

Die Stringtheorie

- Mehr als eine GUT(e) Theorie -

Eine Arbeit von Ralf Wunderlich.

Vorwort

Mit diesem Aufsatz möchte ich einige grundlegende Facetten der Stringtheorie erklären. Die einzelnen Abschnitte wurden unabhängig von einer Gliederung geschrieben und erst nachträglich geordnet und überarbeitet, um eine möglichst verständlichen Überblick zu schaffen (deshalb ist die Nummerierung der Anmerkungen etwas chaotisch). Dennoch könnte einem Leser, der noch nie etwas von der Stringtheorie gehört hat, dieser Text durchaus Probleme bereiten. Zudem ist an einigen Stellen leider eine gewisse physikalische Vorbildung zum leichten Verständnis von Nöten, da sonst der Rahmen dieser Abhandlung hätte gesprengt werden müssen.

Auf die komplexen mathematischen Aspekte der Theorie wird nicht eingegangen, weshalb auch mathematisch nicht vorgebildete Leser diesbezüglich keine Verständnisschwierigkeiten haben sollten. besser

Auch bei sorgfältiger Überarbeitung und aufmerksamen Lesen können sich Fehler einschleichen. Ich empfangen aus diesem Grunde unter flar-kontakt@web.de gern Verbesserungsvorschläge und Berichtigungen, um diese erste Auflage verständlicher zu gestalten.

Bleibt mir nur noch Ihnen viel Spaß beim Lesen zu wünschen.

Inhalt

1. Einleitung
2. Ein Schritt in die richtige Richtung
3. Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik
 - 3.1 Konflikt zwischen Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik
 - 3.2 Konfliktlösung
 - 3.3 Folgen für das Verständnis/Struktur der Raumzeit
4. Anfänge der Stringtheorie
5. Strings
 - 5.1 Strings als Elementarteilchenersatz
 - 5.2 Die Schwingungsmuster
 - 5.3 Teilcheneigenschaften aus den Schwingungsmustern
 - 5.4 Zu viele Spins und Schwingungen
6. Stringtheorie im Kampf
 - 6.1 Stringtheorie versus Standardmodell der Teilchenphysik
 - 6.2 Ordnung in der Teilchenphysik
7. Hochdimensionaler Raum
8. Die Mathematik der Stringtheorie
9. M-Theorie und Branen
 - 9.1 M-Theorie
 - 9.2 Branen
10. Anwendung auf das Ganze
 - 10.1 Kosmische Konsequenzen, kosmische Strings und Branenuniversum
 - 10.2 Das Universum im Lichte des Branenwelt-Szenarios
11. Experimenteller Beweis der Stringtheorie
12. Schlusswort
13. Anmerkungen
14. Quellen
 - 14.1 Textquellen
 - 14.2 Bildquellen

1. Einleitung

Seit jeher war die Aufgabe von Wissenschaftlern, und insbesondere Physikern, Theorien zu finden, die experimentelle Daten erklären. Dabei waren anfangs viele einzelne Theorien für ebenso viele unterschiedliche Situationen und besonderen Gegebenheiten notwendig. Mit der Zeit waren immer weniger Theorien erforderlich, da durch immer größere Gültigkeitsbereiche zahlreiche Phänomene zusammenfassend erklärt werden konnten. So schaffte es Maxwell zu zeigen, dass Elektrizität und Magnetismus nur zwei Seiten der gleichen Medaille sind, Newton erkannte, dass die Kraft, die einen Apfel vom Baum fallen lässt die gleiche ist, die die Planeten auf ihre Bahn zwingt, durch Albert Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie, mit der Newtons Gültigkeitsbereich auf lichtschnelle Geschwindigkeiten und extremste gravitative Bedingungen erweitert wurde, ist es sogar möglich kosmologische Untersuchungen anzustellen und so fort. Dieser Trend hat sich von den Anfängen der Wissenschaft bis zur Gegenwart durchgesetzt. Das finale Ziel der Physiker dieser Welt, ist es nun die Suche nach der einen, großen, vollendeten Theorie zu beenden.

Diese endgültige Theorie soll die vier fundamentalen Kräfte Gravitation, schwache Kernkraft, elektromagnetische und starke Kernkraft vereinen, und darüber hinaus den Konflikt zwischen der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantentheorie beseitigen, und damit die Grenze vom Großen und Kleinen verschwinden lassen.

Auch Albert Einstein war 30 Jahre, und somit einen großen Teil seines Lebens auf der „Jagd“ nach dieser vereinheitlichten Feldtheorie – aber selbst er blieb erfolglos. So ist diese Theorie bis heute noch ein unerfüllter Traum und die Suche danach glich lange Zeit eher einer Irrfahrt. Doch langsam lichtet sich der Nebel auf dem aufgewühlten, wissenschaftlichen Meer und erste Silhouetten einer solchen Theorie werden sichtbar.

Die nun im Folgenden besprochene (Super-)Stringtheorie stellt einen hochpotentiellen Kandidaten einer solchen nebellichtenden Theorie – einer theory of everything (TOE) - dar. Doch bis die Erkenntnis endlich im Hafen einläuft, werden höchstwahrscheinlich noch einige Jahrzehnte vergehen.

2. Ein Schritt in die richtige Richtung

Ein Schritt in die richtige Richtung gelang 1967 bereits den Physikern S.L. Glashow, S. Weinberg und A. Salam mit der theoretischen Beschreibung der elektroschwachen Wechselwirkung, die unter anderem für den β -Zerfall verantwortlich ist. Diese ist die Vereinheitlichung der Quantenelektrodynamik (QED), was der quantenfeldtheoretischen Beschreibung des Elektromagnetismus entspricht, und der schwachen Wechselwirkung. Zusammen mit der Quantenchromodynamik (QCD) bilden sie die Grundfesten des Standardmodells der Teilchenphysik.

Der experimentelle Nachweis der Theorie gelang erstmal indirekt 1973 (durch die Entdeckung der NC-Ströme) und später, im Jahr 1983, direkt durch die Detektierung von W- und Z-Eichbosonen, welche kernschwache Wechselwirkung vermitteln. Sie wirken auf Quarks, Leptonen und ihre Antiteilchen. Ein auffälliges Merkmal dieser Theorie ist die Verletzung der Parität, was eine Art der Symmetrieverletzung darstellt. Die Vereinigung zweier der vier fundamentalen Kräfte ist also schon vor fast 40 Jahren gelungen.

Der nächste Schritt wäre ein „Grand unification theory „ - kurz GUT. Als GUT, oder auf deutsch große vereinheitlichte Theorie, würde man eine Theorie bezeichnen, die

drei der vier Grundkräfte, die elektromagnetisch, die schwache und die starke Wechselwirkung in einem beschreibt. Die Gravitation bleibt dabei noch außen vor. Der experimentelle Nachweis einer GUT ist allerdings noch nicht erbracht und erfordert in diesem Rahmen auch keine weiteren Erläuterungen. Es ist allerdings gelungen die drei nichtgravitativen Kräfte in der gleichen quantenmechanischen „Sprache“ auszudrücken – Es sei nachdrücklich erwähnt, dass dies noch keiner Vereinheitlichung entspricht. Die Idee sowohl der GUT als auch einer TOE ist, dass bei hohen Energie, wie sie kurz nach dem Urknall herrschten, die vier fundamentalen Kräfte zu einer großen grundlegenden Kraft vereinheitlicht waren. Demnach sind die heute beobachteten vier Grundkräfte nur Erscheinungsformen einer einzigen großen Kraft. Bedingung dafür wäre, dass bei hohen Energien, was hier analog zu hohen Temperaturen zu verstehen ist, die starke Kernkraft relativ zur elektromagnetischen und auch schwachen Kernkraft kleiner wird, bis sich alle drei Kräfte in einem Punkt beziehungsweise einer Energie treffen (siehe Abb.1). Bei dieser Energie, die sich mindestens im Bereich von einer Billiarde GeV aufhält, hätten

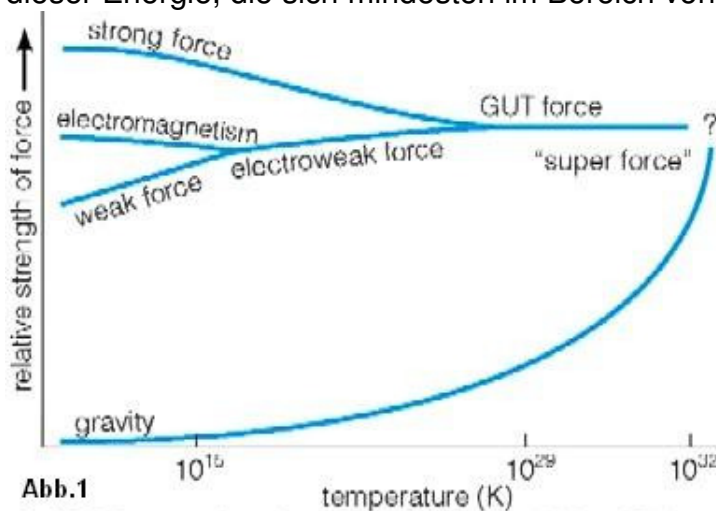


Abb.1
© 2005 Pearson education, Inc., publishing as Addison Wesley

alle drei die gleiche Kraft und wären somit ein und dieselbe Kraft. So wären in diesem Zustand auch die Fermionen, wie es Elektronen und Quarks sind, in großem Maße vereinheitlicht.

Einen direkten experimentellen Beweis für eine solche Vereinheitlichung wird es wohl nie geben, da die benötigten Energien das auf der Erde Machbare bei Weitem überschreiten. Es wären riesige Teilchenbeschleuniger nötig.

Allerdings könnte ein indirekter Beweis mit dem Nachweis eines Protonenzerfalls möglich werden.

Will man das Universum vollends beschreiben, muss zudem noch die Gravitation in diese Überlegungen einbracht werden. Erst dann spricht man von einer TOE, wie die Superstringtheorie eine sein könnte (in Abb.1 mit einem Fragezeichen symbolisiert).

