

Lothar Kolditz

Kollektivität und Emergenz – die Weltformel

Vortrag im Plenum der Leibniz-Sozietät am 11. Juni 2009

In seinem Buch „Abschied von der Weltformel“ stellt Robert B. Laughlin, geboren 1950, der Theoretische Physik an der Stanford-Universität in Kalifornien USA lehrt, seine Überzeugung dar, dass alle und nicht nur einige der uns bekannten physikalischen Gesetze aus kollektivem Geschehen hervorgehen und damit die Möglichkeit der Unterscheidung zwischen grundlegenden Gesetzen und den aus ihnen hervorgehenden Gesetzen entfällt. Die Aufstellung einer Weltformel oder einer Theorie von allem (theory of everything) erscheint von der Sache her als nicht erreichbar, also auch nicht erstrebenswert.

Dem Reduktionismus, der in der generellen Form den Anspruch erhebt, aus den Eigenschaften der kleinsten Teile auf das Ganze schließen zu können, werden in dem Buch seine Grenzen gezeigt. Physikalische Gesetzmäßigkeit muss experimentell entdeckt, sie kann nicht durch bloßes Denken antizipiert werden. Die aus der kollektiven Wirkung hervorgehende Emergenz, also die Leistung und die Erscheinung des ganzen Systems, wird zum wesentlichen Faktor. Nach Robert B. Laughlin ist das Zeitalter des Reduktionismus vorüber, das Zeitalter der Emergenz nunmehr angebrochen. Das sind Aussagen von erheblicher Brisanz, deren Diskussion noch ausführliche Erörterungen hervorrufen wird [1].

Die Beispiele, die Robert B. Laughlin in seiner Argumentation verwendet, stammen verständlicher Weise mit Schwerpunkt aus seinem Wissenschaftsgebiet. Er hat 1998 gemeinsam mit Dan Tsui und Horst Störmer für seine Arbeiten über den fraktionalen Quanten-Hall-Effekt den Nobelpreis für Physik erhalten.

Den Quanten-Hall-Effekt hatte 18 Jahre vorher Klaus v. Klitzing entdeckt und war dafür 1983 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet worden.

Der klassische Hall-Effekt beschreibt das Auftreten einer Spannung in einer stromdurchflossenen Leiterplatte, die sich in einem stationären Magnetfeld befindet und wurde von Edwin Hall 1879 entdeckt. Die Hall-Spannung

U_H , die sich senkrecht zum Stromfluss aufbaut, beträgt

$$U_H = R_H \cdot I \cdot B/d,$$

wobei I die Stromstärke, B die magnetische Flussdichte und d die Dicke der Leiterplatte bedeuten. R_H ist der Hall-Widerstand.

Die Quantisierung des Hall-Widerstandes tritt bei tiefen Temperaturen und starken Magnetfeldern auf. Der Hall-Widerstand ist dann mit großer Genauigkeit messbar und beträgt

$$R_H = h/n \cdot e^2.$$

Dabei ist h das Plancksche Wirkungsquantum, e die Elementarladung und $n = 1, 2, \dots$ nimmt ganze kleine Zahlen an, während beim klassischen Hall-Effekt ein kontinuierlicher Widerstand auftritt. Der Quanten-Hall-Widerstand R_H dient seit 1990 als internationale Maßeinheit für den Widerstand Ω . Die Größe

$$R_K = h/e^2 = 25812,807 \Omega$$

wird von-Klitzing-Konstante genannt.

Der Quanten-Hall-Effekt verschwindet, wenn die Proben zu klein werden, ist also kollektiver Natur.

Der fraktionale Quanten-Hall-Effekt schließlich tritt bei sehr tiefen Temperaturen (50 mK) und hohen Elektronenbeweglichkeiten auf, n in der von-Klitzing-Formel nimmt dann gebrochene Zahlen an, z. B. $1/3$ ($n = m/2m + 1$).

Robert B. Laughlin streut in seinen Ausführungen im Buch viele Anekdoten ein und zieht gern Vergleiche zum aktuellen Tagesgeschehen, was aber bisweilen dem ungestörten Verlauf des grundlegenden Gedankenganges nicht zuträglich ist, Zusammenhänge treten dabei nicht immer deutlich hervor.

In der nun folgenden Betrachtung wird in anderer Vorgehensweise als der Entwicklung im Buch die Gültigkeit der Aussagen von Laughlin an Hand verschiedener Beispiele in Teilbereichen untersucht, wobei von einfachen Systemen zu komplexeren übergegangen wird, Systemgrenzen Beachtung finden und Systemleistungen in Verbindung mit dem Charakter von Grundvorgängen in den Systemen beleuchtet werden bis hin zu lebenden Organismen und Wechselwirkungen zwischen ihnen. Es wird eine systematische möglichst breite Erfassung der Erscheinungen versucht.

Kollektive Wirkung in Feststoffen

Das einzelne Atom eines Metalls hat noch keine metallischen Eigenschaften. Zwar weist ein einzelnes Atom auch bestimmte Eigenschaften auf, z. B. eine Elektronenkonfiguration. Diese Eigenschaften sind das Ergebnis kollektiver Wechselwirkung der Atombestandteile. Ihre Auswirkungen enden an der Systemgrenze. Erst der Zusammentritt mehrerer Atome zu einem Gitter mit der dann sich ausbildenden Wechselwirkung von Elektronen ruft die metallischen Eigenschaften in dem dann zu betrachtenden neuen System hervor, deren Werte von der Temperatur des Metallstückes abhängig sind. So ändert sich die metallische Leitfähigkeit mit der Temperatur, bei tiefen Temperaturen kann Supraleitfähigkeit eintreten. Magnetische Eigenschaften des festen Metallstückes sind ebenfalls von der Temperatur abhängig.

