

Der große Kunstgriff, kleine Abweichungen von der Wahrheit für die Wahrheit selbst zu halten, worauf die ganze Differentialrechnung gebaut ist, ist auch zugleich der Grund unserer witzigen Gedanken, wo oft das Ganze hinfällig würde, wenn wir die Abweichungen mit philosophischer Strenge nehmen würden.

Georg Christoph Lichtenberg

Die Strukturen der Unordnung

Chaosphysik – zwischen Zufall und Notwendigkeit

Von Hans Joachim Schlichting

Wir müssen glauben, daß alles in der Welt eine Ursache habe, so wie die Spinne ihr Netz spinnt, um Fliegen zu fangen. Sie tut dieses, ehe sie weiß, daß es Fliegen in der Welt gibt“ [1, S. 181]. Wie kommt es zu einem solchen Glauben? Darauf gibt es offenbar keine eindeutige Antwort.

David Hume (1711–1776) ging davon aus, daß das Denken in Ursache-Wirkungs-Kategorien, das sogenannte kausale Denken, auf Erfahrung beruht: In dem Maße, wie der Mensch aufgrund wiederkehrender Ereignisse eine zeitliche Abfolge in den Tatsachen der Welt erfährt und sich daran gewöhnt, gewinnt er die Überzeugung, daß zeitlich spätere Ereignisse von zeitlich früheren Ereignissen verursacht oder hervorgerufen werden. Indem diese Sichtweise auf alle Vorgänge verallgemeinert wird, gewinnt die Welt eine kausale Struktur. „Wäre da der geringste Verdacht, daß der Lauf der Natur

sich ändern könnte und daß die Vergangenheit nicht Regel für die Zukunft wäre, so würde alle Erfahrung nutzlos und könnte zu keinerlei Folgerungen oder Schlüssen führen“ [2]. Immanuel Kant (1724–1804) sah die durchgängige kausale Verknüpfung der Erscheinungen als denknotwendig an: Die Welt erschien ihm *a priori*, also vor jeder Erfahrung bereits kausal organisiert: „Alle Veränderungen geschehen nach dem Gesetze der Verknüpfung der Ursache und Wirkung“, und: „Alles, was geschieht, setzt voraus, worauf es nach einer Regel folgt“ [3]. Für Wilhelm Dilthey (1833–1911) war die Kausalität bereits mehr als eine *a priori* gegebene Kategorie, in seiner Kritik an Kant beschreibt er das kausale Denken als Mittel der Lebensbewältigung: „Im Laufe der Erfahrungen tritt die Laune des Zufalls zurück hinter die Gleichförmigkeiten des Geschehens. Der Kreis erkannter fester Gleichförmigkeiten breitet

sich mehr aus; das denkende Rechnen erweist sich überall siegreich gegenüber der elenden Spekulation auf die Launen des Zufalls und die Macht der Dämonen“ [4].

Nach Paul Valéry (1871–1945) ist die Kausalität dagegen nichts weiter als eine anthropomorphe Beschreibung: „Alles mußte ein ‚Warum‘ haben, einen Ursprung, ein Ziel – das heißt, sich in eine Organisation von dem menschlichen Typ ‚bewußte, willentliche Handlung‘ einfügen“ [5, S. 287]. An anderer Stelle hebt er den konventionellen Charakter der Kausalität noch stärker hervor, indem er in ihr nur eine Art Verpflichtung sieht, einen vollständigen Satz zu bilden: „Die Ursache zu suchen heißt, Subjekt oder Attribut eines Satzes bei dem ‚machen‘ das mehr oder weniger eingestandene Verb ist“ [5, S. 274]. Ludwig Wittgenstein (1889–1951) schließlich sah in der auf der Kausalität beruhenden wissenschaftlichen Einstellung bereits die Gefahr ihrer Verabsolutierung zur Wissenschaftsgläubigkeit, die nicht besser als ein Aberglaube ist: „Denn sie tut so, als gäbe es Mittel, das, was uns geheimnisvoll erscheint, durch eine Theorie weniger geheimnisvoll zu machen, so als wären die kausalen Beziehungen ... etwas, was wir in der Realität vorfinden und durch Korrelation mit einer Theorie erklären könnten“ [6].

Schon dieser kurze Durchgang durch die neuzeitliche Philosophie zeigt: Die Unterstellung kausaler Zusammenhänge und die Suche nach kausalen Strukturen scheinen typisch für wissenschaftliches Handeln, ja für das Denken schlechthin zu sein. Und: Auch der Zweifel an dieser Form der Aneignung von Welt ist offensichtlich konstitutiver Teil der Wissenschaftsgeschichte.

Der Epikureische Atomismus

Als Ursprung des kausalen Denkens können primäre Erfahrungen aus dem menschlichen Bereich angesehen werden, indem sich der frühe

Mensch dem Wirken eines unerbittlich gleichgültigen Schicksals ausgeliefert sieht. Diese Anschauung wurde von den Tragödiendichtern Athens, Sophokles, Aischylos und Euripides, literarisch aufbereitet und durch zahlreiche Theateraufführungen wirkungsvoll verstärkt. Vieles spricht dafür, daß diese unerbittliche Unausweichlichkeit Eingang in das wissenschaftliche Denken fand; Alfred North Whitehead (1861–1947) zufolge wird das Schicksal der griechischen Tragödie im modernen Denken zur Ordnung der Natur: „Die physikalischen Gesetze sind die Ratschlüsse des Schicksals“ [8].¹⁾ Bei den Vorsokratikern hat die Kausalität allerdings noch nicht die spezielle Form des uns bekannten Ursache-Wirkungs-Schemas angenommen.

„Der Determinismus ist die einzige Weise, sich die Welt vorzustellen.“

Und der Indeterminismus ist die einzige Weise, in ihr zu existieren.“

Paul Valéry

men. Sie ist vielmehr Ausdruck der für die Entstehung wissenschaftlicher Aktivitäten bedeutungsvollen allgemeinen Grundannahme, daß im natürlichen Geschehen keine Willkür, sondern Gesetzmäßigkeit herrscht, daß – wie Leukipp es um 460 v. Chr. ausdrückt – nichts von selbst geschieht, sondern unter dem Druck der Notwendigkeit.²⁾

Daraus entwickelte sich schließlich die Vorstellung eines vollständig determinierten Verhaltens, in dem für grundloses Geschehen und zufälliges Verhalten kein Platz ist. Auf der Grundlage dieser Vorstellung baute Epikur (342–271) die von Demokrit (*um 460 v. Chr.) und Leukipp geschaffene Atomlehre zu einem universellen, sowohl für die belebte

als auch für die unbelebte Natur Gültigkeit beanspruchenden System aus: Das gesamte makroskopisch erfassbare Geschehen richtet sich aus den Bewegungen qualitätsloser, unveränderlicher Atome. Die Bewegungen der Atome und darauf bauend alle komplexeren Vorgänge der Welt werden durch die Stöße der Atome untereinander und dem Gewicht der Atome, ihrem Bestreben nach unten, zum Mittelpunkt der Erde zu gelangen, determiniert. Während die Notwendigkeit, mit der ein Atom Stöße und damit verbundene Richtungsänderungen erfährt, von außen her bestimmt ist, kann das Gewicht des Atoms, also die Tendenz seiner Abwärtsbewegung, als eine innere, dem Atom innewohnende Notwendigkeit angesehen werden. Im Vorgriff der für die neuzeitliche Physik so bedeutungsvollen *Invariantenvorstellung* – die sich insbesondere in Erhaltungsgrößen wie Energie, Impuls, Drehimpuls, Ladung usw. manifestiert und mit deren Hilfe Veränderungen in der Welt erst qualitativ beschreibbar werden – wird die Summe aller Atome als konstant angenommen. Die Entstehung und Vernichtung von Atomen und damit von allem Seienden ist ausgeschlossen.³⁾

Die Kontinuumstheorie der Stoiker

Alternativ und konkurrierend zur atomistischen Lehre Epikurs entwickelten die Stoiker eine Kontinuumstheorie, in der die Welt als ein stetig und lückenlos mit materiellen Körpern und einem alles durchdringenden *Pneuma* erfüllter Raum erscheint. Dieses *Pneuma* kann als eine determinierten Verhaltens, in dem für grundloses Geschehen und zufälliges Verhalten kein Platz ist. Auf der Grundlage dieser Vorstellung baute Epikur (342–271) die von Demokrit (*um 460 v. Chr.) und Leukipp geschaffene Atomlehre zu einem universellen, sowohl für die belebte

– das kontinuierlich eng geknüpfte Gewebe der Welt nur mit einem lückenlosen Netz kausaler Ereignisse vereinbaren, in dem die Anzahl aller Ursachen und Wirkungen (die wiederum Ursachen weiterer Wirkungen sind usw.) ebenso unveränderlich ist wie die Gesamtheit des Seienden in der Welt. Das von den Stoikern formulierte Prinzip der Unmöglichkeit akasualer Ereignisse gehört damit zu den metaphysischen Grundlagen der Physik, die bis in unser Jahrhundert hinein das naturwissenschaftliche Denken geprägt haben.

