

Atome, Quarks, Superstrings Auf der Suche nach der Weltformel¹

G. Münster, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Die Welt bietet uns eine unübersehbare Fülle von Erscheinungen, zwischen denen ein Zusammenhang oft schwer erkennbar ist. Es gibt unzählige verschiedene Stoffe und Materialien und vielfältige Arten von Veränderungen, Umwandlungen und Wechselwirkungen. Es ist ein tiefes menschliches Bedürfnis, hier Ordnung hineinzubringen.

Frühe Zeugnisse solcher Versuche finden wir bei den Vorsokratikern. Thales von Milet (ca. 630 – 560 v. Chr.), der Schülern wohl vom Thales-Kreis bekannt ist, behauptete: „Alles besteht aus Wasser“, eine These, die uns heute recht seltsam vorkommen muss. Seine Idee war, dass alle Materie aus einer einzigen Grundsubstanz besteht, die in unterschiedlichen Erscheinungsformen vorkommt. Diese können sich ineinander umwandeln. Die Beobachtung, dass Wasser sich zu Dampf und Eis umwandeln kann und Stoffe unterschiedlich feucht sind, brachte ihn dazu, diese Ursubstanz mit dem Wasser gleichzusetzen.

Thales war Philosoph und Mathematiker, und kein Physiker. Aber sein Gedanke, alles auf grundsätzliche Prinzipien bzw. elementare Bestandteile zurückzuführen, zieht sich wie ein roter Faden durch die Geschichte der Physik.

Es muss hier allerdings gleich betont werden, dass dies nur eines der Themen der Physik ist. Die Physik mit ihren zahlreichen Gebieten wie Geophysik, Nanophysik, Halbleiterphysik etc. ist sehr vielfältig und nur einige Physiker beschäftigen sich mit der Frage nach den fundamentalen Prinzipien.

Hierbei gibt es zwei Hauptlinien, bei denen es einerseits um die **Materie** und andererseits um die **Kräfte** geht.

1. Materie

Wir werden jetzt in einem Crash-Kurs die „Struktur der Materie“ studieren. Demokrit von Abdera (ca. 460 – 380 v. Chr.) stellte die Atom-Hypothese auf, nach der alle Materie aus kleinsten Bestandteilen, den Atomen, zusammengesetzt ist. Diese bestehen aus einer einheitlichen, harten, undurchdringlichen und unteilbaren Ursubstanz. Alle äußerlichen Eigenschaften wie Farbe, Geruch, Härte usw. beruhen danach auf der Form und der Anordnung der Atome. Wir können dies als das „Lego-Prinzip“ bezeichnen: die Vielfalt der Dinge wird auf wenige Arten von Bausteinen zurückgeführt.

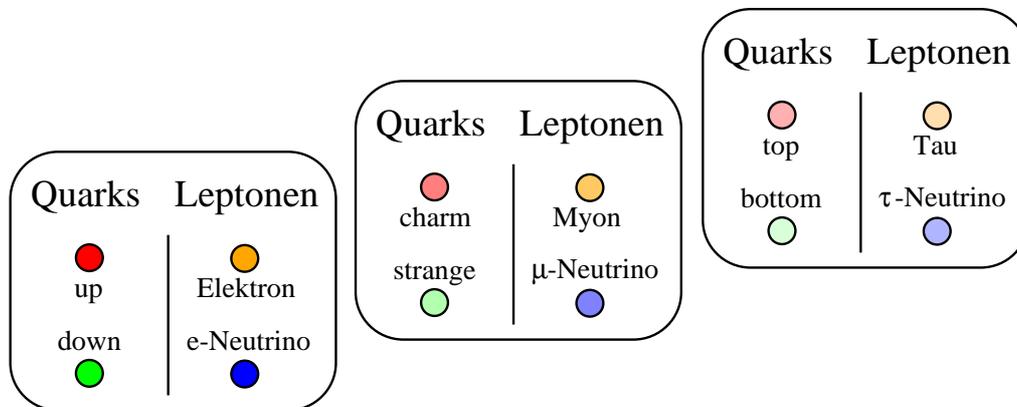
Die Chemie des 18. und 19. Jahrhunderts hat die Atom-Hypothese bestärkt. Sie wurde durch die Physik des 20. Jahrhunderts bestätigt. Heute können mit Rastertunnelmikroskopen einzelne Atome sichtbar gemacht werden. Wir wissen, dass es 92 natürliche und ca. ein Dutzend künstliche Sorten von Atomen gibt. Diese Zahl erscheint ein bisschen groß für die fundamentalen Bausteine. Am Anfang des 20. Jahrhunderts stellte es sich heraus, dass Atome keineswegs unteilbar, sondern aus Kernen und Elektronen zusammengesetzt

