

Josef Honerkamp, Fakultät für Physik, Universität Freiburg

Von fundamentalen Wechselwirkungen und vereinheitlichten Theorien¹

Von Büchern über einheitliche Theorien

Wenn Sie in eine etwas größere Buchhandlung gehen und dort den Bereich aufsuchen, in dem naturwissenschaftliche Bücher ausliegen, entdecken Sie auch zahlreiche Bücher, die in allgemeinverständlicher Form Themen aus der Physik oder Mathematik darstellen wollen. Aktuellstes Thema ist die sogenannte Chaosforschung, die von Unberufenen sogar in den Rang einer Philosophie erhoben wird, die aber in ihrer Bedeutung schrecklich überschätzt wird. Traditioneller und oft auch seriöser in diesem Metier ist das Gebiet der Kosmologie, Astronomie und Teilchenphysik. Hier hat ein Buch eine besondere Karriere gemacht, ist sogar verfilmt worden: "Eine kurze Geschichte der Zeit" von Stephen Hawking. Das Buch wurde inzwischen, einschließlich seiner Übersetzungen, etwa 5.5 Millionen mal verkauft, in Deutschland allein 350 000 mal. Der Spiegel widmete dem Buch und dem Leben seines Autors eine Titelgeschichte. Der Film, der allerdings fast nur über das Leben des Autors erzählt und wenig über das Thema des Buches, ist vor kurzem auch in einem Kino in Freiburg gezeigt worden.

Der publizistische Erfolg ist bemerkenswert und erstaunlich. Ein Physiker, der die entsprechende Forschungsrichtung ein wenig kennt und dieses Buch liest, findet überhaupt nichts Reizvolles, Brillantes an dem Buch, weder sprachlich, noch gedanklich. Die überragende fachliche Kompetenz des Autors, Stephen Hawking, ist allerdings unbestritten, aber eine solche ist ja bekanntlich weder hinreichend noch notwendig für einen Aufsehen erregenden Erfolg in der Sachbuch-Sparte. Vermutlich kommen da zwei Dinge zusammen: das Schicksal des Autors -- er leidet an amyotropher Lateralsklerose² und kann sich nur noch mit Hilfe eines Sprachcomputers mit der Außenwelt verständigen -- und seine Anspielungen, die den religiösen Bereich betreffen. Nach Hawking gibt es für einen Gott bei der Schöpfung immer weniger zu tun, wenn überhaupt noch etwas. Auf jeden Fall ist er nach den ersten 10^{-40} Sekunden des Weltalls arbeitslos, weil alles nach den physikalischen Gesetzen, die wir immer besser verstehen, abläuft.

Beides, das Schicksal des Autors und die Spekulation über Gott spricht unsere emotionale Seite an, nicht so sehr unsere intellektuelle, und so ist der Erfolg des Buches vielleicht einer besonders feinsinnigen Marktstrategie des Verlages zu verdanken: "Transportiere Deine Botschaft durch Weckung von Emotionen".

Die Botschaft ist allerdings hier von aller schwerstem geistigen Kaliber, und ich würde mich wirklich wundern, wenn ein Außenstehender auch nur etwas davon in den richtigen Hals bekäme. Tatsächlich waren alle Äußerungen meiner Bekannten, die dieses Buch gekauft haben --- ich weiß nicht, ob sie es auch ernsthaft gelesen haben --- emotionaler Natur, vom echten ehrlichen Staunen im Bewusstsein des eigenen Unvermögens übers Schwärmen bis zum Spekulieren nach Science-Fiction Art.

¹ Vortrag anlässlich des Empfangs der Emeriti der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg am 5. Mai 1993

² Systemerkrankung des Rückenmarks mit Symptomen der Muskelatrophie

Es gibt ein anderes Buch, das das Thema von Stephen Hawking in größerem Zusammenhang, viel sorgfältiger, viel scharfsinniger, aber auch viel unspektakulärer schildert. Der Band 3 (8. Auflage) der "Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie" von Wolfgang Stegmüller. Dieser Autor ist ein Philosoph, aber ein besonderer: ich wüsste nicht, welcher Philosoph sich so intensiv in die Naturwissenschaften und in die Mathematik eingearbeitet hat, welcher so scharfsinnig, aber dennoch immer völlig klar und in schlanker, schlichter Sprache die Semantik der Naturwissenschaften, insbesondere der Physik untersucht. Wer sich also auch nach meinem Vortrag noch für das Thema einer vereinheitlichten Theorie der fundamentalen Kräfte interessiert, kann es also in diesem Bändchen nachlesen: und er erfährt dort noch vieles andere, was in diesem Zusammenhang interessant ist. Allerdings, das Herz wird dort nicht so bewegt, dafür der Verstand gefordert. Aber der Autor hat schon viel Arbeit in die Strukturierung und Formulierung des Stoffes gesteckt, das kommt dem Leser zugute.

