

Physik - zwischen Zufall und Notwendigkeit

H. Joachim Schlichting Universität GH Essen

*Der Determinismus ist die einzige Weise, sich die Welt vorzustellen.
Und der Indeterminismus ist die einzige Weise, in ihr zu existieren.*

Paul Valéry

*Schritt für Schritt trat er in die Spuren,
die soeben erst vom Fuße des Vordermanns in dem Staube aufklafften,
und so fühlte er es: als ob es so sein müßte:
als einen steinernen Zwang, der sein ganzes Leben in diese Bewegung
Schritt für Schritt- auf dieser einen Linie, auf diesem einen schmalen Streifen,
der sich durch den Staub zog, einfing und zusammenpreßte.*

Robert Musil

Die Suche nach der Ursache

Man könnte den Menschen so den Ursachen- Bär...nennen.

Georg Christoph Lichtenberg

"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.

Im Anschluß an David Hume geht man 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 bzw. hervorgerufen werden. Indem diese Schweise 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].

Demgegenüber wird nach Imanuel Kant die durchgängige kausale Verknüpfung der Erscheinungen als denknotwendig angesehen. Die Welt erscheint "a priori" 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].

Wilhelm Dilthey sieht in der Kausalität 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 den 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].

Die Kausalität ist nach Paul Valéry 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 schließlich sieht in der Verabsolutierung der auf der Kausalität beruhenden wissenschaftsgläubigen Einstellung die Gefahr, zu einem Aberglauben zu entarten. "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 z.B. etwas, was wir in der Realität vorfinden und durch Korrelation mit einer Theorie erklären könnten" [6].

Wie dem auch sei, die Unterstellung kausaler Zusammenhänge und die "Suche" nach kausalen Strukturen sind typisch für wissenschaftliches Handeln, ja für das westliche Denken schlechthin. "Der Mensch ist ein Ursachen suchendes Wesen, der Ursachensucher würde er im System der Geister genannt werden können. Andere Geister denken sich vielleicht die Dinge unter andern uns unbegreiflichen Verhältnissen" [1, S. 286].

Die Welt als Wirkung von Ursachen

*Das erst' war so, das zweite so
Und drum das dritt' und vierte so;
Und wenn das erst' und zweit nicht wär',
Das dritt' und viert' wär' nimmermehr.*

J. W. v. Goethe

Kausal geht es von Anfang an auf der Welt zu. Die Welt selbst ist nicht einfach da, sondern ist Folge einer Ursache, des Schöpfungsaktes eines Demiurgen. Nach griechischer Vorstellung führten folgende kausal verknüpften Vorgänge zur Entstehung der Welt:

"In der Zeiten Beginn war Tartaros, Nacht und des Erebos Dunkel und Chaos;
Luft, Himmel und Erde war nicht; da gebar und brütet' in Erebos' Schoße,
Dem weiten, die schattenbeflügelte Nacht das uranfängliche Windei;
Und diesem entkroch in der Zeit Umlauf der Verlangen entzündende Eros,
An den Schultern von goldenen Flügeln umstrahlt und gehend wie die wirbelnde Windsbraut.
Mit dem Chaos, dem mächtigen Vogel, gepaart, hat der in des Tartaros Tiefen
Uns ausgeheckt und heraufgeführt zu dem Lichte des Tages: die Vögel.
Noch war das Geschlecht der Unsterblichen nicht, bis er alles in Liebe vermischt.
Wie sich eins mit dem andern dann paarte, da ward der Okeanos, Himmel und Erde,
Die unsterblichen, seligen Götter all!" [7].

Die christliche Schöpfungsgeschichte beginnt bekanntlich folgendermaßen:

1. Am Anfang schuf Gott Himmel und Erde.
 2. Und die Erde war wüst und leer, und es war finster auf der Tiefe und der Geist Gottes schwebte auf dem Wasser.
 3. Und Gott sprach: Es werde Licht! und es ward Licht.
 4. Und Gott sah, daß das Licht gut war. Da schied Gott das Licht von der Finsternis,
- 5 und nannte das Licht Tag, und die Finsternis Nacht. Da ward aus Abend und Morgen der erste Tag" [8].

Auch hier geschieht nichts ohne Ursache. Nur Gott ist gewissermaßen eine erste Ursache, hinter der es keine weitere Ursache gibt. Auf diese Weise Gott "definieren" bedeutet daher, daß im kausalen Denken, "ob man will oder nicht...zwangsläufig ein Gott mitgesetzt ist - und das ist eine strenge Ironie" ¹ [5, S.75].

Bereits Adam und Eva erleben die Unerbittlichkeit kausaler Verhältnisse am eigenen Leibe, indem sie ihre Vertreibung aus dem Paradies als Folge von Ursachen erfahren, die sie selbst hervorgerufen haben. Ihr folgenreiches Tun besteht darin, verbotenerweise vom Baum der Erkenntnis zu essen. Sinnigerweise werden sie dadurch überhaupt erst in die Lage versetzt, den kausalgesetzlichen Zusammenhang des Vorgangs zu durchschauen: Strafe erscheint hier als Folge eines Regelverstoßes. Kausales Verhalten wird ursprünglich mehr oder weniger ausdrücklich selbst als eine Rechtsvorschrift gesehen, die unter besonderem göttlichen Schutz steht: "Die Sonne wird ihre Maße nicht überschreiten", heißt es bei den Vorsokratikern, "wenn aber doch, dann werden Erinnynen, der Dike Helferinnen, sie zu fassen wissen"² [9].

Als Ursprung des kausalen Denkens müssen primäre Erfahrungen aus dem menschlichen Bereich angesehen werden. Der frühe Mensch sieht sich dem Wirken eines unerbittlich gleichgültigen Schicksals ausgeliefert. Diese

¹ Die Ironie besteht darin, daß die Kausalität häufig mit Wissenschaftlichkeit gleichgesetzt wird, die Wissenschaften aber nicht selten als ein der Religion entgegengesetzter Bereich angesehen wird.

² Im modernen wissenschaftlichen Betrieb wird die Rolle Dikes als "unerbittliche Richterin" allerdings von der sogenannten "scientific community" übernommen.

Anschauung wird von den Tragödiendichtern Athens, Sophokles, Aischylos und Euripides literarisch aufgearbeitet und durch zahlreiche Theateraufführungen wirkungsvoll verstärkt. Es spricht vieles dafür, daß diese unerbittliche Unausweichlichkeit Eingang in das wissenschaftliche Denken fand. Alfred North Whitehead zufolge wird das Schicksal der griechischen Tragödie im modernen Denken zur Ordnung der Natur: "Die physikalischen Gesetze sind die Ratschlüsse des Schicksals" [10].

