

# An den Enden der Geraden

## Argumente für eine nichtlineare Sehweise

H. Joachim Schlichting, Volkhard Nordmeier

*Die krumme Linie kennt kein größeres Wunder, als die gerade.  
Aber nicht umgekehrt.*  
Friedrich Hebbel

### Prolog

*KNELLER: Wenn es eine Wissenschaft der Linie gibt, verstehe ich dann nicht mehr davon als jeder andere?*

*KARL: Zugegeben, Herr Kneller. Und weiter?*

*KNELLER: Dieser Mann hier, wagt, im Widerspruch zu mir, zu mir! die Behauptung, daß eine richtige Linie eine gerade Linie sei und daß alles, was sich bewegt, in einer geraden Linie verläuft, es sei denn, daß irgendeine allmächtige Kraft es von seiner Bahn ablenkt. Dies, so behauptet er, sei das erste Gesetz der Bewegung. Er liegt.*

*KARL: Und was ist Ihre Meinung, Herr Kneller?*

*KNELLER: Mein Herr, ich habe keine Meinung, ich WEISS: Die richtige Linie, die Linie der Schönheit, ist eine Kurve. Meine Hand kann keine gerade Linie zeichnen: dazu muß ich eine Kreideschnur über meine Leinwand spannen und mich daran halten. Wollen Sie etwa leugnen, daß Ihre Herzogin ebenso berühmt ist für ihre Schönheit wie die PSYCHE des göttlichen Raphael? Nun, an ihrem Körper gibt es keine einzige gerade Linie, er besteht aus lauter Kurven... Die Bewegung in der Kurve ist ein Naturgesetz, und das Naturgesetz ist das Gesetz Gottes. Gehen Sie hinaus in Ihren Garten, und werfen Sie einen Stein in gerader Linie, wenn Sie können. Schießen Sie einen Pfeil vom Bogen, eine Kugel aus der Pistole, eine Kanonenkugel aus der größten Kanone, die Ihnen der König zur Verfügung stellen kann! Und wenn Sie die Kraft eines Herkules hätten und Schießpulver, explosiver als die Dampfkraft, die das Gestein des Ätna emporschleudert, Sie könnten doch weder Ihren Pfeil, noch Ihre Kugel geradlinig auf das Ziel fliegen lassen.*

*NEWTON schrecklich beunruhigt: Dieser Mensch weiß nicht, was er sagt. Fort mit ihm, und laßt mich in Frieden.*

*KARL: Was er sagt, verlangt eine Antwort, Herr Newton.*

*JAKOB: Der Maler hat recht. Eine Kanonenkugel fliegt in Kurven über das Meer, wie die Bögen einer Brücke, hopp, hopp, hopp. Aber was macht das schon aus, ob sie gerade oder krumm fliegt, vorausgesetzt, sie schlägt zwischen Wind und Wasser ein?*

*NEWTON: Einem Admiral macht das nichts aus. Für mich ist es der Unterschied zwischen Vernunft und Wahnsinn.[1]*

Der Unterschied zwischen Vernunft und Wahnsinn, den Bernard Shaw seinen Newton hier ansprechen läßt, ist die dichterische Umschreibung der Differenz zwischen Physik und Lebenswelt, die einen wesentlichen Streitpunkt zwischen beiden Sehweisen ausmacht. Vernunft steht hier für Kalkulierbarkeit und Beherrschbarkeit, Wahnsinn für alles andere. Newton hat in seinem System Vorsorge getroffen, um die Vernunft auf seiner Seite zu haben: Durch Linearisierung der vorgefundenen Verhältnisse gelingt es in der Newtonschen Physik, die Welt auf ein Maß zu reduzieren, das eine quantitative mathematisch einfache Beschreibung erlaubt. In Form einer (linearen) Differentialgleichung läßt sich das Verhalten eines Systems für jeden beliebigen Zeitpunkt vorhersagen, sofern man sein Verhalten zu einem bestimmten Zeitpunkt, z. B. dem gegenwärtigen, kennt. Die Kurven der Herzogin lassen sich problemlos durch eine Summe beliebig kleiner linearer Abschnitte approximieren, ihr Verhalten durch eine wenn auch „ziemlich elaborierte Differentialgleichung“ (Eddington) beschreiben, wobei die allgemeine Lösung wiederum als Summe spezieller Lösungen gewonnen werden kann.