Weissagung und physikalische Vorhersage

Auch wenn die empirische Fundierung des Kausalitätsbegriffs erst im Rahmen der neuzeitlichen Physik durch Experimente und eine durchgängige Mathematisierung möglich wurde, so kann man doch bereits bei den Stoikern das Bemühen feststellen, ihr deterministisches Weltbild durch Beobachtungen und andere empirische Argumente zu untermauern. Auf den ersten Blick erscheint daher ihr Versuch erstaunlich, die zur damaligen Zeit vielgeübte Praxis der Weissagungen, jenes „wechselseitigen Umgangs von Göttern und Menschen“ [10] für ihre empirisch orientierte Lehre nutzbar zu machen. Denn ein wesentlicher Antrieb der griechischen Philosophie bestand gerade in dem Bemühen, sich von der religiös mythologischen Tradition zu emanzipieren. So sahen etwa die Peripatetiker in den Weissagungen der Stoiker einen Rückfall in irrationales Handeln. Bedenkt man aber, daß in einem strengen Verständnis Kausalität zukünftige Ereignisse als Wirkungen gegenwärtiger Ursachen erfährt, so liegt die Parallele zu den göttlichen Weissagungen geradezu auf der Hand.

Außerdem kann man davon ausgehen, daß auch die damaligen Propheten sich nicht nur auf die ihnen

von den Göttern eingegebenen Antworten auf ihre Fragen verlassen haben – auch sie bedienten sich rationaler und logischer Methoden. Plutarch (45–120) etwa interpretierte die Praxis der göttlichen Seher als „diejenige Kunst, die aus dem Gegenwärtigen oder Vergangenen auf das Zukünftige sich richtet“. Und er fügte hinzu: „Daher, wenn es auch bedenklich ist, es auszusprechen, werde ich es doch nicht unterlassen zu behaupten, daß der Dreifuß der Wahrheit eben diese Vernunft (des syllogistischen Beweises, Anm. d. V.) ist, welche erst im Vordersatz die Schlussfolge zieht und dann die Existenz der Sache dazunimmt und so zum Vollziehen des Beweises schreitet“ [11]. Hier hat man bereits die Vorform der für die neuzeitliche

„Du wünschst dir, ein abstraktes und absolutes Raum-Zeit-Kontinuum täte sich auf, in welchem du dich auf einer präzisen, vorgezeichneten Bahn bewegen könntest.“

Italo Calvino

Physik so bedeutungsvollen Methode des induktiven Schließens: Das induktive Prinzip als säkularisierte Form der antiken Kunst der Weissagung.

In der Tat sind die qualitativen Parallelen zwischen Weissagung und physikalischer Voraussage weitreichend: In beiden Fällen wird mit Hilfe einer Methode aus der Kenntnis eines Systems im gegenwärtigen Zustand das zukünftige Verhalten des Systems erschlossen. Die Praxis der Weissagung, „die Zukunft mittels gewisser Zeichen vorherzuempfinden, die das andeuten, was ihnen folgt“ [12, S. 264] sollte später dann zum Problem der Feststellung der physikalischen Anfangsbedingungen eines Systems werden.

Die Mathematisierung der Kausalität

Die ausdrückliche Einbeziehung der Weissagungen in die deterministische Argumentation der Stoiker ist auch deshalb bemerkenswert, weil den Weissagungen offensichtlich nur mäßiger Erfolg beschieden war. Die Gegner des Determinismus, insbesondere die Peripatetiker, wurden nicht müde, darauf aufmerksam zu machen. Doch bereits die Stoiker sahen darin keinen Widerspruch zum Determinismus, sondern gaben sich ausgesprochen empirisch, indem sie mit Beobachtungsfehlern rechneten: „Vorussagen, die auf Grund falscher Schlüsse oder falscher Interpretationen gemacht werden, gehen fehl, nicht weil die Dinge daran schuld sind, sondern wegen der Unwissenheit der Interpreten“ [12, S. 268]. Das Wirken des Zufalls wurde daher auch nicht als Gegenargument angesehen. Bereits die alten Deterministen wie Anaxagoras und Demokrit gingen davon aus, „daß der Zufall eine Ursache sei, die dem menschlichen Verständnis verborgen ist“ [7].

Um diese Mängel zu beseitigen, bemühte man sich, sowohl die Zeichen in den Dingen besser zu erkennen, als auch eine größere Exaktheit bei der Beschreibung und Auslegung der Vorgänge zu erreichen⁴⁾ – also Zeichen und Vorgänge quantitativ zu erfassen, sie mit Hilfe von Zahlenverhältnissen auszudrücken. Ein derart unbescheidendes Unternehmen mußte jedoch mit Bescheidenheit in anderer Hinsicht erkaufte werden: Statt die in ihrem zukünftigen Verhalten zu beschreibenden Systeme so zu belassen, wie sie in der Wirklichkeit vorkommen, wurden sie nun – ebenso wie im Rahmen der neuzeitlichen Physik – drastischen Vereinfachungen unterworfen, bis sie nicht mehr wiederzuerkennen waren. Indem man von Eigenschaften wie „Geschmack“, „Farbe“, „Form“ usw. absah, und sich außerdem auf besonders einfache Situationen be-

zog, gelang es, dem Verhalten eines Systems einfache Mechanismen zugrunde zu legen, die sich in Ursache-Wirkungs-Ketten beschreiben ließen. Mit ihrer Hilfe konnten – und können – dann auch exakte Vorhersagen über das zukünftige Verhalten des Systems gemacht werden.

So unternahm es beispielsweise Galileo Galilei (1564–1642) als einer der ersten neuzeitlichen Physiker, die Bewegungen von Körpern in der besonders einfachen Situation eines luftleeren Raums zu betrachten. Der „luftleere Raum“ kommt zwar in der irdischen Realität nicht vor – erst den Nachfolgern von Galilei gelang es, sich dieser Idealgestalt schrittweise anzunähern – er hat aber im Sinne des oben dargestellten Programms den entscheidenden Vorteil, daß in ihm keine unkalkulierbaren Einwirkungen auf die Bewegungen eines Körpers zu erwarten sind. Ohne derartige Einwirkungen, so argumentierte Galilei, verhalten sich gleichförmig bewegte Körper genau so einfach wie ruhende: Sie verbleiben in diesem Zustand. Im Sinne der Suche nach kausalen Verknüpfungen sind daher ruhende und gleichförmig bewegte Körper gewissermaßen ursachelos. Der auf dieser Vorstellung beruhende Trägheitssatz („alles bleibt wie es ist“) stellt, so gesehen, den invarianten Hintergrund dar, vor dem Veränderungen feststellbar und beschreibbar werden. Erst Änderungen des Bewegungszustandes, also Geschwindigkeitsänderungen, lassen die Frage nach der Ursache sinnvoll erscheinen.

Hier setzt die für die Begründung der klassischen Physik zentrale Argumentation Isaak Newtons (1643–1727) ein, die Ursache von Geschwindigkeitsänderungen (Beschleunigungen) auf Kräfte unterschiedlicher Art zurückzuführen⁵⁾. Newton ging davon aus, daß diese Kräfte F den Beschleunigungen a , die sie „verursachen“, direkt proportional sind: $F = ma$ (m = Masse; zweites Newtonsches Axiom). Mit der Angabe der jeweiligen Kraft ist

auch die Dynamik des Problems fixiert: Zwei oder mehrere Massenpunkte, die zu einem bestimmten Zeitpunkt Kräfte aufeinander ausüben, führen zu gegenseitigen Beschleunigungen. Infolgedessen treten Veränderungen der Entfernungen zwischen den Punkten und damit Veränderungen der von den Entfernungen abhängenden Kräfte auf, die im nächsten Augenblick zwischen den Punkten wirken. Sie rufen erneut Beschleunigungen der Massenpunkte hervor usw.

Die entscheidende Idee der mathematischen Formulierung dieses Problems, die Aufstellung sogenannter Differentialgleichungen, besteht darin, die zeitliche Veränderung der Geschwindigkeiten als unendliche Folge von unendlich kleinen – *infini-*

„Hinzu kommt, daß die Mathematik diesseits der Differentialrechnung Dünkel erzeugt, solange sie von demjenigen, der sie betreibt, nicht als ein Versuch, die Spiele des Zufalls zu analysieren, betrachtet wird.“

Joan Glono

tesimalen – Veränderungen der Geschwindigkeiten aufzufassen, die in einem infinitesimalen Zeitintervall auftreten, und die Bewegung der betrachteten Massenpunkte während eines größeren Zeitintervalls durch die Summierung der Beschleunigungen zu jedem Zeitpunkt des Intervalls zu ermitteln – durch *Integration*⁶⁾. Eine solche Integration führt unter Anwendung von Methoden, die Newton eigens zu diesem Zweck entwickelte⁷⁾, zur Darstellung der *Trajektorien*⁸⁾, der während des Zeitintervalls t durchlaufenen Orte r der Massenpunkte als eine Funktion der Zeit $r(t)$. Um die Integration durchführen zu können, muß man neben der Dynamik in Form der Differentialgleichungen lediglich noch die so-

genannten Anfangsbedingungen, also die Orte und Geschwindigkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt, kennen (vgl. auch Anmerkung 4). Mit anderen Worten: Es genügt, das Verhalten des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt, beispielsweise zum gegenwärtigen zu kennen, um es zu jedem beliebigen Zeitpunkt in der Vergangenheit oder Zukunft zu kennen.