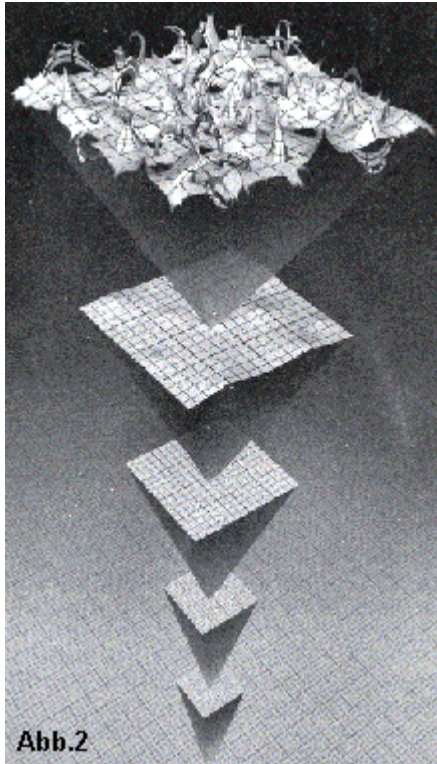
3. Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik

An dieser Stelle muss ich die grundlegendsten Kenntnisse über allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenmechanik voraussetzen, um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen. Mathematisches Verständnis der Theorien wird dabei nicht benötigt.

3.1 Konflikt zwischen Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik

Will man die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie mit denen der Quantenmechanik verbinden, so entsteht dabei fast immer unendlich als Lösung. Das kann aber nicht richtig sein, da es weder unendliche Wahrscheinlichkeiten, unendliche Messwerte oder sonst irgendwas sinnvolles Unendliches gibt – nur sehr selten ergibt „unendlich“ in der Physik einen Sinn. Aber wie kann das sein?

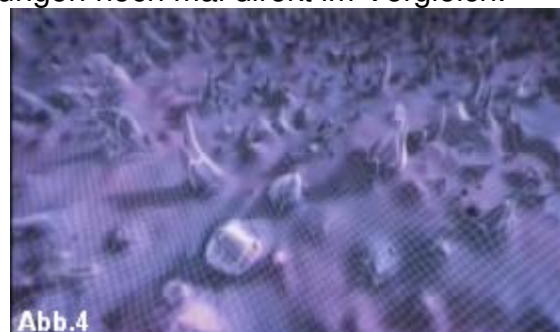
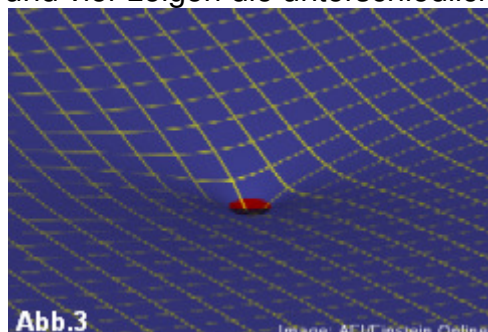
Albert Einstein ging bei dem Entwurf seiner Gleichungen von einer gewölbten, ruhig gekrümmten Raumzeit aus (Abb.2 vierte Vergrößerungsebene).



Die Quantenmechanik und im Speziellen die Heisenbergsche Unschärferelation lehrt uns bei genauerem hinsehen aber etwas ganz anderes. Es zeigt sich ein turbulentes wild brodelndes Bild des Raumes bei kleinen Größenskalen (Abb.2 obere Fläche). Um das genauer zu verstehen sei noch mal das Wesen der Unschärferelation angeführt: Es ist unmöglich die Geschwindigkeit und den Ort eines Teilchens oder die Energie und die Energieänderung im nächsten Augenblick eines Feldes gleichzeitig zu bestimmen. So zeigte beispielsweise der holländische Physiker Hendrik Casimir theoretisch, dass zwei, in einem nach klassischen Gesichtspunkten leeren Raum, parallel und nah beieinander aufgestellte Metallplatten zusammengepresst werden. Der Grund dieses, nach ihm benannten, Casimireffektes sind unverhinterliche Vakuumfluktuationen im vermeintlich leeren Raum. Durch sie werden unter anderem ständig elektromagnetische Wellen erzeugt. Allerdings wird die Vielfalt der physikalisch

möglichen Wellenlängen zwischen den Metallplatten relativ zur Umgebung eingeschränkt². Dieser winzige Unterschied der möglichen elektromagnetischen Feldschwankungen erzeugt einen Druck von außerhalb der Platten, der diese zusammenrücken lässt. Faszinierend! Und was hat das jetzt mit der Relativitätstheorie zu tun oder gar mit der Vereinheitlichung? Das lässt sich in wenigen Sätzen formulieren. Nicht nur der Elektromagnetismus besitzt ein Feld, sondern auch die Gravitation. Damit ist auch das Gravitationsfeld solchen Schwankungen ausgesetzt. Da aber nach Einstein das Gravitationsfeld ein Synonym für die Raumzeitkrümmungen ist, ist der Raum selbst, genauer die gesamte Raumzeit, solchen Fluktuationen unterworfen. Wem immer noch nicht klar ist, warum das so fatal ist, der sein daran erinnert, dass die Allgemeine Relativitätstheorie von einer kontinuierlich und sanft gekrümmten Raumzeit ausgeht, und nicht von einem quantenmechanischen Hexenkessel, in dem unterhalb der Plancklänge (10^{-33} cm) und Planckzeit (10^{-43} s) all unsere Begriffe von Raum und Zeit ihre Gültigkeit verlieren und sinnlos erscheinen.

Dies ist wohl die eindringlichste Art und Weise die Schwierigkeit der Verflechtung dieser zweier großen Theorien zu verstehen. Die nachfolgenden Abbildungen drei und vier zeigen die unterschiedlichen Auffassungen noch mal direkt im Vergleich.



Aber warum sollte man diese beiden Theorien eigentlich verbinden wollen. Man kann doch für die ganz großen Dinge im Universum und für den Kosmos selbst die Relativitätstheorie zu Rate ziehen und die Quantenmechanik außer acht lassen, da ihre Effekte auf solchen Größenskalen keine Rolle spielen. Umgekehrt geht man vor, wenn es sich um kleine Dinge, wie Atome und subatomare Teilchen handelt. Oft ist dies auch der vernünftigste Weg zur Lösung eines Problems, aber es gibt dennoch genügend Gründe eine Vereinigung der beiden Theorien anzustreben. Zum einen sind nicht alle Objekte im Universum automatisch leicht, wenn sie klein sind, sodass die Gravitation vernachlässigt werden kann. Im Falle eines Schwarzen Lochs ist eine enorme Masse von bis zu vielen Millionen Sonnenmassen auf einen Punkt zusammengepresst, sodass extremste Raumzeitkrümmungen entstehen. Will man diese kompakten Objekte verstehen, so ist man gezwungen sowohl die Gleichungen der Quantenmechanik zu verwenden als auch die Gravitation zu berücksichtigen.

Ein anderes Beispiel legt der Kosmos selbst nahe. Denn zu dem „Zeitpunkt“ deiner Entstehung, noch zuvor seiner inflationären Expansion, war die Gesamtmasse/-Energie des ganzen Universums auf einen Bereich zusammengepresst, die die Abmessungen der Planckskala unterschreiten. Auch hier ist man unweigerlich auf eine „Vereinheitlichte Theorie“ angewiesen, wenn man diesen Zustand der Extreme je begreifen möchte.

Und noch einen Grund möchte ich anbringen. Wieso sollte man für ein und dasselbe Universum zwei verschiedene Theorien haben, um alles beschreiben zu können. Es ist einfach intuitiv unbehaglich zu wissen, dass man eine imaginäre nicht näher definierbare Grenze zwischen „Großem“ und „Kleinen“ ziehen muss, auf deren einer Seite die eine auf deren anderer Seite die andere Theorie die Vorherrschaft behält. Diese und andere Beispiele lassen Physiker davon ausgehen, dass es eine große allumfassende Theorie geben muss.

3.2 Konfliktlösung

Wie überwindet man nun die Hürde der unterschiedlichen Auffassungen über die Beschaffenheit des Raumzeitkontinuums, mit der sanft gewogenen Raumzeit der Relativitätstheorie auf der einen Seite, und der turbulenten quantenmechanischen Welt unterhalb der Plancklänge auf der anderen.

Die Antwort ist ebenso simpel wie genial.

Der Raum und seine Beschaffenheit (Krümmung) ist nach der Allgemeinen Relativitätstheorie nichts anderes als das Vorhandensein eines Gravitationsfeldes. Da das Graviton, das Botenteilchen der Gravitation, auf das man bei der Betrachtung sehr kleiner Skalen zwangsläufig zurückgreifen muss, in der Stringtheorie kein Punktteilchen ist, wie in jeder anderen vorher gescheiterten Theorie zur Vereinigung, sondern wie jedes andere Teilchen in der Stringtheorie aus einem endlich ausgedehnten String (mit der Länge im Bereich der Plancklänge) hervorgeht, kommt man erst gar nicht in den, aus der Heisenbergschen Unschärferelation hervorgehenden, unvereinbaren turbulenten Bereich der Raumzeit, in dem die Vereinigung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik unmöglich ist. (Erst in einem späteren Kapitel wenden wir uns im Besonderen den Strings zu.) Es macht einfach keinen Sinn sich etwas kleineres vorzustellen als einen String, da selbst der Raum, in der allgemeinen Relativitätstheorie noch als einheitlich dargestellt, im Plancklängenbereich aus Gravitonen besteht und eben diese erst den Raum bilden. Es ist also unmöglich den Raum oder die Zeit genauer als bis zur Plancklänge aufzulösen. Da der Raum selbst die plancklangen Strings mit dem

Gravitonenschwingungsmuster ist, ist auch der Raum nicht unter der Planckskala untersuchbar, womit man sich der unerwünschten ausgeprägten quantenmechanischen Turbulenzen entziehen kann. Es sind zwar durchaus noch quantenmechanische Unschärfen in Gravitationsfeld, also in der Raumzeit, vorhanden, aber diese sind gerade noch durch mathematisch machbare Abänderungen der allgemeinen Relativitätstheorie zu beherrschen. Somit setzt die Idee der nichtpunktuellen, ausgedehnten Teilchen eine Grenze der Beschaffenheit des Raums, die letztendlich die Vereinigung der zwei fundamentalen Säulen der modernen theoretischen Physik ermöglicht.