Heute kann man sich mit einer solchen Annäherung an die Herzogin auch aus physikalischer Perspektive nicht mehr zufrieden geben: Man ist an den Enden der Geraden angelangt. Die Welt ist weder kalkulierbar noch vorhersagbar, sie ist nicht linear - sie ist *nichtlinear*.

Diese Überzeugung macht Selbstverständlichkeiten wie die folgende, zum Ausgangspunkt eines neuen wissenschaftlichen Programms: „*Wolken sind keine Kugeln, Berge keine Kegel, Küstenlinien keine Kreise. Die Rinde ist nicht glatt - und auch der Blitz bahnt sich seinen Weg nicht gerade*“[3].

Sofern die lineare Denkweise teilweise sehr konkret ihren Niederschlag in anderen Lebensbereichen gefunden hat, wie etwa in der Architektur und Kunst, beginnt man auch hier die Grenzen der Geraden zu sehen: „*Die gerade Linie (führt) zum Untergang der Menschheit. Sie ist zur absoluten Tyrannei geworden. Die gerade Linie ist etwas, was man niederträchtig mit Hilfe eines Lineals zieht, ohne nachzudenken und ohne zu fühlen, eine Linie, die in der Natur nicht existiert. Und diese Linie ist das verrottete Fundament unserer zum Untergang geweihten Zivilisation. Selbst wenn man an einigen spärlichen Plätzen erkannt hat, daß die gerade Linie zu einem schnellen Ende geführt hat, hat man ihre Programmierung fortgesetzt. Die gerade Linie ist die einzige unschöpferische Linie, die einzige Linie, die dem Menschen, der nach dem Bild Gottes geschaffen wurde, fremd ist. Die gerade Linie ist die verbotene Frucht. Die gerade Linie ist der Fluch unserer Zivilisation*“ [4].

## Die Welt ist krumm

Die nichtlineare Physik hat den Naturwissenschaftlern u.a. auf zum Teil spektakuläre Weise bewußt gemacht, daß

- das Verhalten eines Systems auch im Rahmen einer deterministischen Dynamik unvorhersagbar sein kann,
- chaotisches, im Detail nicht vorhersagbares Verhalten nicht das Ende physikalisch sinnvoller Fragestellungen bedeutet,
- Selbstorganisationsverhalten nicht den Lebewesen vorbehalten ist, sondern bereits in sehr einfachen Systemen mit wenigen Freiheitsgraden auftreten kann, die ihrerseits als Modellsysteme für sehr viel komplexere Systeme dienen können.

Darüber ist in den letzten Jahren viel geforscht und publiziert worden [2]. Außerdem ist das Bewußtsein dafür geschärft worden, daß - bereits früher erkannte - nichtlineare Zusammenhänge für eine adäquate Beschreibung der realen Welt unabdingbar sind. Sie können selbst im Prinzip nicht weglassen werden, ohne für die jeweiligen Systeme und Vorgänge wesentliche Aspekte zu beseitigen. Dafür seien einige Beispiele genannt.

## Wellen, Rippel und Mäander

Die Natur vermeidet offenbar die gerade Linie. Wohin man sieht, herrscht das Nichtlineare. Interessant ist aber, daß selbst Systeme, die sich in einer linearen, ebenen Ausgangssituationen befinden, dazu tendieren, diese zu verlassen.