Die – linearen – Differentialgleichungen können als *die* mathematische Sprache angesehen werden, in der sich der Determinismus ausdrückt: Sie geben der Zeit Gestalt, die Ewigkeit im gegenwärtigen Augenblick zu besitzen [13]: „Die Herrschaft über den Augenblick ist die Herrschaft über das Leben“ (Marie v. Ebner-Eschenbach). Es ist eine besondere Qualität des Newtonschen Universums, daß es gewissermaßen offen vor uns liegt und uns das Zukünftige bereits im Gegenwärtigen präsentiert. So gesehen kann der Determinismus als „eine Konzeption der Raum-Zeit“ angesehen werden, „in der das Antezedenz und das Konsequenz gleichsam simultane Teile eines Ganzen sind. Die Zeit ist in jedem Kausationsdenken eine echte Dimension des Raums“ [5, S. 202].

Wille und Würfel

So sehr die Mathematisierung der Physik diese auch voranbrachte – eine weitere Schwierigkeit blieb weiterhin bestehen: Den Determinismus mit der menschlichen Willensfreiheit in Einklang zu bringen. Die Diskussion zu diesem Problem durchzieht die gesamte philosophische Literatur und ist immer wieder Gegenstand wissenschaftlicher Auseinandersetzungen gewesen. René Descartes (1596–1650) hat das Problem durch einen Trick aus der physikalischen Diskussion verbannt wollen: Er teilte die Welt in zwei Bereiche ein, die *res cogitans* und die *res extensa*. Die Phänomene des Lebens und damit auch den menschlichen Geist

ordnete er der *res cogitans* zu und erklärte sie jeglichem naturwissenschaftlichem Zugang entzogen. Die *res extensa* umfasse hingegen die materiellen Dinge und sei naturwissenschaftlich erschließbar. Diese Einteilung hat das Problem der Legitimation der auf kausalem Denken beruhenden Naturwissenschaften zu entschärfen geholfen. Man kann demnach aus voller Überzeugung den Menschen als frei handelndes Wesen betrachten, ohne die deterministischen Grundlagen der Naturwissenschaften in Frage zu stellen. Allerdings erlagen viele Naturwissenschaftler, angespornt durch den enormen Erfolg der Physik nach Newton, weiterhin der Versuchung, die Descarteschen Bereichsgrenzen zu ignorieren und die Willensfreiheit als physikalisches Phänomen zu „enttarnen“.

Der Erfolg des Newtonschen Programms der Mechanisierung der Welt beruhte vor allem darauf, daß durch die Mathematisierung der Kausalität die Beschreibung der Vorgänge bis auf die Feststellung der Anfangsbedingungen der menschlichen Unzulänglichkeit entzogen wurde. Eine weitgehende Beschränkung auf Vorgänge, bei denen die Wirkungen proportional zu den Ursachen sind (die sogenannte *starke Kausalität*, s. u.), garantierte außerdem, daß man es stets mit überschaubaren einfachen Verhältnissen zu tun hatte.

All jene komplexen, unüberschaubaren, scheinbar zufallsbestimmten Vorgänge, die – vorerst – einer Mathematisierung widerstanden und im pränewtonischen Dunkel blieben, vermochten der deterministischen Welt daher auch nichts anzuhängen. Gefährlich sollte indessen ein einfaches mechanisches System werden, mit dem das deterministische Denken im 18. Jahrhundert konfrontiert wurde: der Würfel. Denn auch wenn man einen Würfel zweimal so gut es geht auf dieselbe Weise – mit gleichen Anfangsbedingungen – wirft, bleibt die gewürfelte Zahl

ein Ergebnis des Zufalls. Das Würfel scheint damit dem alten deterministischen Grundsatz zu widersprechen, „daß, wenn immer dieselben Umstände in bezug auf die Ursache und die durch sie betroffenen Dinge vorliegen, unmöglich das Resultat einmal so und ein andermal anders sein kann; denn sonst müßte irgendeine ursachelose Bewegung existieren“ [9].

Den Wissenschaftlern gelang es jedoch, die Gefahr zu bannen, indem sie den Zufall im Rahmen der Wahrscheinlichkeitsrechnung kalkulierbar und damit „unschädlich“ machten. Der Erfolg der Wahrscheinlichkeitsrechnung täuschte jedoch darüber hinweg, daß man im Grunde das Problem nur verlagert hatte: Man war vom Verhalten *eines* Systems

„Ein Meisterstück der Schöpfung ist der Mensch auch schon deswegen, daß er bei allem Determinismus glaubt, er agiere als freies Wesen.“

Georg Christoph Lichtenberg

zum Verhalten *vieler gleichartiger* Systeme übergegangen und hatte die Frage der Vorhersage des Verhaltens *eines einzigen* Würfels verdrängt. Sie blieb weiterhin virulent.

Mit der Wahrscheinlichkeitstheorie bekam man nun jedoch die Möglichkeit, eine Bresche in die unter der Oberfläche einfacher, sogenannter *makroskopischer*⁹⁾ Systeme wirkende Komplexität zu schlagen: Die aus vielen Teilchen aufgebaut gedachten Gase wurden der physikalischen Betrachtung zugänglich. Obwohl das Zufallsverhalten der vielen Gaspartikel konstitutiv für die Wahrscheinlichkeitstheoretische Beschreibung von Gasen ist, fällt es leicht, diese Art der Beschreibung auch als einen Reflex der menschlichen Un-

zulänglichkeit anzusehen, seiner Unfähigkeit, sich einen Überblick über die Anfangsbedingungen *aller* Teilchen zu verschaffen. Pierre Simon Laplace (1749–1827) erschuf daher seinen berühmten Dämon, um sich des prinzipiellen Zugriffs nicht nur auf das Verhalten der Gase, sondern darüber hinaus des gesamten Kosmos zu versichern: „Wir müssen also den gegenwärtigen Zustand des Weltalls als die Wirkung seines früheren und als die Ursache des folgenden Zustands betrachten. Eine Intelligenz, welche für einen gegebenen Augenblick alle in der Natur wirkenden Kräfte sowie die gegenseitige Lage der sie zusammensetzenden Elemente kennt und überdies umfassend genug wäre, um diese gegebenen Größen der Analysis zu unterwerfen, umschlüsse in derselben Formel die Bewegungen der größten Weltkörper wie des leichtesten Atoms; nichts wäre ihr ungewiß, und Zukunft wie Vergangenheit lägen ihr offen vor Augen. Der menschliche Geist bietet in der Vollendung, die er der Astronomie zu geben verstand, ein schwaches Abbild dieser Intelligenz dar. Seine Entdeckungen auf dem Gebiete der Mechanik und Geometrie, verbunden mit der Entdeckung der allgemeinen Gravitation, haben ihn in Stand gesetzt, in demselben analytischen Ausdruck die vergangenen und zukünftigen Zustände des Weltsystems zu umfassen“ [14].

Diese Ansicht bestimmte das physikalische Denken bis in unser Jahrhundert hinein: „Wie der Astronom den Tag vorhersagt, an dem nach Jahren ein Komet aus dem Tiefen des Weltraumes am Himmelsgewölbe wieder auftaucht, so läse jener (Laplacesche) Geist in seinen Gleichungen den Tag, da das griechische Kreuz von der Sophienmoschee blitzend oder da England seine letzte Steinkohle verbrennen wird. Setzte er in der Weltformel $t = -\infty$, so enthielte sich ihm der rätselhafte Urzustand der Dinge. ... Solchem Geist wären die Haare auf unserem Haupt

te gezählt, und ohne sein Wissen feile kein Sperling zur Erde“ [15, S. 19]. Die hier von Emil Du Bois-Reymond (1818–1896) ausgesprochene Überzeugung, die den menschlichen Geist als nur asymptotisch verschieden vom Laplaceschen Dämon ansieht und sich somit einer vollständig erkennbaren Welt gegenüber wähnt, ist auch heute noch im Denken und Handeln zahlreicher Wissenschaftler verankert. „Wir gleichen diesem Geist, denn wir begreifen ihn“ [15, S. 23], sagt Du Bois-Reymond, vermutlich in Anspielung auf die berühmte mephistophelische Sentenz in Goethes „Faust“.

Der Indeterminismus in der Quantenmechanik

Die hellseherischen Fähigkeiten des Laplaceschen Dämons verfestigten die Überzeugung einer vollständigen Erkennbarkeit der Welt. Die durch das klassische physikalische Denken motivierte Reise zu den Dingen, die die Welt im Innersten zusammenhalten (Goethe), hat den Physikern einerseits einen ganzen Mikrokosmos atomarer Phänomene beschert, sie hat aber andererseits – ironischerweise – in eine völlig veränderte Welt geführt: In dem mittlerweile durch die Quantenmechanik regierten Kosmos hat die traditionelle Unterscheidung zwischen Materie, Bewegung, Kraft ihren Sinn verloren; es gibt keine Teilchen mehr im Sinne einer dauerhaften Identität, und die Vorhersagbarkeit im strengen Verständnis erscheint unmöglich. Damit wäre aber auch der klassischen Anschauung jegliche Grundlage entzogen.