3.3 Folgen für das Verständnis/Struktur der Raumzeit

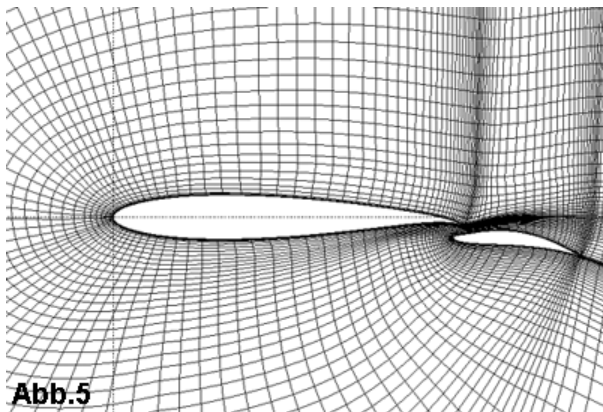


Abb.5

Offensichtlich wird das Verständnis von Raum und Zeit als etwas Kontinuierliches beträchtlich in Frage gezogen – man kann nicht mehr vom Begriff Raumzeitkontinuum Sprechen. Mit anderen Worten, es ist nicht möglich die Raumzeit in beliebig kleine Stückchen zu „zerschneiden“. Ab der Plancklänge und der Planckzeit⁷ ist dies einfach nicht mehr möglich. Der Begriff „kleiner“ hat im Bereich der Plancklänge

keinen Sinn mehr. Es gibt kein kleineres Raumstück, als ein String.

Es sei nochmals angemerkt, dass dies bei Punktteilchen nicht der Fall ist. Bei dieser Teilchenauffassung kann man unendlich kleine Raumregionen betrachten ohne je an ein Ende zu stoßen. Da der Raum aber aus Gravitonstrings aufgebaut ist, wird dem zerschneiden der Raumzeit bei der Plancklänge ein jähes Ende gesetzt. Demnach lässt sich die intuitive Alltagserfahrung von Raum und Zeit nicht auf die Skala der Strings übertragen. Wie es nun wirklich ist, ist noch nicht klar. Es könnte zum Beispiel folgendermaßen sein. Wenn sie von einem Ort zum anderen gehen, dann durchqueren sie den Raum nicht kontinuierlich von hier nach dort, sondern springen von String zu String. Der Raum, und auch die Zeit, würden tatsächlich ein feines Gitter darstellen, außerhalb der Streben dieses selben keine reale physikalische Welt existiert (ähnlich Abbildung 5). Demnach gibt es kein Raumstück kleiner als die Plancklänge oder ein Zeitintervall kürzer als eine Planckzeit.

Es wäre auch möglich, dass sich die Begriff von Raum und Zeit in ultramikroskopischen Längen und Zeiten in noch fundamentalere Konzepte selbiger auflösen, die ein „kleiner als die Plancklänge/zeit“ sinnlos machen, so wie es sinnlos ist zu Fragen, ob ein Taschenmesser traurig ist.

Das wiederholte Zerteilen der Raumzeit wird also nicht durch ein fundamentales Raumzeitgitter gestoppt, sondern, weil die neuen Konzepte dem weiteren zerteilen einfach den Sinn entziehen.

4. Anfänge der Stringtheorie

1968 arbeitet der junge Wissenschaftler Gabriele Veneziano am CERN daran die starke Kernkraft durch Auswertung von Messdaten, die bei hochenergetischen Teilchenstöße im Teilchenbeschleuniger aufgenommen worden, zu verstehen. Nach monatelanger Analyse fiel ihm auf, dass eine von dem berühmten Mathematiker

Leonard Euler entdeckte Formel – die Eulersche Betafunktion - die Messergebnisse exzellent beschreiben vermochte. Doch er wusste nicht, warum die Betafunktion so hervorragend zu den Messungen passte. Jegliches tieferes physikalisches Verständnis der starken Kernkraft blieb ihm verborgen. Zwei Jahre später erkannten Leonard Susskind und Andere, wie man die Daten im Einklang mit der Betafunktion interpretieren konnte. Sieht man die starke Kernkraft zwischen zwei Teilchen als eine Art sehr dünnes, elastisches Gummiband an, so lassen sich die Quantenprozesse, die Veneziano nicht verstand, durch die Betafunktion erklären. Die kleinen elastischen Stränge wurden als Strings (Saiten) bezeichnet und der Grundstein zu Stringtheorie war gelegt. Doch erst nach einiger Zeit wollte eine Zeitschrift seinen Aufsatz veröffentlichen. Aber seine Theorie fand in der damaligen wissenschaftlichen Welt kaum Anklang. Kurz darauf haben Experimentatoren zudem genauere Messdaten der starken Kernkraft aufgenommen, mit denen Susskinds Rechnungen nicht mehr übereinstimmten, sodass 1974 niemand mehr an der Stringtheorie interessiert war. John Schwarz war einer der sehr wenigen Physiker, der die Stringidee einfach nicht loslassen konnte – irgendwas war an ihr besonders. Da die Theorie angesichts der neu entdeckten Quantenchromodynamik, die die starke Kraft bestens beschreiben konnte, keine Chance mehr auf diesem Gebiet hatte, wandten sich immer mehr Physiker von ihr ab. Doch Schwarz entdeckte, dass die quantenmechanischen Gleichungen der Stringtheorie ein masseloses Teilchen mit dem Spin zwei in großen Mengen bei Stößen im Teilchenbeschleuniger vorhersagte. Er und sein Kollege Scherk behaupteten es handle sich um Gravitonen³. Dies ermutigte sie auf diesem Feld weiter zu forschen, da es den Anschein machte es sei eine Theorie gefunden, die die Gravitation mit quantenmechanischen Eigenschaften verknüpfen konnte. Sie gingen also nun davon aus, dass die Stringtheorie keine Theorie der starken Kernkraft ist, sondern vielmehr eine potentielle Vereinigte Theorie. Nun, das klingt ein wenig nach der Suche einer Anwendung für eine bisher erfolglose Theorie, die man einfach nicht aufgeben will. Und als die beiden 1974 ihren Vorschlag veröffentlichten, regierte die Fachwelt auch dementsprechend und niemand nahm ihre Berechnungen ernst.

Schwarz jedoch ließ sich nicht beirren und arbeitete die nächsten Jahre mit Michael Green daran die Stringtheorie zu verbessern. Denn sie hatte ein ziemlich fatales Problem. In ihren Gleichungen wimmelte es von Anomalien, wie zum Beispiel Verstöße gegen den heiligen Energieerhaltungssatz. Nach intensiver Arbeit ließ sich aber zeigen, dass sie alle Anomalien, die in Zwischenrechnungen auftauchten sich auf fast wundersamer Weise in der Gesamtrechnung wieder aufhoben. Ausgezeichnet, einer der stärksten Schwachstellen der Theorie war somit ausgemerzt. Angesichts der parallel dazu verlaufenden Erforschung der nichtgravitativen Teilchenwelt durch Punktteilchentheorien hatten die „konventionellen“ Physiker viel Erfolg gehabt und hatten die vorrangigen Rätsel gelöst (wenn auch bei weitem nicht alle), und waren nun bereit sich einen neuen aktuellerem Problem, dem der Vereinigung der Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik zuzuwenden. Das war die Stunde von Schwarz und Green. Sie konnten nun eine mathematisch stabile Grundidee liefern, die das Problem lösen konnte – und die Wissenschaftswelt war ganz Ohr. Schlagartig wuchs die Anzahl der Stringtheoretiker auf über tausend an.

5. Strings

Strings sind die elementaren Bestandteile der gleichnamigen Theorie und zugleich ihre grundlegende Idee.

5.1 Strings als Elementarteilchenerersatz

Es gibt einen entscheidenden Vorteil der S-Theorie gegenüber der klassischen Vorstellung von Elementarteilchen als Punktteilchen ohne räumliche Ausdehnung. Denn ohne Länge, Tiefe und Höhe treten bei Interpretationen klassischer Formeln Singularitäten auf. Ich möchte das klassisch betrachtete Elektron als Beispiel für eine Singularität heranziehen. Nach dem elektromagnetischen Kraftgesetz nimmt die Kraft mit dem Quadrat des Abstandes zu beziehungsweise ab. Stellt man sich nun vor, immer näher auf eine Elektron heran zu zoomen, also den Radius zu verkleinern, so würde die elektromagnetische Kraft bei $r=0$ schließlich einen unendlich Wert erreichen – man spricht von einer Singularität¹. Die S-Theorie vermeidet dies, indem sie die Teilchen nicht mehr als punktuell ansieht, sondern ihnen eine Länge zuschreibt. Teilchen sind demnach keine Punkte mehr, sondern können viel mehr als winzig kleine schwingende Fädchen (englisch „string“ = „Faden“ oder „Saite“) bezeichnet werden. Oft werden dazu schwingende Saiten auf einer Geige als treffendes Analogon gewählt. Diese Strings können sowohl endliche, zweiendige Objekte, als auch geschlossene Gebilde sein (siehe Abbildung 6). Darüber hinaus wird sich später herausstellen, dass sogar flächenbehafte und höherdimensionale Branen in dieser Theorie vorkommen. Dazu aber erst später mehr.

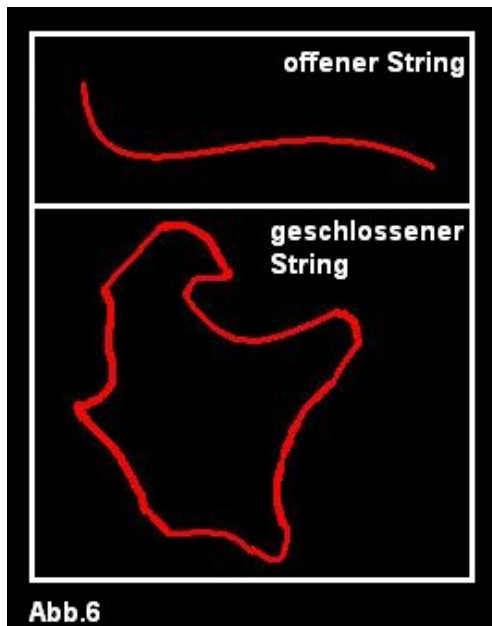


Abb.6

Strings besitzen, wie Geigensaiten, eine Resonanzfrequenz die allerdings um einiges höher ist. So gibt das Schwingungsmuster eines Strings auch nicht einen Ton an, sondern äußert sich in Form eines Elementarteilchens. Je nach Schwingung wird also aus einem String ein Elektron, ein Quark oder sonst ein Elementarteilchen – allein abhängig von der Schwingung ergibt sich für den String eine Ladung, eine Masse und die restlichen Eigenschaften des betreffenden Teilchens! Dabei besitzen die Strings eine Länge, die ungefähr der Plancklänge ($1,61624 \cdot 10^{-35}$ m) entspricht.

