EINFÜHRUNG IN DIE SUPERSTRINGTHEORIE.

von

Alexander Trzeciak

(Ausarbeitung zum Seminarvortrag vom 30.07.2003)

Seminar über Kern- und Teilchentheorie

SS 2003: Symmetrie und Supersymmetrie

Leitung:

Prof. Dr. P. Boschan, Prof. Dr. G. Münster,

Prof. Dr. M. Stingl,

Dr. J. Heitger, R. Peetz

Institut für Theoretische Physik

Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Für Nien Tze.

Was ist die Superstringtheorie?

Die Stringtheorie ist eine vor etwa 30 Jahren entdeckte und seitdem enorm weiterentwickelte Theorie, von der sich viele namhafte Physiker die sagenumwobene "Weltformel" erhoffen. Hierunter hat man sich eine Formel bzw. Theorie vorzustellen, aus der prinzipiell alle anderen physikalischen Gesetze mathematisch hergleitet werden könnten. Diese Weltformel würde wohl nicht auf ein DIN A 4-Blatt passen. Sie würde die vier fundamentalen Wechselwirkungen zusammen erklären und mit ihr könnten wir den Ursprung und die Evolution des Universums leichter verstehen. Der Nobelpreisträger Steven Weinberg z.B. ist überzeugt davon, dass er die Weltformel erkennen würde, wenn man sie ihm zeigen würde.

Was den Nutzen dieser Weltformel für die Praxis bzw. das alltägliche gewöhnliche Leben des Homo sapiens angeht, so darf man selbstverständlich nicht zu viel erwarten. Z.B. lässt sich heute bereits die Chemie im Prinzip aus der Quantenmechanik erklären. Detaillierte Wettervorhersagen für die nächsten Jahre, Lösungen für den Weltfrieden, Heilmittel gegen Krankheiten oder die Antwort auf die Frage nach dem "Sinn des Lebens" oder nach einem Schöpfer des Universums werden auch mit ihr wohl schwer zu finden sein. Doch die Suche nach der Weltformel stellt eine der größten intellektuellen Herausforderungen der Naturwissenschaften, ja sogar aller Wissenschaften dar. Es ist höchst bemerkenswert, dass wir als denkende Wesen auf diesem kleinen Planeten in diesem riesigen Universum vielleicht eines Tages im Besitz der Weltformel sein werden. Einstein bemerkte dazu: "Das ewig Unbegreifliche an der Welt ist ihre Begreiflichkeit. Dass die Setzung einer realen Außenwelt ohne jene Begreiflichkeit sinnlos wäre, ist eine der großen Erkenntnisse Kants." Auf die philosophischen und theologischen Fragen, die in diesem Zusammenhang aufgeworfen werden, können wir hier nicht eingehen.

Schon oft in der Geschichte der Physik gab es Phasen, in denen die Physiker dachten, es sei nur noch ein kleiner Schritt zur Weltformel, das "Ende der Physik" sei in Sicht. Doch dann haben sich meist neue schwerwiegende Probleme aufgetan und man musste erkennen, dass man erst einen Tropfen des Ozeans Physik verstanden hatte. Man denke etwa an den jungen Max Planck, dem man riet, sich einem anderen Studium als dem der Physik zuzuwenden, da in der Physik doch schon "alles entdeckt" sei.

Eine der größten wissenschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit auf dem Weg zur Weltformel besteht darin, die beiden Säulen der modernen Physik, die Quantenfeldtheorie und die Allgemeine Relativitätstheorie, miteinander zu einer Vereinheitlichten Feldtheorie zu verschmelzen. Dieses ehrgeizige Ziel verfolgte schon Albert Einstein, nachdem er seine Relativitätstheorien veröffentlicht hatte und sich auch intensiv mit der Quantentheorie beschäftigt hatte. Hermann Nicolai, Direktor am Albert-Einstein-Institut (AEI, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik) in Golm bei Potsdam, nennt dieses Ziel treffend den "Heiligen Gral der Physik". Er ist noch lange nicht gefunden, aber dank der Stringtheorie nähergerückt.