Mit diesen Entwicklungen hat die Quantenphysik das kausale Denken in eine tiefe Krise gestürzt. Sie äußert sich in verschiedenen, teilweise einander widersprechenden Interpretationskonzepten, in denen die Vorstellung der Kausalität nur noch so etwas wie einen Orientierungsrahmen für die wissenschaftstheoretische Diskussion abgibt. Die

auf ein ursprüngliches Verständnis abzielenden naturphilosophischen Bemühungen drohen endgültig zu scheitern, weil es offenbar nicht gelingt, die mathematischen Aussagen der physikalischen Theorien mit Hilfe eines in natürlicher Sprache geführten Diskurses in einfacher und konsistenter Weise auf jene „realen“ Systeme zu beziehen, die „hinter“ den Erscheinungen vermutet werden¹⁰.

Die Praxis jedoch sieht anders aus. Nahezu alle Begriffe des klassisch mechanistischen Denkens haben gewissermaßen ihren eigenen logischen Verfall überlebt. Auch moderne Physiker können nur schwer auf die durch das kausale Denken nahegelegte Suche nach einfachen Mechanismen, Ursache-Wir-

„Eine bestimmte Unkenntnis – oder vielmehr eine bestimmte Unerkennbarkeit – nicht mehr für das Ergebnis einer Schwäche des Geistes nehmen, sondern als positive Eigenschaft der Sachen selbst.“

Paul Valéry

kungs-Ketten verzichten, wenn sie nicht jene Phänomene übersehen wollen, deren mathematische Beschreibung eine relativ einfache Anschauung voraussetzt. Es scheint, als seien das kausale Denken und die darauf beruhenden Überzeugungen so stark mit der natürlichen Sprache, der Alltagspraxis und der gewöhnlichen Anschauung verwoben, daß dadurch auch weiterhin Intuition und Handeln des Physikers bestimmt werden. Selbst die ehrgeizigsten Ziele der physikalischen Forschung, die Suche nach den elementaren Bausteinen des Materie im Rahmen der Elementarteilchenphysik und die Rekonstruktion der Evolution des Kosmos nach dem Big-Bang-Modell, beruhen auf kau-

salem Denken und der damit verbundenen Zerlegbarkeit der Welt in einfache Elemente.

Die Wiederentdeckung des *Clinamen*

Aber nicht erst im mikrophysikalischen Bereich erwies sich die deterministische Basis des physikalischen Weltbildes als brüchig. Bereits auf makroskopischer Ebene können Situationen auftreten, in denen der Laplacesche Dämon versagt und zu einer Art Gespenst im physikalischen Denkgebäude verkommt.

Obwohl diese Einsicht erst in unseren Tagen im Rahmen der *nichtlinearen Physik*¹¹ eine wissenschaftliche und empirische Untermauerung erfährt, wurde sie bereits in der Determinismusdebatte zwischen Epikureern und Stoikern, also lange bevor der Laplacesche Dämon das Licht der Welt erblickte, auf hohem Niveau durchdacht und dargestellt.

Das klassische Paradebeispiel einer solchen Situation wurde durch den scholastischen Philosophen Buridan (1300–1358) beschrieben: Ein Esel verhungert zwischen zwei Heuhaufen, weil er sich für keinen von beiden entscheiden kann (Abb. 1)¹². Bereits viel früher sahen auch die Epikureer, Gegner des strengen Determinismus der Stoiker, angesichts dieses ihnen gleichermaßen bekannten Dilemmas nur im Hinzutreten eines akasalen Impulses eine Lösung: „Wenn wir zwischen zwei Dingen zu wählen haben, die absolut gleich und gleichwertig sind, und keine Ursache vorliegt, die uns zu einem von beiden zieht, weil sie sich in nichts unterscheiden, dann entscheidet die impulsive Regung der Seele selber und löst das Dilemma“ [9, S. 973]. Den Ursprung solcher zufallsbestimmter Impulse sah Epikur im Verhalten der Atome, das letztlich dem gesamten makroskopischen Geschehen zugrunde liege. Erst dadurch, daß die Atome aus ihrer anfangs als stur parallel ange-

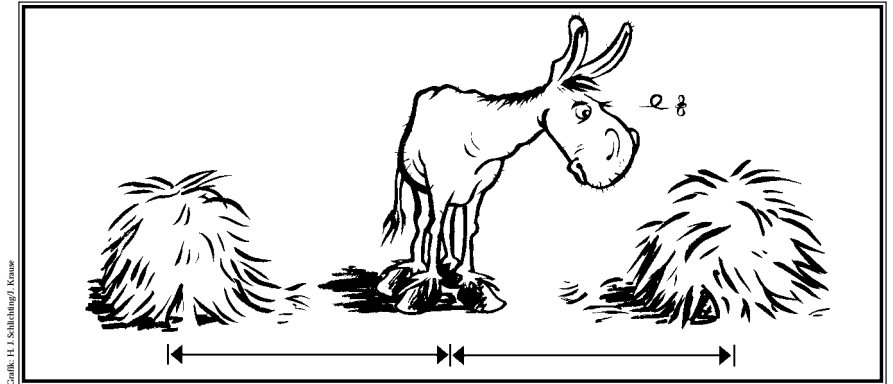
nommenen Bewegung in Richtung auf die Weltmitte zuweisen eine geringfügige Abweichung oder Beugung (griech.: *Clinamen*) erfahren, könne es überhaupt zu Zusammenstößen unter den Atomen und damit letztlich zu jenen komplexen Verflechtungen kommen, die das Weltgeschehen ausmachen¹³. Insbesondere könne das *Clinamen* als Voraussetzung für die Möglichkeit des freien Willens angesehen werden, ohne daß es nötig sei, das deterministische Grundschema allen Geschehens aufzugeben¹⁴.

Bedeutungsvoll an der Clina-

sten der *res cogitans*, der denkenden Welt des Geistes, verschieben.

Das *Clinamen* wurde bereits in der Antike als „Pfehl im Fleische“ des strengen Determinismus angesehen und vor allem von den Stoikern verworfen. Seit Newton muß die Annahme eines akasalen Ereignisses – und wäre es noch so klein – geradezu als Sakrileg gelten. Die Mathematisierung der Kausalität ist vielmehr mit der Verheißung einfacher, beliebig exakter und für alle Zeiten determinierter Verhältnisse verbunden – wenigstens für den Laplaceschen Dämon.

kann ich davon ausgehen, daß auch die Auftreffpunkte nur wenig voneinander abweichen. Im Rahmen der klassischen Physik erfolgt die Modellierung der Realität so, daß diese Voraussetzung erfüllt ist (*Linearisierung*). Nur in einem solchen Fall nehmen die Differentialgleichungen zur Berechnung des Vorgangs jene lineare Form an, die zu dem bereits oben diskutierten einfachen Lösungsverhalten führt. Eine für die klassische Physik typische Konsequenz der Linearität ist darin zu sehen, daß die Summe zweier Lösungen einer Differentialgleichung wie-



(1) Exakt in der Mitte zwischen zwei Heuhaufen stehend wäre Buridans Esel verhungert, wenn die Symmetrie der Situation nicht durch eine kleine Fliege gebrochen worden wäre, die den Esel veranlaßt, sich einem bestimmten Haufen zuzuwenden

mehypothese ist aus heutiger Sicht insbesondere die konstruktive Rolle, die hier wohl erstmalig im abendländischen Denken dem Zufall beigegeben wurde. Da Epikur darüber hinaus vom monistischen Standpunkt aus argumentierte, vermied er jene Probleme, die eine dualistische Zweiteilung der Welt in eine *res cogitans* und eine *res extensa* mit sich bringen. Seine Aussagen galten also unabhängig von der jeweils akzeptierten Grenzziehung zwischen diesen beiden Bereichen. Dies ist um so bedeutungsvoller, je drastischer sich die Grenzen im Rahmen neuerer physikalischer Sehweisen – etwa in der nichtlinearen Physik – zuungun-

Starke Kausalität

Es ist lange Zeit übersehen worden, daß die hellseherischen Fähigkeiten des Laplaceschen Dämons an eine Bedingung geknüpft sind: Er kann nur solche Vorgänge berechnen, bei denen eine lineare Verknüpfung zwischen Ursache und Wirkung besteht. Das ist aber nur unter der Voraussetzung der Fall, daß ähnliche Ursachen zu ähnlichen Wirkungen führen.¹⁵ Zum Beispiel: Wenn ich zweimal einen Stein von einem Turm auf einen ebenen Boden fallen lasse und beim zweiten Mal, die Startposition im Vergleich zum ersten Mal ein wenig verändere, so

der zu einer Lösung führt. Hierin manifestiert sich das für das klassische Naturverständnis typische Überlagerungsprinzip, wonach ein komplexer Vorgang als Summe einfacher Vorgänge beschrieben werden kann: Überraschungen sind damit grundsätzlich ausgeschlossen; alles bleibt im Prinzip beim alten.