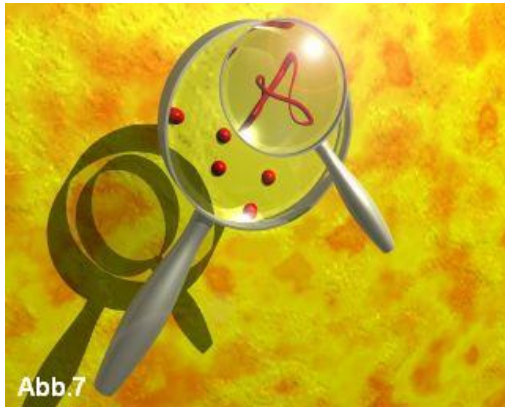
Der „Trick“, den Strings die Plancklänge zu zuschreiben, beantwortet auch die Frage, warum Abstandsmessungen kleiner als in dieser

Größenordnung sinnlos beziehungsweise unmöglich sind. Außerdem entzieht sich die Stringtheorie der schwierigen Interpretation, dass Punktteilchen sowohl partikelhafte, als auch wellenartige Eigenschaften haben können.

Kurz zusammengefasst kann man sagen: Der Stringtheorie zufolge lassen sich also alle Teilcheneigenschaften durch schwingende Objekte erklären.

5.2 Die Schwingungsmuster

Es sei zuerst noch mal angemerkt, dass ein String, der ein Elektron darstellt, nicht etwa eine Elektronenstring ist, und ein anderer String, der ein Myon-Neutrino darstellt ein anderer – ein Myon-Neutrino-String – ist. Nein, es handelt sich in beiden Fällen um ein und die selbst Art von fundamentalen String, der einzig und allein durch sein Schwingungsmuster die entsprechenden Massen, Ladungen usw. erzeugt, die wir dann als Elektron, Myon-Neutrino, oder als sonst einem Elementarteilchen wahrnehmen. Gleiches gilt natürlich auch wieder für die uns schon bekannten

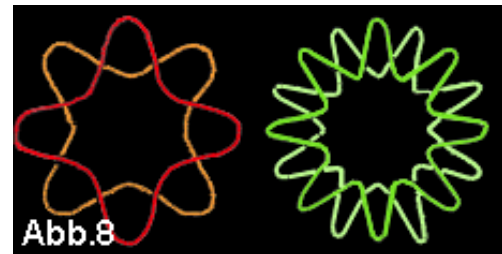


Botenteilchen. So gibt es zum Beispiel ein Schwingungsmuster eines Strings, das uns genau ein Photon sehen lässt, ein anderes Muster zeigt ein Z-Boson und so fort. Besonders dabei ist, dass 1974 Scherk und Schwarz auch ein Schwingungsmuster mit allen Eigenschaften des Gravitons fanden – die Stringtheorie hat für die Gravitation einen quantenmechanischen Ansatz gefunden. Allgemein möchte ich zu den Übertragerteilchen der Fundamentalkräfte noch erwähnen, dass die Länge der mit den Teilchen assoziierten Strings proportional zu der Stärke der übertragenen Kraft. So hat zum Beispiel das Gravitonstring, als Überträger der schwächsten Kraft, ungefähr die hundertfache Plancklänge.

5.3 Teilcheneigenschaften aus den Schwingungsmustern

Die am einfachsten verständliche Eigenschaft, die ein Schwingungsmuster hervorbringt ist die Masse.

Dazu verwendet die Stringtheorie Einsteins Masse-Energie-Äquivalenz $E=mc^2$. Demnach wird die Energie eines schwingenden Strings einfach in seine Masse umgewandelt. Desto stärker und heftiger ein String schwingt, desto größer wird auch seine beobachtete Masse. Dabei für zum Beispiel der String eines masselosen Photon eine denkbar ruhige und sanfte Schwingung aus. Dass diese sanfte Schwingung, die ja gewiss eine geringe, aber sicher von Null verschiedene Energie besitzt, keine Masse hervorbringt, liegt an der quantenmechanischen Unschärfe, die eine Schwingung mit negativer Energie beisteuert, die letztendlich ein masseloses Teilchen ermöglicht. Schwere und nur mathematisch erklärbar, aber mit dennoch der gleichen Grundidee, lassen sich auch die anderen Eigenschaften, wie Spin oder elektrische Ladung aus den einzelnen Schwingungseigenschaften beschreiben. Letztendlich ist es möglich alle beobachtbaren Teilcheneigenschaften aus dem entsprechenden Schwingungsmuster beschwören.



5.4 Zu viele Spins und Schwingungen

Zu Beginn der Siebziger ergaben sich aus der ersten Stringtheorie – der bosonischen Stringtheorie – die ersten Schwingungsmuster und die damit verbundenen Eigenschaften der Elementarteilchen. Allerdings fand man nur Muster die einen ganzzahligen Spin, sprich null, eins, zwei und so fort entsprachen. Nun wird auch der Name „bosonische Stringtheorie“ klar, da Bosonen, wie W- und Z-Teilchen oder Photonen als Überträger der elektromagnetischen Kraft, derartige Spins aufweisen. Materieteilchen wie Quarks und Elektronen weisen hingegen gebrochenezahlige Spins, wie etwa $+1/2$ auf. 1971 gelang es Pierre Ramond schließlich die Gleichungen abzuändern, was auch halbzahlige Spins als Ergebnisse ermöglichte.

Wie diese und viele weitere Forschungsarbeiten zeigen, legte diese abgeänderte Theorie eine ganz neue Symmetrie offen. Erstaunlicherweise entstanden die Spins

immer in Paaren mit einem halben Spin Abstand. Die supersymmetrische Stringtheorie oder Superstringtheorie⁸ war gefunden!

Damit ist ein entscheidender Schritt getan, aber Elementarteilchen weisen weit mehr Eigenschaften als nur ihren Spin auf. Und auch diese müssen von den Schwingungsmustern übereinstimmend mit den Experimenten erklärt werden. Es muss also zum Beispiel, um das Photon im Rahmen der Stringtheorie widerspruchsfrei zu beschreiben, ein Schwingungsmuster unter vielen mit Spin 1 gefunden werden, welches zusätzlich masselos und keine elektrische Ladung besitzt. Will die Stringtheorie wirklich den Platz der großen vereinheitlichten Theorie in Anspruch nehmen, muss sie dies nicht nur für das Photon, sondern auch für alle anderen Boten- und Materieteilchen leisten, die in den Anmerkungen fünf und sechs zu finden sind – und für eventuell noch unentdeckten Elementarteilchen.

Nun, dabei ergeben sich einige Schwierigkeiten. Nicht nur, dass es unendlich viele Schwingungsmuster gibt, es ergeben sich schier riesige Massen für Elementarteilchen, die allesamt Vielfache der, für die Teilchenwelt enormen, Planckmasse (ungefähr 10^{-8} kg). Abgesehen von der Version Null Mal die Planckmasse liegen die Ergebnisse alle Außerhalb der Realität, da kein bekanntes Elementarteilchen auch nur im Entferntesten die einfache Planckmasse besitzt. Der Grund für dieses gravierende Missverständnis zur realen Welt liegt in der Winzigkeit der Strings. Da die Festigkeit eines String umgekehrt proportional zum Quadrat der Länge ist, ergibt sich für die typische Stringlänge eine exorbitale Spannung von 10^{39} Tonnen.

Und einen String dieser Steifheit auch nur in die einfachsten Schwingungsmuster zu „biegen“ erfordert dermaßen viel Energie, dass gemäß $E=mc^2$ die enormen Massen zustande kommen.

Die Stringtheoretiker entgegnen auf diesem Einwand, dass Null Mal die Planckmasse doch eine gute Näherung für die kleinen Massen der Elementarteilchen ist. So ist das schwerste aller Elementarteilchen, das top-Quark (etwa 10^{-17} fache Planckmasse), mit einer Genauigkeit von 10^{-17} Null Mal die Planckmasse schwer. Außerdem sei es durchaus möglich, dass die theoretischen Teilchen mit Vielfachen der Planckmasse in leichte Teilchen verfallen könnten. Das für Elementarteilchen verhältnismäßig massereiche top-Quark zerfällt zum Beispiel schon innerhalb von 10^{-24} Sekunden, weshalb nie auch nur ein Teilchen mit einfacher Planckmasse beobachtet werden würde. Diese Näherung zu verbessern ist ein dringliches Problem der Theoretiker. Leider ist die Liste der Probleme noch nicht beendet. Mitte der achtziger Jahre errechnete man alle masselosen Schwingungsmuster, worauf sich herausstellte, dass nicht nur das verheißungsvolle Graviton mit dem Spin 2 gefunden wurde, sondern auch viel mehr Muster die die Spins eins oder einhalb besaßen, als es Elementarteilchen gibt. Auch war unten den Teilchen mit einem halben Spin keinerlei Familiengruppen zu erkennen, wie es das Standardmodell der Teilchenphysik vermochte zu zeigen.

Der Schlüssel zur Lösung liegt in der Form der Extradimensionen – die anfangs fälschlicherweise ebenso flach, wie die drei ausgedehnten Dimensionen angenommen wurden. Die Form und Größe der zusätzlichen Raumdimensionen ist nämlich von essenzieller Bedeutung für die möglichen Schwingungsmuster. So konnte Edward Witten und andere mit dieser Einsicht das Problem der Teilchenfamilien lösen. Auch die Teilcheneigenschaften selbst konnten dadurch in guter Näherung beschrieben werden, wie wir bald sehen werden.

6. Stringtheorie im Kampf

Was macht die Stringtheorie so besonders und lässt sie im Vergleich zu anderen Modellen triumphieren?

6.1 Stringtheorie versus Standardmodell der Teilchenphysik

In den Sechziger und Siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelten Physiker basierend auf Daten vieler Beschleunigerexperimente und der Quantenmechanik ein sehr fähiges Modell der mikroskopischen Teilchenwelt – das Standardmodell der Teilchenphysik. Dieses beschreibt die Verhältnisse und Vorgänge aller Materieteilchen und Botenteilchen, ausgenommen der Gravitation, hervorragend genau. Von einem so ausgereiften und erfolgreichen Modell ist die Stringtheorie allerdings noch weit entfernt.