Damit wären wir beim Thema: Was sind fundamentale Kräfte bzw. Wechselwirkungen, was sind vereinheitlichte Theorien? Ich möchte zunächst diese beiden Begriffe erläutern, um Ihnen dann einen kleinen Einblick in die Geschichte der Vereinheitlichungen zu geben.

Fundamentale Kräfte

Lassen Sie mich zunächst das Wort "Wechselwirkung" als Synonym für "Kraft" verstehen, so dass wir zunächst von fundamentalen Kräften reden. Der Effekt einer bestimmten fundamentalen Kraft war den Menschen sei jeher bekannt, auch wenn man diese Kraft erst im 17. Jahrhundert zu verstehen begann: ein schwerer Körper fällt zu Boden. Aristoteles formulierte das auch so, leider aber fügte er auch hinzu: leichte Körper wie z.B. Rauch steigen auf. Seine Aussagen im Bereich der Physik hatten eine Lebensdauer wie keine andere Theorie bisher: 2000 Jahre wurden seine Aussagen wiederholt und als Wahrheit weitergegeben. Nur leider war alles so falsch, dass die Begründer der Mechanik, Galilei, Huygens und Newton ganz von vorne anfangen mussten und eigentlich nichts vom Gedankengut Aristoteles' verwenden konnten. Heute wissen wir mit Newton, dass Materie mit einer Eigenschaft, Masse, einhergeht; und dass Massen eben Kräfte, anziehende Kräfte, aufeinander ausüben. Diese gegenseitige Anziehung nennt man auch Gravitation oder die gravitative Wechselwirkung. Ein Stein fällt zu Boden, weil sich Stein und Erde gegenseitig anziehen. Weil die Erde so viel Masse besitzt, der Stein dagegen so wenig, muss sich der Stein in Richtung Erde bequemen, während sich dabei die Erde einen "unmessbaren Teil eines Deuts" bewegt. Die Newtonsche Theorie der Gravitation ist universell: auch die Bewegung der Sterne lässt sich mit ihrer Hilfe verstehen, ebenso die Bewegung ganzer Galaxien.

Einstein hat die Newtonsche Theorie verbessert, eine allgemeinere Theorie der Gravitation formuliert, mit deren Hilfe man eben auch die Entstehung der Welt und das Auseinanderdriften der Galaxien verstehen kann. Man kann damit das Alter der Welt auf 10-20 Milliarden Jahre berechnen, was insbesondere auch bedeutet, dass die Welt einen Anfang gehabt haben muss, an dem Raum und Zeit entstanden sind.

Nachdem wir uns mit einer fundamentalen Kraft besonders aufgehalten haben, will ich Ihnen schnell noch von drei anderen solchen Kräften berichten. Vier fundamentale Wechselwirkungen zählen wir nämlich heute.

Wer mal mit einem Magneten gespielt hat, weiß wie wunderlich diese magnetischen Kräfte sind. Offensichtlich ist das eine andere Art Kraft, weniger direkt, zu Ausweichmanövern

führend. In der Tat ist die elektromagnetische Wechselwirkung von ganz anderer Natur, erst 200 Jahre nach der Gravitationstheorie konnte ein englischer Physiker, James Clark Maxwell, die Summe aller Erfahrungen mit diesen Kräften mit seinen berühmten Grundgleichungen ziehen und eine Theorie des Elektromagnetismus begründen.

Die dritte und vierte fundamentale Kraft sind uns erst in diesem Jahrhundert bekannt geworden. Sie haben beide eine so kurze Reichweite, dass wir sie nur in atomaren oder noch kleineren Dimensionen wirken sehen. Die sogenannte schwache Wechselwirkung beschreibt die radioaktiven Zerfälle. Die sogenannte starke Wechselwirkung sorgt für die Anziehung der Konstituenten eines Atomkernes, garantiert also die Stabilität der meisten Atomkerne.