Interessanterweise erfolgt in den späteren Auseinandersetzungen zwischen Anhängern und Gegnern eines strengen Determinismus³ die Argumentation in umgekehrter Richtung. Die einfachen und überschaubaren Verhältnisse im Bereich der Physik werden auf den seelischen und geistigen Bereich gewissermaßen zurückübertragen.

Von der Notwendigkeit zum Determinismus

Der Epikureische Atomismus

... alles was hier unten geschieht, hat einen Grund.

I. Calvino

Genau genommen hat die Kausalität bei den Vorsokratikern noch nicht die spezielle Form des Ursache-Wirkungsschemas angenommen. 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 (um 460 v.Chr.) es ausdrückt - nichts von selbst geschieht, sondern unter dem Druck der Notwendigkeit .

Daraus entwickelt sich schließlich die Vorstellung eines vollständig determinierten Verhaltens , in dem für grundloses Geschehen und zufälliges Verhalten kein Platz ist. Auf der Grundlage dieser Vorstellung baut Epikur (342 - 271) die von Demokrit (360 -371) und Leukipp geschaffene Atomlehre zu einem universellen, d.h. sowohl für die belebte als auch für die unbelebte Natur Gültigkeit beanspruchenden System aus: Das gesamte makroskopisch erfaßbare Geschehen wird aus den Bewegungen qualitätsloser, unveränderlicher Atome erklärt. Die Bewegungen der Atome und darauf aufbauend alle komplexeren Vorgänge der Welt werden durch die Stöße der Atome untereinander und dem Gewicht der Atome, ihrem Bestreben nach unten (zum Mitelpunkt 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 der Abwärtsbewegung, als eine innere, dem Atom innenwohnende Notwendigkeit angesehen werden. Im Vorgriff der für die neuzeitliche Physik so bedeutungsvollen Invariantenvorstellung wird die Summe aller Atome als konstant angenommen. Die Entstehung und Vernichtung von Atomen und damit von allem Seienden ist ausgeschlossen⁴.

Die Kontinuumstheorie der Stoiker

Alternativ und konkurrierend zur atomistischen Lehre Epikurs entwickeln die Stoiker eine Kontinuumstheorie, in der die Welt als ein stetig und lückenlos mit materiellen Körpern und einem alles durchdringenden Pneuma erfüllter Raum erscheint. Das Pneuma kann als eine Art Vorläufer des physikalischen Feldes angesehen werden, welches die Wirkungen zwischen den Körpern vermittelt und alles Geschehen in der Welt auf unmittelbare Nahrwirkung zurückführt. Infolge einer Art topologischen Parallelismus läßt sich - den Stoikern zufolge - 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. Der absoluten Gültigkeit dieses Prinzips der griechischen Naturphilosophie versichern sich die Stoiker in dem folgenden Ausspruch: "Ein ursacheloses Ereignis gleicht einer Erschaffung aus dem Nichts und ist genau so wenig möglich wie diese" [11, S. 945]. Sehr viel später macht sich umgekehrt Robert Mayer die Überzeugungskraft dieses deterministischen Prinzips zunutze, indem er den von ihm eingeführten Energieerhaltungssatz mit den Worten: "Ex nihilo nihil fit" rechtfertigt, und sogar soweit geht, Kraft (gemeint ist das, was später als Energie bezeichnet wird, Anm. d.V.) und Ursache zu identifizieren: "Alle Erscheinungen oder Vorgänge beruhen darauf, daß Stoffe, Körper, das Verhältnis, in wel-

³ Determinismus wird hier und im folgenden als Ausdruck der kausalen Notwendigkeit verstanden. Wie weiter unten noch zu zeigen sein wird, ist er notwendige Bedingung für Vorhersagbarkeit, nicht aber hinreichende. Denn zur Vorhersage gehört auch eine hinreichend exakte Kenntnis des Anfangszustandes.

⁴ 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.

chem sie zu einander stehen, verändern. Nach dem Gesetze des logischen Grundes nehmen wir an, daß dies nicht ohne Ursache geschähe, und eine solche Ursache nennen wir Kraft" [12].

Das von den Stoikern formulierte Prinzip der Unmöglichkeit akausaler Ereignisse gehört damit zu den metaphysischen Grundlagen der Physik, die bis in unser Jahrhundert hinein das naturwissenschaftliche Denken geprägt haben. In der folgenden, wahrscheinlich von Chrysipp (281 - 208) stammenden Version, kommt bereits die moderne Fassung des Kausalitätsprinzips zum Ausdruck, wonach wenn immer der Zustand A wiederhergestellt ist, aus ihm stets der Zustand B folgen muß: "Angesichts der Vielheit der Ursachen postulieren die Stoiker allgemein, 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 ein kann; denn sonst müßte irgendeine ursachelose Bewegung existierten" [11].

Von der Weissagung zur physikalischen Vorhersage

Wer prophezeit die Späße der Menschen

Jean Paul

Auch wenn die "empirische" Fundierung des Kausalitätsbegriffs erst im Rahmen der neuzeitlichen Physik durch Experimente und eine durchgängige Mathematisierung möglich wird, kann man insbesondere bei den Stoikern das Bemühen feststellen, ihr deterministisches Weltbild durch Beobachtungen und andere empirische Argumente zu untermauern. Auf den ersten Blick erscheint der Versuch der Stoiker erstaunlich, die zur damaligen Zeit vielgeübte Praxis der Weissagungen, jenes "wechselseitigen Umgangs von Göttern und Menschen" [13] für ihre Lehre nutzbar zu machen. Denn ein wesentlicher Antrieb der griechischen Philosophie besteht umgekehrt gerade in dem Bemühen, sich von der religiös mythologischen Tradition zu emanzipieren. Insbesondere die Peripathetiker bekämpfen diesen - aus ihrer Sicht - Rückfall in irrationales Handeln. Bedenkt man aber, daß in einem strengen Verständnis der Kausalität zukünftige Ereignisse Wirkungen gegenwärtiger Ursachen sind, so liegt die Parallele zu den göttlichen Weissagungen geradezu auf der Hand. Man hat im übrigen davon auszugehen, daß die damaligen Propheten sich nicht mehr nur auf die ihnen von den Göttern eingegebenen Antworten auf ihre Fragen verlassen, sondern sich auch rationaler und logischer Methoden bedienen.

Plutarch (45 - 120) interpretiert die Praxis der göttlichen Seher als "diejenige Kunst, die aus dem Gegenwärtigen oder Vergangenen auf das Zukünftige sich richtet". Und er fügt 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" [14]. Hier hat man bereits die Vorform der für die neuzeitliche Physik so bedeutungsvollen Methode des induktiven Schließens: Das induktive Prinzip ist gewissermaßen die säkularisierte Form der antiken Kunst der Weissagungen.

