

# Angebo(o)t



2005



Von: *Phantasia-Versand*  
In der Bachmühle  
Hubenröder Straße 40  
37217 Witzenhausen

☎: 0700 - 800 900 16  
Fax: 0700 - 800 900 23  
E-Mail: [mail@Phantasia-Versand.COM](mailto:mail@Phantasia-Versand.COM)  
URL: [www.Pphantasia-Versand.COM](http://www.Pphantasia-Versand.COM)

Sehr geehrte Interessenten!

Anbei erhalten sie Informationen über das kerzenbetriebene Knatter-Boot und Zubehör.

Vorweg finden sie die Beschreibung der einzelnen Produkte mit den Preisen. Anschließend detailliertere Informationen zur Geschichte der Boote, deren Produktionshintergrund und der Philosophie von Phantasia-Versand. Und zu guter Letzt eine ausführliche physikalische Abhandlung über die Knatter-Boote und deren Antrieb...

**FTS 1:** *Es hat viele Namen: Knatter-Boot, Piff-Paff-Boot, Dampf-Jet-Boot, Putt-Putt-Boot... Das klassische Spielzeug, das ohne Batterien auskommt! Mit einer kleinen Kerze und einem Dampfkessel fährt das Boot bis zu einer Stunde lang ohne Unterbrechung - und knattert dabei wie ein Dieselmotor!*

*Komplett verpackt im Klarsicht-Beutel mit Kerze, Zubehör und Anleitung. Gefertigt aus buntem Recyclingblech, von Einzel-Familien nahe Delhi mit denen seit über 10 Jahren Fair-Handels-Kontakte bestehen. Direkt vor Ort auf erstklassige Qualität kontrolliert und anschließend weiterverarbeitet und verpackt in einem professionellen Export-Unternehmen.*

*„Auftanken“ lässt sich das Boot mit normalem Kerzenwachs! Um es noch einfacher zu machen, liefere ich auch Beutel mit 20 Ersatzkerzen und Zubehör unter dem Code FTK 1.*

*Gemäß Forderungen seitens der Behörden ist das Knatterboot seit Anfang 2005 nur noch in dieser „extra sicheren“ Version erhältlich, mit rundum aufwendig umgebördeltem Blech, so dass keinerlei scharfe Kanten mehr bestehen (siehe Detail-Foto)!*

Knatterboot, X-tra  
safe (FTS 1):

€ 6,00 /St.



**FT 14:** Aus Neublech hergestellt, bunt bedruckt und in einer Papp-Verpackung ist das „Robin-Boot“ prädestiniert für Spielwaren-Geschäfte und Blech-Spielzeug-Sammler...



Robin-Boot, (FT 14):  
**€ 8,00 /St.**

**FT 15:** Das Cruise-Boot wird aus Neublech hergestellt und ist lithografisch bedruckt. Langgezogen wie ein richtiges Rennboot hat es selbstverständlich auch ein Ruder, das in verschiedenen Positionen fest einrastet... Dieses Boot wird von einem Betrieb mit ca. 15 Mitarbeitern produziert und ist konventionell gehandelt.

**FT 15**

Cruise-Boot, (FT 15):  
**€ 10,00 /St.**



**FTK 1:** Der einfachste Weg sein Boot neu „aufzutanken“: 20 kleine Ersatzkerzen mit Wachs und Docht, passend für alle Knatter-Boote. Zusätzlich liegt jedem Set auch noch eine Ersatz-Wasserspritze und ein Kerzen-Löffel mit bei – falls mal etwas verloren gegangen ist!



Ersatzkerzen-Set,  
(FTK 1):  
**€ 2,50 /St.**

**FTK 1**

**FTB 1:** Speziell für Bastler und für den Schulunterricht haben wir den „Motor“ des „Knatter-Bootes“ einzeln ins Sortiment aufgenommen. So lässt sich ohne großen Aufwand jede alte Fischdose in ein Knatterboot umwandeln – und wer möchte kann auch ein „Zwei-Zylinder-Boot“ bauen, mit dem man jedes Rennen gewinnt...

Boots-Kessel, klein (FTB 1):

€ 2,00 /St.



FTB 2

Boots-Kessel, groß  
(FTB 2):

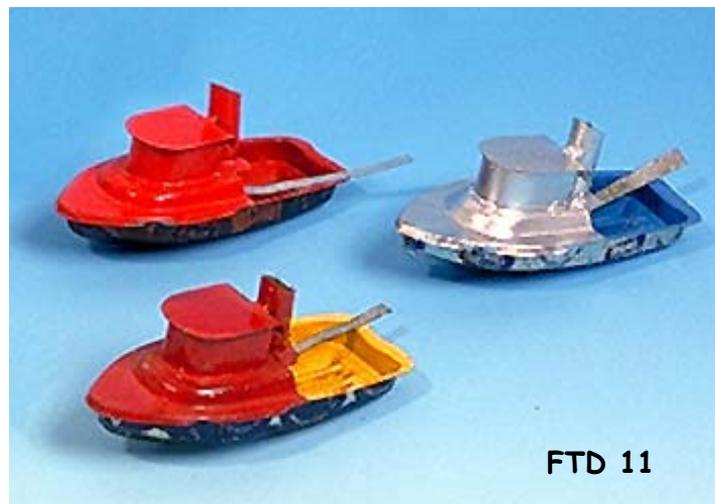
€ 3,00 /St.

**FTB 2:** Und wer größeres vor hat, braucht auch größere „Dampfkessel-Motoren“: Entwickelt für lange Bootsrümpfe, treibt dieser große Kessel mit seinen langsamen kraftvollen Impulsstößen auch die Boote an, die mit einer Fernsteuerung ausgestattet werden können... Auch für den Werk- bzw. Physikunterricht an Schulen sind beide Varianten (FTB 1 und FTB 2) sicher interessant!

**FTD 11:** Dieser Dampfer-Aufsatz mit Schornstein macht das Knatter-Boot flugs zum Knatter-Dampfer: Knatter-Boot-Deckel abziehen - Dampfer-Deckel aufschieben - fertig!!!

Dampfer-Aufsatz,  
(FTD 11):

€ 1,50 /St.



**FPH 3:** Warum knattert das Boot? Warum wird der Dampf-Kessel nicht leer? Wie kommt das Wasser wieder in den Kessel? Warum fährt das Boot vorwärts? Als Antworten auf diese Fragen werden mit Hilfe vieler einfacher Experimente selbst komplexe physikalische Zusammenhänge spielerisch erfahrbar gemacht. Für jedermann verständlich erklärt dieses Buch die physikalische Funktion des Knatterbootes, gibt Einblicke in die Geschichte des genialen Antriebes, der älter ist, als der Verbrennungsmotor und liefert anhand von Bauplänen und Konstruktions-Tipps den einfachsten Weg, sein eigenes Knatterboot zu bauen! So gibt dieses Büchlein für Laien und Experten gleichermaßen wertvolle Informationen und weckt den Spaß an Physik, Geschichte und Modellbau.

Knatter-Buch, (FPH 3): € 7,00 /St.