Damit sind die vier fundamentalen Kräfte der Natur aufgezählt. Alle Phänomene sind letztlich auf diese vier Wechselwirkungen zurückzuführen. Für jede dieser Wechselwirkungen gab es in den 60er Jahren eine Theorie, und diese Theorien waren so verschieden wie die damit verbundenen Phänomene. Mit jeder dieser Theorien waren große Namen verbunden, Newton und Einstein mit der Gravitationstheorie, Faraday und Maxwell mit der elektromagnetischen Wechselwirkung. Fermi mit der Theorie der schwachen und Gell-Mann mit der Theorie der starken Wechselwirkung. Einstein, Fermi und Gell-Mann wurden natürlich Nobel-Preisträger; Newton und Maxwell wären ohne Zweifel auch mit diesem Preis geehrt worden, wenn es ihn damals schon gegeben hätte.

Vereinheitlichte Theorien

Was ist nun eine vereinheitlichte Theorie? Wenn man etwas vereinheitlicht, so macht man aus mehreren eins, aus mehreren Theorien also eine Theorie. Da nun jede dieser vier Theorien schon jeweils einen großen Phänomenbereich erklärt --- die elektromagnetische Theorie z.B. alle elektrischen und magnetischen Phänomene, bedeutet eine Verschmelzung zweier Theorien zu einer einzigen, dass diese neue Theorie noch sehr viel fundamentaler ist, denn der Phänomenbereich, der durch diese neue Theorie nun erklärt wird, hat sich gewissermaßen verdoppelt. Das Erklärungsvermögen der neuen Theorie ist also noch größer als das einer der alten.

Wie geschieht das nun, solch eine Vereinheitlichung?

Theorien sind definiert durch fundamentale Gleichungen und Annahmen. Diese lassen sich auf einer halben Seite, in mathematischer Form allerdings, formulieren und aus diesen Gleichungen läßt sich dann alles, streng mathematisch, ableiten. Einstein konnte seine Grundgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie auf der Rückseite einer Briefmarke unterbringen; und dennoch können wir aus diesen Gleichungen z.B. die Gesetze für ein expandierendes Weltall ableiten. Die Folgerungen aus diesen Gleichungen füllen ganze Bücher.

Verschmelzung, Vereinheitlichung zweier Theorien heißt nun auch, dass man neue allgemeine Grundgleichungen mit entsprechenden Annahmen findet, die eben die neue vereinheitlichte Theorie konstituieren, die aber, unter bestimmten Einschränkungen, jeweils wieder zu den Grundgleichungen der alten Theorien führen. Man hat also mit den neuen Grundgleichungen eine noch fundamentalere Gesetzmäßigkeit gefunden. Die alten Theorien werden nicht falsch, erscheinen aber jetzt in einem neuen Licht und werden in Grenzbereichen vielleicht modifiziert.

Dieser Vorgang, die Verschmelzung zweier Theorien hat tatsächlich stattgefunden; aber nicht nur das, die Vereinheitlichung der Theorien ist sozusagen das Leitthema in der Physik: es hat schon mehrere, sehr spektakuläre Vereinheitlichungen gegeben, man hat intensiv, aber oft vergeblich nach solchen einheitlichen Theorien gesucht, und man sucht heute noch, nicht ohne Aussicht auf Erfolg, nach solchen Vereinheitlichungen.

Erfolge in der Suche nach Vereinheitlichung

Lassen Sie mich zunächst von den spektakulären Erfolgen in der Vergangenheit berichten: Der jüngste Erfolg ist gerade 20 Jahre alt. 1971 stellten die amerikanischen Physiker Glashow, Salam und Weinberg eine vereinheitlichte Theorie der schwachen und elektromagnetischen Quantenfeldtheorie auf. Das war nicht der einzige Vorschlag für eine solche Theorie, aber dieser sah für die Experten gleich sehr plausibel aus und die Vorhersagen dieser Theorie wurden auch in den folgenden Jahren immer wieder bestätigt. Bis heute hat sich diese Theorie, die wir nun die elektroschwache Theorie nennen, in allen experimentellen Prüfungen bewährt. Wir müssten heute eigentlich nur noch von drei fundamentalen Wechselwirkungen reden, der Gravitation, der elektroschwachen und der starken Wechselwirkung.

Ich will nicht eingehen auf die Fülle von neuen Aspekten, die diese vereinheitlichte Theorie für die Physik der Elementarteilchen aufgezeigt hat, denn solch eine Theorie ist immer auch mehr als die Summe ihrer Teile, ihrer Teiltheorien also.