- Eine noch so glatte Meeresoberfläche ist in Gegenwart des darüber streichenden Windes instabil, wird in einem selbstverstärkenden Prozeß aufgerauht und bremst den Wind ab, wobei das Wasser selbst in Bewegung gerät.
- Analoge Vorgänge finden bei der Ausbildung von Sandrippeln und -dünen in Wüstengebieten statt.
- Werden in der Natur Geraden angetroffen, so deuten sie in der Regel auf menschliche, d.h. technische Aktivitäten hin: Die schnurgerade Straße, der begradigte Fluß, aber auch die Ackerfurche, die in geraden Reihen angeordneten Ackerpflanzen sind der Natur aufgezwungen. Was aus menschlicher Sicht als naheliegend erscheint, ist offenbar nicht natürlich: Die ebene Straße wird nach einiger Zeit uneben. Wer hätte sich nicht schon über die regelmäßigen, wellenförmigen Störungen auf dem viel befahrenen rechten Fahrstreifen einer Autobahn gewundert. Bei einem ebenen Sandweg kann man schon nach kurzer Benutzungsdauer eine wellenförmige Oberfläche beobachten (Bild 1).
- Nicht nur (natürliche) Flüsse zeigen ein dynamisches Mäanderverhalten. Auch schnurgerade Entwässerungsgräben weichen bald vom vorgegebenen Verlauf ab und beginnen zu mäandern (Bild 2).

- Die gegen eine glatte und saubere Scheibe prasselnden Regentropfen laufen ruckweise und fast zickzackförmig hinunter.



Bild 1: Nahezu äquidistante Rillen auf einem viel befahrenen festen Sandweg.



Bild 2: Schon nach wenigen Jahren wird aus dem geraden Entwässerungskanal ein „mäandernder“ Bach.

die zeigen, daß das Nichtlineare allgegenwärtig ist.

- Eine Fahne im Wind fängt an zu flattern, eine senkrecht fallengelassene Spielkarte gerät in eine regelmäßige Drehbewegung.
- Aber auch in der Technik wird man an den entscheidenden Stellen gezwungen, das Gerade zu umgeben: Mauerwerke werden in einem „nichtlinearen“ Verband errichtet. In der Vertikalen trifft man normalerweise keine durchgehenden Geraden an. Brücken werden durch Bögen und Streben stabilisiert.

Es ließen sich zahlreich weiter Beispiele aus der Umwelt finden,

### „Bäume wachsen nicht in den Himmel“

Ein sich linear, geradlinig entwickelndes System ist schon deshalb unrealistisch, weil es niemals an Grenzen stoßen könnte. Eine elementare Einsicht in Wachstumsprozesse ist aber die, daß in einem endlichen System, und wir haben es auf dieser Welt nur mit endlichen Systemen zu tun, nicht unbegrenzt Wachstumsprozesse stattfinden können. Nur die an der Zauberformel des Wachstums hängenden Politiker scheinen dies noch nicht bemerkt zu haben und sind überrascht, wenn das System seine Grenzen auf eine Weise zu erkennen gibt, die in der linearen Modellierung der Welt keine plausible Erklärung finden kann.

Nimmt man das obige Sprichwort wörtlich, so zeigt sich, daß die Grenzen des Wachstums der Bäume in der Nichtlinearität begründet sind. Geht man in einfacher Modellierung [8] davon aus, daß die Kräfte, die einen Baum der Länge  $l$  stabilisieren, proportional zur Querschnittsfläche  $A \sim l^2$  wachsen, die Gewichtskraft aber proportional zum Volumen  $V \sim l^3$  variiert, so folgt zwangsläufig, daß sich die Baumdicke  $d$  wie  $d \sim l^{3/2}$ , also nichtlinear mit der Länge entwickelt. Dabei wurde nur unterstellt, daß das Verhältnis aus Gewichtskraft und Volumen einen bestimmten maximalen Wert nicht überschreiten kann. Der Baum müßte demnach irgendwann einmal dicker als hoch sein, was zu weiteren Problemen führt, die im folgenden Beispiel anhand der Größe von Lebewesen skizziert wird.