Doch das Standardmodell der Teilchenphysik lässt nicht nur die Gravitation außen vor, sondern sie findet auch keine Antwort warum die aus den Beschleunigerexperimenten ermittelten Daten die gefundenen Werte aufweisen. Warum ist die Ladung des Protons genauso groß wie die des Elektrons, dessen Masse aber 1836 Mal kleiner als eines Protons. Warum wiegt das Myon 23,4 Mal so viel wie ein up-Quark, warum gibt es überhaupt so eine große Anzahl von Teilchen im Universum und so fort.

Das Standardmodell der Teilchenphysik braucht all diese Daten aus den Experimenten ehe es seine exzellenten Hervorsagen machen kann. Die Stringtheorie versucht hingegen diese fundamentalen Fragen in sich zu klären, als ein natürlicher Bestandteil der Theorie selbst – die Schwingungsmuster bestimmen die Teilcheneigenschaften.

6.2 Ordnung in der Teilchenphysik

Wie schon erwähnt stellen verschiedene Schwingungsmuster eines Stings alle unterschiedlichen Teilchen dar. Dabei sei aber gesagt, dass es sich nicht nur um alle Materieteilchen⁵, sondern auch um alle Botenteilchen⁶ der Fundamentalkräfte handelt. Wie man den Anmerkungen leicht entnehmen kann gibt es eine Fülle von Elementarteilchen, dessen unerklärlichen Umfang sich die Stringtheorie aber entledigen kann. Warum sollte es auch so viele verschiedene Teilchen geben. Die Punktteilchenphysik kann diesen vielfältige Vorkommen nicht erklären. Ganz anderes die Stringtheorie. Wie schon gesagt sorgen die unterschiedlichen Schwingungsmuster der Strings das Zustandekommen der verschiedenen Eigenschaften, die letztendliche ein bestimmtes Teilchen ausmachen. So bringt die Theorie auf ganz natürliche Weise Ordnung in die undurchsichtige Welt der Elementarteilchenphysik.

7. Hochdimensionaler Raum

Kommen wir gleich zu Beginn wieder zu einem Hindernis, dass sich die Stringtheorie in den Weg stellt. Nur in einem Universum mit drei Raumdimensionen können Planeten eine stabile Umlaufbahn um Sterne haben. Sind mehr als drei Raumdimensionen vorhanden, wie es die Stringtheorie verlangt, so würden Planeten, bevor sie noch entstehen könnten, in ihre Zentralgestirne hineinfallen. Die Tatsache, dass stabile Planetenbahnen existieren, ist ein starker Widerspruch zur

Stringtheorie, die mit nur drei Raumsdimensionen nicht auskommt. Die Schwingungsmuster die die Strings ausführen müssten, um die beobachteten Teilchen darzustellen, verlangen zwingend nach nicht vier, fünf, sechs oder einer sonstigen Raumsdimensionanzahl, sondern nach exakt zehn – ansonsten verlieren die Gleichungen ihre Gültigkeit. Damit ist die Stringtheorie die erst physikalische Theorie, die eine begründete Aussage über die Anzahl der Dimensionen unseres Universums macht. Deshalb bedient sich die Stringtheoretiker, wie so oft, einen eleganten mathematischen Trick. Sie nehmen an, dass zwar elf Raumsdimensionen⁴ existieren, wir aber aus dem Grund, dass nur drei davon groß genug sind, um sie wahrnehmen zu können. So kann man sich die elf Dimensionen wie ein kleiner Wollknäuel elf aufgewickelter Wollfäden vorstellen, wobei nur drei der elf Wollfäden entwirrt und erkennbar sind.

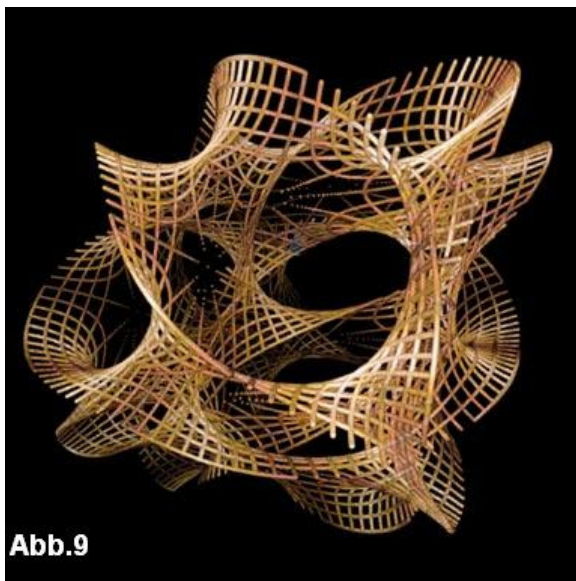


Abb.9

Dieser „aufgewickelte“ Raum wird mathematisch durch so genannte Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten (graphische Darstellung Abb.9) beschrieben – benannt nach dem italienischen Mathematiker Eugenio Calabi und dem chinesischen Mathematiker Shing-Tung Yau. Später mehr dazu. Aber warum fordert die Stringtheorie so viele Extradimensionen? Um die Vielzahl verschiedener Elementarteilchen, aus dem unser Universum besteht und die in diesem erzeugbar sind, durch Strings zu beschreiben benötigt es mehr „Schwingungsrichtungen“, als es nur mit drei Raumsdimensionen möglich wäre.

Die Idee versteckter Extradimensionen gibt es schon seit Beginn des 20. Jahrhunderts. 1919 erreichte Albert Einstein ein Brief von einem Mathematiker Namens Theodor Kaluza, in dem er eine Erweiterung der Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie um eine Dimension Vorschlag. Aus diesem doch mathematisch recht simplen Trick ergeben sich doch verblüffende Konsequenzen. So erkennt Kaluza, dass sich dadurch aus den Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie die Maxwellgleichungen für den Elektromagnetismus ableiten lassen – es war also ein Ansatz die Gravitation und den Elektromagnetismus zu vereinen. Dabei beschreiben die Verzerrungen und Krümmungen, wie Einstein schon herausgefunden hatte, das Gravitationsfeld und, nach Kaluzas Meinung, die Krümmungen in der neuen Extradimension das elektromagnetische Feld. Der Schwedische Physiker Oskar Klein erweiterte Kaluzas Idee mit dem Ansatz die Extradimension als zu klein anzusehen, um sie mit heutigen technischen Möglichkeiten wahrnehmen zu können – man spricht von der Kaluza-Klein-Theorie⁹. Ein Analogon um den Begriff der winzigen aufgewickelten Extradimensionen zu verstehen stellt

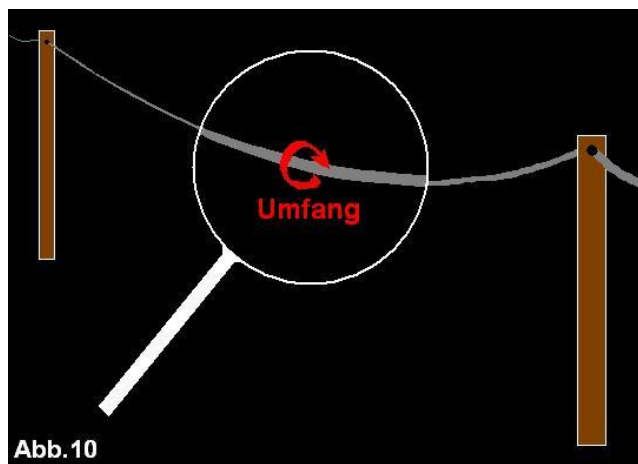


Abb.10

ein von Hochmast zu Hochmast gespanntes Hochspannungsseil dar. Von einigen Kilometern Entfernung lässt sich mit bloßem Auge nur eine Dimension erkennen – die Länge. Benutzt man ein Teleskop oder geht einfach näher heran, so kann man eine zweite Dimension erkennen – den kreisförmigen Umfang. Er stellt eine zusätzliche Dimension zur Länge dar, weil ein Punkt auf der Seiloberfläche nicht einzig und allein durch die Angabe der Länge eindeutig charakterisiert ist. Man benötigt für eine exakte Ortsangabe auch die unabhängige, durch die Länge nicht darstellbare, Information über die Stelle des Umfangs. Es gibt also eine große Dimension – die Länge, und eine kleine Dimension – der Umfang. Die drei uns bekannten Dimensionen entsprechen also der Länge der Hochspannungsleitung und die verborgenen kleinen Extradimensionen der Stringtheorie dem Umfang. Kleins Untersuchungen zeigten durch die Erweiterung Kaluzas Ansatzes durch quantenmechanischen Aspekte, dass die Extradimension eine Größe nahe der Plancklänge haben müssen. Für unsere makroskopische Alltagswelt und selbst für mikroskopische Objekte ist diese Einsicht nicht bedeutend. Aber für ein Objekt, wie etwa einem String, dessen Größe sich im Bereich der Plancklänge befindet, stellen die kleinen Dimensionen, auf die die Idee der anfangs nur einen Extradimension durch die Entdeckung der Stringtheorie erweitert wurden¹⁰, eine neue unabhängige Bewegungsrichtung dar. Ohne Widerspruch mit den bisherigen Beobachtungen schafft man so die Existenz der Extradimensionen zu verteidigen und die Schwingungsmuster zu ermöglichen.

Wenden wir uns nun noch der Form dieser Extradimensionen zu – den Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten¹¹. Erstaunlich ist, dass die Gleichungen der Stringtheorie nicht irgendwelche Formen der Extradimensionen erlauben, sondern genau nach den, leider komplizierten, Calabi-Yau-Räumen verlangen, die übrigens schon lange vor irgendeiner möglichen physikalischen Anwendung von den beiden oben erwähnten Mathematikern entdeckt wurden. Dabei hat der Calabi-Yau-Raum Ausmaße – wie sollte es anders sein - in der Größenordnung der Plancklänge¹². Dies ist so zu verstehen, dass zum Beispiel ein Mensch seinen Arm hebt er zwar nur einen winzigen Bruchteil der normalen drei Dimensionen durchquert, aber die Extradimensionen unzählige Male durchquert. Wie wenn man immer wieder an den gleichen Ort kommt, wenn man dem Umfang eines Kreises folgt, kommt man durch die Extradimensionen immer wieder am Anfangspunkt an, sodass man im Mittel gar keine Bewegung durch den Calabi-Yau-Raum bemerkt.