Gehen wir weiter zurück in die Vergangenheit. Die Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung selbst ist schon eine vereinheitlichte Theorie. Das war gerade die herausragende Leistung von James Clark Maxwell, dass er die Theorien für die Elektrizität und die für den Magnetismus, aufbauend auf den Arbeiten Faradays, 1873 zu einer einzigen Theorie zusammenschmolz und einen Satz von fundamentalen Gleichungen für die elektromagnetischen Felder fand.

Diese Gleichungen waren so treffend formuliert, dass sie nicht nur alle damaligen elektrischen und magnetischen Phänomene gut erklärten, sie besaßen auch noch Eigenschaften, deren Bedeutung erst später erkannt wurde. Heinrich Hertz sagte 1886 ausgehend von diesen Gleichungen die elektromagnetischen Wellen voraus --- und fand sie auch experimentell; unsere ganze Industrie der drahtlosen Kommunikation, Funk und Fernsehen und neuerdings auch Telefon, beruhen darauf. Das Licht, das wir mit unserem menschlichen Auge wahrnehmen, wurde auch als elektromagnetisches Phänomen erkannt, die Optik wurde ein Teil der Elektrodynamik. Die Maxwellschen Gleichungen erwiesen sich sogar später als den strengen Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie Einsteins genügend, so dass auch die moderneren Einsichten des 20. Jahrhunderts für diese Theorie keine Änderung erzwang.

Gehen wir noch einen Schritt weiter zurück, an den Anfang der Naturwissenschaften und der Physik. Dort steht die Newtonsche Mechanik, 1687 formuliert. Diese kann eigentlich auch als vereinheitlichte Theorie bezeichnet werden, und zwar in dem Sinne, dass sie eine einheitliche Theorie darstellt für verschiedene Phänomenbereiche, die vorher durch verschiedene Theorien erklärt wurden. Diese Phänomene sind die verschiedenen Typen von Bewegungen. Die Theorien für die Bewegungen vor Newton stammten von Aristoteles, er kannte Bewegungen am Himmel und Bewegungen auf der Erde. Sie wurden von ihm ganz unterschiedlich erklärt. Bewegungen von Planeten und Sternen am Himmel waren göttlicher Natur. Hinter ihnen

stand der Erste Beweger, ein Gott. Für Bewegungen auf der Erde machte Aristoteles zwei Typen aus und hatte für jeden Typus eine andere Theorie: ein Stein fällt zur Erde, weil die Erde der Weltmittelpunkt ist und mit dem Fallen zum Mittelpunkt eine gestörte Ordnung wieder hergestellt wird. Bewegungen entlang der Erdoberfläche sind ganz anderer Natur, sie müssen ständig erzwungen werden. Die Newtonsche Theorie erklärte alle diese Bewegungen am Himmel und auf der Erde durch ein einziges Grundgesetz. Der Apfel, der zur Erde fällt, gehorcht dem gleichen Gesetz wie der Mond, der um die Erde kreist.

Wir sehen hier also wieder die Vergrößerung des Erklärungsvermögens. Ein wesentlicher Unterschied zu den anderen Vereinheitlichungen besteht allerdings. Aristoteles hatte eigentlich keine Theorie in unserem Sinne, keine mathematische Grundgleichung, sondern nur verbale Erklärungen. Daher blieb von seinen Theorien auch nichts übrig.

Mit Newton begann eigentlich erst die Naturwissenschaft, nach wesentlichen Vorbereitungen von Galilei, insbesondere der Einführung der Mathematik als Sprache. Bei den anderen, späteren Vereinheitlichungen war das anders: die alten Theorien blieben in ihrem Gültigkeitsbereich in ihrem Recht, wurden nur im Rahmen des neuen Weltbildes relativiert.

Misserfolge beim Streben nach Vereinheitlichung

Nachdem ich Ihnen von drei erfolgreichen Vereinheitlichungen in der Geschichte der Physik berichtet habe, lassen Sie mich von drei nicht erfolgreichen erzählen. Nicht etwa, dass es nur drei weitere Versuche gegeben hätte, die nicht erfolgreich gewesen sind. Es gab unzählige Versuche, von berühmten und weniger berühmten Männern der Physik. Aber zu den dreien, die ich erwähnen möchte, habe ich persönlich eine, wenn auch einseitige Beziehung.