Bei Interesse an größeren Mengen für Schule oder Wiederverkauf, sende ich Ihnen gern die EK-Preisliste!

## Geschichte(n) des „Phantasia-Knatter-Bootes“

„Dampf-Jet-Boot“, „Kerzenboot“, „Piff-Paff-Boot“, „Put-Put-Boot“, „Knack-Boot“ oder eben „Knatter-Boot“...: alle diese Namen stehen für das gleiche geniale Spielzeug-Boot!

Erstmals wurde diese Antriebstechnologie vermutlich von der französischen Firma H. Barré genutzt, die bereits 1868 Spielzeugboote mit der beachtlichen Länge von 61 cm mit einem solchen Antrieb ausstattete.

Anfänglich wurden die Schiffsmodelle zumeist mit Schalldämpfung ausgestattet, um das „Knattern“ zu unterdrücken, das unerwünscht war, weil auch die Vorbilder dieser Schiffe nicht mit Dieselmotoren, sondern mit Dampfkesseln fuhren... und die „knattern“ eben auch nicht! Während derartig große und aufwendige Schiffsmodelle aber sicherlich einer kleinen, exquisiten Käuferschicht vorbehalten blieben, erlebten kleinere, einfachere und vor Allem „knatternde“ Boote Ihre erste Blütezeit in den 20er und 30er Jahren als sie in Deutschland unter dem Namen „Piff-Paff-Boot“ in großen Stückzahlen produziert und verkauft wurden.

Hierzulande wurden Blech-Boote mit „Knatter-Antrieb“ bis in die späten 50er Jahre produziert, bevor die meisten Blechspielzeugmanufakturen in Konkurs gingen, da Plastik als ein neuer Werkstoff die Massenmärkte eroberte und solch eine Begeisterungswelle auslöste, dass die guten alten Blechspielzeuge kaum einer mehr haben wollte. Auf diese Weise gerieten viele wunderschöne und geniale Spielzeugideen in Vergessenheit, denn alles lässt sich eben doch nicht aus Plastik herstellen!

Warum erleben die einfachen Knatter-Boote eine Renaissance in unserer Zeit, in der die meisten Spielwaren aus Plastik fabriziert werden und im Kinderzimmer kaum etwas funktioniert ohne Batterien, die per Computerchip und unzähligen versteckten Elektromotoren den Spielsachen ein künstliches Leben einhauchen?

Vielleicht, weil das Knatter-Boot alles hat, was Kinder begeistert: Feuer, Wasser, Bewegung und Geräusch! Oder weil man hier die Technik wirklich noch nachvollziehen, im wahrsten Wortsinn „begreifen“ kann. Und das weit mehr Physik in der korrekten Erklärung der Boote steckt, als viele im ersten Moment vermuten, belegen die Ausführungen auf den vorangehenden Seiten...So war es wohl nur eine Frage der Zeit, bis die Knatter-Boote Einzug in den schulischen Physikunterricht und auch den Werkunterricht fanden!

Gründe genug, weshalb *Phantasia-Versand* sich freut, an der Verbreitung eines solch einfach-genialen, lehrreichen und zugleich charaktervollen Spielzeuges mitwirken zu können...

Und dazu kommt die spezielle Produktions- und Handelsgeschichte gerade dieser Boote:

In Europa für Jahrzehnte in Vergessenheit geraten, wurden die Boote in vielen asiatischen Staaten von kleinen Familienbetrieben in den armen Randbezirken der Millionenstädte weiterproduziert - für den asiatischen Markt - und, um Geld zu sparen, häufig aus bunt bedruckten Recyclingblechen. Dort stieß Gunnar Kuhlencord, der sich im Rahmen seines Völkerkunde-Studiums mit Recyclingprodukten in Indien befasste, auf „*steamer-wallas*“, Dampfboot-Meister, wie sich die Knatter-Boot-Produzenten selbst nennen. Sofort von den Booten begeistert, gründete er 1996 *Phantasia-Versand* und startete mit einer ersten Familie ein Fair-Handels-Projekt. Mittlerweile sind sieben Familien an das Projekt angeschlossen.



Die Herstellung der Knatter-Boote in Indien erfolgt bis heute ganz ohne elektrische Werkzeuge.

Um ein Boot fertigzustellen ist eine lange Reihe von (Hand-) Arbeitsschritten nötig:

Anfangen mit dem Pressen der Rumpf-, Deckel- und Kesselformen bis hin zum Rollen und Löten der Auspuffröhren, Abschneiden von scharfen Kanten und schließlich dem Lackieren und Verpacken!

Die Blechschere ist eines der wichtigsten Werkzeuge.

Ein fairer Preis und die garantierten Abnahmemengen geben den Familien den nötigen finanziellen Spielraum und so die Möglichkeit ihre Kinder zur Schule zu schicken, die vorher in der Produktion unabhkömmlich waren.

Außerdem helfen Kleinkredite, die Materialkosten vorzufinanzieren und bessere Werkzeuge anzuschaffen und bis heute wird die gesamte Ware im Voraus bezahlt. Die ersten 10.000 bestellten Boote produzierte die Familie aus Neublechen, da „für so viel Geld pro Boot, die Verwendung von Recyclingblech nicht mehr nötig sei...“ Erst mit der 2. Bestellung von weiteren Booten ein gutes Jahr später, konnten dann Recycling-Boote in Deutschland angeboten werden.



Das Pressen der „Dampf-Kessel“(FTB 1)...

Nahezu alle Produkte von Phantasia-Versand werden aus Recyclingmaterialien hergestellt und fördern den fairen Handel oder sind ökologisch besonders innovativ!

Zum weiteren Sortiment gehören z.B.:

- **„Autoreifen-Schaukel-Tiere“:** aus alten Autoreifen gefertigt. belastbar bis zu 110 kg, auch für Kindergärten/Schulen zugelassen, absolut witterungsbeständig und beweglich fast wie echte Tiere... © Als Pferd, Elch, Stier, Elefant, Dino, Drache oder Motorrad!



- **„Recycling-Blech-Autos“:** kunstvoll gearbeitete Modellautos, Flugzeuge, Schiffe, Motor- oder Fahrräder aus Dosenblechen, produziert vom Straßenkinder-Projekt Manda in Madagaskar



- **„Capri-Taschen“:** Tragetaschen, Handtaschen, Rucksäcke und Portemonnaies aus recycelten Saft-Tüten aus verschiedenen Fair-Trade-Projekten auf den Philippinen.



- **„JoJo-Tiere“:** aus Papiermaché oder Kunststoff-Resten, ausgestattet mit einem speziellen Gummiband-Rollantrieb. Gefertigt in einem Fair-Trade-Projekt in Bali.



- **„Zeitungs-Papier-Tüten“** aus alten Zeitungen, gefertigt vom Straßenkinder-Projekt **KarmMarg** nahe Delhi...



**Phantasia-Zeitungsstüten bedrucken wir auf Wunsch auch mit Ihrem individuellen Logo...** Je nach Größe, Qualität und Menge gibt es die Tüten bereits ab 0,06 € je Tüte!