¹abgedruckt in: *Nur Götter und Götzen? Zur Aktualität des Mythos*, Hg. C. Urban, J. Engelhardt, LIT Verlag, Münster, 2004

sind. Die Kerne wiederum bestehen aus zwei Arten von Bausteinen, den Protonen und den Neutronen. Deren Anzahl im Kern legt die Art des chemischen Elements fest.

Wäre die Geschichte hier zu Ende, so wären es also 3 Teilchen-Sorten, aus denen die gewöhnliche Materie besteht, und das Lego-Prinzip wäre sehr schön verwirklicht. Die Forschung hat allerdings noch eine weitere Stufe gefunden. Protonen und Neutronen bestehen aus noch kleineren Teilchen, die man Quarks nennt. Außerdem wurden seit ca. 1935 neben den Protonen und Neutronen eine Vielzahl anderer Teilchen entdeckt, die normalerweise auf der Erde nicht vorkommen. Seit den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts wuchs ihre Zahl auf mehr als 200.

In diesen Zoo von Teilchen konnte glücklicherweise Ordnung gebracht werden. Alle diese Teilchen lassen sich zurückführen auf eine überschaubare Anzahl von Bausteinen, nämlich 6 Arten von Quarks und 6 Arten von sogenannten Leptonen, die sich zu 3 „Generationen“ zusammenfügen. Das ist der heutige Stand der Dinge.



2. Kräfte

Die älteste bekannte Kraft ist die Schwerkraft: was losgelassen wird, fällt herunter. Vor mehr als 400 Jahren dachte noch niemand daran, dass sie etwas mit der Bewegung der Planeten zu tun haben könnte. Die Bahnen, welche die Planeten um die Sonne ziehen, genügen den Kepler'schen Gesetzen, die jeder Schüler im Physikunterricht kennenlernt. Es war Isaac Newton (1643 – 1727), der durch das Studium der Kepler'schen Gesetze auf einen Zusammenhang zwischen der Schwerkraft und der Planetenbewegung stieß.

In den Jahren 1665 bis 1667 wütete die Pest in England. Um ihr zu entgehen, zog Newton sich von Cambridge in seine Heimat Woolsthorpe zurück. Hier erlebte er in der Abgeschiedenheit die produktivste Phase seines Lebens. Unter anderem interessierte er sich für den Lauf der Planeten. Nach einer verbreiteten Anekdote, deren Wahrheit allerdings angezweifelt wird, kam er 1666 durch einen vom Baum fallenden Apfel auf die Idee, dass die irdische Schwerkraft auch auf den Mond wirkt. In seiner „Mondrechnung“ zeigte er, dass tatsächlich die gleiche Kraft, die einen Apfel zur Erde zieht, den Mond auf seiner Bahn um die Erde hält.

Diese Feststellung verallgemeinerte er dann auf die Bewegung der Planeten um die Sonne. Es gelang ihm zu zeigen, dass die Sonne eine Schwerkraft auf die Planeten ausübt,

aufgrund derer sie in Ellipsenbahnen umlaufen. Newton fand das mathematische Gesetz für die Schwerkraft. Diese Schwerkraft ist die Gleiche, die zwischen Erde und Mond oder zwischen Erde und Apfel wirkt. Mit diesem Begriff einer universellen Gravitation erreichte Newton die erste Vereinigung von Kräften, die zuvor als unterschiedlich betrachtet wurden.

Die mathematische Beschreibung der Schwerkraft wurde von Albert Einstein noch einmal verfeinert in der Allgemeinen Relativitätstheorie von 1916. In ihr wird die Gravitation auf die Geometrie von Raum und Zeit zurückgeführt. Dies wäre aber eine andere Vorlesung.