Der berühmteste fehlgeschlagene Versuch einer weiteren Vereinheitlichung ist der von Albert Einstein, die Gravitationstheorie, wie er sie in der Allgemeinen Relativitätstheorie entwickelt hatte, mit der Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung zu vereinheitlichen. Nachdem Einstein mit 26 Jahren die spezielle Relativitätstheorie, mit 36 Jahren die allgemeine Relativitätstheorie entwickelt hatte, mit 42 Jahren den Nobelpreis für eine ganz andere herausragende Erkenntnis erhalten hatte, damit als der größte Physiker nach Newton gefeiert und verehrt wurde, wollte er diese letzte große Tat tun und damit sein Werk krönen. Es misslang: es war kein Prinzip zu finden, das "hinter" den bisher erfolgreichen Prinzipien und Gleichungen der Gravitationstheorie und der Elektrodynamik lag und sich in der Konfrontation mit experimentellen Tatsachen bewährte.

Einstein hat in diesem Bestreben viele Nachfolger: Hermann Weyl, Theodore Kaluza, Oscar Klein usw. Diese ganze Entwicklung steckte voll guter Ansätze und tiefer Gedanken, aber auch voll von Misserfolgen. Es war der falsche Weg zur Einheit. Wir wissen heute, dass es gerade die Gravitation ist, die sich am hartnäckigsten gegen eine Verschmelzung mit anderen Theorien sträubt.

Ein anderer, erfolgloser Versuch wurde mir, ich glaube es war 1959, bekannt, als ich noch Schüler in einem Gymnasium war. Heisenberg hatte (schon 1953) eine Feldgleichung für eine vereinheitlichte Theorie der Elementarteilchen aufgestellt, die sogenannte nichtlineare Spinortheorie. Ich hatte das in der Zeitung gelesen, dann während meines Studiums der Physik immer wieder danach Ausschau gehalten und schließlich auch in München eine einführende Vorlesung darüber gehört. Aber die Zeit ging über diese Theorie hinweg, die

mathematischen Schwierigkeiten, aus ihr etwas experimentell Zugängliches abzuleiten, waren zu groß. Bald erkannte man, dass der ganze Ansatz zu kurz gegriffen war.

Der dritte erfolglose Versuch, von dem ich berichten möchte, wurde noch schneller als solcher erkannt. Karl Friedrich von Weizsäcker, der in den 30er Jahren mit einem Modell für Atomkerne großen Erfolg hatte, schlug in den späten 60er Jahren eine vereinheitlichte Theorie für sogenannte Urteilchen vor. Ich war damals Doktorand in Hamburg am Deutschen Elektronensynchrotron, einem großen Forschungslabor für Teilchenphysik. Ich kann mich gut entsinnen, wie aufgeregt meine damaligen Professoren waren. Sie waren sehr skeptisch, luden von Weizsäcker zu einem Vortrag ein, und waren entsetzt. Der Ansatz war offensichtlich unprofessionell gewesen, entsprechend war die Resonanz in der übrigen Fachwelt, die ganze Sache blieb eine Episode.

Zeitgenössische Bestrebungen um die Einheit der Physik

Nachdem ich so von erfolgreichen und von erfolglosen Bemühungen um die Vereinheitlichung der Physik der fundamentalen Wechselwirkungen gesprochen habe, lassen Sie mich davon berichten, wie es heute um dieses Ziel steht. Ich kann da von zwei Entwicklungssträngen berichten, die beide die Gemeinschaft der Grundlagenphysiker sehr bewegen: die Formulierung einer "Großen Vereinheitlichten Theorie" für die elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung und schließlich die Entwicklung einer "Theorie für Alles", in der schließlich auch die Gravitation mit den anderen drei Theorien vereinheitlicht ist.

Dabei nimmt sich das erste dieser beiden Ziele, die Formulierung einer "Großen Vereinheitlichten Theorie" gegenüber der Entwicklung einer "Theorie für Alles" noch bescheiden und konventionell aus und zwar hinsichtlich der Methoden, die dabei Anwendung finden wie auch der Perspektive, die man nach Erreichung des Zieles gewonnen hätte. Eine "Theorie für Alles", für alle vier fundamentalen Wechselwirkungen, in der also schließlich auch die Gravitation eingeschlossen wäre, eine solche Theorie, die sich auch unter experimentellen Tests bewähren würde, wäre ein unerhörter Schritt für die Menschheit. Man besäße eine einheitliche Theorie für die fundamentalen Kräfte in der Welt, ein einheitliches Bild, in dem man die ersten Sekunden der Entstehung der Welt, die Entwicklung des Kosmos, den Aufbau der Elementarteilchen, der Kerne, der Atome, die Umwandlung der Teilchen untereinander usw. verstehen würde.