Schwache Kausalität

In dem Maße, wie die physikalische Aufmerksamkeit auf Systeme gerichtet wurde, die sich als „mehr als die Summe ihrer Bestandteile“ erwiesen und sich zeigte, daß „sehr geringe Unterschiede ... manchmal große

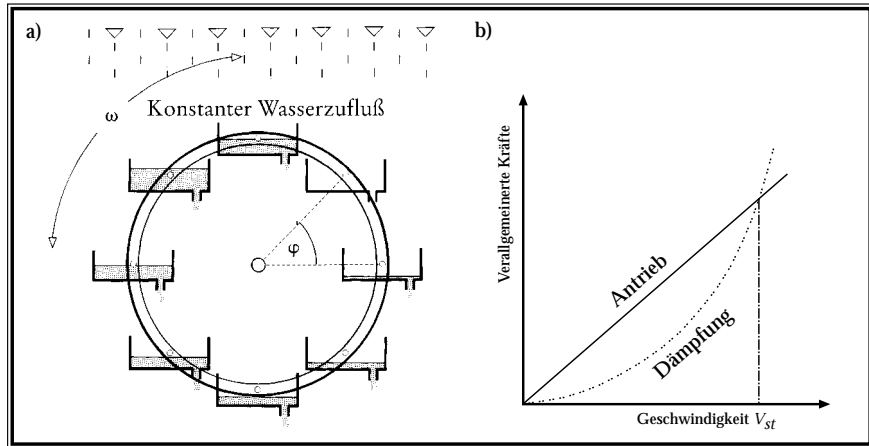
Verschiedenheiten“ (Marie v. Ebner-Eschenbach) auch in der Physik bedingten, geriet das Prinzip der Linearisierung und mit ihm die geradezu als Synonym für physikalisches Handeln angesehene Möglichkeit der sicheren Vorhersage von Ereignissen ins Wanken.

Diese Entwicklung sei an einem auf den ersten Blick harmlos erscheinenden System illustriert [17]: Es besteht aus einem drehbar gelagerten Rad, dessen Kranz mit Behältern

Kopplastigkeit des Systems durch die Reibung ausgeglichen wird, bleibt das System dennoch in Ruhe.

Erst wenn der Zufluß einen kritischen Wert überschreitet, führt die Kopplastigkeit in die Situation von Buridans Esel. Dies ist der Augenblick, in dem das *Clinamen* „ins Weltgeschehen eingreift“: Kleinste, zufällige Schwankungen – etwa in der Füllhöhe der einzelnen Behälter – führen zu einer Entscheidung und damit zu einer Symmetriebrechung

man muß auch in der Lage sein, die Anfangsbedingungen mit *streng unendlicher Präzision* festzulegen.¹⁸⁾ Denn im Unterschied zu den vertrauten klassischen Vorgängen, die der starken Kausalität gehorchen, gilt hier das Prinzip der schwachen Kausalität, wonach *nur gleiche Ursachen gleiche Wirkungen hervorrufen können*. Dieses Prinzip erweist sich aber für die Praxis als bedeutungslos, denn um beispielsweise den Zeitraum, in dem das Verhalten eines Sy-



(2a) Schematische Darstellung des chaotischen Wasserrades. Die Wasserhöhe in den Gefäßen gibt h an, ω die Winkelgeschwindigkeit des Rades und φ den Drehwinkel. Die gegeneinander wirkenden nichtlinearen „Kräfte“ (Antrieb und Dämpfung) regeln die stationäre Geschwindigkeit v_{st} ein (2b)

sehen ist, die im Boden eine kleine Öffnung besitzen (Abb. 2a). Berieselt man dieses Rad mit Wasser, so treten je nach der Stärke des Zuflusses verschiedene Bewegungsfiguren auf.

Bei sehr geringem Zufluß bewegt sich das Rad überhaupt nicht. Das in die jeweils obersten Behälter laufende Wasser verläßt diese sofort wieder durch die untere Öffnung. Selbst wenn man dem Rad einen kurzen Anstoß gibt, kommt es aufgrund von Reibungseinflüssen schnell wieder zur Ruhe. Wird jedoch der Zufluß verstärkt, so staut sich das Wasser zunächst in den oberen Behältern. Solange die dadurch hervorgerufene

des ruhenden Rades, das sich nunmehr in die eine oder andere Richtung zu drehen beginnt. Die einmal aufgrund eines Zufalls eingeschlagene Drehrichtung wird beibehalten und stabilisiert, so daß der Zufall gewissermaßen im zukünftigen Systemverhalten konserviert erscheint: „Ein Lärmschauer, das kleine Zufallselement, transformiert ein System oder eine Ordnung in ein anderes System, eine andere Ordnung“ (Michel Serres).

Um das Verhalten des Wasserrades vorherzusagen zu können, genügt es also offenbar nicht, die Dynamik des Systems – und das heißt, die kausalen Zusammenhänge – zu kennen,

stems vorhersagbar bleibt zu verzehnfachen, müßte man die Genauigkeit, mit der die Anfangsbedingungen bestimmt werden, um einen Faktor mit dem Exponenten 10 steigern. Es ist unnützlich, „die Genauigkeit zu vergrößern oder sogar zum Unendlichen tendieren zu lassen, es bleibt bei gänzlicher Ungewißheit, sie verringert sich nicht in dem Maß, in dem die Genauigkeit zunimmt. ... Kein Beobachter, und seien seine Sinne noch so geschärft, könnte ein Zustand ohne jede Näherung erfassen; nur Gott, so scheint es, wäre dazu in der Lage. Das heißt aber, daß das göttliche Wissen nicht mehr vom menschlichen Wissen als seine

Grenze impliziert wird, als dasjenige Wissen, zu dem es bei wachsender Genauigkeit tendiert; es ist anders, durch einen Abgrund von uns getrennt“ [18].

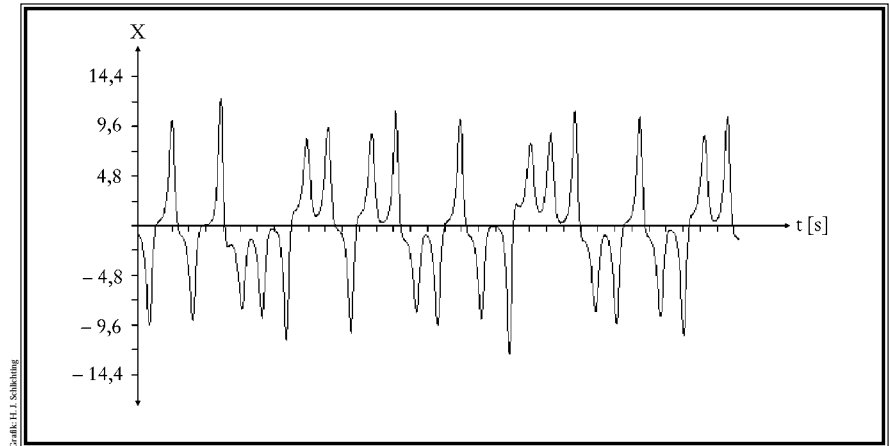
Zirkuläre Kausalität: Rückkopplung

Wie schafft es das Wasserrad, die in Form einer regelmäßigen Drehung eingenommene Ordnung zu erhalten und sich gegen äußere Störungen zu

trieb. Geht man der Einfachheit halber davon aus, daß der Antrieb linear mit der Geschwindigkeit variiert, so variiert die Dämpfung stärker als linear, also nichtlinear mit der Geschwindigkeit. Diese Nichtlinearität hat zur Folge, daß sich Antrieb und Dämpfung gegenseitig begrenzen und damit zu einer zyklischen Einregelung einer stationären Geschwindigkeit v_{st} führen (Abb. 2b).

Wenn v_{st} aus irgendeinem Grund – etwa durch eine Störung – unter-

dem Punkt des Kreislaufs ganz herumgetragen werden, um Veränderungen an diesem Ausgangspunkt hervorzurufen“ [19]. Darin kommt zum Ausdruck, daß die Kausalität in der primitiven Form einer starren Verkettung von Wirkungen und Ursachen durchbrochen und durch eine zirkuläre Kausalität ersetzt wird, wonach „jede Ursache ... die Wirkung ihrer eigenen Wirkung“ (Ibn' Arabi) darstellt. So gesehen haben wir es hier nicht mit einem *circulus*



(3) Das chaotische Orts-Zeit-Signal des Wasserrades. Aufgetragen ist eine durch die Drehgeschwindigkeit bestimmte Größe X als Funktion der Zeit t (aus [17]). Zu erkennen ist der unregelmäßige Wechsel zwischen ungleichförmigen Schwingungen und Drehungen in verschiedene Richtungen

stabilisieren? Nachdem das Rad sich für eine Drehrichtung „entschieden“ und sich in Drehung versetzt hat, geraten die gefüllten oberen Behälter auf die eine und die geleerten Behälter auf die andere Seite. Dadurch baut sich auf der Seite der gefüllten ein antreibendes Drehmoment (Antrieb) auf. Da mit zunehmender Geschwindigkeit aber die aufsteigenden Behälter weniger gefüllt und die absinkenden Behälter weniger entleert werden, entsteht gleichzeitig ein dem Antrieb entgegenwirkendes bremsendes Drehmoment (Dämpfung). Entscheidend ist, daß die Dämpfung stärker mit der Geschwindigkeit wächst als der An-

schritten wird, so dominiert der Antrieb. Dadurch nimmt die Geschwindigkeit wieder zu. Wird v_{st} hingegen überschritten, dann dominiert die Dämpfung, was zu einer Abnahme der Geschwindigkeit führt. Wenn also die Drehgeschwindigkeit über v_{st} hinaus zunimmt, dann wird sie (aufgrund der dadurch bedingten überproportionalen Zunahme der Dämpfung) wieder abnehmen, was wieder zu einer Zunahme führt, die eine Abnahme nach sich zieht ...