Die Quantenfeldtheorie (QFT) hatte riesigen Erfolg bei der Erklärung der Vorgänge im Mikrokosmos. Z.B. gilt die auf Feynman und andere Wissenschaftler zurückgehende Quantenelektrodynamik als Quantentheorie des Elektromagnetismus die erfolgreichste Theorie aller Zeiten, was ihre experimentellen Bestätigungen angeht.

Die auf Einstein zurückgehende Allgemeine Relativitätstheorie (ART) auf der anderen Seite ist die favorisierte Theorie zur Erklärung der Struktur der Raumzeit auf großer Skala ("large-scale structure of spacetime"). Sie beschreibt also die Vorgänge im Makrokosmos richtig. Sie hat z.B. faszinierende Einblicke auf dem Gebiet der Kosmologie gebracht, was z.B. die Entstehung und Entwicklung unseres Universums oder auch die Entdeckung der schwarzen Löcher oder die Gravitationswellen angeht, welche mit den Detektoren GEO 600, LIGO, Advanced LIGO (LIGO II), VIRGO, TAMA, LISA etc. erforscht werden sollen.

Doch leider sind die QFT und die ART völlig inkompatibel. Der Versuch, die Gravitation zu quantisieren, führt zu unerfreulichen Divergenzen, die sich mit den Mitteln der herkoemmlichen Quantenfeldtheorie nicht beseitigen lassen.

Die Stringtheorie, seit einiger Zeit auch bekannt als Superstringtheorie und dann als M-Theorie, ist eine der interessantesten wissenschaftlichen Theorien. Von ihr erhofft man sich die Lösung der Probleme der Quantengravitationstheorie (Quantum Gravity).

In der Stringtheorie werden die fundamentalen Objekte unserer physikalischen Welt nicht wie in der herkömmlichen Quantenfeldtheorie als punktförmig, i.e. nulldimensional, sondern als ausgedehnt angesehen. Alle bekannten Elementarteilchen sollen nach der Stringtheorie aus schwingenden Saiten, engl. Strings, hervorgehen, ganz analog zum Erzeugen von Tönen mit einem Saiteninstrument. Hier finden sich also gewissermaßen die Sphärenklänge der Pythagoreer wieder. Diese Strings können offene, extrem kurze Fäden (etwa Plancklänge) oder geschlossene Schleifen sein ohne Knoten (u.a. wegen mehr Raumdimensionen in der Stringtheorie als vier, s.u., ebenfalls ca. 10^{-33}cm lang). Die Kürze dieser Strings erklärt, dass sie bislang nicht experimentell als solche aufgespürt wurden. Aus großer Entfernung, wie sie unsere derzeitigen Teilchenbeschleuniger bzw. Stringbeschleuniger - die ja "Mikroskope" für den Mikrokosmos sind - nur ermöglichen, sehen die Strings nämlich wie punktförmige Elementarteilchen aus. Es ist wichtig für unser Verständnis der physikalischen Welt, dass wir die Entwicklung der Teilchenbeschleuniger weiter vorantreiben. Z.B. fehlt als eine der letzten experimentellen Bestätigungen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik, das die drei fundamentalen Wechselwirkungen - die elektromagnetische, die schwache und die starke (Kernkraft) - miteinander vereint, noch die Entdeckung des Higgs. Das Higgs-Teilchen oder auch Higgs-Feld wurde nach dem britischen Physiker Peter W. Higgs benannt, der dessen Existenz bereits 1964 postulierte. Es handelt sich dabei um ein elektrisch neutrales Austauschboson mit Spin 0 (skalares Feld), dessen Masse sehr hoch sein muss. Experimentell ließ sich die Massengrenze oberhalb von 95,2 GeV (LEP-II Experiment am CERN) einordnen. Zum Vergleich sei angeführt: Proton und Neutron haben eine Masse von etwa 1 GeV. Im sog. Higgs-Mechanismus stattet das Higgs-Feld, das sich unendlich im Raum erstreckt, die Teilchen mit Masse aus. Es handelt sich um eine spontane Symmetriebrechung. Die läuft folgendermaßen ab: Das Higgs-Boson koppelt an sämtliche Teilchen. Dabei ist die Stärke dieser Kopplung proportional zur Masse des Teilchens. Dadurch, dass das Higgs-Boson an alle Teilchen koppelt, verschafft es ihnen Schwere: Die Teilchen erhalten Masse.