Die Ordnung im Metallgitter wirkt auf das System der Elektronen. Alle Eigenschaften, die aus der Wechselwirkung mit Elektronen hervorgehen, sind deshalb verständlicher Weise von Bedingungen abhängig, die diese Ordnung beeinflussen.

Die Betrachtung der metallischen Systeme legt bereits eine Reihe von Vermutungen nahe, denen allgemeine Gültigkeit im Rahmen der zu beachtenden Grenzen zukommt. Emergente Eigenschaften, die nicht in den Einzelteilen des Systems vorhanden sind, erwachsen aus der Wechselwirkung der Teilchen und können aus den Eigenschaften der isolierten Einzelteilchen nicht abgeleitet werden.

Die Atomkerne selbst haben in ihrer Gesamtheit Auswirkungen auf den Zustand der Elektronen. Insofern sind sie in die Emergenz mit einbezogen. Eine gewaltige Veränderung ihrer Wirkung auf das Ganze würde dann eintreten, wenn zwischen den Kernen eine ihre Eigenschaften verändernde Wechselwirkung stattfindet. Dies könnte z. B. durch sehr hohen Druck geschehen, wenn dieser zu einem Übergang von Elektronen in den Kern und zur Vereinigung mit Protonen unter Bildung von Neutronen führen würde. Das wäre aber der Übergang zu einem neuen System.¹

1 Der Atomkern besteht aus Protonen und Neutronen, die sich nach der Theorie der Quantenchromodynamik aus Quarks aufbauen, die durch Gluonen verbunden sind. Mit gewaltigem Rechenaufwand ist es auf Grund dieser Theorie gelungen, die Massen von Protonen, Neutronen und anderen leichten Hadronen erneut zu berechnen. Es wurde eine bessere Annäherung an die experimentellen Werte erreicht, als es bisher möglich war. Der letzte Stand der Rechnungen weicht nur wenige Prozent von den experimentell festgestellten Werten ab [2]. Das ist zwar eine Rechnung ab initio, aber nur eine Annäherung an die experimentellen Werte und keine exakte Berechnung des gesamten Systems

Die festgestellten Charakteristika der kollektiven Wirkung treten bei anderen Feststoffen in gleicher Weise auf, sie gelten natürlich ebenso für Halbleiter, für Isolatoren und andere feste Substanzen mit ausgeprägten Eigenschaften, für Keramiken, elastische Materialien usw. Ihre gesamten Eigenschaften ergeben sich aus der Wechselwirkung ihrer Teilchen, es sind Eigenschaften, die den isolierten Teilchen nicht zukommen, sondern erst im Zusammenschluss entstehen.

Kollektive Wirkung in Gasen und Flüssigkeiten

Für den Gaszustand treffen analoge Überlegungen zu. Der Druck eines Gases, der sich auf die Gefäßwände auswirkt, ist ein kollektives Ergebnis der Impulswirkung von Gasteilchen auf die Gefäßwand. Einem einzelnen Teilchen lässt sich kein Druck zuordnen.

Bei flüssigen Systemen ist das nicht anders mit dem grundlegenden Charakter der Wechselwirkung, etwa bei flüssigen Metallen, die unter entsprechenden Temperaturen beständig sind. Das können höhere Temperaturen sein, als Beispiel schmilzt Eisen bei 1539°C , aber auch normale Temperaturen, wie sie für flüssiges Quecksilber gelten. Die Wechselwirkung der Teilchen bringt die Eigenschaft hervor. Einzelne Teilchen haben keinen Schmelzpunkt.

Lineare Systeme

Für die Erfassung der kollektiven Wirkung in einem System bedarf es der Beurteilung auftretender Wechselwirkungen zwischen den Teilchen. Die einfachste Wechselwirkung wäre eine lineare, die auch eine lineare Extrapolation ermöglichen und eine reduktionistische Ableitung, also einen Schluss von Eigenschaften der kleinsten Teile auf das Ganze, erleichtern würde. Bei genauer Analyse der Systeme stellt sich jedoch heraus, dass die Wechselwirkung zwischen den Teilchen eine Linearität nur in begrenzten Bereichen und nur in angenäherter Form aufweist.

Eine Spiralfeder wird durch Anhängen eines kleinen Gewichtes um einen bestimmten Betrag gedehnt. Das doppelte Gewicht ruft doppelte Dehnung hervor. In diesem Anfangsbereich herrscht scheinbar Linearität. Wird das Gewicht vielfach größer, treten Abweichungen von der Linearität ein. Bei welchem Betrag sich eine deutliche Abweichung von der Linearität bemerkbar macht, hängt von den Federeigenschaften ab.

Für Gassysteme lassen sich bezogen auf lineares Verhalten ganz ähnliche Aussagen treffen. Wird eine geringe Menge Gas, z. B. Helium, in einem Gefäß eingeschlossen, so lässt sich ein Druck messen, der konstant bleibt, wenn die Temperatur nicht verändert wird. Es gilt die ideale Gasgleichung

$$p \cdot v = n \cdot R \cdot T.$$

Dabei ist p der Druck, v das Volumen des Gefäßes, n die Gasmenge, T die Temperatur und R eine Konstante, die ideale Gaskonstante. Bei Verdopplung der Gasmenge unter Beibehaltung von v und T muss der Druck p auf den doppelten Wert steigen. Das System verhält sich linear, was sich aber nicht unbegrenzt weiterführen lässt. Wenn die Gasmengen größer werden, treten immer stärkere Wechselwirkungen zwischen den Gasteilchen auf, das System weicht von der Linearität ab, an der idealen Gasgleichung müssen Korrekturen angebracht werden.