Die nichtlineare Dynamik dieses Systems bringt folglich eine Art Rückkopplung hervor, durch die die „Wirkungen von Ereignissen an je-

vitiosus sondern mit einem *circulus virtuosus* [20] zu tun: Die gegeneinanderwirkenden Drehmomente beim Wasserrad führen nicht zu einer Aufhebung von Wirkungen, sondern zu einer neuen Qualität: der regelmäßigen Drehung.

Deterministisches Chaos

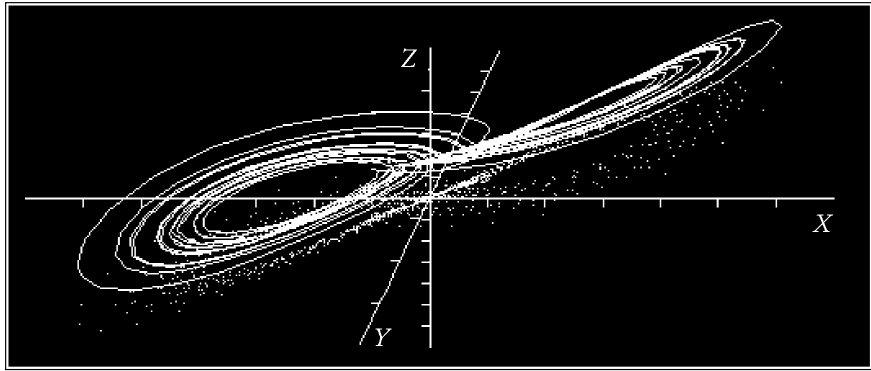
Mit der selbsttätigen Einregelung einer stationären Drehung sind die dynamischen Möglichkeiten des einfachen Wasserrades jedoch noch nicht ausgeschöpft. Wenn der Wasserzufluß weiter zunimmt, kommt es schließlich zu einem weiteren Symmetriebruch. Die stationäre Drehung

geht dann in einen unregelmäßigen Wechsel zwischen ungleichförmigen Schwingungen und Drehungen in verschiedene Richtungen über. Man spricht von einem *chaotischen* Verhalten (Abb. 3).

Wie kommt es dazu? Der erhöhte Wasserzufluß führt zu stark gefüllten Behältern. Die dadurch bedingte Massenzunahme führt zu großen Beschleunigungen, so daß die Behälter auf die andere Seite geraten, bevor sie merklich Wasser verloren haben. Nun wirkt sich die große Masse der aufsteigenden Behälter als

such einer längerfristigen Vorhersage des Bewegungsablaufs zunichte. Diese chaotische Bewegung des Wasserrades wird zwar in Form der zugrunde liegenden Differentialgleichungen in eindeutiger Weise durch eine deterministische Dynamik bestimmt, die Trajektorie des Systems selbst ist aber im Prinzip nicht reproduzierbar und daher *indeterminiert*. Infinitesimale Unterschiede in den Anfangsbedingungen führen nach kürzester Zeit zu *völlig unterschiedlichen Bewegungsfiguren*: „Kleine Unterschiede in den An-

in der Möglichkeit, das Verhalten eines Systems für alle Zeiten vorherzusagen zu können. Doch was bleibt davon im Rahmen der nichtlinearen Physik übrig? Um wenigstens die Idee einer Antwort auf diese Frage zu umreißen, kommen wir noch einmal auf den Würfel zurück: Auch beim ausrollenden Würfel entscheidet das *Clinamen* in der Form von kleinsten zufälligen Schwankungen darüber, ob er gerade noch über eine Kante kippt oder nicht – genau dies macht die erwürfelte Augenzahl zu einem unvorhersehbaren Ereignis.



(4) Das chaotische Signal des Wasserrades im Zustandsraum des Systems, der durch die Größen X , Y und Z aufgespannt wird (Attraktor). Es wurden der Übersicht halber nur wenige „Umläufe“ aufgetragen. Durch die Punktierung wird die Projektion des im XYZ -Raum liegenden Attraktors auf die XY -Ebene angedeutet (aus [17])

Bremse aus: Wie ein überschlagendes Pendel kommt das Rad immer wieder aufs neue in die empfindliche Situation, in der kleinste zufällige Schwankungen darüber entscheiden, ob die Drehrichtung beibehalten wird oder eine Richtungsumkehr eintritt.

Anders als im Falle der regulären Drehung des Rades – bei der nur die Initialisierung mit der Festlegung des Drehsinns vom Zufall bestimmt ist und das Wasserrad gewissermaßen mit jeder Drehung ein Bekenntnis zur deterministischen Verlässlichkeit ablegt – behält nunmehr der Zufall die „Entscheidungsgewalt“ über die Ereignisfolge „längs der gesamten Trajektorie“ und macht jeden Ver-

fangsbedingungen (können) große Unterschiede in den späteren Erscheinungen bedingen; ein kleiner Irrtum in den ersten kann einen außerordentlich großen Irrtum in den letzteren nach sich ziehen. Die Vorhersage wird unmöglich“ [21]. Mit dieser Aussage umreißt bereits um die Jahrhundertwende Henri Poincaré (1854–1912) ein Szenario im Herzen der klassischen Physik, das jedoch erst in unseren Tagen in seiner ganzen Tragweite nicht nur für die Physik, sondern für das im wesentlichen auf der Physik beruhende naturwissenschaftliche Weltbild begriffen wird.

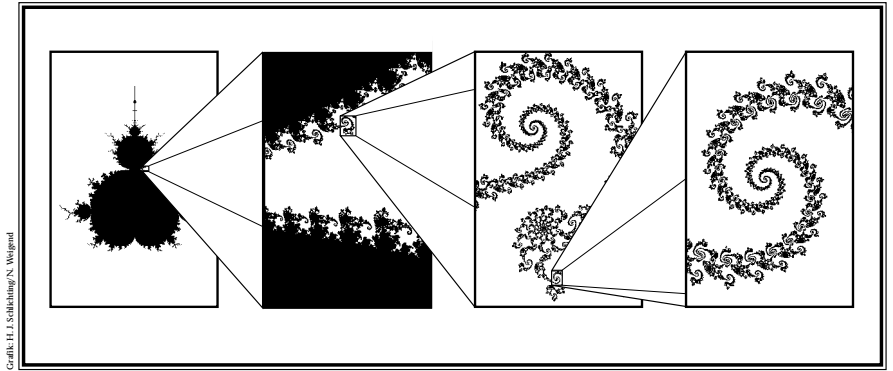
Eines der wesentlichen Merkmale des Determinismus liegt weiterhin

Dennoch kann man eine globale Aussage über alle möglichen Trajektorien des geworfenen Würfels machen: Sie enden alle bei den Zahlen „1“ bis „6“ und zwar jeweils mit einer Wahrscheinlichkeit von eins zu sechs. So gesehen ist der Würfel *global determiniert* und *lokal indeterminiert*. Obwohl sich die nichtlinearen dynamischen Systeme, wie etwa das oben skizzierte Wasserrad, schon deshalb anders verhalten als ein Würfel – es bleibt in Bewegung, während der Würfel bei einer bestimmten Augenzahl zur Ruhe kommt – läßt sich dadurch anschaulich beschreiben, wie man sich in der nichtlinearen Physik chaotischen Systemen anzunähern versucht. Anstatt

nämlich *einzelne* Trajektorien des – chaotischen – Systems zu verfolgen, betrachtet man die Gesamtheit *aller* Trajektorien auf einmal und vollzieht auf diese Weise einen Übergang zu einer Art geometrischer Systemanalyse. So entpuppt sich die völlig irreguläre und unvorhersagbare Bewegung des Wasserrades in seinem Orts-Zeit-Diagramm (Abb. 3) im dreidimensionalen Zustandsraum des Systems als achterbahnartige Spur, die sich im unregelmäßigen Wechsel um zwei Fixpunkte herumwindet und auf diese Weise das

des Systems, die hierin kodiert ist, hinweg. Schaut man jedoch genauer hin, indem man eine Ausschnittvergrößerung des Attraktors vornimmt, von der man erneut einen vergrößerten Ausschnitt betrachtet usw., so zerfasert das Gebilde in immer feinere Details, ohne daß ein Ende abgesehen wäre. Lediglich die begrenzte Rechenkapazität des Computers bereitet einer Reise in die reichhaltigen Tiefenstrukturen des Attraktors ein Ende. Geometrische Objekte mit diesen Eigenschaften nennt man *Fraktale*.