### Von Mäusen und Menschen

Könnte man Mäuse durch eine lineare Ähnlichkeitstransformation auf die Größe von Menschen und diese umgekehrt auf die Größe von Mäusen transformieren? Da die Oberfläche wie  $O \sim l^2$  und das Volumen wie  $V \sim l^3$  variiert, würde bei einer Vergrößerung bzw. Verkleinerung um - sagen wir den Faktor 10 - die Oberfläche der Maus bzw. des Menschen um den Faktor 100 zu - bzw. abnehmen. Beim Volumen hätte man sogar eine Variation um den Faktor 1000. Damit wären aber weitreichende Konsequenzen verbunden. Die „Menschenmaus“ würde unter der Last ihres vertausendfachen Volumens zusammenbrechen, da Muskel- und Knochenquerschnitte nur auf eine 10 mal so kleine Last ausgelegt wären. Demgegenüber würde der „Mausemensch“ aufgrund der 10 mal zu kleinen Oberfläche auskühlen. Sein Verdauungssystem wäre viel zu klein für derartig große Energieumsetzungen, wie sie eine Maus allein zur Aufrechterhaltung der Körpertemperatur benötigte. Was die Maus an Knochen- und Muskelgewebe „einspart“, wird durch das im Vergleich zum Menschen überdimensionalen Verdauungssystem wieder

wettgemacht. Eine kleine Maus muß Nahrungsmittel in der Größenordnung von einem Viertel ihrer Körpermasse umsetzen, beim Menschen sind es wenige Prozent.

Darin zeigt sich eine weitere für das Leben bedeutungsvolle Nichtlinearität. Da das Volumen eines Lebewesens durch Oberflächen versorgt und entsorgt werden muß, kann der Ver- und Entsorgungsenergiestrom mit der Zunahme des Volumens bei immer größeren Tieren nicht Schritt halten. Herz- Lungen- und Verdauungssystem sind aus dieser Sicht trickreiche Vorrichtungen, die den Oberflächen- Volumen- Engpaß Rechnung zu tragen [6]. Es liegt nahe, diesen Energiestrom, die sogenannte Stoffwechselintensität  $I \sim l^2 \sim m^{2/3}$  ( $m$  ist die zu  $l^3$  proportionale Masse des Lebewesens) zu setzen. Sorgfältige Untersuchungen über alle existierenden Größenordnungen haben jedoch ergeben, daß  $I \sim m^{3/4}$ . Dieser Befund ist lange Zeit rätselhaft geblieben. Aus der Sicht der fraktalen Geometrie scheinen die fraktal ineinander verwobenen Organe das Flächenhafte zu überwinden, ohne das Volumenhafte zu erreichen. Form und Funktion der Organe sind so gesehen die zwei Seiten derselben Medaille.

### Der freie Fall der Maus

Eine Maus könnte aus einer Höhe von 1000 m fallen, ohne sich zu verletzen. Aus der Sicht der reibungsfreien klassischen Physik würde ihre Geschwindigkeit während des freien Falls immer weiter wachsen. In Wirklichkeit gelangt die Maus aber aufgrund ihrer im Verhältnis zur Masse großen Oberfläche sehr schnell in eine konstante Sinkgeschwindigkeit, die so niedrig ist, daß sie das Auftreffen auf dem Boden überleben würde. Während die beschleunigende Erdanziehungskraft konstant bleibt, wächst die Reibungskraft quadratisch, also nichtlinear mit der Geschwindigkeit an, so daß letztere erstere einholt und begrenzt. In speziell ausgewählten (fallende Stahlkugeln) oder präparierten Fällen (luftverdünnter Raum) merkt man davon zwar nichts; sei es, daß nur kurze Wegstreckenabschnitte betrachtet werden, in der sich Abweichungen von der Linearität noch nicht bemerkbar machen, sei es, daß die Bewegung zum Ende kommt, bevor der Widerstand merklich wird.

Selbst eine fallende Stahlkugel wird bei hinreichender Höhe schließlich eine endlich Sinkgeschwindigkeit erreichen, bei der die Reibung die Gravitationskraft kompensiert. Weniger künstliche Objekte, wie etwa ein Blatt oder geflügelte Samen, nehmen sich die Freiheit, vom freien Fall in einer mehr oder weniger regelmäßigen Struktur abzuweichen und langsam zu Boden zu gehen. Über die schlichte Beschränkung des klassischen Blicks auf den Massenpunkt hinausgehend erkennt man die Bedeutung der Form des Objekts, die offenbar eng verknüpft ist mit der Dynamik. Ob man beispielsweise einen Papierstreifen zu einer Papierkugel zusammenknäult, zu einem Papierhubschrauber geformt oder unverändert fallen läßt, führt zu völlig verschiedenen Bewegungsfiguren. Am interessantesten ist offenbar der Papierhubschrauber, der seine Gestalt gegen äußere Störungen stabilisierend wie ein Ahornsamen rotierend gemächlich hinabsinkt [8].