„Straßenkinder“, die ein Zuhause gefunden haben bei

Detaillierte Kataloge mit Farbfotos sowie Hintergrundinformationen zu den einzelnen Produkten und Projekten fordern Sie einfach per E-Mail an oder finden Sie demnächst auch im Internet unter **www.Phantasia-Versand.COM...**

# Physikalische Phänomene am Dampf-Jet-Boot

H. Joachim Schlichting und B. Rodewald

## 1 Einleitung

Die Renaissance der Blechspielzeuge hat auch ein kleines Spielzeugboot wieder verfügbar gemacht, das besonders in der Nachkriegszeit weit verbreitet war.

Dieses - von uns so genannte - Dampf-Jet-Boot, zuweilen auch mit Putt-Putt-Boot bezeichnet, erweist sich als äußerst interessant für den Physikunterricht:

- Als relativ ungewöhnliches Spielzeug vermag es die Neugier und den Spieltrieb der Schüler zu wecken. Daraus lässt sich in vielen Fällen die Motivation zu physikalischen Untersuchungen gewinnen.
- Das Dampf-Jet-Boot ähnelt mehr einem technischen Gebrauchsgegenstand als einem Gerät der Lehrmittelindustrie. Während letztere häufig nur dazu geschaffen wurden, jene künstlichen Phänomene hervorzubringen, an denen möglichst nur ein isoliertes physikalisches Prinzip erkennbar wird, enthält das Dampf-Jet-Boot noch eine gewisse Komplexität. Es eröffnet damit die Möglichkeit für verschiedenartige physikalische Fragestellungen und erlaubt, Unterrichtsinhalte zu integrieren, die sonst nur isoliert behandelt werden könnten.
- Je nachdem auf welchem Anspruchsniveau das Boot behandelt werden soll, lassen sich qualitative oder quantitative Modellierungen erarbeiten. Neben klassischen Fragestellungen können dabei auch Aspekte aufgegriffen werden, die erst in jüngster Zeit in der Physik Bedeutung erlangt haben. Die Absicht dieses Aufsatzes besteht nicht darin, einen entsprechenden Unterrichtsgang darzustellen. Vielmehr sollen als Grundlage für den Unterricht einige uns interessant erscheinende physikalische Probleme herausgegriffen und möglichst elementar beschrieben werden. Im einzelnen befassen wir uns mit:

- den mechanischen Aspekten des Bootsantriebs,
- dem zugrundeliegenden Wärmekraftprinzip,
- dem nichtlinearen Schwingungsverhalten und der damit verbundenen Möglichkeit zur Selbstorganisation.

Mit dem letzten Punkt betreten wir insofern physikalisches Neuland, als hier Probleme der modernen Physik (Synergetik, dissipative Strukturen) angesprochen werden, die bislang nicht zum Stoffkanon des Physikunterrichts gehören. Die Darstellung zeigt jedoch, dass diese Probleme zu einem tiefergehenden Verständnis des Systems beitragen, ohne dass der übliche Schwierigkeitsgrad überschritten würde. Wir tragen damit außerdem Bestrebungen Rechnung, den Physikunterricht auch für solche Probleme zu öffnen (siehe z.B. *Sauer* 1984, *Rodewald* 1983, *Rodewald et al.* 1986).

Die folgenden Untersuchungen wurden an einem käuflich erworbenen Spielzeug vorgenommen. Auf Untersuchungen, die auf konstruktive Abänderungen des fertigen Objekts hinauslaufen, wurde vorerst verzichtet.

Das Dampf-Jet-Boot wurde kürzlich von *Berge* (1982, S. 75) als physikalisches Spielzeug beschrieben, nachdem es unseres Wissens zuletzt vor mehr als 20 Jahren fachdidaktische Aufmerksamkeit erlangte (z. B. *Finnie et al.* 1962, *Mackay* 1958, *Miller* 1958).

## 2 Beschreibung des Bootes

Das Herzstück des Boots besteht (gemäß Abb. 1) aus einem flachen Dampfessel (K). Von diesem gehen zwei dünne Röhren (R) aus und ragen am Heck des Boots ins Wasser. Die Oberseite des Kessels besteht aus einer dünnen Messingmembrane (M). Will man das Boot in Bewegung versetzen, so füllt man vorerst den Kessel und die Röhren mit Wasser auf und heizt sodann den Kessel von unten mit einer Kerze oder Esbit (W). Nach kurzer Zeit setzt sich das Boot tuckern in Bewegung. Das Tuckern rührt von der Membrane her, die sich in regelmäßigem Rhythmus (sichtbar) auf- und abbewegt. Mit gleicher Frequenz wird aus den Röhren am Heck Wasser ausgestoßen und angesaugt, wodurch der Antrieb des Boots zustande kommt. Das Boot bewegt sich solange fort, wie die Wärmezufuhr erfolgt. Wir haben Fahrten von einer Stunde und länger aufrechterhalten können.

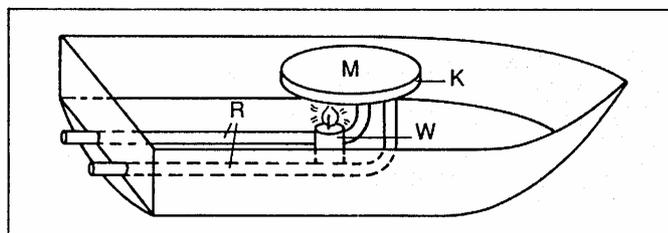


Abb. 1: Schematische Darstellung des Dampf-Jet-Boots K = Kessel, M = Membrane, R = Röhren, W = Wärmequelle

## 3 Antrieb des Bootes

Auf den ersten Blick scheint der Antriebsmechanismus des Bootes mit dem eines Düsenjets vergleichbar zu sein: Dadurch, dass das Dampf-Jet-Boot Wasser nach hinten stößt, wird durch den damit verbundenen Impulsübertrag ein entsprechender Vortrieb (Rückstoß) bewirkt.

Im Unterschied zum Düsenjet wird das *nach hinten* ausgestoßene Wasser (zumindest im zeitlichen Mittel) auch wieder *von hinten* eingesogen. Berücksichtigt man, dass die Beträge der Aus- und Einströmgeschwindigkeit sich nicht wesentlich unterscheiden (siehe unten), so stellt sich die Frage, wieso die mit dem Ausström- und Einsaugvorgang verbundenen Impulsüberträge sich nicht ausgleichen und das Boot sich auf der Stelle hin- und herbewegt. Man beobachtet vielmehr eine ruckweise Vorwärtsbewegung im Halbtakt des Wasser-

ausstoßens und keine Bewegungsänderung im Halbtakt des Wassereinsaugens. Daraus folgt, dass die Impulsüberträge in bzw. gegen Fahrtrichtung beim Ausstoßen bzw. Einsaugen des Wassers von stark unterschiedlichem Betrag sein müssen. Ein solcher Sachverhalt lässt sich nur mit einer Asymmetrie des Ein- und Ausströmvorganges erklären:

Vereinfacht argumentiert behält die ausgestoßene Wassersäule beim Verlassen der Röhren i.w. ihre Richtung bei, wodurch die gesamte Masse zur Entfaltung des Impulsübertrages beiträgt. Demgegenüber ist beim Einsaugen keine Richtung ausgezeichnet. Das Wasser strömt aus fast allen Richtungen kommend den Rohrenden wie einem Ausguss zu (siehe Abb. 2). Dabei prallen die jeweils aus entgegengesetzten Richtungen kommenden Wasserteile aufeinander, ihre Impulse heben sich auf. Nur der in Rohrtrichtung strömende Wasseranteil kann seinen Impuls auf das Boot übertragen, weil er keinen Partner mit entgegengesetztem Impuls vorfindet. Dieser Wasseranteil (siehe schraffierte Fläche in Abb. 2b) ist im Vergleich zur gesamten einströmenden Wassermenge (sie erfüllt eine gedachte Kugel vom Radius  $r$ , siehe Abb. 2b) umso kleiner, je dünner das Rohr ist.