Ich will aber gar nicht erst versuchen, Ihnen die Ansätze für solche Art von Theorien auch nur näherungsweise zu vermitteln. Zu abstrakt, zu mathematisch komplex, zu unanschaulich sind diese. Dennoch kann man vielleicht einige Aspekte dieser beiden zeitgenössischen Bestrebungen einfach zur Kenntnis nehmen. Lassen Sie mich in diesem schwierigsten Kapitel meines Vortrags zunächst ein wenig von den Begriffen und Objekten, die in der heutigen Theorie der starken Wechselwirkung eine bedeutsame Rolle spielen, berichten. Ich will dazu anknüpfen, an das, was Sie vielleicht noch aus ihrer Schulzeit wissen, den Aufbau der Materie aus Atomen. Jeder Kubikzentimeter eines Stücks Materie besteht aus etwa 10^{23} Atomen. Die Atome sind heute sehr gut verstanden; der Zusammenschluss einiger weniger Atome zu Molekülen wird von der Molekülphysik, vieler Atome zu regelmäßigen Kristallgittern oder anderen Strukturen wird von der Festkörperphysik studiert. Der Aufbau der Atome, das sogenannte periodische System der verschiedenen Atomsorten ist Thema der theoretischen Chemie und der Atomphysik. Wir lernen dort, dass Atome aus einem Atomkern und einer Anzahl von Elektronen bestehen. Während die Elektronen Materieteilchen sind, die wir auch

heute noch als unteilbar bezeichnen, kann man noch eine Struktur des Atomkerns erkennen und auflösen. Der Kern besteht aus Protonen und Neutronen, Materieteilchen, die man auch bald als zusammengesetzt aus noch fundamentaleren Objekten erkannte.

Die Theorie der starken Wechselwirkung ist nun eine Theorie für diese noch fundamentaleren Objekte, den Bausteinen der Protonen und Neutronen. Sie heißen "Quarks", nach einem Kunstwort aus dem Roman "Finnegans Wake" von James Joyce. Irgendwie musste man einen Namen finden für diese Objekte, und M. Gell-Mann, der mit G. Zweig 1964 als erster eine Theorie für solche Bausteine der Natur aufstellte, las vermutlich zu jener Zeit diesen Roman und ließ sich bei der Namenswahl dadurch inspirieren. Bei den Quarks entdeckte man interessante, neuartige Eigenschaften und Funktionen, von denen ich nur drei erwähnen will:

1) Es gibt mehrere Sorten von Quarks, mindestens sechs. Zu jedem Quark gibt es auch ein entsprechendes Antiquark. Beim Stoß von Antiquark und Quark aufeinander werden beide vernichtet, die Materie und Bewegungsenergie geht in reine Strahlungsenergie über.

Jedes Quark besitzt zudem noch eine "Farbe". Dieser Begriff "Farbe" ist etwas irreführend, gemeint ist eine Ladung, ähnlich einer elektrischen Ladung. Diese Eigenschaft hat der Theorie auch den zweiten Namen gegeben: Quantenchromodynamik, wobei der Zusatz "Quanten" darauf hinweist, dass diese Theorie natürlich eine Quantentheorie ist. Ich kann aber leider nicht darauf eingehen, was eine Quantentheorie im Gegensatz zu einer klassischen Theorie ist.

2) Quarks sind neben den Elektronen (und anderen Leptonen wie Myonen, Neutrinos) heute die wirklich elementaren Teilchen, aus denen man sich nicht nur die Protonen und Neutronen zusammengesetzt denken darf, sondern alle anderen Materieteilchen (sofern sie nicht eben Leptonen sind), wie Mesonen und andere Baryonen. Dabei sind Mesonen aus einem Quark und einem Antiquark, Baryonen wie Protonen und Neutronen aus drei Quarks aufgebaut.

3) Quarks existieren nicht einzeln wie Protonen und Elektronen. Will man ein Quark aus seinem Verbund mit anderen Quarks herauslösen, so muss man sehr viel Energie zur Trennung, Überwindung der Anziehungskräfte aufwenden. Es stellt sich heraus, dass dabei nicht einzelne, freie Quarks erzeugt werden, sondern dass die aufgewandte Energie zum Teil materialisiert, zu weiteren Quarks wird und dass somit wieder nur andere, bekannte Teilchen, zusammengesetzt aus Quarks, erzeugt werden.