Die Untersuchung dieser Problematik führt zu der Vermutung, dass lineares Verhalten bei auftretender Wechselwirkung im System nur angenähert erreicht wird und dass unbegrenzt lineares Verhalten in der Realität nicht vorkommt wegen sich nicht linear verändernder Wechselwirkung. Dadurch kann eine direkte einfache Extrapolation nicht vorgenommen werden.

Als Vermutung halten wir weiterhin aus den bisher betrachteten Beispielen fest:

Die Wechselwirkung zwischen Einzelteilen eines Systems verhält sich nicht linear und führt im Komplex zu emergenten Eigenschaften, deren Art sich nicht aus den Teileigenschaften direkt ableiten lässt und deren Wert von den Bedingungen abhängt, dem das Gesamtsystem unterliegt.

Reaktionen und Gleichgewichte

Treten Wassermoleküle durch Kondensation zu einer Flüssigkeit zusammen, so bilden sich je nach der Temperatur Gleichgewichtszustände aus. Die Wassermoleküle werden über Wasserstoffbrückenbindungen miteinander verzahnt. Diese Bindung wird als zusätzliche Anziehungskraft zwischen Elementen hoher Elektronegativität wie Fluor, Sauerstoff und Stickstoff in ihren Wasserstoffverbindungen wirksam.

Bei Abkühlen von Wasser oberhalb 4°C nimmt die Dichte regulär zu, weil die Abstände zwischen den Molekülen sich im Durchschnitt zunehmend verkürzen. Bei 4°C aber gewinnt die Struktur bestimmende Wirkung der Wasserstoffbrückenbindung die Oberhand. Es werden Strukturkonstellationen zwischen den Molekülen ausgebildet, die zu der lockereren Struktur verschie-

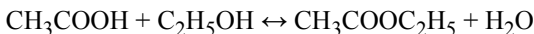
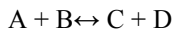
dener Eisarten überleiten. Dadurch nimmt die Wasserdichte unterhalb 4°C wieder ab. Wasser hat bei 4°C ein Dichtemaximum. Wegen seiner hohen Dichte sinkt Wasser von 4°C nach unten und verhindert im Winter das Zufrieren der Seen vom Boden her, was für das Überleben von Organismen wesentlich ist.

In Eiweißen steuert die Wasserstoffbrückenbindung (hier in der Stickstoffbrücke) die komplizierte Faltung der Moleküle, und in der DNA sorgt sie für die richtige Basenpaarung. Die Wasserstoffbrückenbindung ist also von genereller lebensnotwendiger Bedeutung.

Das Gleichgewicht, das sich in flüssigem Wasser bestimmter Temperatur ausbildet, ist ein dynamisches Gleichgewicht. Strukturen werden aufgebrochen und wieder gebildet. Reaktionen heben sich gegenseitig auf. Im Schnitt liegt ein flüssiges System mit bestimmten Eigenschaften vor, die kollektiv durch die Moleküle erzeugt werden.

Bei der Bildung von Metallen, Halbleitern und Isolatoren aus atomaren Teilen laufen Reaktionen ab, die ebenso zu Gleichgewichten führen. Sie werden z.B. durch bestimmte Festkörperphasen und eine Temperatur charakterisiert. Bei Übergang zu einer anderen Temperatur stellt sich ein neuer Gleichgewichtszustand ein. Dabei kann eine neue Gitterordnung aufgebaut oder bei gleicher Ordnung der Schwingungszustand der Gitterbestandteile verändert werden. Stets aber werden die Eigenschaften kollektiv erreicht. Auch die Störstellen in Halbleitern sind nur im Kollektiv mit der Umgebung wirksam.

Bei Reaktionen zwischen verschiedenen Molekülen, die aus Atomen aufgebaut sind, stellen sich ebenfalls Gleichgewichte ein. Nehmen wir die Molekülart A, die mit B zu C und D reagiert. Das kann z. B. Essigsäure (A) und Ethylalkohol (B) sowie Essigsäureethylester (C) und Wasser (D) sein.



Im Gleichgewichtszustand tritt die Rückreaktion von C und D zu A und B mit gleicher Geschwindigkeit wie die Reaktion zwischen A und B auf. Alle Moleküle sind in zwar unterschiedlichen Mengen, aber gleichzeitig vorhanden. Mit zwei Einzelmolekülen A und B lässt sich das Gleichgewichtssystem nicht verwirklichen, die emergente Eigenschaft des Systems ist das Resultat kollektiver Wechselwirkung.

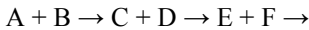
Lebende Systeme

Wir gehen nun zur Betrachtung immer komplizierterer Systeme über, zu lebenden Systemen. Diese sind nicht im Gleichgewicht. Auch die lebende Natur kann sich deshalb nicht im Gleichgewichtszustand befinden.

Offensichtlich unterscheiden sich also die bisher betrachteten Systeme von lebenden Systemen. Es stellt sich die Frage, welche Grundvoraussetzungen Systeme haben müssen, die die Eigenschaft des Lebens aufweisen.