Aufgrund dieser einfachen, die wesentlichen Aspekte berücksichtigenden Modellierung, kommt man zu folgender quantitativen Abschätzung:

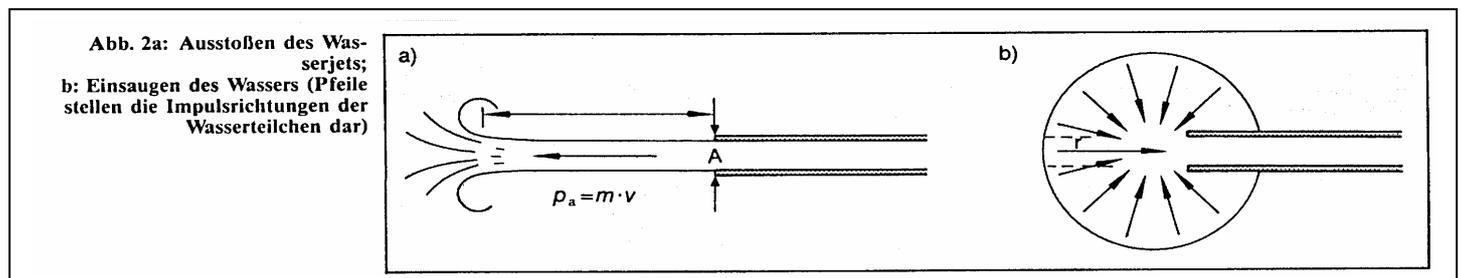
**Wasserausstoß:** Innerhalb der Zeit  $t = 1/(2 \cdot \nu)$  ( $\nu$  = Frequenz des Tuckerns) werde die Wassermasse  $m = \rho A l$  ( $\rho$ ,  $A$  und  $l$  bezeichnen Dichte des Wassers, Querschnitt und Länge der Wassersäule) mit der Geschwindigkeit  $v = l/t = 2 l \nu$  ausgestoßen. Damit ist ein Impulsübertrag verbunden.

$$p_a = mv = \rho \cdot A \cdot l \cdot l/t = 2 \cdot \rho \cdot A \cdot l^2 \cdot \nu \quad (1)$$

dicken Röhren nur ein Hin- und Herschwingen des Bootes erwarten. Dem Impulsübertrag  $\Delta p \approx p_a$  entspricht nach (1) bei Berücksichtigung beider Röhren eine über eine Periode gemittelte Vortriebskraft (Antriebskraft) von

$$F_A = 2 \cdot \Delta p \cdot \nu = 4 \cdot \rho \cdot A \cdot l^2 \cdot \nu^2 = \rho A v^2. \quad (4)$$

Die Antriebskraft läßt sich messen, indem man das arbeitende Boot mit einer geeigneten Federwaage festhält und die der Auslenkung entsprechende Kraft  $F_A$  abliest. Unabhängig davon lassen sich aber auch die übrigen in (4) auftretenden Größen abschätzen: Die Frequenz kann beispielsweise akustisch registriert werden. Die Wasserjets sind in der Regel aufgrund von Wirbelbegrenzungen gut zu erkennen. Ihre Länge  $l$  kann daher mit einem darübergehaltenen Lineal abgeschätzt werden. Mit diesen Informationen läßt sich die Güte der bei der Ableitung von (4) benutzten Näherung bestimmen. In unserem Fall betrug  $\nu \approx 4 \text{ s}^{-1}$ ,  $l \approx 2 \text{ cm}$ ,  $A \approx 0,13 \text{ cm}^2$  und  $F_A = 0,1 \text{ mN}$ , womit der Güte der Abschätzungen entsprechend eine größenordnungsmäßige Übereinstimmung gegeben ist. Bestimmt man auch noch die Geschwindigkeit  $v_A$  des Boots, so kann man über  $P_A = F_A v_A$  die Antriebsleistung ermitteln. Sie betrug in unserem Fall  $P_A \approx 0,1 \text{ mN} \cdot 0,07 \text{ m/s} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ W}$ . Setzt man  $P_A$  ins Verhältnis zur Leistung  $P_H$  der Heizquelle, dann erhält man einen Ausdruck für den Wirkungsgrad des Bootes.  $P_H$  läßt sich durch den Massenverlust pro Zeiteinheit des Brennmaterials multipliziert mit dem massenspezifischen Heizwert des Brennmaterials ermitteln. Der Wirkungsgrad erweist sich als sehr klein. Außerdem schwankt er in einem sehr weiten Bereich, weil es schwierig ist, die Flammengröße so zu optimieren, daß nicht



• **Wassereinsaugen:** Innerhalb derselben Zeit  $t$  werde aus dem Kugelvolumen vom effektiven Radius  $r$  (siehe Abb. 2b) die Wassermasse  $m_e$  eingesogen. Im stationären Betrieb ist die eingesogene Wassermasse  $m_e$  gleich der ausgestoßenen  $m$ . Nimmt man vereinfachend an, dass das Wasser radial (gradlinig) den Rohrenden zuströmt, dann wird nur der Impuls wirksam  $\rho_c'$  (er in der Abb. 2b schraffiert eingezeichneten Wassermasse  $m_e'$  entspricht:

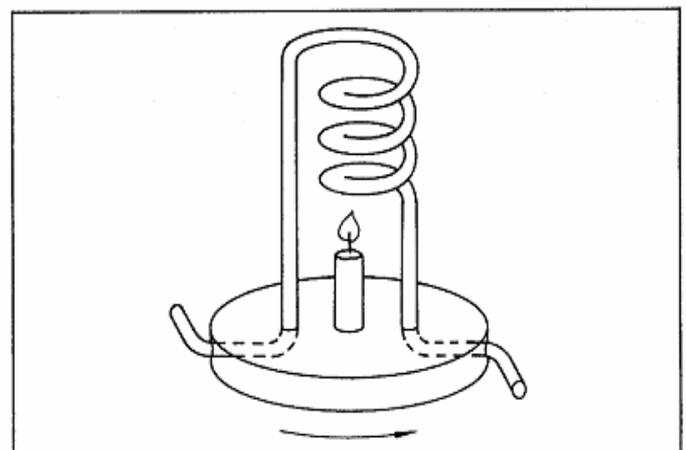
$$p_c' = m_e' v_e = \rho \cdot A \cdot r \cdot \frac{r}{t} \quad (2)$$

Der den Vortrieb bestimmende Impuls  $\Delta p$  beträgt demnach:

$$\Delta p = p_a - p_c' = p_a \left(1 - \frac{r^2}{l^2}\right), \quad (3)$$

wobei  $r$  und  $l$  noch über die Beziehung  $Al = \frac{4}{3} \pi r^3 - Ar$  zusammenhängen.