Für die Bestätigung des Standardmodells fehlt also noch die Detektion des Higgs. Was die experimentelle Bestätigung der Stringtheorie angeht, so hat man wohl noch größere Probleme: Die Planckenergie - etwa 10^{19}GeV - wird wohl von Teilchenbeschleunigern nie aufgebracht werden können. Doch nach Entdeckungen von Antoniadis und Bachas (s.u.) werden die Hochenergiephysiker vielleicht mit weit weniger Energie auskommen, um Strings als solche "sehen" zu koennen. Auch indirekte Tests sind im Gespräch. Entsprechende Experimente sind eingeleitet worden (z.B. am Large Hadron Collider, LHC, s.u.).

Es gibt also noch keine experimentelle Bestätigung der Stringtheorie, doch ähnlich wie bei der SUSY sollte dies nicht zu einem Verwerfen der Theorie führen. Während in der frühen Geschichte der Physik die Theorien hinter den Experimenten hinterherhinkten, ist es heutzutage wohl umgekehrt.

Gehandelt werden außer den nulldimensionalen Elementarteilchen und den eindimensionalen Strings auch höherdimensionale Objekte. Allgemein spricht man von p-dimensionalen Branen oder kurz p-Branen (engl. p-branes), wobei p eine beliebige natürliche Zahl sein kann. Das Wort "Bran" steht abkürzend für "Membran" und geht auf Paul Townsend zurück. Branen sind also Verallgemeinerungen von Strings, welche historisch zuerst gefunden wurden. Daraus resultierte auch etymologisch der Name "Stringtheorien" und nicht etwa "Brantheorien", was eigentlich treffender wäre. Ein Punktteilchen ist also eine 0-Bran, ein String eine 1-Bran und eine 2-Bran nennt man auch Membran.

Die Branen repräsentieren die uns bekannten Teilchen des Standardmodells der Teilchenphysik und darüber hinaus viele weitere, die noch nicht entdeckt wurden, insbesondere wenn Branen in der Supersymmetrie untersucht werden. Von einem übergeordneten Standpunkt sollten die p-Branen endlich den von Demokrit postulierten "Atomen" (bekanntlich von griech. "atomos", "unteilbar"), den unteilbaren, fundamentalen Konstituenten der Materie, entsprechen. Branen können aber auch ganze stellare Objekte, wie z.B. klassische schwarze Löcher beschreiben. Branen dienen als Verallgemeinerung des punktförmigen Schwarzen Loches: dieses identifiziert man gerade mit einer 0-Bran. Die dimensionsmäßig nächsthöhere Stufe eines schwarzen Lochs, die 1-Bran, nennt man dann schwarzen String (engl. black string), die zweite als 2-Brane heisst schwarze Bran (engl. black brane). Je nach angenommenen Wirkungsfunktional bzw. Lagrangedichte (Einstein-Hilbert-Lagrangian, Einstein-Maxwell-Lagrangian etc.) kann man Branen-Verallgemeinerungen der klassischen Schwarzschild-Lösung (ungeladen, statisch), Reissner-Nordstrm-Lösung (geladen, statisch) oder Kerr-Newman-Lösung (geladen, rotierend) finden.

Die Stringtheorie bzw. ihre Weiterentwicklung nach "Einbau" der Supersymmetrie - die Superstringtheorie - ist derzeit der aussichtsreichste Kandidat für eine TOE (Theory of Everything). Sie ist Physik jenseits des Standardmodells. Sie weist keine Divergenzen auf, was die Quantisierung der Gravitation angeht. Vielleicht weist sie zu einer "Theorie, die mathematisch völlig eindeutig ist, aus der sich alles von selbst ergibt", um nochmal den Stringtheoretiker Hermann Nicolai zu zitieren, der jedoch auch bemerkt hat: "Wir gehen davon aus, dass wir für ein wirklich einheitliches Modell noch weit über die Stringtheorie hinaus denken müssen".

Der Schritt des Übergangs von punktförmigen Elementarteilchen zu eindimensionalen Strings mag zunächst sehr banal erscheinen, ist jedoch radikal und genial. Er führt dementsprechend zu (oftmals komplizierten) Zusammenhängen und neuen Einsichten, die die Quantenfeldtheorie nicht ermöglicht. Man vergleiche dies etwa mit der Einführung der komplexen Zahlen in der Mathematik.