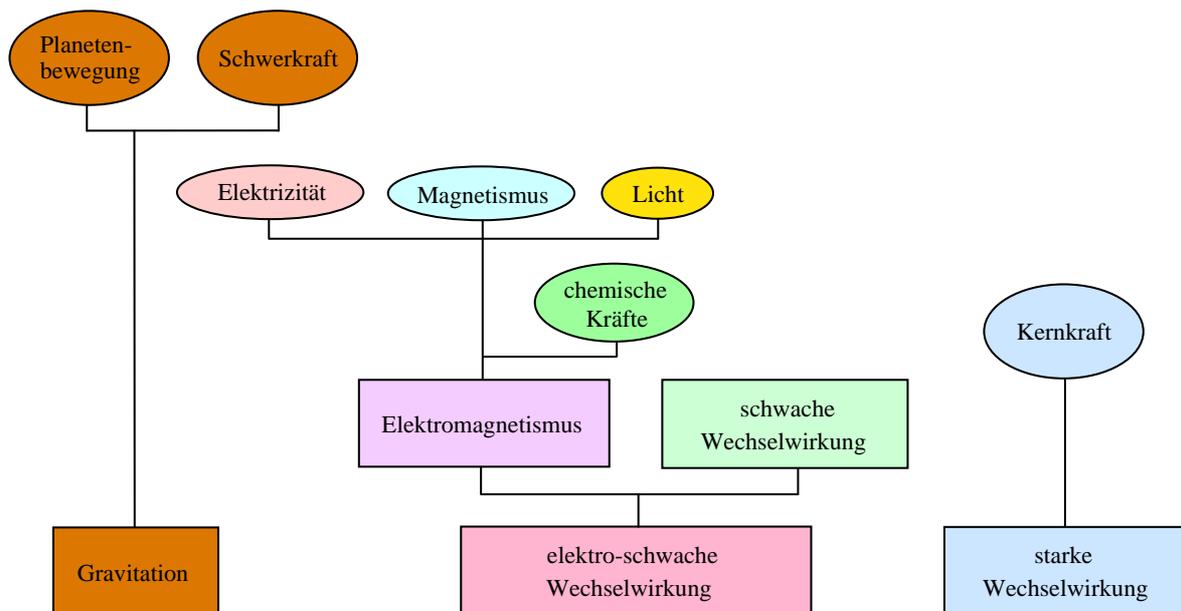
Außer der Gravitation gibt es weitere Kräfte in der Natur. Schon lange bekannt sind Elektrizität und Magnetismus. Die Elektrizität tritt u.a. in Blitzen und statischen Aufladungen in Erscheinung. Der Magnetismus wirkt zwischen magnetischen Steinchen und lässt die Kompassnadel nach Norden zeigen. Der englische Physiker Faraday entdeckte im 19. Jahrhundert die Induktion: durch die Veränderung magnetischer Kräfte können elektrische Erscheinungen hervorgerufen werden. Der Däne Oerstedt hatte das Umgekehrte gefunden: durch elektrische Ströme können magnetische Kräfte erzeugt werden. Auf diesen Entdeckungen aufbauend gelang J.C. Maxwell (1831 – 1879) 1865 die formale Synthese von Elektrizität und Magnetismus. In den Maxwell'schen Gleichungen werden sie zum Elektromagnetismus vereinigt. Dabei gab es noch einen besonderen Bonus: aus seinen Gleichungen konnte Maxwell die Existenz von elektromagnetischen Wellen ableiten und darüber hinaus zeigen, dass das Licht eine Form von elektromagnetischen Wellen ist. Heute wissen wir, dass auch die chemischen Kräfte, welche die gewöhnlichen Substanzen zusammenhalten, von elektromagnetischer Natur sind.

In der Vereinigung dieser Kräfte wurde ein enormer Schritt vollzogen. Eine riesige Vielfalt von Vorgängen unseres Alltages, vom Gewitter über das Licht bis zur Elektronik, kann durch diese 4 Gleichungen der elektromagnetischen Theorie beschrieben werden:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0}, & \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, & c^2 \nabla \times \mathbf{B} &= \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\mathbf{j}}{\epsilon_0} \end{aligned}$$

Die Kernphysik des letzten Jahrhunderts hat uns zwei weitere Kräfte beschert: die „schwache Wechselwirkung“ ist für Radioaktivität verantwortlich und spielt für die Entstehung der Sonnenenergie eine wichtige Rolle; die „starke Wechselwirkung“ ist die Ursache der Kernkräfte, welche die Bausteine der Atomkerne zusammenhält. Insgesamt haben wir es also mit 4 bekannten Wechselwirkungen zu tun.