Bei langen, schlanken Röhren wie im Falle des vorliegenden Spielzeuges kann wegen  $r \ll l$  der zweite Summand in (3) vernachlässigt werden. Dies wird durch die Beobachtung gestützt, daß während des Halbtakts des Wassereinsaugens keine Rückwärtsbewegung erfolgt. Umgekehrt würde man bei



**Abb. 3: Wärmekraftdrehler**

der Erwärmung des Wassers dienende Energieverluste unterbunden werden.

Das Vorhandensein von zwei Antriebsröhren hat zu der falschen Erklärung geführt (vgl. z. B. Miller 1958, S. 199), das Wasser werde durch das eine Rohr angesogen und durch das

andere ausgetrieben. Dem widerspricht nicht nur die Tatsache, dass das Boot auch mit einer Röhre arbeitet, wie man durch Zustöpseln der anderen zeigen kann, sondern auch das bei sorgfältiger Beobachtung (unterstützt mit gefärbtem Wasser) feststellbare synchrone Ausströmen des Wassers aus beiden Röhren.

Durch eine geringfügige konstruktive Abänderung lässt sich aber auch ein ähnlicher "Antrieb" realisieren (siehe Abb. 3), bei dem Wasser kontinuierlich aus dem einen Rohr ausgestoßen und gleichzeitig Wasser in das andere eingesogen wird. Aufgrund der speziellen Konstruktion kommt es dann ebenfalls zu einer Bewegung, in diesem Fall einer Drehbewegung (vgl. Sükoso 1983). Schwingungen treten hier nicht auf. Das zyklische an dem Vorgang besteht, wenn man so will, in der Drehung des Objektes. Auch kommt es zu keiner Verdampfung des Wassers. Die Erwärmung sorgt für ein Aufsteigen des leichteren warmen Wassers und bewirkt dadurch das Ausstoßen von Wasser am einen und das Einsaugen von Wasser am anderen Rohrende.

#### 4 Wärmekraftmechanismus

Das Antriebsaggregat des Dampf-Jet-Boot ist eine Wärmekraftmaschine ohne bewegliche mechanische Teile. Der Wärmekraftzyklus besteht aus folgenden Teilvorgängen:

- Das Wasser im Dampfkessel wird durch die kontinuierlich zugeführte Wärmeenergie der Heizquelle (Kerze, Esbit o.ä.) zum Verdampfen gebracht.
- Die dadurch bewirkte Volumenzunahme führt zu einer Auslenkung der Wassersäulen in den Röhren und damit zum direkt beobachtbaren Ausstoß der Wasserjets. Wir haben gesehen, dass dadurch der Antrieb des Bootes zustande kommt.
- Der auf diese Weise mit den vorher vom Wasser gekühlten Rohrwandungen in Verbindung kommende Dampf wird abgekühlt und kondensiert.
- Dadurch kommt eine Kontraktion des Dampfolumens und ein Zurückströmen des Wassers von außen in die Röhren zustande. Gleichzeitig wird die Erwärmung der Rohrwandungen durch das zurückströmende Wasser wenigstens teilweise wieder aufgehoben. Nun beginnt ein neuer Zyklus.

Der eigentliche Kühler der Wärmekraftmaschine ist das umgebende Wasser. Die in den Röhren ausgelenkten Wassersäulen werden im stationären Betrieb normalerweise nicht vollständig herausgedrückt. Es wird weder entweichender Dampf noch werden Wasserjets von der Länge der Röhren beobachtet. Damit eine hinreichende Abkühlung erfolgen kann, muss die Auslenkung der Wassersäule so groß sein, dass diese eine genügend große Fläche gekühlter Rohrwandungen berührt. Lässt man das Boot nämlich in heißem (fast kochendem) Wasser schwimmen, so kommt die Schwingung zum Erliegen. Dies ist ein sehr anschauliches Beispiel für die Bedeutung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik.

#### 5 Oszillator

Das Dampf-Jet-Boot fällt vor alles durch ein regelmäßiges Tuckern auf, welches an eine ungedämpfte Schwingung erinnert. In Wirklichkeit unterliegt die Schwingung natürlich starken Dämpfungen, die nur deshalb nicht zum Erliegen der Schwingung führen, weil durch die Wärmeenergiezufuhr eine gleich große Anfachung der Schwingung erfolgt.

Als schwingende Elemente des Dampf-Jet-Boot kommen die das tuckern Geräusch produzierende Membran des Dampfkessels sowie die mit gleicher Frequenz in den Röhren schwingenden Wassersäulen in Frage. Die Membrane ist insofern unwesentlich als auch dann eine Schwingung zustande kommt, wenn sie durch einen starren Deckel ersetzt wird (vgl. Macaky 1958). Sie sorgt jedoch für das Geräusch des Tuckerns und beeinflusst den Schwingungsverlauf. Zur Beschreibung der Schwingung werde daher die Lage  $z$  des Meniskus der Wassersäule herangezogen (Abb. 4). Damit es überhaupt zu einer Auslenkung kommt, muss es erst einmal zu einer Verdampfung von Wasser kommen. Der zugeführte Wärmestrom muss demnach größer sein als die nicht der Erwärmung des Wassers dienenden Wärmeverluste. Die Verdampfung von Wasser führt zum Austreiben von Wasser aus dem Kessel und damit zu einer Auslenkung der Wassersäule. Von dem Moment an, da der Dampf aus dem Erwärmungsbereich heraus in die dünnen Röhren dringt, beginnt sich mit zunehmendem  $z$  ein Wärmeverlust aufzubauen, der schließlich zu einer Kondensation und damit zu einer die Auslenkung stoppenden rücktreibenden Kraft führt. Bei einer bestimmten Auslenkung  $z_0$ , wird ein stationärer Gleichgewichtszustand erreicht, bei dem sich Ausdehnungs- und Zusammenziehungstendenz die Waage halten. Um diesen Gleichgewichtszustand  $z_0$  vollziehe sich die Schwingung, die im Folgenden durch die Elongation  $x = z - z_0$  beschrieben werde (Abb. 4).