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" [15, S. 264] wird später zum Problem der Feststellung der physikalischen Anfangsbedingungen eines Systems.

Die Mathematisierung der Kausalität

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

Italo Calvino

Die ausdrückliche Einbeziehung der Weissagungen in die deterministische Argumentation der Stoiker ist auch deshalb bemerkenswert, weil den Weissagungen nur mäßiger Erfolg beschieden ist. Die Gegner des Determinismus, insbesondere die Peripathetiker, werden daher auch nicht müde, darauf aufmerksam zu machen. Schon die Stoiker sehen darin jedoch keinen Widerspruch zum Determinismus, sondern geben sich ganz empirisch, indem sie mit Beobachtungsfehlern rechnen: "Voraussagen, 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" [15, S. 268]. Das Wirken des Zufalls wird daher auch nicht als Gegenargument gesehen. Bereits die alten Deterministen (Anaxagoras, Demokrit und die Stoiker) gehen davon aus, "daß der Zufall eine Ursache sei, die dem menschlichen Verständnis verborgen ist" [9].

Um diese Mängel zu beseitigen, bemüht man sich, sowohl die Zeichen in den Dingen besser zu erkennen, als auch eine größere Exaktheit bei der Beschreibung und Auslegung der Vorgänge anzustreben⁵. "Bei Prophezeiungen ist der Ausleger oft ein wichtigerer Mann als der Prophet" (G. Chr. Lichtenberg). Diese Bemühungen werden zunehmend bestimmt durch den Versuch, die Zeichen und Vorgänge quantitativ zu erfassen, also mit Hilfe von Zahlenverhältnissen auszudrücken. Sie sind schließlich erfolgreich, wenn auch vielleicht auf ganz andere Weise, als es sich die Alten vorgestellt haben mögen. Denn ein derart unbescheidenes Unternehmen muß mit Bescheidenheit in anderer Hinsicht erkauf werden: Statt die in ihrem zukünftigen Verhalten zu beschreibenden Systeme so zu belassen, wie sie in der Wirklichkeit vorkommen, werden sie im Rahmen der neuzeitlichen Physik drastischen Vereinfachungen unterworfen, bis sie nicht mehr wiederzuerkennen sind. Indem man von Eigenschaften wie Geschmack, Farbe, Form usw. absieht, und sich außerdem auf besonders einfache Situationen bezieht, gelingt es, dem Verhalten eines Systems einfache Mechanismen zugrundezulegen, die sich in Ursache-Wirkungsketten manifestieren. Mit ihrer Hilfe können dann exakte Vorhersagen über das zukünftige Verhalten des Systems gemacht werden.

So unternimmt es beispielsweise Galileo Galilei 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 Realität nicht vor- erst den Nachfolgern von Galilei gelingt es, sich dieser Idealgestalt schrittweise anzunähern- er hat aber den im Sinne des obigen Programms entschiedenen Vorteil, daß in ihm keine unkalkulierbaren Einwirkungen auf die Bewegungen eines Körpers zu gewärtigen sind. Ohne derartige Einwirkungen, so argumentierte Galilei, verhalten sich gleichförmig bewegte Körper genauso 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 ein, die Ursache von Geschwindigkeitsänderungen bzw. Beschleunigungen auf Kräfte unterschiedlicher Art zurückzuführen⁶. Newton geht davon aus, daß diese Kräfte F den Beschleunigungen a , die sie verursachen, direkt proportional sind:

$$F = ma \text{ (2. Newtonsches Axiom).}$$

Mit der Angabe der jeweiligen Kraft ist die Dynamik des Problems fixiert: Zwei oder mehrere Massenpunkte, die zu einem bestimmten Zeitpunkt Kräfte aufeinander ausüben, führen zu gegenseitigen Beschleunigungen. Infolge dessen treten Veränderungen der Entfernung zwischen den Punkten und damit Veränderungen der von den Entfernung abhängenden Kräfte auf, die im nächsten Augenblick zwischen den Punkten wirken. Sie verursachen erneut Beschleunigungen der Massenpunkte 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 (infinitesimalen) Veränderungen der Geschwindigkeiten aufzufassen, die in einem infinitesimalen Zeitintervall auftreten, und die Bewegung der betrachteten Massenpunkte während eines größeren Zeitintervalls durch Aufsummierung der Beschleunigungen zu jedem Zeitpunkt des Intervalls, d.h. durch *Integration* zu ermitteln.

Eine solche Integration führt unter Anwendung von Methoden, die Newton eigens zu diesem Zweck entwickelte⁷, zur Darstellung der Trajektorien, d.h. der während des Zeitintervalls durchlaufenen Orte r der Massenpunkte als Funktion der Zeit t : $r(t)$. Um die Integration durchführen zu können, muß man neben der Dynamik in Form der Differentialgleichungen lediglich noch die sogenannten Anfangsbedingungen, also die Orte und Geschwindigkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt, kennen (siehe auch Anmerkung 4). Mit anderen Worten: Es genügt, das

⁵ 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.

⁶ 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.

⁷ Das Problem muß jedoch wie so oft bei fast gleichzeitigen Entdeckungen (T.S. Kuhn) gewissermaßen in der Luft gelegen haben. Denn unabhängig von Newton entwickelte auch Leibniz die Infinitesimalrechnung.

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 so gesehen als die mathematische Sprache angesehen werden, in der sich der Determinismus ausdrückt: Sie geben der Zeit Gestalt, die Ewigkeit im gegenwärtigen Augenblick zu besitzen [16]: "Die Herrschaft über den Augenblick ist die Herrschaft über das Leben" (Marie v. Ebner- Eschenbach). Das Newtonsche Universum liegt gewissermaßen offen vor uns, das Zukünftige ist im Gegenwärtigen bereits enthalten. Oder, wie Gottfried Wilhelm Leibniz es ausdrückt: "Le présent est gros de l'avenir, le future se pouvait lire dans le passé, l'éloingné est exprimé dans le prochain" [17]. So gesehen kann der Determinismus bereits als "eine Konzeption der Raum- Zeit" angesehen werden, " in der das Antezedenz und das Consequenz gleichsam simultane Teile eines Ganzen sind. Die Zeit ist in jedem Kausationsdenken eine echte Dimension des Raums" [5,S.202].

Der Laplacesche Dämon durchschaut die Welt

Du gleichst dem Geist den du begreifst, nicht mir.

J.W.v. Goethe, Faust I

Der Erfolg des Newtonschen Programms der Mechanisierung der Welt beruht vor allem darauf, daß durch die Mathematisierung der Kausalität die Vorgänge bis auf die Feststellung der Anfangsbedingungen der menschlichen Unzulänglichkeit entzogen wird. Eine weitgehende Beschränkung auf Vorgänge, bei denen die Wirkungen proportional zu den Ursachen sind (starke Kausalität!, siehe unten), garantiert außerdem, daß man es stets mit überschaubaren einfachen Verhältnissen zu tun hatte.