In lebenden Systemen treten gekoppelte Reaktionen auf, deren Zustand sich fernab vom Gleichgewicht bewegt. Für lebende Organismen ist damit eine höhere Reaktionsqualität als bei einfachen Reaktionen erforderlich, nämlich der Fluss gekoppelter Reaktionen.

Wir gehen zur Erfassung dieses Zustandes von den Stoffen A und B aus, die noch fernab vom Gleichgewicht zu C und D reagieren, welche sich wiederum nach ihrer Entstehung zu E und F weiter umsetzen usw.



Rückreaktionen treten nur in untergeordnetem Maße auf. Das dargestellte Reaktionsschema ist eine sehr vereinfachte Skizzierung der realen Vorgänge in lebenden Organismen, enthält aber die Grundzüge des Reaktionsgeschehens [3].

Die Reaktionskette wird in Gang gebracht durch Zusammenführung von A und B, deren Energieinhalt Voraussetzung für den Reaktionsablauf ist. Die Kette kann nur so lange aufrecht erhalten werden, wie A (Nahrungsmittel) und B (Reaktionspartner im Stoffwechselprozess) zur Verfügung stehen. Einstellen der Zufuhr führt ebenso wie eine Unterbrechung der Reaktionskette durch Blockieren einer Reaktion mittels störender Stoffe (Gifte) zum Ausklingen der Reaktionskette, Erreichen des Gleichgewichtszustandes und zur Beendigung der Lebensfunktion.

In realen lebenden Systemen ist das Geschehen sehr komplex. Es treten Reaktionsverzweigungen auf. Nebenprodukte mit geringerem Energieinhalt, die für das System nicht weiter nützlich sind, werden ausgeschieden (Exkreme).

Sehr deutlich wird bei der Betrachtung lebender Systeme die Rolle der kollektiven Wechselwirkung für die emergente Erscheinung des Lebens. Erst nach Ineinandergreifen der komplexen Vorgänge in den Reaktionen der Einzelteile fernab vom Gleichgewicht tritt das Leben hervor. Einzelne Teilchen oder auch Einzelreaktionen haben nicht die emergente Eigenschaft des Lebens.

Evolution

Dem Ganzen liegt eine lange Evolution zu Grunde, die zur Vorbereitung die Entwicklung von Verbindungen umfasst, welche noch nicht das Kriterium des Lebens aufweisen, aber die energetische Voraussetzung für den Aufbau lebender Systeme darstellen [4].

Es hat sich in der gesamten kosmischen Evolution offensichtlich eine Hierarchie von Systemen durch Selbstorganisation aufgebaut, wie es unserem heutigen Verständnis entspricht.

Die Emergenz der Systeme ist mit kollektivem Geschehen verbunden immer dann, wenn eine Wechselwirkung zwischen den das System bestimmenden Teilchen eintritt. Dabei bilden sich Eigenschaften aus, die bei den Einzelteilchen noch nicht vorhanden sind.

Was für das Ergebnis der Wechselwirkung von Teilchen eines Systems gilt, muss analog übertragbar sein auf das Zusammenwirken von Systemen, die sich zu größeren Einheiten vereinen. Die Hierarchie geht weiter. Es entstehen Übersysteme, deren Steuerung nun wesentlich komplexere Vorgänge erfordert als diejenigen in den Teilsystemen.

In einer lebenden Einzelzelle halten Teilsysteme die Vorgänge im Inneren in Gang. Ein Zusammenschluss von Zellen zu einem Verband erfordert zusätzliche Steuermechanismen und gipfelt schließlich in der Ausbildung von Organismen mit Funktionsteilung der Zellen.

Wechselwirkung zwischen lebenden Systemen

In einer weiteren Stufe ist die Wechselwirkung zwischen den Organismen zu betrachten. Eine derartige Wechselwirkung ist nicht auf höhere Organismen beschränkt. Bei Einzellern wurde dazu unterschiedliches kollektives Verhalten festgestellt.

Bakterien der Art *Proteus mirabilis* bilden Kolonien mit unterschiedlichem Verhalten. Einige treten miteinander zusammen, andere grenzen sich voneinander ab. Peter Greenberg und andere [5] haben diese schon lange bekannte Erscheinung mit Genbestimmungsmethoden untersucht und nachgewiesen, dass Abgrenzung oder Verträglichkeit mit bestimmten Genkombinationen verbunden sind. Das schließt eine zellübergreifende Kommunikation ein.

Bei *Rhodospseudomonas pallustris* gelang der Forschungsgruppe Caroline Harwood in Zusammenarbeit mit Greenberg und Mitarbeitern, den Mechanismus einer zellübergreifenden Kommunikation nachzuweisen, aus der die

Bevölkerungsdichte der eigenen Art hervorgeht, in der Literatur als Quorum sensing bezeichnet [6]. Die Gruppenbildung dieser primitiven Einzeller wird über Botenstoffe gesteuert. Das gemeinsame Handeln bringt Erfolg in der Nahrungsverwertung mit sich. Zusammenwirken von Individuen in einer Gruppe bei primitiven Lebensstufen mit Vorteilen für das Ganze wird über Substanzen gesteuert, eine Erkenntnis, die die Bedeutung der Gruppenselektion im Verlaufe der Evolution herausstellt. Die Individualselektion wird dadurch nicht in Abrede gestellt.