Alles, was ich bisher erzählt habe, ist relativ gut abgesichert durch experimentelle Untersuchungen. Dieses moderne Bild des Aufbaus der Materie wird nicht mehr angezweifelt, auch wenn es später, eingebettet in eine allgemeinere Theorie, vielleicht in einer etwas veränderten Sicht erscheinen wird.

Nun komme ich zu Entwürfen für eine solche große Vereinheitlichung. Ich möchte hier nur zwei Aspekte erwähnen.

Zunächst: Wir hatten gesehen, dass die wirklich elementaren materiellen Objekte heute die Quarks und die Leptonen sind. In der Großen Vereinheitlichten Theorie sind Quarks und Leptonen verschiedene Manifestationen eines Urteilchens.

Zweitens: In allen solchen Theorien ergibt sich, dass das Proton, der Baustein der Atomkerne und damit der gesamten höher strukturierten Materie, nicht mehr stabil ist, sondern zerfällt in andere, leichtere Teilchen, und zwar zunächst in ein δ -Meson und ein Positron, wobei das δ -Meson schließlich wieder in zwei Photonen zerstrahlt. Die mittlere Lebensdauer beträgt nach solchen Theorien allerdings 10^{31} - 10^{32} Jahre, eine unvorstellbare Zeit. Das Alter der Welt beträgt ja nach unserer heutigen Kosmologie etwa 10^{10} , also 10 Milliarden Jahre. Somit scheint zunächst der Protonzerfall nie messbar zu sein und damit die Instabilität des Protons ein irrelevanter Aspekt solcher Theorien.

Das stimmt aber nicht, da man nur im Mittel 10^{31} oder 10^{32} Jahre warten muss, bis ein Proton zerfällt. Protonen können auch viel früher und viel später zerfallen, erst im Mittel ergeben sich die 10^{31} Jahre und jede Lebensdauer hat eine bestimmte Wahrscheinlichkeit für sich. Kommen nun 10^{33} Protonen zusammen wie etwa in einem Bassin mit einer Breite, Länge und Tiefe von etwa 20-30 Metern, in dem diese 10^{33} Protonen in Form von 10.000 Tonnen Wasser Platz finden, so erwartet man etwa ein Dutzend Protonzerfälle pro Jahr bei einer mittleren Lebensdauer von 10^{31} Jahren. Solche Experimente werden tatsächlich unternommen, in USA in der Morton Salzmine östlich von Cleveland, in Europa im Montblanc-Tunnel oder in Indien in einer Goldmine. Diese Experimente versucht man so tief wie möglich in die Erde zu legen, um die störenden Effekte der kosmischen Höhenstrahlung möglichst gering zu halten.

Das Ergebnis aller dieser Bemühungen bis heute ist allerdings enttäuschend. Keine der vorgeschlagenen Theorien für eine Große Vereinheitlichung hat diesen Test bestanden. Man beobachtet nicht die Anzahl von Protonzerfällen, wie sie von den Theorien vorhergesagt wird. Die Situation ist unentschieden, vielleicht müsste man genauer messen, vielleicht die Theorien modifizieren. Die Zukunft wird es zeigen.

Diese Suche nach dem Protonzerfall zeigt aber drei Dinge ganz deutlich. Zunächst, alle diese Theorien sind zwar "Setzungen menschlichen Geistes", aber Hypothesen, die geprüft werden, ja, die zunächst einmal so formuliert werden, dass sie überhaupt prüfbar sind. Insofern sind es keine Spekulationen, Visionen oder Weltentwürfe, sondern präzise Hypothesen in mathematischer Form, aus denen auch in mathematischer Strenge Folgerungen gezogen werden können, die an der Wirklichkeit exakt überprüft werden können.

Das ist die gute Nachricht. Jetzt aber kommen zwei schlechte Nachrichten. Bei diesen Theorien wird es aber auch immer schwieriger, nicht prinzipiell, aber mathematisch-technisch, die Konsequenzen bis zu experimentell überprüfbar Aussagen theoretisch zu berechnen und zweitens, es wird immer auch immer schwieriger, Experimente zur Überprüfung zu entwerfen und auszuführen.