Vor dreißig Jahren gelang Glashow, Salam und Weinberg eine weitere Vereinigung, indem sie die elektromagnetischen und die schwachen Wechselwirkungen in der Theorie der „elektro-schwachen Wechselwirkungen“ zusammenfassen konnten. Damit haben wir den heutigen Stand der Physik erreicht. Die fundamentalen Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkungen werden durch das sogenannte Standard-Modell erfasst. Dieses ist eine Theorie, welche die Teilchen und ihre Kräfte mathematisch beschreibt, wobei die Schwerkraft allerdings noch eine Sonderrolle behält.



In seiner Rede anlässlich der Nobelpreisverleihung hat Sheldon Glashow die Situation 1979 so geschildert:

„Als ich 1956 mit der theoretischen Physik begann, war das Studium der Elementarteilchen mit einem Flickenteppich vergleichbar. Die Elektrodynamik, die schwache Wechselwirkung und die starke Wechselwirkung waren klar voneinander getrennte Disziplinen, die getrennt gelehrt und getrennt gelernt wurden. Es gab keine kohärente Theorie, die sie alle beschrieb. Die Zeiten haben sich geändert. Heute haben wir eine Standardtheorie der Elementarteilchenphysik, in der sich starke, schwache und elektromagnetische Wechselwirkungen von einem (einigen) Prinzip ableiten lassen [...] Die heutige Theorie ist ein integrales Kunstwerk: der Flickenteppich ist zu einem Gobelin geworden.“

Eine Bemerkung zum „Lego-Prinzip“ ist hier angebracht. Die Reduktion der Erscheinungen der physikalischen Welt auf eine kleine Zahl von Bestandteilen und Wechselwirkungen und deren Beschreibung durch mathematische Formeln beinhaltet **nicht**, dass alles Geschehen berechenbar oder vorhersehbar geworden ist. Dazu ist die Welt viel zu komplex. Es verhält sich eher so wie bei der Musik. Wir können alle Kompositionen mit relativ wenigen Noten- und Satzzeichen niederschreiben, aber die Kenntnis der Notenschrift befähigt uns nicht, die Vielfalt aller möglichen Musikstücke zu erfassen.

3. Die Suche nach der „Weltformel“

Die Suche nach den grundlegenden Bausteinen der Materie und den grundlegenden Kräften in der Natur kann als die Suche nach der „Weltformel“ betrachtet werden. Was soll man darunter verstehen? Die Sprache der Physik ist die Mathematik, wie schon Kepler gesagt hat. Wenn es eine einheitliche Beschreibung aller Teilchen und Kräfte gibt, so wird sie in einer mathematischen Theorie ihren Ausdruck finden. Diese könnte man als

Weltformel bezeichnen. Die Suche nach der Weltformel ist zu einem neuzeitlichen naturwissenschaftlichen Mythos geworden, der durch die bisherigen Erfolge der Physik genährt wird. In diesem Abschnitt möchte ich einige Versuche in dieser Richtung vorstellen.

Nachdem er die Theorie der Schwerkraft aufgestellt hatte, begab sich Einstein seit 1920 auf die Suche nach einer Weltformel. Damals waren Gravitation und Elektromagnetismus und einige wenige Teilchensorten bekannt. Einstein versuchte, die beiden genannten Wechselwirkungen und die materiellen Teilchen nach dem Vorbild der Relativitätstheorie durch geometrische Begriffe zu beschreiben. Seine Bemühungen stellten sich als äußerst schwierig heraus. Er schrieb einmal: „Ich habe wenig Geduld mit Wissenschaftlern, die ein Holzbrett nehmen, nach dem dünnsten Teil suchen und dann da, wo es am leichtesten geht, eine Menge Löcher bohren“. Seine Versuche stellten sich letztendlich als vergeblich heraus.

Eine interessante Idee wurde von Theodor Kaluza in Königsberg 1919 hervorgebracht und von Oskar Klein 1926 weiter ausgearbeitet. Sie fanden einen Weg zur Vereinigung von Gravitation und Elektromagnetismus. Der Preis dafür war, dem dreidimensionalen Raum eine weitere Dimension hinzuzufügen. Hiermit ist nicht die Zeit, sondern eine zusätzliche räumliche Dimension gemeint. Ein vierdimensionaler Raum entzieht sich zwar der menschlichen Anschauung, ist aber mathematisch wohldefiniert und handhabbar. Kaluza und Klein stellten fest, dass die Gravitation im vierdimensionalen Raum nicht nur die Gravitation im dreidimensionalen, physikalischen Raum hervorbringt, sondern zusätzlich die elektromagnetischen Wechselwirkungen. Warum würden wir von der zusätzlichen Dimension nichts merken? Dies ließe sich dadurch erklären, dass sie aufgerollt wäre wie ein zusammengerolltes Blatt Papier, das von weitem wie ein Faden aussieht.