Gedämpft wird die Schwingung vor allem durch den oben beschriebenen Antrieb des Bootes: Das Ausstoßen des Wasserjets aus den Rohrenden erfolgt nach dem Prinzip "actio gleich reactio" mit einer mittleren Kraft der Größe  $F_D \sim v^2 = x^2$  (s. Gl. (4)). Dieses ausgestoßene Wasser wechselwirkt

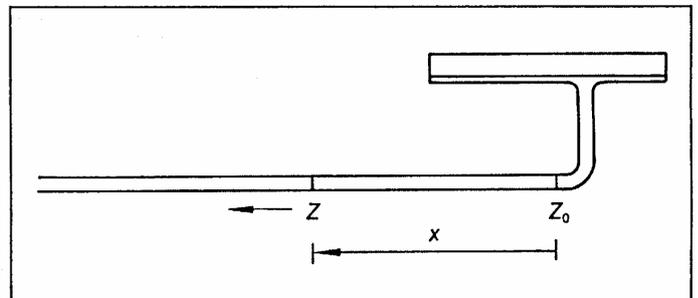


Abb. 4: Darstellung der Auslenkung der schwingenden Wassersäule

wiederum mit der im Rohr verbliebenen Wassersäule und führt nach dem gleichen Prinzip zu einer dieser Säule abbremsenden Kraft proportional zu  $x^2$ . Da diese Dämpfungskraft  $F_0$  i.w. nur im Halbtakt des Ausströmens wirkt, gilt für sie:

$$F_0 = d x^2 \cdot \Theta(\dot{x}),$$

$$\text{wobei } \Theta(\dot{x}) = \begin{cases} 1 & \text{für } \dot{x} > 0 \\ 0 & \text{für } \dot{x} < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Veranschaulichen läßt sich dieser Dämpfungsvorgang z.B. durch den Versuch, von einem ans Ufer treibenden Boot an Land zu springen: Der mit dem Sprung verbundene Impulsübertrag bremst die Fahrt des Bootes ab.

Weitere Dämpfungskräfte, wie z. B. der Strömungswiderstand in den Röhren setzen wir mit  $F_R = r x$  an. Für die Anregung der Schwingung sorgt der hier als konstant vorausgesetzte Wärmestrom von der Heizquelle zum Kessel. Wir gehen hier von der einfachen Annahme aus, dass er eine der

Geschwindigkeit proportionale Kraft erzeugt:

$$F_A = a\dot{x}.$$

Als Trägheit, die die Bewegung über die Gleichgewichtslage  $z_0$  hinausführt, werde die mittlere Masse  $m$  der schwingenden Wassersäule angesehen.

Demnach ergibt sich im Rahmen dieser einfachen Modellierung die folgende Bewegungsgleichung:

$$m\ddot{x} + kx + r\dot{x} + dx^2 \Theta(\dot{x}) = a\dot{x} \text{ bzw.} \quad (6)$$

$$\ddot{x} + \omega^2 x + \gamma\dot{x} + \delta\dot{x}^2 \Theta(\dot{x}) = \alpha\dot{x}$$

wenn man die Abkürzungen  $\alpha = a/m$ ,  $\omega^2 = k/m$  und  $\gamma = r/m$   $\delta = d/m$  benutzt. Diese nichtlineare Differentialgleichung ist elementar nicht auswertbar. Eine numerische Integration ist allerdings i.a. problemlos durchzuführen.

In den Abb. 5a und b wurde das Orts-Zeit-Diagramm für zwei

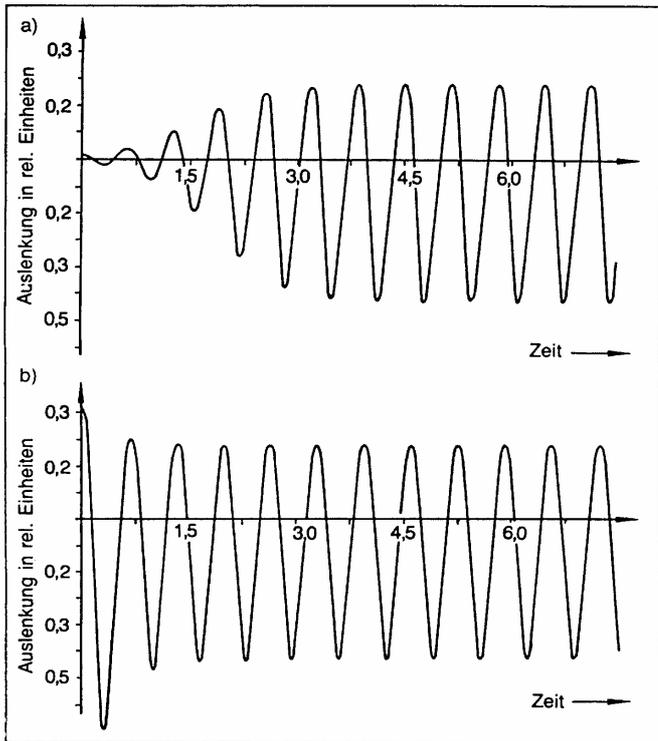


Abb. 5a: Orts-Zeit-Diagramm (Erläuterung im Text); b: Ort-Zeit-Diagramm (Erläuterung im Text)

verschiedene Ausgangssituationen dargestellt.

Wie immer der Ausgangspunkt auch sein mag, es stellt sich stets derselbe stationäre Endzustand ein. In 5a wurde der Normalfall der sich aufgrund einer kleinen Störung aufschaukelnden Schwingung aufgetragen, in 5b der Fall einer sehr starken Anfangsauslenkung. Auffallend ist die Asymmetrie der Hin- und Her-Amplituden. Wegen der starken Energieabgabe zum Antrieb des Bootes beim Ausstoßen des Wassers ist die Amplitude der Hin-Schwingung kleiner als die mit dem Einsaugen des Wassers verbundene Her-Schwingung.

## 6 Energiebetrachtungen

Multipliziert man Gl. (9) mit  $x$ , so lässt sie sich als Energiebilanzgleichung schreiben und erlaubt eine anschauliche Interpretation:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \omega^2 x^2 \right) + (\delta \dot{x}^3 \Theta(\dot{x}) + \gamma \dot{x}^2) = \alpha x^2. \quad (10)$$

Der erste Term auf der linken Seite von Gl. (10) stellt die zeitliche Änderung der im Oszillator gespeicherten Energie dar, der zweite Term den durch Dämpfung abgeführten Energiestrom. Beide Anteile müssen durch den auf der rechten Seite dargestellten Anregungsenergiestrom aufgebracht werden.

Wir gehen näherungsweise davon aus, daß die Schwingung pro Periode harmonisch ist. Es gilt also für die Auslenkung  $x \cong A \sin(\omega t + \varphi) + A_0$ , wobei  $A$  die Amplitude,  $\omega$  die Frequenz der Schwingung ist. Dann kann man aus Gl. (10) den über eine Periode gemittelten Dämpfungsenergiestrom  $P_D$  und Anregungsenergiestrom  $P_A$  bestimmen:

$$P_D = \int_0^T \left\{ \frac{\delta A^3 \omega^4}{2\pi} \cos^3 \omega t + \frac{\gamma A^2 \omega^3}{2\pi} \cos^2 \omega t \right\} \cdot dt$$

$$= A^2 \omega^2 \left( \frac{\delta A \omega}{3\pi} + \frac{\gamma}{2} \right) \quad (8a)$$

$$\overline{P}_A = \int_0^T \frac{A^2 \omega^3}{2\pi} \cos^2 \omega t \cdot dt = \frac{\alpha A^2 \omega^2}{2}. \quad (8b)$$

In Abb. 6 wurden die mittleren Energieströme  $P_A$  und  $P_D$ , als Funktion der Amplitude  $A$  aufgetragen. Aufgrund der Nichtlinearität vermögen sich die beiden Kurven zu treffen, wodurch - wie unten noch ausgeführt wird - das stationäre Endverhalten selbsttätig eingeregelt werden kann.