All jene komplexen, unüberschaubaren, scheinbar zufallsbestimmten Vorgänge, die (vorerst) einer Mathematisierung widerstehen und im pränewtonschen Dunkel bleiben, vermag der deterministischen Welt daher auch nichts anzuhaben. Gefährlich sollte indessen ein längst bekanntes einfaches mechanisches System werden, mit dem das deterministische Denken im 18. Jahrhundert konfrontiert wird: der Würfel. Er scheint 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" [11]. Auch wenn man einen Würfel zweimal auf dieselbe Weise (gleiche Anfangsbedingungen) wirft, bleibt die gewürfelte Zahl das Ergebnis des Zufalls.

Den Wissenschaftlern gelingt es jedoch, die Gefahr zu bannen, indem sie diesen Zufall im Rahmen der Wahrscheinlichkeitsrechnung kalkulierbar und damit unschädlich machen. "Auch der Zufall ist nicht unergründlich - er hat seine Regelmäßigkeit" (Novalis). Der Erfolg der Wahrscheinlichkeitsrechnung täuscht jedoch darüber hinweg, daß man im Grunde das Problem verlagert hat. Man ist vom Verhalten eines Systems zum Verhalten vieler gleichartiger Systeme übergegangen und hat die Frage der Vorhersage des Verhaltens eines einzigen Würfels verdrängt. Es bleibt weiterhin virulent.

Mit der Wahrscheinlichkeitstheorie hat man jedoch die Möglichkeit, eine Bresche in die unter der Oberfläche einfacher makroskopischer Systeme wirkende Komplexität zu schlagen: Die aus vielen Teilchen aufgebaut gedachten Gase werden so einer physikalischen Betrachtung zugänglich. Obwohl das Zufallsverhalten der vielen Gaspartikel konstitutiv für die wahrscheinlichkeitstheoretische Beschreibung der Gase ist, fällt es leicht, dieses als Reflex der menschlichen Unzulänglichkeit anzusehen, seiner Unfähigkeit, sich einen Überblick über die Anfangsbedingungen aller Teilchen zu verschaffen. Pierre Simon Laplace schafft 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 kennte und überdies umfassend genug wäre, um diese gegebenen Größen der Analysis zu unterwerfen, würde in derselben Formel die Bewegungen der größten Weltkörper wie des leichtesten Atoms umschließen; nichts würde ihr ungewiß sein, und Zukunft wie Vergangenheit würden ihr offen vor Augen liegen. 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" [18].

Diese Ansicht bestimmt das physikalische Denken bis weit in unser Jahrhundert: „Wie der Astronom den Tag vorhersagt, an dem nach Jahren ein Komet aus den Tiefen des Weltraumes am Himmelsgewölbe wieder auftaucht, so läse jener (Laplacesche) Geist in seinen Gleichungen den Tag, da das griechische Kreuz von der Sophienmoschee blitzen oder daß England seine letzte Steinkohle verbrennen wird. Setzte er in der Weltformel $t = -$

i, so enthüllte sich ihm der rätselhafte Urzustand der Dinge... Solchem Geist wären die Haare auf unserem Haupte gezählt, und ohne sein Wissen fiele kein Sperling zur Erde" [19, S.19]. Die hier von Emil Du Bois - Reymond, der im ausgehenden 19. Jahrhundert ausgesprochene Überzeugung einer vollständig erkennbaren Welt bestimmt auch heute noch das Denken und Handeln zahlreicher Wissenschaftler. Der menschliche Geist wird somit als nur asymptotisch verschieden vom Laplaceschen Dämon angesehen: "Wir gleichen diesem Geist, denn wir begreifen ihn" [19, S.23], sagt Du Bois - Reymond vermutlich in Anspielung auf die berühmte mephistophelische Sentenz in Goethes Faust. Wir dürfen gespannt sein, ob es dem Menschen gelingen wird, die damit in ihn gelegten Erwartungen zu erfüllen, oder ob der vom Menschen auch zu diesen Zwecke entwickelte Computer irgendwann den menschlichen Geist übersteigt und die Sache selbst in die Hand nimmt⁸.

Es steht in den Sternen geschrieben

Das Problem der Willensfreiheit

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

G. Chr. Lichtenberg

Eine weitere von Anfang an diskutierte Schwierigkeit besteht darin, den Determinismus mit der menschlichen Willensfreiheit in Einklang zu bringen. Die Diskussion durchzieht die gesamte philosophische Literatur und ist immer wieder Gegenstand wissenschaftlicher Auseinandersetzungen gewesen. René Descartes hat das Problem durch den Trick aus der physikalischen Diskussion verbannen wollen, daß er die Welt in zwei Bereiche einteilte, die res cogitans und die res extensa. Die Phänomene des Lebens und damit auch der menschliche Geist gehörten der res cogitans an und seien jeglichem naturwissenschaftlichen 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 verschärfen 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 erliegen viele Naturwissenschaftler durch die enormen Erfolge der klassischen Physik angespornt- zu leicht der Laplaceschen Versuchung, Bereichsgrenzen zu ignorieren und insbesondere die sogenannte Willensfreiheit als physikalisches Phänomen zu enttarnen.

Bereits die Stoiker, unter ihnen vor allem Chrysipp versucht, das Problem der Willensfreiheit mit streng deterministischen Argumenten zu lösen. Dabei dienen ihnen nicht selten physikalische Beispiele: "Wenn du einen zylindrischen Stein auf einen steilen Abhang wirfst, so wirst du zwar die Ursache und den Beginn seines Absturzes veranlaßt haben, dann aber rollt er bergab, nicht weil du noch daran beteiligt bist, sondern wegen seiner besonderen Beschaffenheit und seiner Fähigkeit zu rollen, die er vermöge seiner Form besitzt. So gibt die gesetzmäßige Ordnung und Notwendigkeit des Fatums den Anstoß zur Bewegung der verschiedenen Ursachenfolgen, jedoch der Antrieb für unsere Pläne und Gedanken und unsere Handlungen selber sind vom Willen jedes Einzelnen und von den natürlichen Anlagen seines Charakters bestimmt" [9,S.1000]. Der Mensch ist also nach Chrysipp so frei wie ein fallender oder geworfener Stein. Die natürlichen Anlagen des Menschen beeinflussen zwar den Lauf der Dinge genauso wie die Form des Steins dessen Absturz, und der Mensch kann darin durchaus den Einfluß seiner Person sehen. Aber in beiden Fällen geschieht alles mit Notwendigkeit.