Trotz ihres besonderen Reizes geriet die Kaluza-Klein-Theorie weitgehend in Vergessenheit, wozu auch die Entdeckung der weiteren Wechselwirkungen beitrug.

Ein weiterer Versuch zu einer Weltformel stammt von Werner Heisenberg. Er stellte 1958 seine Formel vor, mit der er alle Teilchen und Wechselwirkungen außer der Gravitation beschreiben wollte. Seine Theorie erregte damals großes Aufsehen. Seine Formel stellte sich allerdings als mathematisch sehr problematisch heraus und wird heute allgemein als misslungen betrachtet.

Stellt nicht das Standard-Modell der Elementarteilchenphysik, das ich im vorigen Abschnitt angesprochen habe, eine Weltformel dar? Die meisten Physiker würden dies nicht so sehen. Das Standard-Modell ist zweifellos eine sehr erfolgreiche physikalische Theorie und fasst den heutigen Stand der Elementarteilchen-Physik zusammen. Es kommen aber noch zu viele Teilchen vor, als dass man sie als fundamental betrachten möchte. Außerdem gibt es im Standard-Modell noch verschiedene Wechselwirkungen, die nicht vereinigt sind. Hieraus rührt ein gewisses Unbehagen. Das Modell ist den Physikern nicht „schön“ genug.

Zum Schluss möchte ich auf heutige Versuche eingehen, die unschönen Züge des Standard-Modells zu überwinden. Eine Zielrichtung wird mit dem Stichwort „Große Vereinigte Theorie“, auf englisch Grand Unified Theory (GUT), bezeichnet. Hierbei geht es darum, die elektro-schwachen und die starken Wechselwirkungen auf eine Urkraft zu-

rückzuführen. Man folgt dabei dem Vorbild der Vereinigung der elektromagnetischen und schwachen Kräfte. Es gibt mehrere konkrete Ansätze hierzu, die aber nach wie vor als spekulativ betrachtet werden müssen. Die große Vereinigung würde für die Physik des sehr frühen Universums eine wichtige Rolle spielen.

Ein ganz andersartiger Weg wird in den Superstring-Theorien besprochen, die in letzter Zeit auch in der Öffentlichkeit bekannt geworden sind. Seit ca. 1984 werden sie als neuer Ansatz zur einheitlichen Beschreibung aller Teilchen und Kräfte betrachtet, wobei auch die Gravitation inbegriffen ist. Strings sind Saiten oder Fäden, welche in der String-Theorie die Bausteine der Welt bilden. Sie sind außerordentlich klein, ihre Länge beträgt ca. 10^{-35} m, so dass sie fast wie Teilchen wirken. Die verschiedenen Schwingungsformen der Strings stellen verschiedene Teilchensorten dar. Durch Aufspaltung und Zusammenfügen von Strings kommen ihre Wechselwirkungen zustande. In der Theorie der Strings fand man heraus, dass die Gravitation und andere Wechselwirkungen auf diese Weise hervorgebracht werden können. Das „Super“ im Namen der Theorie stammt von der Supersymmetrie, einer sehr hohen mathematischen Symmetrie, die in der Theorie enthalten ist.

Es muss betont werden, dass die String-Theorie trotz der großen Aktivitäten auf diesem Gebiet noch sehr spekulativ und ungesichert ist. Bis jetzt gibt es noch keine Möglichkeiten, sie experimentell zu überprüfen. Eines ihrer Hauptprobleme ist der Umstand, dass ein Raum mit 6 zusätzlichen Dimensionen erforderlich ist, die aufgerollt sein müssten wie in der Kaluza-Klein-Theorie. Die Art, wie dies geschieht, ist wichtig für die Physik, aber noch völlig unklar.

Es gibt viele Theoretiker, die ihre Hoffnungen in die Superstring-Theorie setzen. Es handelt sich um eine mathematisch äußerst interessante und schöne Theorie. Ob in ihr die Weltformel steckt, bleibt abzuwarten. Wir werden wohl noch eine Weile mit dem Mythos von der Weltformel leben müssen, bevor wir wissen, ob es sie tatsächlich gibt.