Sein Rand offenbart die fraktale



(5) Die fraktale Struktur des „Apfelmännchens“ (Mandelbrotmenge): Ausschnittvergrößerungen der „rauen“ Oberfläche offenbaren selbstähnliche Formen und Muster. Abbildungen wie diese zeigen, wie die Verhaltensmöglichkeiten eines chaotischen Attraktors nichtlinearer Systeme sich in einem fraktalen Gebilde geometrisch widerspiegeln können

kompakte Muster eines sogenannten *chaotischen Attraktors*³⁷⁾ erzeugt (Abb. 4). Wie beim Würfel kann man auch hier lokal keine Vorhersage treffen (einzelne Trajektorien des Wasserrades sind völlig indeterminiert), aber man kann global vorhersagen, daß „sich die Bewegung des Wasserrades auf einem solchen Attraktor abspielt“.

Der chaotische Attraktor kann als eine geometrische Visualisierung eines chaotischen, der Anschauung weitgehend entzogenen Verhaltens eines nichtlinearen Systems angesehen werden. Auf den ersten Blick täuscht jedoch die kompakte Einfachheit des geometrischen Bildes über die komplexe Verhaltensvielfalt

Der Begriff wurde von Benoit Mandelbrot (geb. 1924) geprägt, der diese „Monster der Anschauung“ an einer äußerst einfachen mathematischen Abbildung „entdeckte“, bei deren Auswertung im Prinzip genauso vorgegangen wird, wie bei der numerischen Lösung der Differentialgleichungen, die dem Wasserrad zugrunde liegen, und daher als eine Art Labormaus der nichtlinearen Physik angesehen werden kann. Diese Abbildung, die sogenannte „Mandelbrotmenge“, die nach ihrer äußeren Gestalt auch unter dem Begriff „Apfelmännchen“ bekannt wurde, hat die einfache Form $z_{n+1} = z_n^2 + c$, wobei z und c komplexe Zahlen sind. Wenn man für alle Werte der

Eigenschaft der Mandelbrotmenge. Ausschnittvergrößerungen – wie sie in der Abbildung (5) dargestellt sind – vermitteln dabei nur einen sehr unvollkommenen Eindruck von dem unerschöpflichen Reichtum *selbstähnlicher* Formen und Muster, die unter der vermeintlich „rauen“ Oberfläche des Apfelmännchens zu entdecken sind.

Geometrische Gebilde wie das Apfelmännchen zeigen eindrucksvoll, wie die in dem fraktalen Gebilde eines chaotischen Attraktors nichtlinearer Systeme enthaltenen Verhaltensmöglichkeiten geometrisch entfaltet werden können – und damit zumindest einen visuellen Eindruck von der Komplexität des Sy-

stems vermitteln. Der Zufall, der bei chaotischen Systemen in Form des *Clinamens* auf das Verhalten des Systems einwirkt, führt nicht zu hoffnungsloser Verwirrung, sondern offenbart sich in oft ästhetisch ansprechenden Mustern. „Chaos“ im Sinne der nichtlinearen Physik kann man daher kaum mit „Unordnung“ und „Gestaltlosigkeit“ in Verbindung bringen, sondern eher mit Formenreichtum und Schönheit – durch die nach wie vor die deterministische Tiefenstruktur der physikalischen Welt hindurchschimmert. Sie zu entschlüsseln und damit Aufschluß über chaotische Systeme zu gewinnen, hat sich die Chaosforschung in erster Linie zur Aufgabe gemacht.

Dabei geht es beispielsweise darum, anhand der irregulären Ereignisse (des sogenannten *irregulären Signals* eines Systems) herauszufinden, ob es sich *stochastisch*¹⁸⁾ oder *chaotisch* verhält und damit auf ein vernünftig arbeitendes System verweist [22].

Es war ein Meteorologe, nämlich Edward Lorenz, der im Jahre 1963 bei der mathematischen Beschreibung des Wetterverhaltens in einem äußerst einfachen System, dem sogenannten Lorenzsystem, auf jene zunächst merkwürdigen Verhaltensweisen stieß, die wir heute als chaotisch bezeichnen [27]. In diesem Modell geht Lorenz davon aus, daß das Wetter wesentlich durch aufsteigende warme und absinkende kalte Luftmassen, die sich in einem System solcher rotierender Luftwirbel organisieren, bestimmt wird. Jeder dieser Luftwirbel verhält sich genau so wie das oben beschriebene Wasserrad. Denn Lorenz kam auf dieselben nichtlinearen Differentialgleichungen, die dem Wasserrad zugrunde liegen. Darin kommt ein weiterer Aspekt der nichtlinearen Physik zum Ausdruck: Auch in einem sehr komplexen (Vielteilchen-)System können die zahlreichen Subsysteme derart kooperieren, daß sich ihr Verhalten durch wenige, Differentialgleichungen erfassen läßt. Im vorliegenden Fall sind es drei Diffe-

rentialgleichungen, die die einzelnen Luftwirbel „einfach“ wie ein Wasserrad erscheinen lassen. Andererseits hat es diese Einfachheit insofern in sich, als das Wasserrad, wie gezeigt wurde, äußerst komplexe Verhaltensweisen, reguläre und chaotische, an den Tag legen kann.

Angesichts der wachsenden Einsicht, daß zahlreiche reale Systeme sich längerfristigen Vorhersagen entziehen und teilweise überraschende Entwicklungen zeitigen, versucht man Szenarien der Entwicklungsmöglichkeiten zu entwerfen und dabei insbesondere zu untersuchen, wie Neues entsteht, wie die Evolution zu Höherem „funktioniert“. Dabei zeigt sich, daß – wie bereits von den Epikureern erkannt – die Einbindung des Zufalls in das kausale Denken nicht das Ende der Wissenschaften bedeutet, sondern umgekehrt Möglichkeiten eröffnet, die beschränkte Sicht des Weltgeschehens als ereignisloses und ewig gleichbleibendes „Tuckern eines Mechanismus“ zu überwinden.

Fazit

Ist nun mit den physikalischen Erregenschaften unseres Jahrhunderts „des Denkens Faden zerrissen“ – um mit Goethe zu sprechen? Zwar hat die klassische Überzeugung „...daß diese Welt eine starre Verkettung von Wirkungen und Ursachen sei“ (Paul Claudel), starke Einschränkungen erfahren, und dabei sind zumindest der Laplacesche Dämon und mit ihm einige Illusionen hinsichtlich der prinzipiellen Vorhersagbarkeit physikalischer Ereignisse auf der Strecke geblieben. Dennoch bleibt das Kausalitätsprinzip mit den Worten Max Plancks (1858–1947) nach wie vor „ein heuristisches Prinzip, ... der wertvollste Wegweiser, den wir besitzen, um uns in dem bunten Wirrwarr der Ereignisse zurechtzufinden und die Richtung anzuzeigen, in der die wissenschaftliche Forschung vorangehen muß, um zu fruchtbaren Ergebnissen zu gelan-

gen“ [23]. Befreit man die Kausalität von allem metaphysischen Beiwerk, kann sie sich auch heute noch sehen lassen: als eine besondere Weise des Sehens. Oder in Paul Valéry [24] Worten: „Man sieht determiniert. Man kann auch anders sehen.“

Zusammenfassung

Das Kausalitätsprinzip zieht sich wie ein roter Faden durch die Geschichte der Physik und damit der Naturwissenschaften. Im Rahmen der neuzeitlichen Physik gelingt es, die durch die Kausalität gegebene „lückenlose“ Verknüpfung vergangener und zukünftiger Ereignisse in Form von Differentialgleichungen zu quantifizieren und damit aus der Kenntnis eines physikalischen Systems zu einem gegebenen Zeitpunkt dessen Verhalten zu jedem Zeitpunkt zu berechnen.

Diese für die klassische Physik typische Form eines strengen Determinismus ist jedoch (in der aktuellen Physik) insbesondere in der Quantenphysik und nichtlinearen Physik starken Einschränkungen unterworfen.

Summary

The principle of causality runs like a red thread through the history of physics and natural sciences. Within the scope of modern physics it has been possible to quantize causality, as an unbroken link between past and future events, by means of differential equations so that the knowledge of a physical system at a given instant allows to calculate the behaviour of the system at any other time.

This typical form of a strong determinism for classical physics has suffered severe restrictions within actual physics especially in quantum physics and nonlinear physics.

Der Autor:

Hans Joachim Schlichting promovierte in theoretischer Physik und habilitierte sich im Fach Didaktik der Physik; seit 1991 ist er ordentlicher Professor für die Didaktik der Physik an der Universität GH Essen. Die Erschließung neuerer physikalischer Lehrinhalte komplexer Phänomene aus der natürlichen und wissenschaftlich-technischen Welt stehen im Zentrum seiner Aktivitäten. Schlichting ist seit 1994 Leiter des Fachverbandes Didaktik der Physik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Vor kurzem erhielt er einen Ruf an die Universität Münster, die Verhandlungen laufen zur Zeit.