Im stationären Gleichgewichtszustand  $\dot{x} = 0$  sind wegen  $\ddot{x} = \dot{x} = 0$  Anregungs- und Dämpfungskraft gleich. Dieser

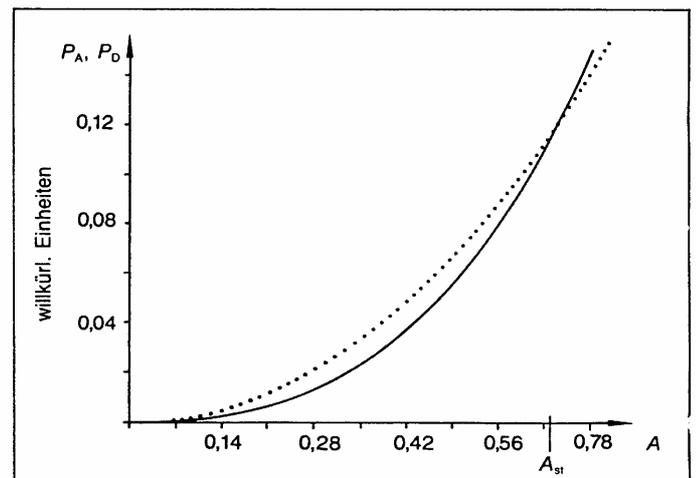


Abb. 6: Schematische Darstellung des über eine Periode gemittelten Anregungs- ( $P_A$ ) und Dämpfungsenergiestromes ( $P_D$ ) in Abhängigkeit von der Amplitude  $A$ .  $A_{st}$  bezeichnet die stationäre Amplitude

Zustand ist jedoch labil. Eine zu einer noch so kleinen Auslenkung  $\delta x$  führenden Störung bewirkt eine Aufschaukelung der Schwingung. Denn die linearisierte Gl. (6)

$$\delta\ddot{x} + \omega^2 \delta\xi - (\alpha - \gamma) \delta\dot{x} = 0$$

beschreibt für  $\alpha > \gamma$  eine sich aufschaukelnde Schwingung. Die Bedingung  $\alpha > \gamma$  bringt zum Ausdruck, dass die Energiezufuhr genügend groß sein muss, damit überhaupt eine Schwingung zustande kommt. In der Tat muss der zugeführte Wärmestrom einen kritischen Schwellenwert überschreiten, unterhalb dessen keine Auslenkung der Wassersäule erfolgt. Wie man Abb. 6 entnimmt, gewinnt infolge der Aufschaukelung mit wachsender Amplitude  $A$  der kubische Term  $P_D$  zunehmend an Bedeutung, bis er nach Erreichen einer bestimmten Amplitude  $A_{st}$  größer wird als der quadratische Term  $P_A$ . Dann überwiegt der dämpfende Anteil den anfachenden und verhindert eine weitere Aufschaukelung. Das System erreicht auf diese Weise einen stabilen

Grenzyklus. Damit wird eine geschlossene Kurve im Geschwindigkeits-Auslenkungsdiagramm bezeichnet, auf der die Werte von  $\dot{x}(t)$  "umlaufen" und die Stationarität und Stabilität des Systems zum Ausdruck bringen (Abb. 7).

## 7 Selbstorganisation

Dass ein solches durch starke Dämpfungen charakterisiertes System überhaupt mit konstanter Frequenz zu schwingen vermag, liegt in seiner energetischen Offenheit begründet. Dem System wird ständig Energie zugeführt, und es gibt ständig Energie an die Umgebung ab. Im stationären Schwingungszustand ist die im System enthaltene Gesamtenergie zeitlich konstant. Die gesamte zugeführte hochwertige Wärmeenergie (Wärme bei hoher Temperatur) wird als wertlose Wärme (bei niedriger Temperatur) an die Umgebung abgeführt. Der eigentliche Antrieb ist demnach in der Dissipation von Energie zu sehen. Solche Systeme werden daher nach Prigogine (1980), auch *dissipative Systeme oder Strukturen* genannt. Solange das System diesen stationären

Wechselspiel zwischen positiver und negativer Rückkopplung (siehe Abb. 8), durch das ein stabiles Endverhalten des Systems, d. h. eine (dissipative) Struktur eingeregelt wird. Das System besitzt demnach die Fähigkeit, ein charakteristisches, gegen äußere Störungen stabiles Verhalten selbst zu organisieren (*Selbstorganisation*) und gewissermaßen eine durch die Struktur definierte Individualität in einer sich (in Grenzen) ändernden Umwelt zu bewahren.

### Literatur

- [1] O. E. Berge. - Spielzeug im Physikunterricht. Heidelberg: Quelle & Meyer 1982
- [2] I. Finnie und R. L. Curk Physics in a Toy Boat. Am. J. Physics 31, 289 (1963)
- [3] R. S. Mackey: Boat Driven by Thermal Oscillations. Am. J. Physics 26, 583 (1958)
- [4] J. S. Miller. Physics in a Toy Boat. Am. J. Physics 26, 199 (1958)
- [5] I. Prigogine und L. Stengers: Dialog mit der Natur. München: Piper 1983
- [6] B. Hegewald: Phasenübergangsähnliche Phänomene in der Mechanik ein Gegenstand zur Einführung synergetischer Grundbegriffe im Schulunterricht. PdN-Ph. 32/2, 35 (1983)