Bei Infektionen mit *Salmonella typhimurium* (Lebensmittelvergiftung) wurde beobachtet, dass die erfolgreiche Ausbildung eines Infektionsherdes mit der Auflösung einiger Mikroben zusammenhängt, die dabei Giftstoffe ausscheiden. Die Anlage zur Selbstzerstörung haben alle Bakterien, doch nur bei 10% kommt es zur Aufopferung. Die übrigen 90% vermehren sich erfolgreich im Infektionsherd. Den Mechanismus dieser Gruppenaktivität haben Martin Ackermann bzw. Wolf-Dietrich Hardt und ihre Mitarbeiter aufgeklärt. Er liegt am stochastischen Charakter der Auslösung des Mechanismus zur Aufopferung der Zellen [7].

Die Kommunikation zwischen Einzellerindividuen weist auf den Weg der Höherentwicklung in der Evolution hin. Ein Zusammenschluss von Zellen zu einem Organismusverband erfordert die Einrichtung weiterer Steuervorgänge in Gestalt ineinandergreifender Reaktionszyklen. Je komplexer die Grundausstattung der zusammenwirkenden Systeme, umso reichhaltiger ist die emergente Leistung des gesamten Organismus.

Bewusstsein

Ein abermaliger Qualitätssprung ist das Auftreten von Bewusstsein, das mit der Entstehung entsprechender Zellorgane im Verlaufe der Evolution verbunden und auf kollektive Wechselwirkung von Neuronen zurückzuführen ist. Einzelne Neuronen können eine solche Leistung nicht aufweisen.

Die geistige Verständigung der Individuen tritt auf dieser Stufe in Erscheinung mit einer Beeinflussung der Handlung der Individuen und auch des Gruppenverhaltens. Eine prinzipielle Qualitätsänderung in den Grundreaktionen der Systeme ist nicht erkennbar. Lediglich ihre Vielfalt, Komplexität und Kollektivität ist angestiegen.

An dieser Stelle sei auf das Buch von Helmut Moritz „Science, Mind and the Universe“ hingewiesen, in dem der Begriff Emergenz, besonders Emergenz des Lebens und des Bewusstseins, diskutiert wird. Die Ausführungen zeigen in die gleiche Richtung wie die in diesem Beitrag erläuterten [8].

Chaotische Systeme

Die Verfolgung des Weges der Höherentwicklung in den Systemen führt uns zu solchen mit chaotischem Charakter. Der Begriff des Chaos ist im landläufigen Sinne mit völligem Durcheinander, Unordnung, Wirrwarr, katastrophalen Ereignissen verbunden und hat eine stark negative Färbung. Der wissenschaftliche Begriff des deterministischen Chaos hat dem gegenüber eine ganz andere Prägung.

Chaotische Systeme sind durch das Wirken bestimmter Gesetze determiniert, aber nicht periodisch. Das liegt daran, dass kleine Veränderungen in den Anfangsbedingungen wegen der exponentiellen nichtlinearen Abhängigkeit nach einer Zeit bestimmend werden und den Zustand des Systems drastisch verändern können.

Eine gute Demonstration der Verhältnisse in einem deterministischen Chaos lässt sich mit dem Malkusschen Wasserrad zeigen, das Strogatz beschreibt [9]. Es handelt sich um ein schräg gestelltes Wasserrad mit regelmäßig angeordneten Kammern. In eine Reihe von zufällig oben gelagerten Kammern wird durch Düsen Wasser gepumpt, das über eine Bodenöffnung der Kammern wieder langsam abläuft und in einem Kreislauf zu führen ist. Das Rad wird nun oberlastig und setzt sich dadurch in Bewegung, z. B. im Uhrzeigersinn. Dadurch kommen neue Kammern in den Bereich des Füllmechanismus. Durch einseitige Verteilung des Wassers wird das Rad schließlich in der Drehung immer langsamer. Es bleibt stehen und wechselt dann die Richtung. Auf längere Zeit ist keine Regelmäßigkeit, keine Periodizität der Drehungen zwischen den Umkehrungen festzustellen. Der Verlauf ist zwar im Ganzen determiniert, er unterliegt den dafür gültigen Naturgesetzen, zeigt aber kein periodisches Verhalten. Es kann nicht vorausgesagt werden, ob nach tausend Umdrehungen Richtungswechsel erfolgt. Wird versucht, die Anfangsbedingungen bei verschiedenen Ansätzen übereinstimmend einzurichten, so wird in der ersten Zeit auch gleiches Verhalten eintreten. Auf unbegrenzte Dauer ist das aber nicht einzuhalten. Es würde schon ein zufälliger Luftzug über das Wasserrad genügen, um nach längerer Zeit exponentiell verstärkt ein Abweichen von der im vorangehenden Versuch festgestellten Drehfolge hervorzurufen.

Chaotische Eigenschaften treten dann auf, wenn eine Vielzahl von Grundprozessen im System wirkt, die nicht linearen Charakter haben. Ihr Verhalten lässt sich für längere Zeiten nicht ohne weiteres voraussehen. Der Meteorologe Edward Lorenz, der über die Wettervorhersage nachdachte, hat in seiner

berühmten Arbeit von 1963 die Grundgleichungen nicht linearer Systeme veröffentlicht [10],

$$dx/dt = \sigma(y-x)$$

$$dy/dt = x(\rho-z)$$

$$dz/dt = xy - \beta z$$

Dabei sind σ , ρ und β für das jeweilige System charakteristische Werte. Die Gleichungen sehen einfach aus, sind aber nicht exakt lösbar.