Seitdem man auch in der Physik beginnt, die mit Idealgestalten bevölkerte luftleere und reibungsfreie Welt zu verlassen, entdeckt man, daß jede Kraft eine Gegenkraft, jede Bewegung eine Gegenbewegung hervorruft, die diese wie ein Schatten begleitet. Dieser nichtlineare Schatten, der sich in Reibung und anderen Dissipationserscheinungen bemerkbar macht, sollte nicht nur negativ gesehen werden. Er ist der Garant dafür, daß jeder noch so „wilde“ Vorgang in einen stationären Zustand einmündet und als System „gezähmt“ wird. Daraus ergibt sich unmittelbar, daß die Dissipation stets schneller wächst als der Antrieb.

## Keine Stabilität ohne Nichtlinearität

Was steckt anschaulich betrachtet hinter der Nichtlinearität? Eine vorläufige und pauschale Antwort lautet: Stabilität. Eine präzisere Antwort wird sich mit der Art der Stabilität und ihre physikalische Bedeutung befassen müssen. Hier sei nur soviel gesagt: Sich selbst überlassene komplexe Systeme werden durch Dissipation von Energie in Gang gehalten [9]. Damit der stationäre Zustand des Systems (fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht) aufrechterhalten werden kann, muß der an die Umgebung abgegebene Energiestrom  $I_D$  im zeitlichen Mittel durch Aufnahme eines Energiestroms  $I_A$  ausgeglichen werden, Auf diese Weise in Wechselwirkung mit ihrer Umgebung stehende offene Systeme sind naturgemäß auch „offen“ für zufallsbedingte Störungen aus der Umgebung. Das System muß diese Störungen „erkennen“ und beseitigen. Das ist mathematisch gesehen nur möglich, wenn sich  $I_D$  als Funktion

on einer Variablen, die das Systemverhalten charakterisiert (Ordnungsparameter), „schneller“ ändert als  $I_A$ , was gleichbedeutend mit der Nichtlinearität der zugrundeliegenden Differentialgleichung ist. Die Nichtlinearität ist Voraussetzung für diese Art von Selbstorganisation.

Welche stationären Gleichgewichtszustände suchen die Systeme auf? Es scheint einiges dafür zu sprechen, daß unter den Möglichkeiten, die die Natur hat, diejenige bevorzugt wird, bei der unter den gegebenen Bedingungen die pro Zeiteinheit dissipierte Energie (Energiedissipationsrate) minimal ist. Dies ist der physikalische Hintergrund des oft etwas unscharf als Ökonomieprinzip bezeichneten „Verhaltens“ der Natur.

Konkret: In einem mäandernden Fluß fließt das Wasser langsamer als in einem begradigten Fluß. Damit ist u.a. eine Pufferwirkung verbunden, die die Unregelmäßigkeiten des Wassertransports auszugleichen vermag. Über eine nichtlineare, geriffelte Straße wird man zwangsläufig langsamer fahren. Daraus haben auch die Menschen gelernt. Nach einem drastischen Anstieg der Verkehrstoten und der Überschwemmungskatastrophen macht man sich daran, Straßen in verkehrsberuhigten Zonen z.B. durch künstliche Mäander und Unebenheiten, sowie Flüsse durch Wasserrückhaltebecken und Einbau von Krümmungen wieder zu „entlinearisieren“.

Weitere Beispiele für Nichtlinearität sind Verzweigungen. Einzugsbereiche von Flüssen, die wesentlich zur Gestaltung von Landschaften beitragen, Adersysteme, Baumstrukturen u.v.a.m. Ihre Morphologie bzw. Form ist unter dieser Perspektive in allen Fällen (so verschieden das jeweilige physische Substrat auch sein mag) so beschaffen, daß Funktionen (Versorgung und Entsorgung der Systeme mit und von Stoffen, d.h. Regelung des Stoffdurchsatzes) unter Minimierung der Dissipationsrate realisiert werden.