Leider gibt es abertausende Formen solcher Calabi-Yau-Räume, und der richtige ist noch nicht gefunden. Hinweise auf den richtigen Kandidaten liefern die Schwingungseigenschaften die für die richtigen Teilcheneigenschaften sorgen sollten. Außerdem zeigen Edward Witten und sein Team¹³, dass Löcher, im mathematischen Sinne, im Calabi-Yau-Raum Teilchen mit ruhigen Schwingungsmustern, also nahe der Null-Mal-Plackmasse, hervorrufen – also genau die uns bekannten Teilchen. Und dies nicht rein zufällig, sondern je Loch eine Gattung ähnlicher Teilchen. Da Materieteilchen, wie in Anmerkung 5 in drei Familie auftreten liegt ein Raum mit drei Löchern nahe. Tatsächlich fand man solche Räume, die dazu auch noch die Botenteilchen in guter Näherung ergaben – ein wahrlich großer Erfolg der Theorie.

8. Die Mathematik der Stringtheorie

Die Mathematik der Stringtheorie ist dermaßen kompliziert, das derzeit nur Näherungen der stringtheoretischen Gleichungen vorliegen. Die Folgen der

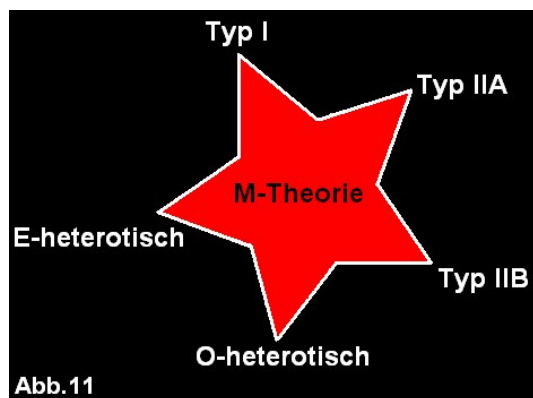
Näherungen waren zum Beispiel, dass zuerst nur neun der zehn Raumdimensionen erkannt wurden – später dazu etwas mehr -, oder macht die Bestimmung der genauen Form des Calabi-Yau-Raums unmöglich

Nicht einmal den brilliantesten Mathematikern und Physikern, wie Edward Witten, ist es gelungen eine exakte Formel zu beschreiben. Meiner Meinung nach ist ein einzelner Mensch dazu auch gar nicht in der Lage. Dies äußert sich auch dahingehend, dass die Fortschritte die in diesem schwierigen Gebiet gemacht werden nicht einzelnen Menschen, sondern Bemühungen weltweit verstreuter Stringtheoretiker zu verdanken sind. Es gibt natürlich hervorragende Persönlichkeiten, wie der schon erwähnte Edward Witten, aber auch er hätte allein nicht den Hauch einer Chance die Komplexität der Stringtheorie zu bewältigen.

9. M-Theorie und Branen

Die nächste Revolution im Lebenslauf der Stringtheorie war die Entdeckung der so genannten M-Theorie und ihre Folgen.

9.1 M-Theorie



Ein hier absichtlich noch nicht erwähnter Fakt, an dem die Stringtheorie lange Zeit litt, war, dass es nicht etwa nur eine Stringtheorie, sondern ganze fünf Formulierungen der Theorie gab¹⁴, die sich zwar ähnelten – die Grundidee der kleinen schwingenden Fäden stimmte überein, aber im Detail doch unterschiedlich waren. Alle verlangten nach der gleichen Zahl der Extradimensionen – damals ging man noch von sechs aus -, aber so gab es beispielsweise in der einen Version

nur geschlossene String, in deren anderen sowohl geschlossene, als auch offen schwingende Fäden.

Ein Problem, was am Thron des Anwärters der „Vereinheitlichten Theorie“ doch kräftig nagte. Denn wie kann eine Theorie, die als EINZIGE den Anspruch auf die Verschmelzung der Relativitätstheorie und Quantenmechanik erhebt, selbst uneins sein?!

1995 verbrachte Edward Witten, der angesehenste Stringtheoretiker der Welt, einen Geniestreich und löste das Problem. Er erkannte, dass die fünf unterschiedlichen Stringtheorien sich als Folge verschiedener mathematischer Analysen einer umfassenderen, noch genauer zu untersuchenden, Theorie ergaben. Es taufte sie M-Theorie! Die genaue Bedeutung des „M's“ ist nicht klar und wird oft mit „Master“, „Magie“, „Matrix“ und mehr assoziiert. Er sorgte dadurch also quasi für eine Vereinigung in der Vereinigung. Dabei sei nachdrücklich darauf hingewiesen, dass das komplette Verständnis der M-Theorie noch in weiter Ferne liegt, auch wenn schon Fortschritte gemacht wurden.

Dennoch hatte Wittens Entdeckung noch weitreichendere Folgen, als auf den ersten Blick erkennbar sind. So ermöglichte die Erkenntnis nicht nur, dass die fünf Stringversionen fünf verschiedene mathematische Formulierungen der M-Theorie sind, sondern durch die Übersetzungssprache die Witten bereitstellte, ließen sich Fragen und Probleme die eine Stringversion nicht beantworten konnte in eine andere

übersetzen, und man konnte sein Glück in einer anderen „Stringsprache“ versuchen. Diese Vorgehensweise ermöglichte es einige Fragen zu beantworten und viele Fortschritte zu erzielen. Um aber ein tieferes Verständnis zu erlangen, brauchte es allerdings eine vollständig verstandene Formulierung der mysteriösen M-Theorie. Zu einem Erfolg der M-Theorie und der M-theoretischen Sprache zählt auch die schon erwähnte Entdeckung der siebten Zusatzraumdimension, die ohne Witten in den benutzten mathematischen Näherungsgleichungen wohl untergegangen wäre.

9.2 Branen

Die Entdeckung und weitere Erforschung der M-Theorie offenbarte aber auch eine vollkommen neue Art von Objekten, die die vorher gebräuchlichen Näherungen nicht erfassen konnten. Erzeugen die Gleichungen der „alten“ Stringtheorie nur eindimensionale Strings, so ergeben sich gezwungenermaßen auch höherdimensionale Gebilde. Diese werden Branen – im Laufe der Zeit als Neologismus vom englischen „membrane“ abgeleitet – genannt. Man sagt auch p-Branen, wobei sich das p auf die Zahl der Dimensionsausdehnung bezieht und zwischen eins und zehn liegt. Also etwa Fünf-Bran für eine fünfdimensionale Bran¹⁷. Die Annahme mehrdimensionaler Objekte als Ersatz für Punktteilchen wurde unter anderem auch schon Heisenberg in Erwägung gezogen – damals aber noch in einem dreidimensionalen Raum. Es erwies sich aber als unmöglich solche Körper mit der Quantenmechanik zu vereinbaren. Dennoch zeigt schon die spätere Entdeckung der Stringtheorie, dass mindestens eindimensionale Fäden als Teilchenersatz möglich waren, und mit der „Sprache“ der M-Theorie schienen auch die höherdimensionalen Membranen erklär- und beschreibbar.



Abb.12



Abb.13

Es stellte sich aber bald heraus, dass die Branen noch höhere Energien als Strings besaßen und damit noch unglaublichere Massen einhergingen. So hohe Massen, dass man nicht mehr hinreichend exakt mit den Näherungen rechnen konnte, die mit ansteigenden Energien immer ungenauer wurden. Doch mit der Zeit gelang es Brian Greene, David Morrison und Andrew Strominger einen Weg zu finden, der zeigt, dass Branen nicht unbedingt massereicher als Strings sein müssen¹⁵. Eine andere Konsequenz der Branen und der schon vorangegangenen Arbeit von Joe Polchinski war es, dass eindimensionale offene Strings an ihren zwei Endpunkten an den Branen haften können und damit ihre Schwingbewegung eingeschränkt ist.

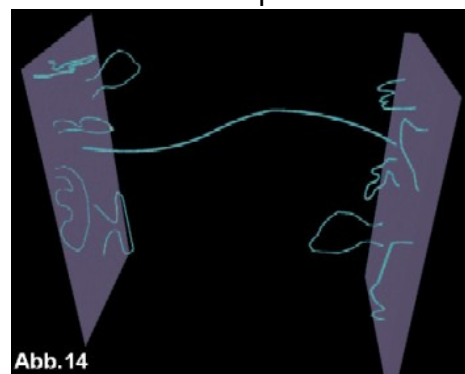


Abb.14

Dabei können bei Enden an der gleichen Bran „kleben“ (Abb. 13), oder aber an verschiedenen, die darüber hinaus nicht einmal die gleiche dimensionale Ausdehnung haben müssen (Abb. 14).

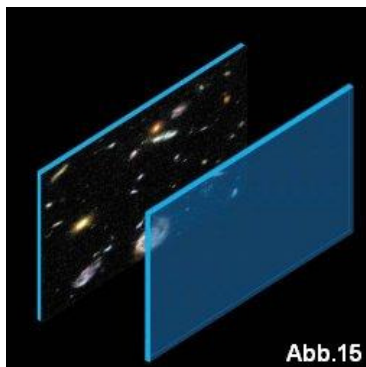
Es sein angemerkt, dass sich die Endpunkte offener Strings dabei zwar frei in und auf den Branen bewegen, diese aber nicht verlassen können. Damit nicht genug. Dank Polchinski wurde klar, dass die Eigenschaften der Branen weitestgehend durch die angehefteten Strings bestimmt wurden, und so auch die Branen mit den alt hergebrachten mathematischen Methoden untersuchbar wurden. Ein überraschender, wie glücklicher Umstand.

10. Anwendung auf das Ganze

Wie auch die die Allgemeine Relativitätstheorie schon bald nach ihrer Entdeckung auf das ganze Universums angewandt wurde, und somit eine Revolution in der Kosmologie einleitete, lässt sich auch die M-Theorie in diesen Rahmen benutzen.