Diese Position, daß der Mensch nur glaubt, frei zu handeln, in Wirklichkeit aber vom Schicksal bestimmt ist, wird daher nicht zufällig auch von Literaten und Philosophen immer wieder mit physikalischen Bildern illustriert: "Vielleicht ist jedem Menschen, er sei wie er wolle, wie einem geschleuderten Ball seine Wurfbahn vorgezeichnet, und er folgt einer längst bestimmten Linie, während er das Schicksal zu zwingen oder zu hänseln meint" [20]. Oder: "Der Mensch ist so frei, wie die Erde unbeweglich ist. Für diese Illusion ist alles vorbereitet. Er darf die Kräfte nicht spüren und glaubt sich ebenso leicht nach O fortzubewegen wie nach W, nach N wie nach S...[5, S. 113].

Die Chrysippische Zerlegung des Problems in einen die Randbedingungen (ein zylindrischer Stein startet auf steilem Abhang) und einen die Dynamik charakterisierenden Teil, (der Stein rollt infolge der Schwerkraft hinab) geht bemerkenswerterweise vollständig im Newtonschen Formalismus auf. Newton hat gewissermaßen mathematisch vollendet, was in der langen Tradition des Determinismus gedanklich bereits vorbereitet war.

⁸ So mutmaßt beispielsweise Robert Jastrow, ein Wissenschaftler der Artificial Intelligence: "Es ist gut möglich, daß die Evolution des Menschen so weit wie möglich gegangen ist und daß eine neue Lebensform auf Silikonbasis die dominanten menschlichen Lebensformen auf Kohlenstoffbasis ablösen wird " (zit. nach [33])

Umgekehrt stellt sich im Anschluß an die Newtonsche Mathematisierung der Kausalität das Problem der Willensfreiheit neu: Läßt sich die Willensfreiheit in Analogie zum Formalismus der Mechanik beschreiben? Als einer der ersten, die sich mit dieser Frage auseinandergesetzt haben, ist Joseph Priestley (1733- 1804) zu nennen. Kerngedanke seiner Überlegungen ist die Anwendung der Newtonschen Vorstellung der Kraft als Ursache von Bewegungsänderungen auf den Bereich der menschlichen Psyche [21]. Für ihn sind die Motive, die den menschlichen Willen leiten, Kräfte im Newtonschen Sinne. Die streng deterministische Ausrichtung seines Gedankengangs kommt mit großer Deutlichkeit in der Aussage zum Ausdruck, daß der Mensch bei gleicher Ausgangslage stets wieder aus "freiem" Willen zu denselben Handlungen veranlaßt wird. Man kann davon ausgehen, daß die Idee einer mechanischen Beschreibung seelischer und geistiger Vorgänge nicht ohne Einfluß auf die bis in unsere Tage wirkenden großen psychologischen und psychoanalytischen Systeme ist⁹.

Grenzen des Determinismus

Der Indeterminismus der Quantenmechanik

Die hellseherischen Fähigkeiten des Laplaceschen Dämons verfestigten die Überzeugung einer vollständigen Erkennbarkeit der Welt und lösten Aktivitäten aus, zum Urgrund der Dinge vorzudringen und zu erforschen, "was", mit den Worten von Goethes Faust, "die Welt im Innersten zusammenhält". Die durch das klassischen physikalischen Denken motivierte Reise ins Innere der Welt, hat den Physikern einerseits einen ganzen Mikrokosmos atomarer Phänomene beschert, sie hat aber andererseits - und das ist eine strenge Ironie - in eine völlig veränderte Welt geführt: In diesem 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 der klassischen Anschauung jegliche Grundlage entzogen.

Die Praxis sieht anders aus. Nahezu alle Begriffe des klassisch mechanistischen Denkens haben gewissermaßen ihren eigenen logischen Verfall überlebt. Auch der moderne Physiker könnte nur schwer auf die durch das kausale Denken nahegelegte Suche nach einfachen Mechanismen, Ursache - Wirkungsketten verzichten, wenn er nicht vor allem jene Phänomene übersehen will, deren mathematische Beschreibung relativ einfache Anschauungen voraussetzen. 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 dem kausalen Denken und der damit verbundenen Zerlegbarkeit der Welt in einfache Elemente. Die Quantenphysik hat das kausale Denken in eine große 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 Wiederentdeckung des *Clinamen*

Aber nicht erst aus mikrophysikalischer Sicht erweist 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 des physikalischen Denkgebäudes verkommt.

Obwohl diese Einsicht erst in unseren Tagen im Rahmen der nichtlinearen Physik eine wissenschaftliche und empirische Untermauerung erfährt, wird sie bereits in der Determinismus- Debatte zwischen Epikureern und

⁹ Dies kommt beispielsweise deutlich bei Sigmund Freud zum Ausdruck, der in seiner "naturwissenschaftlichen Psychologie" das Ziel verfolgt, "quantitativ bestimmte Zustände aufzeigbarer materieller Teile" [22] zu untersuchen.

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. zuwege gebracht worden ist, die Grundlage für eine neue angemessener Ontologie liefern können.

Stoikern, also lange bevor der Laplacesche Dämon das Licht der Welt erblickt, auf hohem Niveau durchdacht und dargestellt.

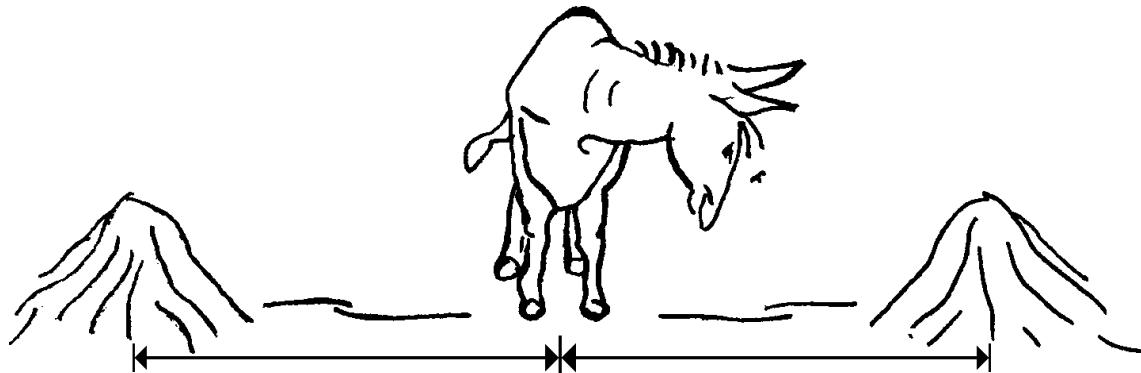


Bild 1: Exakt in der Mitte zwischen zwei Heuhaufen stehend wäre Buridans Esel verhungert, wenn die Symmetrie der Situation nicht durch eine kleine Fliege gebrochen worden wäre, die den Esel veranlaßt, sich einem bestimmten Haufen zuzuwenden