## Die Gang der Welt ist nicht vorhersagbar

Die lineare Welt wird durch lineare Differentialgleichungen beschrieben, deren allgemeine Lösung aus der Summe zweier spezieller Lösungen gewonnen werden kann. Hierin äußert sich das für das lineare Naturverständnis typische Überlagerungsprinzip, wonach ein komplexer Vorgang als Summe einfacher Vorgänge aufgefaßt werden kann. Mit der allgemeinen Lösung hat man aber die gesamte Entwicklung des Systems auf einmal in der Hand, vorausgesetzt nur, man kennt dessen gegenwärtigen Zustand mit hinreichender Genauigkeit. Der Erfolg der klassischen Physik zeigt uns, daß die Natur sich tatsächlich in vielen Fällen so verhält, wie in den Berechnungen unterstellt wird. Man denke nur an die Voraussagen von Sonnen- und Mondfinsternissen.

Wenn jedoch die zu beschreibenden Systeme eine nichtlineare Dynamik besitzen, können die zugrunde liegenden nichtlinearen Differentialgleichungen nicht mehr geschlossen gelöst werden. Man muß auf numerische Verfahren zurückgreifen, mit denen man sich anschaulich gesprochen vom Anfangszustand ausgehend Schritt für Schritt von einem Zustand zum nächsten vorantastet. Darin kommt u.a. die Tatsache zum Ausdruck, daß das System sensitiv von den Anfangsbedingungen abhängt. Kleinst Abweichungen können bereits zu einem völlig anderen Verlauf der jeweiligen Trajektorien des Systems führen. Da man diese kleinsten Abweichungen auch im Prinzip nicht im Griff hat, läßt sich ein nichtlineares System in seinem langfristigen Verhalten nicht vorhersagen.

Bei den oben erwähnten dissipativen Strukturen hat man jedoch den Eindruck, daß sie als Ganzes gesehen ein relativ einfaches und in Form ihres stationären Gleichgewichts vorhersagbares Verhalten zum Ausdruck bringen. Mit Hilfe des Ordnungsparameterkonzeptes gelingt es in der Tat, aus der Vielfalt der im einzelnen nicht vorhersagbaren Verhaltensmöglichkeiten ihrer zahlreichen Subsysteme eine Struktur herauszuschälen, die durch wenige Parameter beschrieben werden kann. Trotz der Unvorhersagbarkeit im Detail hat man die Möglichkeit, das Verhalten als ganzes mathematisch zu beschreiben.

Aber auch dissipative Systeme, die sich chaotisch verhalten, sind nicht sinnlos und entziehen sich nicht der physikalischen Beschreibung [9]. Haben wir es nicht auch im Alltag vielfach mit chaotischen Situationen zu tun, die gerade dadurch, daß sie nicht vorhersagbar sind, besondere Möglichkeiten bieten? Man betrachte beispielsweise die beiden Spieler eines Tennismatches. Auch wenn man sie gut kennt, kann man den Ausgang des Spieles und noch weniger den detaillierten Spielverlauf mit Sicherheit vorherzusagen. Aber macht nicht gerade das den Reiz des Spieles aus? Es spricht einiges dafür, daß die Kreativität eines Menschen, die Entstehung von Neuem und damit die Evolution von Systemen in gewisser Weise auf eine chaotische Dynamik angewiesen sind.