Bei definierten Anfangswerten lässt sich für ein chaotisches System das Verhalten eine begrenzte Zeit voraussagen, dann aber mit immer größerer Unsicherheit nur abschätzen. Auf diese Weise gelingt eine exakte Wettervorhersage nur für einen begrenzten Zeitraum, nicht aber z. B. für ein Jahr im voraus. In diesem Zusammenhang ist der berühmte Schmetterlingseffekt zu erwähnen, der von Lorenz in einem Referat 1979 formuliert wurde: Vorhersagbarkeit - löst der Schlag eines Schmetterlingsflügels in Brasilien einen Tornado in Texas aus? [11].

Die Vorhersagezeit kann durch schärfere Erfassung der Anfangsbedingungen und durch Vergrößerung der Toleranz für die Vorhersage erweitert werden. Allerdings bringt jede Erhöhung der angestrebten Vorhersagezeit eine exponentiell vergrößerte Anstrengung in der Erfassung der Anfangsbedingungen mit sich. Die Betrachtungen müssen systemspezifisch durchgeführt werden. Für ein deterministisch chaotisches System ist die Zeit, nach der sich das System der Kontrolle entzieht, von dessen innerer Dynamik abhängig. Sie wird als Ljapunow-Zeit bezeichnet und von Lighthill bezüglich der Newtonschen Dynamik erörtert [12].

Das ganze Universum ist ein deterministisch chaotisches System. Dabei gelten hier für die Voraussage größere Zeiträume als für die Wetterprognose. Sonnenfinsternisse und andere Ereignisse lassen sich für Tausende von Jahren vorausberechnen, auch die Berechnung der Vergangenheit ist in diesen Grenzen möglich. Bei Millionen von Jahren sieht das schon anders aus. Für das Sonnensystem wird die Ljapunow-Zeit zu 4 Millionen Jahre abgeschätzt [13]. Kleine Veränderungen z. B. durch den Einschlag eines Meteoriten könnten sich dann exponentiell in nicht vorhersagbarer Weise auswirken.

Wir haben damit genügend Material für den Versuch einer Schlussfolgerung zusammengestellt. Deterministisch chaotische Systeme machen einen Hauptanteil aus. Die zu Grunde liegenden Prozesse sind gesetzmäßig festgelegt. In ihren Eigenschaften sind die im Kollektiv wirkenden Teile in dem betreffenden Teilbereich als konstant anzusehen.

Nicht so verhält es sich in der höchsten Kategorie der Wechselwirkung beim Verhalten menschlicher Gruppen und Gesellschaften. Die Eigenschaften der Individuen sind nicht als konstant anzusehen, und Vorhersagen sind mit großer Unsicherheit behaftet. Für diese Bereiche gibt es soziologische Untersuchungen in der Regel in Studien und mit wenig Aussagen in Anlehnung an deterministisch chaotische Vorgänge. Für eine Diskussion dieser Wechselwirkung müsste zusätzlich Material vorbereitet werden, das den zeitlichen Rahmen des Vortrages sprengen würde. Die Diskussion zu solchen Vorgängen wird hier ausgeklammert.

Es sei auch darauf hingewiesen, dass auf Betrachtungen zum Verhältnis von Emergenz und Dialektik - ob Gleichheit, Überschneidung oder Parallelität vorliegt - aus zeitlichen Gründen im Vortrag nicht eingegangen werden kann. Nach meiner Auffassung trifft die mittlere Einordnung zu.

Schlussfolgerung

In den untersuchten Bereichen hat sich ohne Ausnahme das Auftreten emergenter Eigenschaften als Ergebnis der kollektiven Wirkung der Teilchen bestätigt. Es treten Eigenschaften im Bereich auf, die nicht den einzelnen Teilchen zukommen. Die theoretische Erfassung des Systems kann also für diese Fälle nicht vom Einzelteilchen her erfolgen, sondern muss vom kollektiven Geschehen im System ausgehen. Es wurde kein Beispiel gefunden, das den Grundaussagen von Robert B. Laughlin zum kollektiven Charakter der physikalischen Gesetze widerspricht.

Eine theoretische Beschreibung muss in den Grenzen des Bereichs erfolgen. Das kann z. B. die Erklärung der Supraleitung sowie des superfluiden Zustandes in entsprechenden Systemen sein. Die Theorie ist an den experimentellen Befunden zu normieren, worauf Robert B. Laughlin nachdrücklich hinweist. Theorien, die von der Anlage her keine experimentelle Überprüfung ermöglichen, werden abgelehnt. Dieser Grundsatz ist sehr zu betonen, da er den Wildwuchs theoretischer Spekulationen bremsst.

Die kollektive Wirkung mit Emergenz der Eigenschaften überschreitet nicht die Grenzen des betreffenden Bereichs. Innerhalb der Grenzen sind Berechnungen möglich, die an experimentellen Befunden zu normieren sind. Experiment und Denkprozesse müssen in Wechselwirkung stehen. Isoliertes Vorgehen verhindert den Erfolg.

Ein lineares Verhalten der Systeme ist nur näherungsweise erreichbar. Die Nichtlinearität führt häufig zu Gleichungen, die für komplizierte Fälle nicht

exakt lösbar sind, wie das für die Berechnung von chemischen Bindungsenergien mit Hilfe der Schrödinger-Gleichung zutrifft.