10.1 Kosmische Konsequenzen, kosmische Strings und Branenuniversum

Selbst zum Beginn des Universums, dem hypothetischen Urknall, kann die Stringtheorie unser beim Verstehen der damaligen Vorgänge helfen. Die Entdeckung der Extradimensionen bieten einen vollkommen neue Einblick in die Beschaffenheit der Umstände zum „Zeitpunkt Null“. So waren gab es zu diesem Zeitpunkt keinerlei Unterschiede zwischen den aufgewickelten und den heute drei ausgedehnten flachen Dimensionen. Alle hatten die gleiche winzige Ausdehnung. Allerdings nahmen drei dieser ursprünglich gleichen Dimensionen eine Sonderstellung ein und begannen zu expandieren und taten dies 13,7 Milliarden Jahre hinweg. Auch die Entdeckung der Branen bietet spannende Aussichten. Ein konventioneller, also kleiner, String schwingt nicht nur heftiger und erhöht seine Masse, wenn man ihm Energie zuführt, es ermöglicht ihm auch ab einer bestimmten Grenze seine Größe zu verändern. Umso mehr Energie zugeführt wird, umso länger wird der String, wobei für die Ausdehnung prinzipiell keine Grenze existiert. Gleiches ist nun auch mit den neu entdeckten p-Branen möglich. Die Idee ist, dass sich eine Drei-Bran auf riesige, vielleicht unendliche Maßstäbe ausgedehnt hat und nicht in unserem dreidimensionalen Raum existiert, sondern unser Universums selbst ist. Wir leben dieser Spekulation nach also in beziehungsweise auf einer Bran, die wir zusammen mit der Zeit als unsere bekannte Raumzeit assoziieren (Abb. 15).



Die neuen Erkenntnisse der M-Theorie lassen noch weitere Spekulationen zu. Im Jahre 2002 entwickelten Neil Turok und Paul Steinhardt ein kosmologisches Modell namens „Ekpyrotisches Universum“ (griech: ekpyrosis = Weltenband) oder auch „Zyklische Kosmologie“ genannt. Dieses soll eine mögliche Erklärung für die Entstehung des Universums liefern. Dieser Theorie nach, ist unser Universum mit einem Paralleluniversum, in dem durch die Stringtheorie beschriebenen fünfdimensionalen Raum, zusammengestoßen, wodurch genügend Energie frei wurde, um die heute beobachtbare Strahlung und Materie zu erzeugen. Im Bezug auf unsere Vorstellung von einem Drei-Bran-Universum, würde dieses und eine zweite Drei-Bran, praktisch ein Paralleluniversum, durch eine Strecke in einer vierten Raumdimension getrennt sind. Die zwei Drei-Branen, so zeigten die Rechnungen, ziehen sich an und kollidieren letztendlich, prallen voneinander ab und ziehen sich wieder an. Ein Zyklus immer

wiederkehrender Urknall in Abständen einiger Billionen Jahre (Abb. 16). Ein Indiz für diese Theorie wäre der Nachweis hochfrequenten Gravitationswellen.

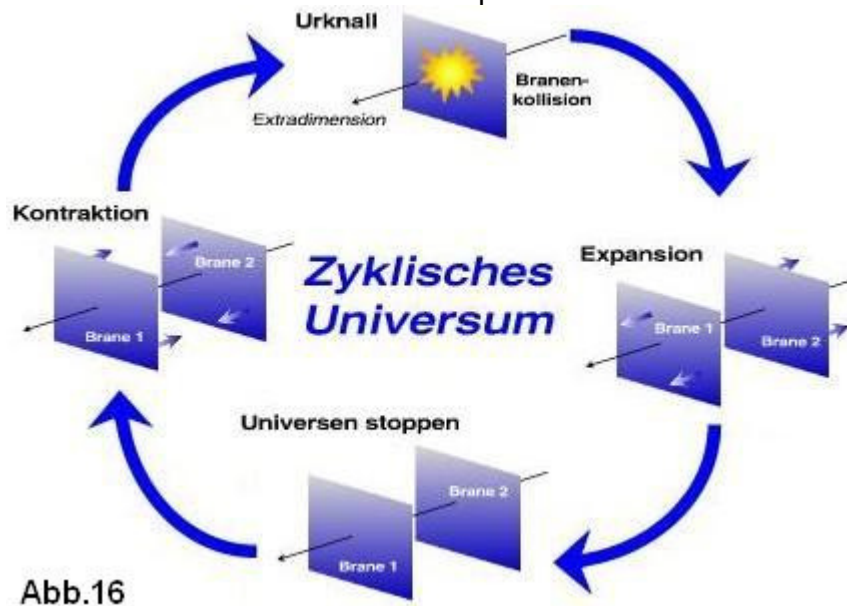


Abb.16

10.2 Das Universum im Lichte des Branenwelt-Szenarios

An dieser Stelle möchte ich mich noch etwas eingehender mit der Idee des Branenuniversums beschäftigen, da sich dadurch weitreichende Konsequenzen offenbaren. Zu allererst sei erwähnt, dass sich dieses Szenario nicht nur auf eine Drei-Bran beschränkt. Theoretisch könnte die Bran auch höherdimensional sein und die anderen Dimensionen in der Winzigkeit des aufgerollten Calabi-Yau-Raums „verstecken“. Bleiben wir aber vorerst bei der Vorstellung wir leben in einer Drei-Bran, die sich durch die elfdimensionale Raumzeit der M-Theorie bewegt. Nun, wie könnte man diese Annahme beweisen? Wie könnte man die Dimensionen außerhalb der Bran erkennen?

Betrachten wir dazu die Bewegung des Lichts im Raum. Es lässt sich mathematisch zeigen, dass das Schwingungsmuster eines Photons nur durch einen offenen String erzeugt werden kann. Das heißt die Endpunkte des Strings, befinden sie sich in unserem Raum, also in unserer Bran, diese, wie oben erklärt, nicht verlassen können. Es ist also mit Hilfe der elektromagnetischen Kraft unmöglich irgendeinen Einfluss außerhalb unserer Bran vorzunehmen, geschweige denn überhaupt eine Information von außen zu bekommen¹⁶. Gleiches gilt auch für die Starke und schwache Kernkraft, die ebenfalls nur durch offene Strings dargestellt werden können.

Da aber das Schwingungsmuster des Gravitons durch einen geschlossenen String erzeugt wird, ist es der Gravitation als einzige fundamentale Kraft möglich, die Grenzen unserer Bran zu überwinden und ohne Widerstände in andere Dimensionen oder andere Branen zu gelangen (Abb. 17).

Dies eröffnet ein vollkommen neues Verständnis der verborgenen Extradimensionen, nach der die Theorie so zwingend verlangt. Diese müssten nicht winzig klein sein, um sie mit unseren Beobachtungen zu vereinbaren. Nein, vielmehr, trifft das Branenwelt-Szenario zu, können wir die



Abb.17

Zusatzdimensionen nicht wahrnehmen, weil wir innerhalb einer Drei-Bran leben, und Kommunikation jeglicher Art durch drei der vier Kräfte unmöglich sind. Die Zusatzdimensionen müssen also nicht zwangsweise so klein wie anfangs angenommen, sondern können um viele Größenordnungen größer sein.

11. Experimenteller Beweis der Stringtheorie

Der direkte experimentelle Beweis eines herkömmlichen Strings scheint wohl außerhalb des technisch je Möglichen zu liegen. Man bräuchte ein Auflösungsvermögen, welchen eine Milliarde Milliarde Mal stärker ist als das gegenwärtig Realisierbare. So hat ein Gravitonstring, zugegebenermaßen ein sehr energiearmes Schwingungsmuster, nur eine Länge von etwa 100 Mal die Plancklänge.

Wie schon oben erwähnt könnten indirekte Folgerungen der M-Theorie letztendlich Beweise für deren Richtigkeit liefern. So können im energiereichen Zustand des Universums nach dem Urknall Strings mit Energie angereichert wurden sein, die dadurch anwachsen und, auch wenn sie heute vielleicht nicht mehr existieren und damit ihr direkter Nachweis undenkbar erscheint, Spuren in der kosmischen Struktur des Universums hinterlassen haben könnten.

Ein anderer experimenteller Nachweis erwächst aus dem Branenwelt-Szenario. Ist dieses korrekt, so könnten Abweichungen des gravitativen Abstandsgesetzes bei kleinen Abständen einen Hinweis auf die Zusatzdimensionen erbringen. Grund dafür ist, dass wie oben erwähnt, nur das Graviton unsere Drei-Bran verlassen kann. Aber wieso sollte sich dadurch das Gravitationsgesetz ändern?

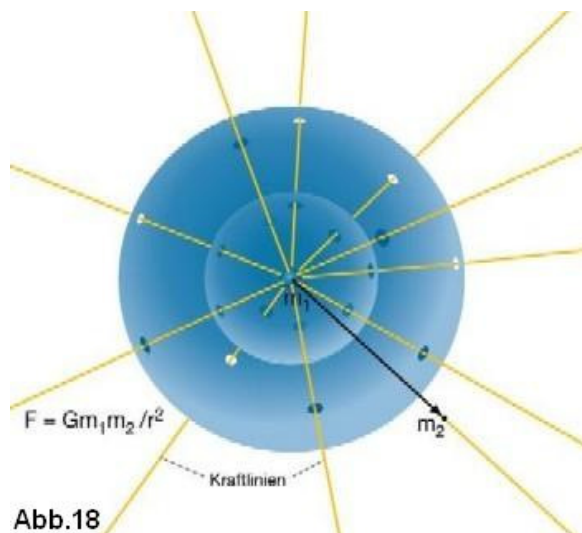


Abb.18

Die Antwort lässt sich schon durch die klassische Betrachtung der Gravitation durch Newton beantworten. Die Kraft der Gravitation eines Körpers in einem bestimmten Abstand a ist bestimmt durch die Dichte der Feldlinien der Gravitation. Umso weiter man sich von dem Körper entfernt, umso weiter können die Feldlinien sternförmig in allen drei Raumrichtungen auseinanderschneiden, was deren Dichte und damit die Gravitationskraft verringert (Abb.18). In einem dreidimensionalen Raum muss man also zur Berechnung der Feldliniendichte die gedankliche Zahl Feldlinien durch die

imaginäre zweidimensionale Kugelfläche im betrachteten Abstand a dividieren. Da die zweidimensionale Kugelfläche A mit $A=4\pi a^2$ gegeben ist, ist auch die Gravitationskraft umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung. Gibt es jetzt noch kleine Zusatzdimensionen, so weicht das Gravitationsgesetz bei Abständen unter der Größe dieser Extradimension von der $1/a^2$ -Relation ab. Denn wird dieser Abstand unterschritten, haben die Feldlinien die Möglichkeit auch in den anderen Dimensionen auseinanderzuschneiden, was deren Dichte und damit die gravitative Anziehungskraft markant ändern sollte. Oberhalb der Abstandsgrenze, die durch die verborgenden Dimensionen festgelegt wird, ist dieser Umstand nicht mehr zu bemerken, da die Extradimensionen praktisch schon von den Feldlinien gesättigt sind und ein weiteres auseinanderdriften in diesen winzigen Zusatzdimensionen

unmöglich ist. Tatsächlich war es bis jetzt durch die Schwäche der Gravitation und quantenmechanischen Störungen nur möglich Messungen bis auf einen zehntel Millimeter vorzunehmen, was die Möglichkeit eröffnet, dass die Extradimensionen nur wenig kleiner sein können als Einzehntel Millimeter.

