Gießen 1983, S. 44