Ein genereller Reduktionismus stößt an die Grenzen der Bereiche. Innerhalb eines Bereichs sind zwar reduktionistische Ansätze möglich, nicht aber in uneingeschränkter Erweiterung auf andere Gebiete. Das ist eine notwendige Präzisierung der Aussage von Robert B. Laughlin zum Ende des Zeitalters des Reduktionismus. Die Akzeptanz dieser Feststellung ist mit der Absage an einen umfassenden Reduktionismus verbunden und stellt auch die Möglichkeit der Aufstellung einer Weltformel in Frage.

Die Weltformel

Von der Weltformel wird erwartet, dass sie eine vollständige Erklärung für die Vorgänge im Kosmos liefert, und zwar ausgehend von einem Urgesetz. Robert B. Laughlin legt diese allgemeine Formulierung seinen Ausführungen zu Grunde. Sie wird auch in den folgenden Betrachtungen verwendet. Sie geht über das Ziel der einheitlichen Erfassung der vier Grundkräfte (Gravitation, elektromagnetische Wechselwirkung, starke und schwache Wechselwirkung) hinaus, jedoch nicht bis zu den Eigenschaften des Laplaceschen Dämons. Auch von Helmut Moritz wird die Vereinheitlichung der vier Grundkräfte als große Einheitstheorie (*grand unified theory*) bezeichnet, die noch nicht das Kriterium der allgemeinen Weltformel (*theory of everything*) erreicht [14].

Einstein und Heisenberg haben sich ohne positives Ergebnis mit dem Problem der Weltformel beschäftigt, besonders in der Version, die die Vereinheitlichung der Grundkräfte beinhaltet. Hawking hat sich zunächst optimistisch zur allgemeinen Fassung der Weltformel geäußert, schließlich aber nach Einbeziehung von Gödels Unvollständigkeitssatz eine positive Antwort ausgeschlossen.

Ein diskutiertes Teilproblem im Zusammenhang mit der Weltformel ist der Versuch, Quantentheorie und Gravitation in Einklang zu bringen, was bisher nicht gelungen ist. Die Theorie der Schleifen-Quantengravitation wird als Möglichkeit zur Schaffung einer Quantentheorie der Gravitation angeführt. Sie sieht den Raum nicht als kontinuierlich an, sondern unterteilt ihn in Quanten, die mit einer Ausdehnung von 10^{-35} m der Plancklänge entsprechen und nur endlich viel Materie und Energie zu speichern vermögen. Eine nach der allgemeinen Relativitätstheorie formulierte Singularität im Urknall mit unendlicher Dichte der Materie wäre danach nicht erreichbar. Vielmehr sollte durch einen katastrophalen Kollaps im Universum ein Zustand maximaler

Dichte eingetreten sein, der dann durch Umkehr der anziehenden Schwerkraft einen großen Rückprall verursachte (big bounce) und die Expansion des Universums in Gang setzte.

Die Zeit beginnt nach diesem Szenario nicht mit dem Urknall. Das Universum existiert ewig. Die Theorie der Schleifen-Quantengravitation ist mit überprüfbaren Aussagen verbunden, die mit den Raumzeit-Quanten zusammen hängen, z. B. die Aussage einer geringen Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Wellenlänge. Mit der Lösung des Zeitproblems und bestätigten Indizien für Raumzeit-Quanten wäre aber nicht die Weltformel aufstellbar, worauf mit der Theorie der Schleifen-Quantengravitation auch nicht der Anspruch erhoben wird [15].

Die Stringtheorie dagegen wurde als Kandidat für die Entwicklung der Weltformel angesehen. In ihr treten die Strings als fundamentale Bausteine der Materie auf, vorstellbar als schwingende Saiten mit einer Ausdehnung von 10^{-35} m.

Je nach Art der Schwingung repräsentieren sie unterschiedliche Elementarteilchen. Die Theorie arbeitet mit 10 oder 11 Dimensionen. Eine Beschreibung unserer vierdimensionalen Welt mit Hilfe der zehndimensionalen Theorie gelingt mit der Vorstellung, dass die 6 räumlichen Extradimensionen eine sehr kompakte, sehr kleine räumliche Anordnung bilden. Sie sind kompaktifiziert, unobservierbar klein, besitzen aber nach der Theorie erheblichen Einfluss auf das aus ihnen hervorgehende vierdimensionale Universum mit seinen Elementarteilchen und Fundamentalkräften. Für 11 Dimensionen ist die Beschreibung analog.

Die Stringtheorie fasst unser Universum auf als nur eines von vielen. Die Welten bestehen parallel und haben möglicher Weise nie miteinander Kontakt. Das ist ein direktes Hindernis für wissenschaftliche Überprüfbarkeit. In der Landschaft der Stringtheorie gibt es eine unermessliche Anzahl von Hügeln und Tälern. Der Urknall wird als Übergang unseres Universums von einem Zustand höherer Energie in eine Energiemulde aufgefasst. Die theoretische Abschätzung der Anzahl von Hügeln und Tälern liefert die Größenordnung 10^{100} oder 10^{1000} . Das ist mehr als die Anzahl der Atome in unserem Universum und wohl das gewichtigste Argument gegen diese Theorie. Die Forderung nach Überprüfbarkeit ist in diesem Zusammenhang nicht gegeben.