Das Branenwelt-Szenario hat nicht nur Folgen für die Größe der Zusatzdimensionen, sondern unter Umständen auch auf die Größe der String selbst. Sind die Extradimensionen nämlich größer als zu Beginn angenommen, hat die Gravitation wie eben beschrieben, mehr „Platz“ in den anderen Dimensionen, was eine aus dem Blickwinkel unserer drei Raumdimensionen eine Schwache Kraft vermuten lässt. In Wirklichkeit wäre die Gravitationskraft aber viel stärker als angenommen, da sie in allen zehn Raumdimensionen „verteilt“ wird, und wir nur die Wirkung in drei Raumdimensionen erkennen. Da die Länge der der Gravitationsstrings aber direkt von der Stärke der übertragenen Kraft abhängt, könnte der Gravitationsstring eine maximale Länge von 10^{-18} Meter haben, also 10^{17} Mal größer als angenommen, was auf Hinweise in der nächsten Generation der Beschleuniger hoffen lässt. Auch würde sich in diesem Fall bei sehr kleinen Abständen eine stärkere Gravitationskraft als normal erwartet detektieren lassen.

12. Schlusswort

Ich hoffe, ich konnte ihnen einige grundlegende Gesichtspunkte der String-/M-Theorie verständlich machen und habe ihr Interesse für dieses Forschungsfeld wecken können. Ich wurde durch die Bücher „Das elegante Universum“ und „Der Stoff, aus dem der Kosmos ist“ von Brian Greene angeregt diesen Aufsatz zu schreiben. Nach recht ausführlicher Analyse der Theorie mit meinen doch begrenzten (zum Beispiel mathematischen) Möglichkeiten, sehe ich mit doch anfänglicher Euphorie, der Theorie nun etwas skeptischer gegenüber. Wenn auch einzelne Annahmen und Folgerungen der Theorie noch zu verkräften sind, so scheint die verschlungene, überaus komplexe und dennoch ausnahmslos faszinierende Gesamtheit der Aspekte doch wissenschaftlich nur sehr schwer trag- und fassbar. Letztendlich wird die Zeit die Wahrheit bringen. Bleibt mir, inspiriert durch eine Diskussion mit einem Wissenschaftler, nur noch mit einem kritischen Zitat zu enden.

„Raffiniert ist der Herrgott, aber boshaft ist er nicht.“ von Albert Einstein.

13. Anmerkungen

1	Diese Singularität lässt sich auch unter Verwendung der Theorie der virtuellen Teilchen beseitigen. Dazu werden im elektromagnetischen Feld nahe dem Elektron ständig virtuelle Teilchen erzeugt, die das Elektron abschirmen und, wenn wir beim oben beschriebenen Beispiel bleiben, das Hereinzoomen verhindern. Für nähere Informationen empfehle ich unter dem Suchbegriff „virtuelle Teilchen“ zu recherchieren.
2	Zwischen den Metallplatten sind nur diejenigen Wellenlängen möglich, die an den Metallplatten den Wert Null haben.
3	Diese Behauptung ist nicht ganz aus der Luft gegriffen. Denn aus vorher angestellten Überlegungen wusste man, dass eine Theorie, die die Allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik verflechten sollte, ein Teilchen beinhalten müsste, das als Botenteilchen der Gravitation fungiert, masselos ist und den Spin zwei hat.
4	Die elf Dimensionen beziehen sich als Spezialfall der M-Theorie, auf die später eingegangen wird, auf die so genannte elfdimensionale Supergravitation. Zu Beginn der Superstringtheorie ging man erst von „nur“ zehn Raumzeitdimensionen aus. Dies lag an den verwendeten mathematischen Näherungen, welche die siebte zusätzliche Raumdimension nur schwer erkennbar machten. Erst die später besprochene M-theoretische Mathematik vermochte die elfte Dimension zu erkennen. Lassen sie sich also nicht irritieren, wenn ich vorerst zwischen den genauen Dimensionszahlen schwanke. Innerhalb eines Kapitels will ich aber keine Zahl bleiben, um die Verwirrung so klein wie möglich zu halten.
5	Es gibt drei Familien der Materieteilchen, die sich durch ihre zunehmenden Masse unterscheiden lassen. 1. Familie: Elektron, Elektron-Neutrino, up-Quark, down-Quark 2. Familie: Myon, Myon-Neutrino, charm-Quark, strange-Quark 3. Familie: Tauon, Tauon-Neutrino, top-Quark, bottom-Quark Zudem existiert zu jedem Teilchen ein Anti-Teilchen mit gleicher Masse, aber umgekehrter Kraftladung.
6	Die Botenteilchen sind die quantenmechanischen Überträger der vier fundamentalen Kräfte. Starke Kernkraft: Gluon (masselos) Elektromagnetische Kraft: Photon (masselos) Schwache Kernkraft: W^+ , W^- , Z-Boson (86-fache und 97-fache Protonenmasse) Gravitation: Graviton (masselos)
7	Die Planckzeit entspricht der Zeit, die das Licht braucht um die Plancklänge zurückzulegen.
8	Wenn nicht eindeutig darauf hingewiesen, ist im Weiteren Stringtheorie und Superstringtheorie nicht zu unterscheiden.
9	Es sei Angemerkt, dass Kaluza und Klein lediglich von einer Extradimension ausgingen, auch wenn ich im Nachfolgenden sofort von Extradimensionen spreche.
10	Wie sich nach eingehenden Untersuchungen herausstellte, war es ein unlösbares Problem das Elektron in die ursprüngliche Kaluza-Klein-Theorie einzuarbeiten. Erst mit der Entdeckung der Stringtheorie wurde Kaluzas und Kleins Ansatz wieder populär und zu mehreren Extradimensionen ausgedehnt.
11	Für den mathematisch vorgebildeten Leser sei angemerkt, dass es sich allgemein bei einer Mannigfaltigkeit um einen topologischen Raum handelt, der

	lokal dem gewöhnlichen Euklidischen Raum gleicht. Nichtlokal muss der Raum nicht dem R^n entsprechen.
12	Tatsächlich ist die genaue Größe der Extradimensionen noch nicht bekannt. Sicher ist nur, dass sie sehr klein sein müssen, sich aber wie schon erwähnt wahrscheinlich im Plancklängenbereich bewegen.
13	Dieses Team, bestehend aus Witten, Philip Candelas, Andrew Strominger und Gary Horowitz auf die Bedeutung der Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten für die Theorie.
14	Deren Namen vollständiger halber noch genannt werden sollen. Typ I, Typ IIA, Typ IIB, O-heterotisch, E-heterotisch (als Limit der M-Theorie noch die elf-dimensionale Supergravitation)
15	Dabei wickelt sich eine Bran um eine kugelförmige Calabi-Yau-Raumregion, die zu darauf zuschrumpfen beginnt, was auch die Bran verkleinert und somit ihre Masse verringert.
16	Fakt ist, dass die meisten Kontakte mit unserer Umwelt über die elektromagnetische Kraft bestimmt werden. Wird sehen mit unserem Auge zum Beispiel nur elektromagnetisch Wellen. Auch die Untersuchungen der Elementarteilchen in Beschleunigern beruht auf der elektromagnetischen Kraft.
17	Tatsächlich umfasst die Theorie sogar Null-Branen, die dem Punktteilchenmodell recht nahe kommen. Allerdings sind die Null-Branen stets mit Strings verbunden, womit auch ihre Wechselwirkungen durch diese bestimmt werden.

14. Quellen

14.1 Textquellen

- „Das elegante Universum“ von Brian Greene
- „Der Stoff, aus dem der Kosmos ist“ von Brian Greene
- wikipedia.de unter den Stichwörtern:
 - Stringtheorie
 - elektroschwache Wechselwirkung
 - Quantenelektrodynamik
 - Parität
 - Ekpyrotische Universum
 - M-Theorie
 - Große vereinheitlichte Theorie
 - Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten
 - Eugenio Calabi
 - Shing-Tung Yau
- <http://www.weltderphysik.de/de/4907.php>
- diverse Sendungen von Alpha Centauri

14.2 Bildquellen

Abbildungen von oben nach unten durchnummeriert, beginnend mit eins:

Abb.1: http://qbx6.ltu.edu/s_schneider/courses/intro_astro/images/17-04.jpg

Abb.2: http://abyss.uoregon.edu/~js/21st_century_science/lectures/lec17.html

Abb.3: <http://www.lisa-science.org/intro/nutshell>

Abb.4: <http://www.humboldt.edu/~earthluv/cosmosxexceptindexhtml/IMAGES/z51SPACETIMEFOAM/SpacetimeFoam2.html>

Abb.5: http://www.vis.uni-stuttgart.de/ger/teaching/lecture/ws04/hs-hierarchisch/unstructured_volume/

Abb.6: Copyright by Ralf Wunderlich

Abb.7: <http://www.teorfys.uu.se/popular/>

Abb.8: <http://www.abenteuer-universum.de/diverses/string.html>

Abb.9: <http://www.topologies.com.au/observatory/calabi.htm>

Abb.10: Copyright by Ralf Wunderlich

Abb.11: Copyright by Ralf Wunderlich

Abb.12: Copyright by Ralf Wunderlich

Abb.13: <http://www.teorfys.uu.se/popular/>

Abb.14: <http://theoriem.ifrance.com/theoriem.html>

Abb.15: http://www.der-kosmos.de/unser_universum.htm

Abb.16: http://www.mpe.mpg.de/~amueller/lexdt_z02.html

Abb.17: Screenshot des dritten Videos von
<http://cosmbranche.free.fr/UniversDimensions.htm>

Abb.18: <http://www.weltderphysik.de/de/4726.php>