Anmerkungen:

- 1) Interessanterweise erfolgt in den späteren Auseinandersetzungen zwischen Anhängern und Gegnern eines strengen Determinismus die Argumentation in umgekehrter Richtung. Die einfachen und überschaubaren Verhältnisse im Bereich der Physik werden auf den seelischen und geistigen Bereich gewissermaßen zurückübertragen.
- 2) „Determinismus“ wird hier und im folgenden als Ausdruck der kausalen Notwendigkeit verstanden. Wie weiter unten noch zu zeigen sein wird, ist er zwar eine notwendige Bedingung für Vorhersagbarkeit, nicht aber eine hinreichende, weil zur Vorhersage auch eine hinreichend exakte Kenntnis des Anfangszustandes gehört.
- 3) Interessanterweise läßt Epikur innerhalb dieses deterministischen Rahmens kleine indeterministische Abweichungen zu. Wie weiter unten auszuführen sein wird, hat diese heftig kritisierte Aufweichung des Determinismus im Rahmen der nichtlinearen Physik unserer Tage erneute Aktualität erlangt.
- 4) Diese Zerlegung des Problems findet sich später in der Mathematisierung der Vorhersage bei Newton wieder. Das Verhalten eines Systems wird durch einen die Dynamik (Differentialgleichung) und einen den Zustand des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt (Anfangsbedingungen) bestimmenden Teil zerlegt.
- 5) Der Gedanke einer Verknüpfung von Ursachen und Kräften geht in der wissenschaftstheoretischen Diskussion der klassischen Physik so weit, daß Kräfte schließlich als Ursachen angesprochen werden. Wie problematisch eine solche Identifizierung ist, zeigt u. a. die Tatsache, daß auch jene neue „Kraft“, die später als Energie Furore macht, als Ursache interpretiert wird. Hier zeigt sich, wie stark das kausale Denken die Begriffsbildung der klassischen Physik bestimmt.
- 6) Die Infinitesimalrechnung umfaßt die Differential- und Integralrechnung. Während die Differentialrechnung sich mit der Bestimmung der Veränderungsgeschwindigkeit einer Größe (etwa des Ortes eines bewegten Gegenstandes) in bezug auf eine andere (beispielsweise die Zeit, in der sich die Veränderung vollzieht) befaßt, geht es in der Integralrechnung umgekehrt darum, den Wert einer Größe durch Summierung (Integration) kleinster Veränderungen zu bestimmen.
- 7) Unabhängig von Newton entwickelte auch

- Leibniz (1646–1716) die Infinitesimalrechnung. Das Problem muß – wie so oft bei fast gleichzeitigen Entdeckungen (T. S. Kuhn) – gewissermaßen in der Luft gelegen haben.
- 8) Ereignisfolge, Bewegungs- oder Entwicklungsbahn wie etwa die eines Körpers auf einer Fläche, eines fliegenden Projektils oder eines Blitzes im Raum.
 - 9) Ein makroskopisches System ist aus einer Vielzahl mikroskopischer Systeme aufgebaut, von deren Verhalten jedoch abgesehen werden kann, wenn man sich auf eine Beschreibung durch makroskopische Zustandsgrößen (wie Temperatur, Volumen, Druck) beschränkt.
 - 10) Es soll dahingestellt bleiben, ob naturphilosophische Überlegungen aus dem Geiste der Romantik, wie sie vor allem im letzten Jahrhundert von Schelling, Hegel u. a. zugeführt worden sind, die Grundlage für eine neue angemessene Ontologie liefern können.
 - 11) Vgl. den Abschnitt „Starke Kausalität“.
 - 12) Das Motiv von Buridans Esel wird in den verschiedensten Zusammenhängen immer wieder aufgegriffen. In der Göttlichen Komödie Dantes heißt es beispielsweise: „Zwischen zwei Speisen, lockend und entfernend, auf gleiche Weise, stirbt man eher Hungers, als daß man eine frei zum Munde führte. So stände auch, gehemmt von gleicher Angst, ein Lamm zwischen zwei gierig wilden Wölfen.“ [25]
 - 13) „Wenn die Körper (die Atome, Anm. d. V.) durchs Leere nach unten geradewegs stürzen mit ihrem eignen Gewicht, so springen zu schwankender Zeit und an schwankendem Ort von der Bahn sie ab um ein Kleines, so, daß du von geänderter Richtung zu sprechen vermöchtest. Wären sie nicht gewohnt sich zu beugen, würde alles nach unten, wie die Tropfen des Regens, fallen im grundlosen Leeren, wäre nicht Anstoß entstanden noch Schlag den Körpern geschaffen. So hätte nichts die Natur je schaffend vollendet.“ [16, S. 101].
 - 14) Epikur argumentiert mit den Worten Lukrez: „Wenn eine jede Bewegung immer verknüpft wird und aus der alten Bewegung entsteht in sicherer Ordnung stets eine neue und nicht durch Beugen (*Clinamen*, Anm. d. V.) die Körper den Anfang einer Bewegung machen, der breche das Bündnis des Schicksals, daß seit unendlicher Zeit nicht Ursache folge auf Ursache: Woher besteht auf Erden allem Beseelten der freie Wille, dank dem vorwärts wir schreiten, wohin einen leitet die Freude, abliegen auch die Bewegungen weder zu sicherem Zeitpunkt noch an sicherer Stelle des Raums, sondern wo der Gedanke uns hintrug?“ Und er antwortet etwas später: „Daß aber der Geist selber nicht habe inneren Zwang in allen Dingen, welche er anfängt, und wie ein Besiegter gedrängt ist zu tragen und leiden, das bewirkt der Ursprungskörper (*Atome*, Anm. d. V.) winzige Beugung (*Clinamen*) weder am festen Ort noch auch zum sicheren Zeitpunkt“ [16, S. 105].
 - 15) Die Unterscheidung zwischen starker und schwacher Kausalität geht auf Max Born zurück [26].
 - 16) Vgl. hierzu auch das Rechenexperiment im Beitrag von Robert Graham, S. 56–58.
 - 17) Ein Attraktor zieht die Trajektorien eines Systems an. Im einfachsten Fall, wenn beispielsweise ein Pendel mit Reibung zur Ruhe

kommt, besteht der Attraktor aus einem Punkt.

18) Stochastisch (= zufällig) nennt man statistisch unabhängige Signale, also solche, die keine Regelmäßigkeiten aufweisen.

Literatur:

- [1] G. Chr. Lichtenberg: Sudelbücher, Bd. II. München 1968
- [2] D. Hume: An Enquiry Concerning Human Understanding, New York, S. 47
- [3] I. Kant: Kritik der reinen Vernunft. Darmstadt 1968, S. 226
- [4] W. Dilthey: Der Fortgang über Kant. In: M. Riedel (Hrsg.): Das Wesen der Philosophie, Stuttgart 1984, S. 185
- [5] P. Valéry: Cahiers 2, Frankfurt 1988
- [6] J. Schulte: Chor und Gesetz, Wittgenstein im Kontext, Frankfurt 1990, S. 48
- [7] H. Diels, W. Kranz: Die Fragmente der Vorsokratiker, Berlin, 1961
- [8] A. N. Whitehead: Wissenschaft und moderne Welt, Frankfurt 1988, S. 22
- [9] Stoicorum Veterum Fragmenta, Hrsg. v. H. v. Arnim, Leipzig 1903, Bd. II
- [10] Platon: Symposion, 180b
- [11] Zitiert nach E. Grassi: Die Macht der Phantasie, Königstein 1979, S. 4
- [12] Cicero, zitiert nach S. Sambursky: Das physikalische Weltbild der Antike, Stuttgart 1965, S. 264
- [13] I. Ekeland: Das Vorhersehbare und das Unvorhersehbare, Berlin 1989, S. 36
- [14] P. S. de Laplace: Essai philosophique sur les probabilités (1840), Zitiert nach S. Sambursky: Der Weg der Physik, München 1978, S. 462
- [15] E. Du Bois-Reymond: Über die Grenzen der Naturerkenntnis, Leipzig 1907, S. 19
- [16] Lukrez: De rerum natura, Stuttgart 1973, S. 101
- [17] H. J. Schlichting, U. Backhaus, H. G. Küpker: Chaos beim Wasserrad – ein einfaches mechanisches Modell für das Lorenz-System, Physik und Didaktik 19/3, 196 (1991)
- [18] I. Prigogine, I. Stengers, S. Pahaat: Die Dynamik – von Leibniz zu Lukrez, In: I. Prigogine et al.: Anfänge, Berlin 1991, S. 54
- [19] G. Bateson: Geist und Natur, Frankfurt 1984, S. 130
- [20] F. Varela: Der kreative Zirkel, Skizzen zur Naturgeschichte der Rückbezüglichkeit, In: P. Watzlawick (Hrsg.): Die erfundene Wirklichkeit, München 1984, S. 294
- [21] H. Poincaré: Wissenschaft und Methode, Darmstadt 1963, S. 380
- [22] V. Nordmeier, H. J. Schlichting: Auf der Suche nach Strukturen komplexer Phänomene, Praxis der Naturwissenschaften Physik 1/96, 22–28 (1996)
- [23] M. Planck: Der Kausalbegriff in der Physik, Leipzig 1941, S. 6
- [24] P. Valéry: Cahiers 2, Frankfurt 1988, S. 173
- [25] A. Dante: Die Göttliche Komödie, Zürich 1941, S. 376
- [26] M. Born: Ist die klassische Mechanik tatsächlich deterministisch? Phys. Bl. 11, 49 (1955)
- [27] E. Lorenz: Nonperiodic Deterministic Flow, J. Atmosph. Sciences 20 (1963), 130