Zur Begründung der Existenz vieler Parallelwelten wird das Gesetz der großen Zahlen angeführt. Danach wird in einem hinreichend großen Bereich alles, was möglich ist, irgendwo realisiert. Überprüfbare Vorhersagen lassen

sich nicht ableiten. In diesem Zusammenhang wurde das anthropische Prinzip formuliert. Es besagt in einfacher Darstellung, dass unser Universum für die Entwicklung intelligenten Lebens geeignet sein muss, da wir sonst nicht existierten und es nicht beobachten könnten.

Es gibt eine Klasse von Stringkompaktifizierungen, die Intersecting-Brane-Modelle, die Voraussagen für die anstehenden Experimente am Teilchenbeschleuniger LHC in Genf erlauben. Wenn sie zutreffen, müssen die am LHC erreichbaren Energien ausreichen, um neue Stringteilchen zu erzeugen. Diese Klasse von Stringmodellen wäre damit überprüfbar und falsifizierbar. Die mögliche Erzeugung schwarzer Minilöcher am LHC stehen übrigens auch im Zusammenhang mit diesen Modellen, was eine weitere Überprüfungsmöglichkeit darstellt. Ansonsten scheint aber die Stringtheorie mit dem Bild vom Multiversum alles vorauszusagen und setzt damit umgekehrt ihren Voraussagewert auf Null herab. Die Weltformel wäre damit nicht erreichbar (vgl. dazu [16]).

Die bisherigen Betrachtungen sprechen für die Vergeblichkeit der Suche nach einer allgemeinen Weltformel. Auch der Unvollständigkeitssatz von Gödel wird als Argument gegen die Aufstellung der Weltformel angeführt. Der Unvollständigkeitssatz besagt in vereinfachter Form, dass jedes formale System, welches widerspruchsfrei ist und elementare Arithmetik erlaubt, unvollständig bezüglich der Aussagen dieser Arithmetik ist, was auch bedeutet, dass es in Teilbereichen weder bewiesen noch widerlegt werden kann und damit nicht entscheidbar ist.

Alle hier diskutierten wissenschaftlichen Befunde weisen auf den hierarchischen Aufbau des Kosmos aus Teilbereichen hin, bei denen emergente Leistungen aus dem kollektiven Zusammenwirken innerhalb der Bereiche hervorgehen. Eine reduktionistische Betrachtung ist in Teilbereichen möglich. Bei Überschreitung gelten andere Bedingungen, eine umfassende reduktionistische Ableitung ist damit unmöglich und die Aufstellung der Weltformel somit nicht erreichbar. Nach wie vor gilt der alte Grundsatz des Aristoteles:

Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.

Literatur

- [1] Robert B. Laughlin; Abschied von der Weltformel, 4. Aufl. 2008, Piper München-Zürich, ISBN 978-3-492-04718-0, 330 Seiten, S. 16.

- [2] S. Dürr, Z. Fodor, J. Frison, C. Hoelbling, R. Hoffmann, S.D. Katz, S. Krieg, T. Kurth, L. Lellouch, T. Lippert, K. K. Szabo, G. Vulvert; Ab Initio Determination of Light Hadron Masses, *Science* 322 [2008] 1224/1227.
- [3] Lothar Kolditz; *Chemie und Zeit*, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät 80 [2005] 115/123, 118, ISSN 0947-5850, ISBN 3-89626-520-2.
- [4] Lothar Kolditz; *Evolution der chemischen Verbindungen*, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät 85 [2006] 57/79, ISSN 0947-5850, ISBN 3-89626-578-4.
- [5] Karine A. Gibbs, Mark L. Urbanovski, E. Peter Greenberg; Genetic Determinants of Self Identity and Social Recognition in Bacteria; *Science* 321 [2008] 256/259.
- [6] Amy L. Schäfer, E. P. Greenberg, Colin M. Oiver, Yasuhiro Oda, Jean J. Huang, Gilli Bittan-Banin, Caroline M. Peres, Silke Schmidt, Katarina Juhaszova, Janice R. Sufrin, Caroline S. Harwood; A new class of homoserine lactone quorum-sensing signals, *Nature* 454 [2008] 595/599.
- [7] Martin Ackermann, Bärbel Stecher, Nikki E. Freed, Pascal Songhet, Wolf-Dietrich Hardt, Michael Doebeli; Self-destructive cooperation mediated by phenotypic noise, *Nature* 454 [2008] 987/990.
- [8] Helmut Moritz; *Science, Mind and the Universe*, ursprünglich Herbert Wichmann Verlag Heidelberg 1995, S. 56, z.Zt. erreichbar unter <http://www.helmut-moritz.at>
- [9] Steven Strogatz, *Synchron – vom rätselhaften Rhythmus der Natur*, Berlin Verlag GmbH, 2004, 458 S., S. 263/265.
- [10]Edward N. Lorenz, Deterministic nonperiodic flow, *Journal of the Atmospheric Sciences* 20 [1963] 130/141.
- [11]Steven Strogatz, vgl. [9], S. 259.
- [12]J. Lighthill, The recently recognized failure of predictability in Newtonian dynamics, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences* 407 [1986] S. 35-50,
- [13]G. Sussman, J. Wisdom, Chaotic Evolution of the Solar System, *Science* 257 [1992] S. 56-62.
- [14]Helmut Moritz, vgl. [8], S. 263.
- [15]M. Bojowald, *Der Ur-Sprung des Alls*, *Spektrum der Wissenschaft* Mai 2009, S.26-32, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH., Heidelberg.
- [16]D. Lüst, V. Spillner, Ist die Stringtheorie noch eine Wissenschaft? *Spektrum der Wissenschaft* Mai 2009, S. 34-39.