Diese drei Punkte gelten nun vollends für den größten Schritt, den die Menschheit in der Erklärung der Kräfte der Natur machen will, für die "Theorie für Alles", für die Vereinheitlichung aller vier fundamentalen Wechselwirkungen. Hier möchte man gerne zwei, aber sehr verschiedene konzeptionelle Ungereimtheiten der heutigen Beschreibung der Natur beseitigen und man glaubt, ein besseres Verständnis der Gravitationstheorie ist der Schlüssel dazu.

Die Gravitationstheorie Newtons bildete den Anfang der Physik überhaupt und wurde dann von Einstein in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie wesentlich modifiziert und erweitert. Man hat es aber bisher nie geschafft, aus dieser Theorie eine Quantentheorie zu machen, eine

Theorie also, die auch die Quantengesetze der Physik atomarer Dimensionen in sich trägt. Das konnte man bisher bei allen anderen Theorien für fundamentale Wechselwirkungen, und die Tatsache, dass das für die Einsteinsche Theorie nie gelang, mag darauf hindeuten, dass sie noch nicht die endgültige Form für eine Gravitationstheorie ist.

Die zweite konzeptionelle Ungereimtheit ist die, dass man, auch noch in einer Großen Vereinheitlichten Theorie, die fundamentalen Urteilchen immer noch als Punktteilchen betrachtet, also als Teilchen mit einer Ausdehnung eines mathematischen Punktes, nämlich keiner. Das ist sicherlich eine Idealisierung, die bisher keinen Anstoß erweckte, aber in einer "Theorie für Alles", der endgültigen Theorie aller Kräfte der Natur sollte diese Idealisierung keinen Platz mehr haben. Man versucht es so mit ausgedehnten Objekten, sogenannten schwingenden Saiten (strings). In der Tat gibt es mathematische Strukturen, motiviert durch solche Bilder von schwingenden Saiten, die man als eine Quantentheorie interpretieren kann und in denen dann auch die vier fundamentalen Wechselwirkungen in bestimmten Näherungen auftreten.

Die mathematischen Schwierigkeiten mit solchen Theorien sind aber enorm, ebenso aber auch die interpretatorischen. So kennt man bisher solche Theorien nur in Raumzeiten, die 10-dimensional sind. Die Welt wäre danach als eine 10-dimensionale entstanden und in den ersten Momenten der Evolution des Weltalls haben es vier Dimensionen geschafft, sich zu entwickeln, während die restlichen sechs "verkümmerten". Weiterhin sagt diese Stringtheorie eine Schattenwelt voraus, die wir optisch nie registrieren könnten, die sich nur über die gravitative Wechselwirkung bei uns bemerkbar machte.

Es gibt große Diskussionen über diese Theorie unter Grundlagenphysikern; es gibt Theoretiker, die sich ihr mit ganzer Arbeitskraft widmen und fasziniert sind von der Schönheit der Theorie und den Aussichten auf Erfolg. Es gibt aber auch Physiker, die die Stringtheorie rundweg ablehnen, als Irrweg bezeichnen. Tatsache ist, dass bisher keine Experimente zur Prüfung einer solchen Theorie in Aussicht stehen und dass mathematische Konsistenz und Schönheit alleine für eine einheitliche Theorie nicht ausreichen.

Wenn sich auch heute die Geister scheiden an diesen Stringtheorien, einig ist man sich über das Ziel, eine einheitliche Theorie der fundamentalen Kräfte zu finden. Es ist wahrscheinlich, dass diese --- vielleicht sogar in nicht allzu ferner Zukunft --- geschaffen wird: es dauerte 200 Jahre (von Newton bis Maxwell) bis zur zweiten Vereinheitlichung, nur noch 90 Jahre bis 1970 (von Maxwell bis Glashow, Salam und Weinberg) zur dritten Vereinheitlichung.

Es ist aber nicht sicher, dass wir sie finden. Steven Weinberg spricht das in seinem neuen Buch "Der Traum von der Einheit des Universums" aus: "Es könnte sein, dass Menschen einfach nicht intelligent genug sind, um eine solche endgültige Theorie zu entdecken oder zu verstehen."

Aber dieser Gedanke ist nur eine vorübergehende Anfechtung; Weinberg weiß auch: "Zum Glück scheinen wir noch nicht am Ende unserer intellektuellen Möglichkeiten zu sein. Es hat den Anschein, dass jede neue Studentengeneration gescheiter ist als die vorherige."

Mit diesen hoffnungsvollen Gedanken über den Nachwuchs an unseren Universitäten möchte ich den Vortrag beschließen.