Das klassische Paradebeispiel solcher - aus heutiger Sicht folgenreichen- Situationen wird durch den Esel des scholastischen Philosophen Buridan beschrieben, der zwischen zwei Heuhaufen verhungert, weil er sich für keinen von beiden entscheiden kann (Bild 1). 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 entfernt,/auf gleiche Weise, stürb 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,

Die Epikureer, Gegner des strengen Determinismus der Stoiker, sehen nur in der Wirkung eines akausalnen Impulses eine Lösung des hier geschilderten Dilemmas: "Wenn wir zwischen zwei Dingen zu wählen haben, die absolut gleich und gleichwertig sind, und keine Ursache vorliegt, die uns zu einem von beiden hinzieht, weil sie sich in nichts unterscheiden, dann entscheidet die impulsive Regung der Seele selber und löst das Dilemma" [11, S. 973]. Den Ursprung solcher zufallsbestimmter Impulse sieht Epikur im Verhalten der Atome, das letztlich dem gesamten makroskopischen Geschehen zugrundeliege. Erst dadurch, daß die Atome aus ihrer anfangs als stur parallel angenommenen Bewegung in Richtung auf die Weltmitte zuweilen eine geringfügige Abweichung (griech.: Clinamen) erfahren, könne es überhaupt zu Zusammenstößen unter den Atomen und damit letztlich zu jenen komplexen Verflechtungen kommen, die das Weltgeschehen ausmachen: "Wenn die Körper (Atome; H.J.S.) 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." [24, S. 101]. Insbesondere könne das Clinamen als Voraussetzung für die Möglichkeit des freien Willens angesehen werden, ohne daß es nötig sei, das deterministische Grundschema allen Geschehens aufzugeben. Denn, so argumentiert Epikur 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 die Körper den Anfang einer Bewegung machen, der breche das Bündnis des Schicksals, daß seit unendlicher Zeit nicht Ursache folge auf Ursach: Woher besteht auf Erden allem Beseelten der freie Wille, dank dem vorwärts wir schreiten, wohin einen leitet die Freude, abbiegen 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; H.J.S.) winzige Beugung (Clinamen) weder am festen Ort noch auch zum sicheren Zeitpunkt" [24, S. 105].

Bedeutungsvoll an der Clinamen- Hypothese ist insbesondere aus heutiger Sicht die konstruktive Rolle, die hier wohl erstmalig im abendländischen Denken dem Zufall beigemessen wird. Da Epikur darüber hinaus vom monistischen Standpunkt aus argumentiert, vermeidet er Probleme, die eine dualistische Zweiteilung der Welt in eine res cogitans und eine res extensa mit sich bringen. Seine Aussagen gelten 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 (z.B. der nichtlinearen Physik) zuungunsten der res cogitans, der denkenden Welt des Geistes, verschieben.

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

Starke Kausalität

Es ist allerdings 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 führen¹¹. 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 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 dann nehmen die Differentialgleichungen 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 wieder 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 grundsätzlich ausgeschlossen; alles bleibt im Prinzip beim alten.

Schwache Kausalität

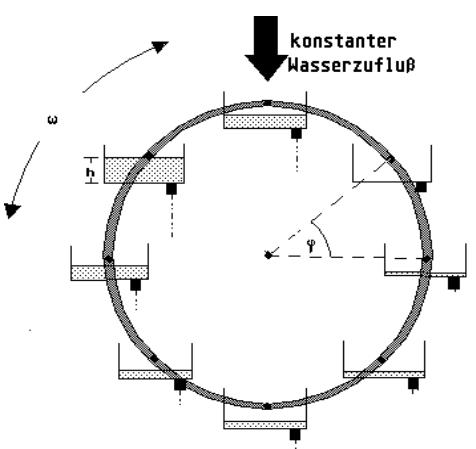
"Sehr geringe Unterschiede bedingen manchmal große Verschiedenheiten"

Marie v. Ebner- Eschenbach

In dem Maße, wie die physikalische Aufmerksamkeit auf Systeme gerichtet wird, die sich als "mehr als die Summe ihrer Bestandteile" erweisen und sich zeigt, daß der obige Aphorismus von Ebner- Eschenbach auch eine physikalische Dimension besitzt, gerät das Prinzip der Linearisierung und mit ihm die geradezu als Synonym für physikalisches Handeln angesehene Möglichkeit der sicheren Vorhersage von Ereignissen ins Wanken.

Dies sei an einem auf den ersten Blick harmlos erscheinenden System illustriert [25]. Das System besteht aus einem drehbar gelagerten Rad, dessen Kranz mit Behältern versehen ist, die im Boden eine kleine Öffnung besitzen (Bild 2). Berieselst man dieses Rad mit Wasser, so treten je nach der Stärke des Zuflusses verschieden Bewegungsfiguren auf:

Bei sehr kleinem Zufluß passiert überhaupt nichts. Das in die 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 der Zufluß verstärkt, so staut sich das Wasser zunächst in den oberen Behältern. Solange die dadurch hervorgerufene Kopfplastigkeit des Systems durch die Reibung ausgeglichen wird, bleibt das System dennoch in Ruhe.



Das Diagramm zeigt ein kreisförmiges Rad, das horizontal drehbar gelagert ist. Der Rand des Rades besteht aus sechs gleich großen Segmente, die jeweils einen kleinen Behälter mit einer vertikalen Öffnung am Boden enthalten. Ein Pfeil markiert den "konstanten Wasserzufluß" in die oberen Behälter. Ein Winkel ω gibt die Winkelgeschwindigkeit des Rades an, während ein Pfeil φ den Drehwinkel angibt. Die Radialbewegung ist durch einen Pfeil im Inneren des Rades dargestellt.

Erst wenn der Zufluß einen kritischen Wert überschreitet, führt die Kopfplastigkeit in die Situation von Buridans Esel. Dies ist der Augenblick, in dem das Clinamen "ins Weltgeschehen eingreift": Kleinste, zufällige Schwankungen z.B. in der Füllhöhe der Behälter führen zu einer Entscheidung und damit zu einer Symmetriebrechung 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 Lärmshauer, das kleine Zufallsselement, transformiert ein System oder eine Ordnung in ein anderes System, eine andere Ordnung" (Michel Serres).

Bild 2: Schematische Darstellung des chaotischen Wasserrades (h gibt die Wasserhöhe in den Gefäßen, ω die Winkelgeschwindigkeit des Rades und φ den Drehwinkel an)

¹¹ Die Unterscheidung zwischen starker und schwacher Kausalität geht auf Max Born zurück [34].