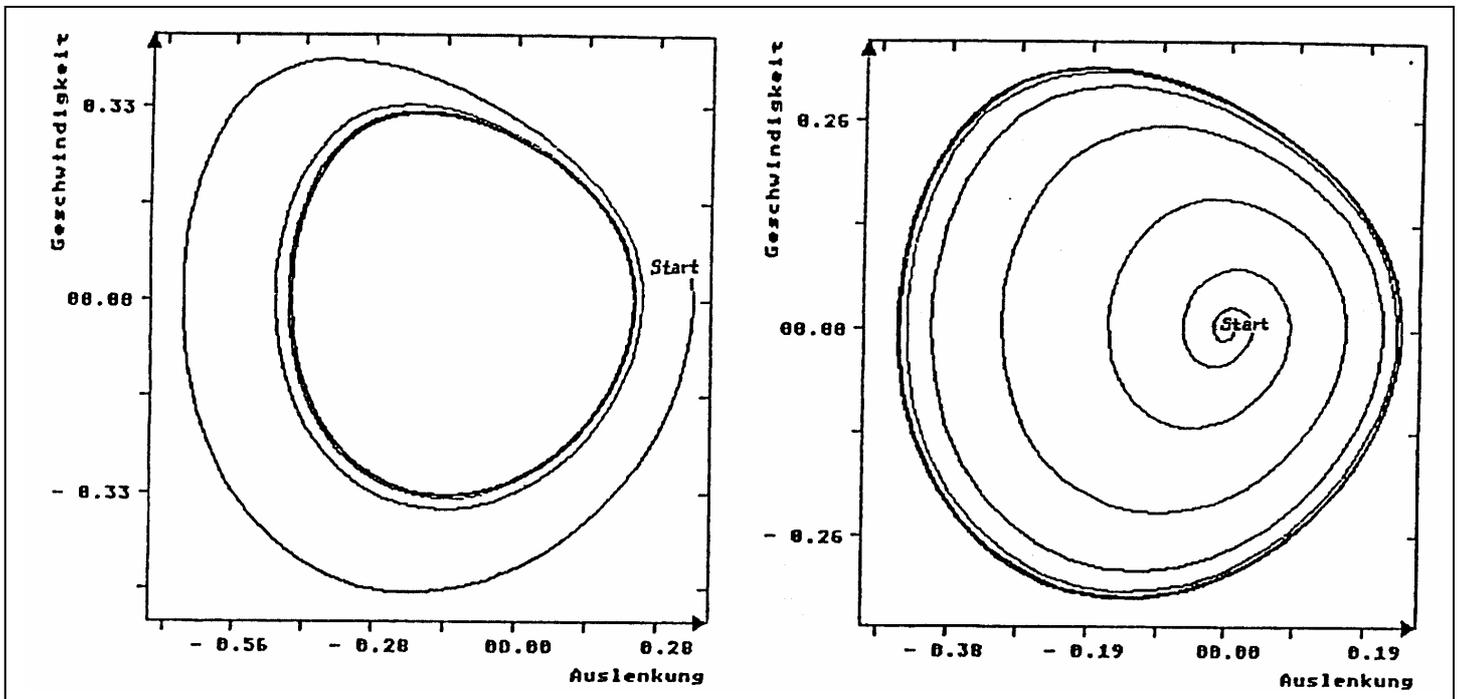


Abb. 7: Schematische Darstellung des Grenzyklus einer Schwingung. Zustände innerhalb der geschlossenen Kurve führen jeweils zur Aufschaukelung, außerhalb zur Dämpfung, derart, daß es aus jeder Anfangslage zu einer Einmündung in den stationären Zustand komm

Zustand noch nicht erreicht hat, wird für den Fall, dass die Amplitude  $A$  kleiner als die stationäre Amplitude  $A_{St}$  ist, nicht die gesamte zugeführte Energie dissipiert. Ein Teil verbleibt im System und manifestiert sich in der schrittweise wachsenden Amplitude bzw. Geschwindigkeit, bis die mit wachsender Amplitude bzw. Geschwindigkeit noch "schneller" wachsende dissipierte Energie den Betrag der zugeführten Energie gerade kompensiert. Eine ähnliche Argumentation gilt für die Einregelung der stationären Amplitude  $A_{St}$ , wenn die anfängliche Amplitude  $A$  größer ist als  $A_{St}$ . Für den hier noch einmal skizzierten Regelvorgang ist das *nichtlineare Verhalten* des Systems verantwortlich, d.h. die Tatsache, dass zwei konkurrierende Terme in der Bewegungsgleichung unterschiedlich "schnell" mit der Amplitude  $A$  variieren, so dass sie sich bei einem bestimmten Wert von  $A$ , nämlich bei  $A_{St}$  "treffen" können. Die Nichtlinearität bewirkt demnach ein

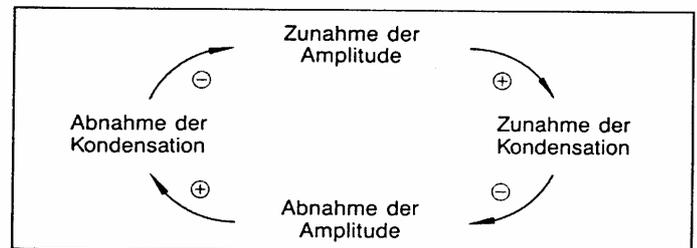


Abb. 8: Das Wechselspiel zwischen positiver und negativer Rückkopplung regelt ein stabiles Endverhalten ein

- [7] B. Rodewald und H. J. Schlichting. - Prinzipien der Synergetik - erarbeitet an Spielzeugen. PdN-Ph. 3514, 33 (1986)
- [8] G. Sauer. - Synergetik in der Sekundarstufe 11. In: W. Kuhn (Hrsg.): Vorträge Physikertagung in Münster 1984
- [9] C. Sükoso: School experiments for the second law. In: G. Marx (ed.): Entropy in the School. Budapest 1983, S. 497

An  
**PHANTASIA-VERSAND**  
 Hubenröder Straße 40  
 37217 Witzenhausen



Lieferung an: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Tel: 0700 - 800 900 16; Fax: 0700 - 800 900 23  
 E-Mail: mail@Phantasia-Versand.COM  
 URL: www.Phantasia-Versand.COM

E-Mail: \_\_\_\_\_  
 TEL/FAX: \_\_\_\_\_

Bitte liefern Sie mir gemäß Ihren unten aufgeführten Geschäftsbedingungen:

Code	Artikel	Menge	€-Preis/St.	Summe

Unterschrift: \_\_\_\_\_ Datum: \_\_\_\_\_

**Geschäftsbedingungen:**

Alle Preise inkl. 16 % MwSt. zuzüglich einer Verpackungs-/Portopauschale (Inland) von € 7,- (bzw. von € 15,- für Hängematten und Reifenschaukeln). Der Mindestbestellwert beträgt € 15,-. Ab € 200,- Bestellwert liefern wir frei Haus. Lieferungen erfolgen unter Vorbehalt der Verfügbarkeit in der Regel innerhalb von einer Woche ab Bestellungseingang. Lieferung (außer bei Firmen/Behörden) nur gegen Vorausüberweisung, Zusendung eines Verrechnungs-Schecks, Bankeinzugsermächtigung oder per Nachnahme (Nachnahmegebühren von €7,- zu Lasten des Empfängers). Gerichtsstand für beide Teile ist Göttingen.

Vorausüberweisungen richten sie bitte an unser Konto Nr.: 11 07 67 bei der Sparkasse Göttingen, BLZ: 260 500 01 und informieren uns kurz über erfolgte Zahlungen/Bestellungen.

Oder nutzen sie das bequeme Einzugsverfahren:

Ich bin damit einverstanden, dass der Betrag aus obiger Bestellung einmalig von folgendem Konto eingezogen wird:

Kontoinhaber: \_\_\_\_\_

Konto-Nr.: \_\_\_\_\_ bei \_\_\_\_\_ BLZ: \_\_\_\_\_

Ort: \_\_\_\_\_ Datum: \_\_\_\_\_ Unterschrift: \_\_\_\_\_