## Nichtlineare Physik in der Schule

Ist die nichtlineare Physik für die Schule nicht zu schwierig? Das ist die stereotype Frage der Lehrenden, die tagtäglich erfahren, daß die Schülerinnen und Schüler bereits in der linearen Physik vor allem Probleme mit den mathematischen Berechnungen haben. In der Tat gelingt es nicht mehr, die nichtlinearen Differentialgleichungen, die der nichtlinearen Physik zugrunde liegen, geschlossen zu lösen. Man ist auf numerische Verfahren und damit auf den Computer angewiesen. Wir sehen darin jedoch nicht die Grenze der Schulphysik, sondern eine Chance. Indem man die Berechnungen als Routineangelegenheit erkennt, die man ebenso getrost dem Computer überlassen kann, wie die Berechnung des Sinus dem Taschenrechner, lassen sich die Aktivitäten und Interessen der Schülerinnen und Schüler auf wesentlichere, physikalische Aspekte konzentrieren. Hinzu kommt, daß man mit der Aufstellung der Bewegungsgleichungen sehr nahe am konkreten Problem bleiben kann. Der Computer ist nicht auf möglichst kompakt und elegant formulierte Gleichungen angewiesen. Oft reichen grobe Algorithmen aus, um das Problem qualitativ in den Griff zu bekommen. Dabei muß „qualitativ“ nicht gleichbedeutend mit vorläufig und unvollkommen angesehen werden. Weil im Rahmen der nichtlinearen Physik, man möchte fast sagen - wie im wirklichen Leben - die exakte Vorhersage die Ausnahme, die grobe Einschätzung, die qualitative Charakterisierung eines Systems die Regel darstellt, werden die Untersuchungsmethoden manchmal auch als „qualitativ“ bezeichnet. Damit ist gemeint, daß es nicht mehr auf die Berechnung einzelner Trajektorien als Ausdruck der vollkommenen Kontrolle über das System ankommt, sondern vielmehr grafische Portraits im Vordergrund stehen, in denen die Gesamtheit aller möglichen Trajektorien und damit die Verhaltensmöglichkeiten des Systems ihren Niederschlag finden.

Ganz allgemein gesehen bietet die nichtlinearen Physik die Chance, einer Versöhnung zwischen Leben und Physik und zwar nicht etwa in der Weise, daß das Leben zunehmend auf mathematische Gleichungen reduziert bzw. mechanistischen Prinzipien unterworfen wird, sondern umgekehrt, daß man das physikalische Interesse von den „toten“ Zuständen der Materie im thermodynamischen Gleichgewicht abwendet und beginnt, ähnliche Strukturen und Vorgänge in den Blick zu nehmen, die bisher als typisch für das Lebende angesehen wurden. Über fiktive Idealgestalten und statischer Ordnung hinausgehend werden die Gegensätze zwischen Ordnung und Chaos, Notwendigkeit und Zufall, Gesetz und Willkür der physikalischen Betrachtung zugänglich gemacht.

## Literatur:

- [1] Shaw; Bernard: Die Millionärin. Die goldenen Tage des guten König Karl. S. 215.
- [2] Nordmeier, Volkhard, Schlichting, H. Joachim: Nichtlineare Physik und Physikunterricht - eine Bestandsaufnahme: 35 Experimente zu Synergetik, Fraktalen & Chaos. In diesem Band.
- [3] Mandelbrot, Benoît: Die fraktale Geometrie der Natur. Basel, Boston: Birkhäuser 1987, s. 13
- [4] Hundertwasser, Friedensreich: z.n. Manthey.
- [5] Rodewald, Bernd; Schlichting, H. Joachim: Die Gestalt von Bäumen - zufällig oder gesetzmäßig. Praxis der Naturwissenschaften / Physik 37/5, 7-12 (1988).
- [6] Schlichting, H. Joachim; Rodewald, Bernd: Von großen und kleinen Tieren. Praxis der Naturwissenschaften / Physik 37/5, 2 - 7 (1988).
- [7] Schlichting, H. Joachim; Nordmeier, Volkhard; Buttkus, Beate: Wie fraktal ist der Mensch? Anmerkungen zur Problematik des tierischen und menschlichen Stoffwechsels aus der Sicht der fraktalen Geometrie. Physik in der Schule 31/9, 310 (1993)
- [8] Schlichting, H. Joachim; Rodewald, Bernd: Papierhubschrauber. Praxis der Naturwissenschaften / Physik 35/5, 30
- [9] Schlichting, H. Joachim: Energie, Entropie, Synergie. Ein Zugang zur nichtlinearen Physik. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 46/3, 138 -148 (1993), sowie: ders.: Prozeß und Struktur I. Probleme der Selbstorganisation im Bereich der unbelebten Natur I. Physik in der Schule 32/11, 392- 397 und 32/12, 430 (1994)