Um das Verhalten des Wasserrades vorhersagen zu können, genügt es also offenbar nicht, die Dynamik des Systems und das heißt, die kausalen Zusammenhänge zu kennen, man muß auch in der Lage sein, die Anfangsbedingungen mit streng unendlicher Präzision festzulegen. 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, weil es unnütz ist, "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 einen 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" [26].

Zirkuläre Kausalität: Rückkopplung

Wie schafft es das Wasserrad, die in Form einer regelmäßigen Drehung eingenommene Ordnung zu erhalten, d.h. insbesondere gegen äußere Störungen zu stabilisieren? Nachdem sich das Rad 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 Behälter ein antreibendes Drehmoment (Antrieb) auf. Da mit zunehmender Geschwindigkeit aber auch 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 Antrieb. 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 (Bild 3):

Wenn v_s aus irgendeinem Grund (z.B. durch eine Störung) unterschritten wird, so dominiert der Antrieb. Dadurch nimmt die Geschwindigkeit wieder zu. Wird hingegen v_{st} überschritten, dann dominiert die Dämpfung und führt zu einer Abnahme der Geschwindigkeit. M.a.W.: Wenn die Drehgeschwindigkeit über v_{st} hinaus zunimmt, dann nimmt sie (aufgrund der dadurch bedingten überproportionalen Zunahme der Dämpfung) ab, dann nimmt sie zu, dann nimmt sie ab...

Die nichtlineare Dynamik des Systems bringt folglich eine Art Rückkopplung hervor, durch die "Wirkungen von Ereignissen an jedem Punkt des Kreislaufs ganz herumgetragen werden, um Veränderungen an diesem Ausgangspunkt hervorzurufen" [27]. Darin kommt zum Ausdruck, daß die Kausalität in ihrer 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 vitiosus sondern mit einem circulus virtuosus [28] zu tun: Die gegeneinanderwirkenden Drehmomente beim Wasserrad führen nicht zu einer Aufhebung von Wirkungen, sondern zu einer neuen Qualität, einer regelmäßigen Drehung.

Deterministisches Chaos

Mit der selbsttägigen 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. Wie kommt es dazu? Der große 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 Beschleunigung in entgegengesetzter Richtung (Abbremsung) bemerkbar. Wie ein überschlagendes Pendel kommt das Rad immer wieder aufs Neue in die sensitive Situation, in der kleinste zufällige Schwankungen darüber entscheiden, ob die Drehrichtung beibehalten wird oder eine Richtungsumkehr eintritt.

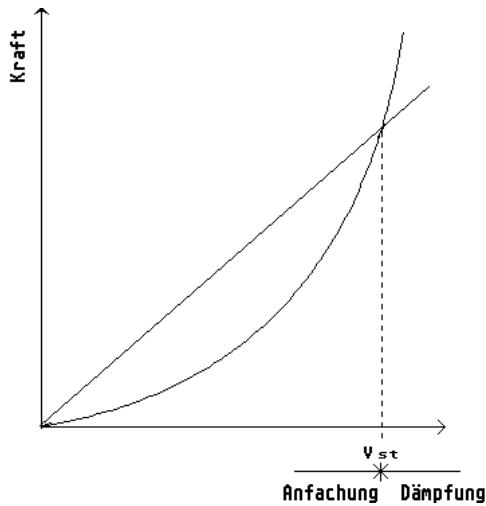


Bild 3: Die gegeneinander wirkenden nichtlinearen „Kräfte“ regeln die stationäre Geschwindigkeit v_{st} ein.

chaotische Bewegung des Wasserrades wird zwar in Form der zugrunde liegenden Differentialgleichungen in eindeutiger Weise durch eine deterministische Dynamik bestimmt. Die Trajektorie des Systems ist aber selbst im Prinzip nicht reproduzierbar und daher indeterminiert. Infinitesimale Unterschiede in den Anfangsbedingungen führen nach kürzester Zeit zu völlig unterschiedlichen Bewegungsfiguren: "Kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen(können) große Unterschiede in den späteren Erscheinungen bedingen; ein kleiner Irrtum in den ersten kann einen außerordentliche großen Irrtum in den letztern nach sich ziehen. Die Vorhersage wird unmöglich" [29]. Mit dieser Aussage umreißt bereits um die Jahrhundertwende Henri Poincaré 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.

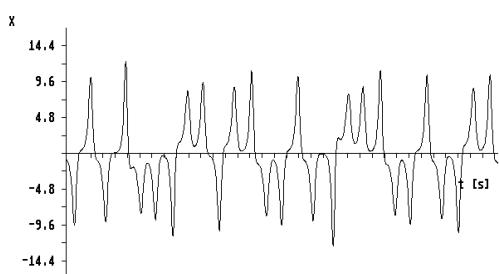


Bild 4: Chaotisches Orts- Zeitsignal des Wasserrades (aus [25]).

lokal indeterminiert. Obwohl sich die nichtlinearen dynamischen Systeme, wie etwa das oben skizzierte Wasserrad, in wesentlicher Hinsicht anders verhalten als ein Würfel, läßt sich dadurch anschaulich beschreiben, wie man sich in der nichtlinearen Physik chaotischen Systemen anzunähern versucht. Anstatt 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 das völlig irreguläre und unvorhersagbare Signal (Orts- Zeit- Diagramm) des Wasserrades (Abb.4) im dreidimensionalen Zustandsraum des Systems als achterbahnartige Spur, die sich im unregelmäßigen Wechsel um zwei Fixpunkte herumwindet und auf diese Weise das kompakte Muster eines sogenannten chaotischen Attraktors erzeugt (Abb. 5). Wie beim Würfel kann man auch hier lokal keine Vorhersage treffen (einzelne Trajektorien des Wasserrades sind völlig indeterminiert), man kann aber global vorhersagen, daß sich die Bewegung des Wasserrades auf einem solchen Attraktor abspielt.

Als eines der wesentlichen Merkmale des Determinismus muß man die Möglichkeit ansehen, das Verhalten eines Systems für alle Zeiten vorhersagen zu können. 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, kleinste zufällige Schwankungen, darüber, ob gerade noch eine Kante überschritten wird oder nicht und macht damit die erwürfelte Augenzahl zu einem unvorhersehbaren Ereignis. 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 1/6. So gesehen ist der Würfels global determiniert und

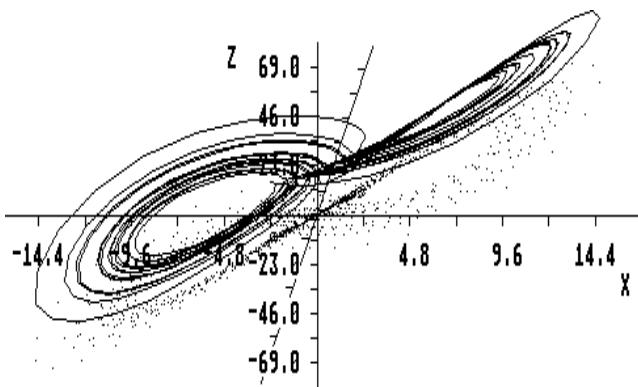


Bild 5: Das chaotische Signal des Wasserrades im Zustandsraum des Systems (Attraktor) (aus [25]).

teilweise überraschende Entwicklungen zeitigen, versucht man entwerfen und dabei insbesondere zu untersuchen, wie Neues entsteht, wie die Evolution zu Höherem "funktionierte". 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 Errungenschaften unseres Jahrhunderts - mit Goethe zu sprechen „des Denkens Faden zerrissen“? Zwar hat die klassische Überzeugung „...daß diese Welt eine starre Verkettung von Wirkungen und Ursachen sei“ (Paul Claudel), starke Einschränkungen erfahren. Dabei sind zummindest 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 nach wie vor „*ein heuristisches Prinzip, ein Wegweiser, und zwar nach meiner Meinung der wertvollste Wegweiser, den wir besitzen, um uns in dem bunten Wirrwarr der Ereignisse zurechtzufinden und die Richtung anzugezeigen, in der die wissenschaftliche Forschung vorangehen muß, um zu fruchtbaren Ergebnissen zu gelangen*“ [31]. Befreit man die Kausalität von allem metaphysischen Beiwerk, so läßt sie sich am ehesten als eine besondere Schweise auf-fassen: „Man sieht determiniert. Man kann auch anders sehen“ [32].

Literatur

- [1] Lichtenberg, G.Chr.: Sudelbücher, Bd.II. München: Hanser 1968.
- [2] Hume, D.: An Enquiry Concerning Human Understanding, New York, p.47.
- [3] Kant, I.: Kritik der reinen Vernunft. Darmstadt 1968, S.226
- [4] Dilthey, W.: Der Fortgang über Kant. In: ders.: Riedel,M. (Hrsg.): Das Wesen der Philosophie. Stuttgart 1984, S. 185.
- [5] Valery, P.: Cahiers 2. Frankfurt 1988.
- [6] Schulte, J.: Chor und Gesetz. Wittgenstein im Kontext. Frankfurt 1990, S.48
- [7] Aristophanes: Die Vögel, Berlin 1987, S.160f.
- [8] Die Bibel. Genesis.
- [9] Diels, H., Kranz, W : Die Fragmente der Vorsokratiker. Berlin 1961.
- [10] Whitehead, A.N.: Wissenschaft und moderne Welt. Frankfurt 1988, S. 22.
- [11] Stoicorum Veterum Fragmenta, ed. H.v.Arnim. Leipzig 1903, Bd. II.
- [12] Mayer, R.: Über die Erhaltung der Kraft. Leipzig o.J., S.31.
- [13] Platon: Symposium, 188b.
- [14] zit. nach Grassi S.4 [15] Cicero: z.n. Sambursky, S. Das physikalische Weltbild der Antike. Stuttgart 1965, S. 264.

Obwohl bei nichtlinearen Systemen der Zufall in Form des Clinamens eine entscheidende Rolle spielt, schimmert in den oft ästhetisch ansprechenden Mustern der chaotischen Attraktoren nach wie vor die deterministische Tiefenstruktur der physikalischen Welt hindurch. Diese Muster charakterisieren das System, das sie gezeichnet hat. Sie zu entschlüsseln und damit Aufschluß über das System zu gewinnen, stehen im Vordergrund der Chaosforschung. Dabei geht es beispielsweise darum, anhand eines irregulären Signals herauszufinden, ob es stochastisch oder chaotisch und damit auf ein vernünftig arbeitendes System verweist [30]. Angesichts der wachsenden Einsicht, daß zahlreiche reale System sich längerfristigen Vorhersagen entziehen und Szenarien der Entwicklungsmöglichkeiten zu

- [16] Ekeland, I.: Das Vorhersehbare und das Unvorhersehbare. Berlin 1989, S.36.
- [17] Leibniz, G.W.: Principes de la Nature et de la Gräce, fondees en raison. In: Gerhardt, C.J. (Hrsg.): Die philosophischen Schriften von Gottfried Wilhelm Leibniz. Hildesheim 1961, 6:604.
- [18] Laplace, P. S. de: Essai philosophique sur les probabilites (1840); z.n. Sambursky, S: Der Weg der Physik. München 1978, S.462.
- [19] Du Bois-Reymond, E.: Über die Grenzen der Naturerkenntnis. Leipzig 1907, S.19.
- [20] Hesse, H.: Erzählungen. Berlin 1970.
- [21] Priestley, J.: The Doctrin of Philosophical Necessity, London 1777.
- [22] Freud, S.: Aus den Anfängen der Psychoanalyse 1887- 1902. Frankfurt 1975.
- [23] Dante, Alighieri: Die Göttliche Komödie. Zürich 1941, S. 376.
- [24] Lukrez: De rerum natura. Stuttgart 1973, S. 101.
- [25] Schlichting, H.J., Backhaus, U., Küpker, H.G.: Chaos beim Wasserrad - ein einfaches mechanisches Modell für das Lorenz- System. Physik und Didaktik 19/3, 196 (1991)
- [26] Prigogine, I., Stengers, I., Pahaut, S.: Die Dynamik- von Leibniz zu Lukrez. In: Prigogine, I. et al.: Anfänge. Berlin 1991, S.54.
- [27] Bateson, G.: Geist und Natur. Frankfurt 1984, S.130.
- [28] Varela, F.: Der kreative Zirkel. Skizzen zur Naturgeschichte der Rückbezüglichkeit. In: Watzlawick, P. (Hrsg.): Die erfundene Wirklichkeit. München 1984, S.294.
- [29] Poincare, H.: Wissenschaft und Methode. Darmstadt 1963, S.380.
- [30] Nordmeier, V., Schlichting, H.J.: Auf der Suche nach Strukturen komplexer Phänomene. Praxis der Naturwissenschaften Physik 1/96, 22- 28 (1996)
- [31] Planck, M.: Der Kausalbegriff in der Physik. Leipzig 1941, S.6.
- [32] Valéry,P.: Cahiers 2, Frankfurt: S. Fischer 1988, S.173
- [33] Coy, W.: Industrieroboter. Zur Archäologie der zweiten Schöpfung. Berlin 1985.
- [34] Born, M.: Ist die klassische Mechanik tatsächlich deterministisch? Phys. Bl. 11, 49 (1955).