Eine wichtiges Merkmal der Stringtheorie, das für sie spricht, ist: Sie braucht die Supersymmetrie und die Allgemeine Relativitätstheorie für ihre Konsistenz.

Die Stringtheorie verfolgt also das sehr ehrgeizige Ziel, die Weltformel zu finden, eine "Theorie für alles" zu sein bzw. zu werden. In diesem Zusammenhang sollte man besser von der M-Theorie reden, die die 11-dimensionale Lösung der den bislang gefundenen (fünf) Superstringtheorien zu Grunde liegenden Theorie sein soll. Das "M" steht für "Mutter" (aller Theorien), "Magie", "mystische", "Matrix", "Membran", "Millenium", "murky" (dunkel, trüb, da sie noch lange nicht verstanden ist) oder was man sich sonst (sinnvoll) darunter vorstellen möchte, "according to taste", um Professor Edward Witten (SNS, IAS, Princeton) zu zitieren. Witten ist Fields-Medaillen-Träger von 1990 (für seine Anwendung topologischer Methoden auf die Quantenfeldtheorie) und einer der besten Stringtheoretiker.

Wieso gibt es bei der Verwendung von Strings statt von Teilchen keine Divergenzen mehr?

In Punktteilchentheorien liest man die fundamentalen Wechselwirkungen an der Lagrangedichte ab. Im Feynman-Diagramm zu z.B. dem Wechselwirken zweier Teilchen gibt es einen eindeutigen Vertex, an dem die Teilchen z.B. zusammentreffen. Der Abstand der Teilchen wird infinitesimal klein, was zu den störenden Divergenzen führt. Die Wechselwirkung findet an einem geometrischen Punkt statt, wo die Weltlinien zusammenkommen und aufhören, eine Mannigfaltigkeit zu sein. In Lorentz-invarianten Theorien mit flacher Minkowski-Raumzeit ist der Wechselwirkungspunkt Lorentz-invariant. Um zu spezifizieren, wie die Punktteilchen wechselwirken, müssen zusätzliche Daten am Wechselwirkungspunkt hinzugefügt werden, die zu vielen möglichen, voneinander verschiedenen Quantenfeldtheorien führen.

In der Stringtheorie hängt der Wechselwirkungspunkt hingegen gerade von dem Lorentzrahmen ab, der zur Beobachtung des Prozesses gewählt wurde. Verschiedene Beobachter würden verschiedene Schnitte im zugehörigen Diagramm machen und verschiedene Wechselwirkungspunkte nennen, die alle ihre Berechtigung hätten. Klar ist hier, wenn man die Sum over all histories bilden will nur, dass die Wechselwirkung stattgefunden hat, da an die Strings weit vor der Wechselwirkung getrennt, weit nachher z.B. vereint sind, nicht wo diese Wechselwirkung genau stattgefunden hat. Die Lorentzinvarianz der Wechselwirkung verbietet es, irgendeinen Punkt auf der Weltfläche als Wechselwirkungspunkt auszuzeichnen. Der Vertex das Stringdiagramms ist also gewissermaßen verschmiert. Somit kommen sich die Strings auch nicht infinitesimal nah und daher wiederum gibt es keine Divergenzen.

Die anderen Quantengravitationstheorien machen hier Probleme. Bei der schwachen, der starken und der elektromagnetischen Wechselwirkung sind den Physikern im Laufe der Jahrhunderte, vor allem im 20., jedoch bereits mehrere große Schritte auf dem Weg zur TOE gelungen, ohne eine Theorie wie die Stringtheorie heranziehen zu müssen. Eine Theorie, in der die drei Wechselwirkungen zusammengefasst sind, nennt man Grand Unified Theory (GUT, Große Vereinheitlichte Theorie) Faraday erkannte experimentell Zusammenhänge zwischen Elektrizität und Magnetismus, Maxwell stellte seine berühmten Gleichungen auf, die sie zum Elektromagnetismus verknüpfen. Der Elektromagnetismus wurde quantentheoretisch von Feynman, Tomonaga, Schwinger zur QED weiterverarbeitet. Fermi lieferte grundlegende Arbeiten zur schwachen Kraft, das Glashow-Salam-Weinberg-Modell lieferte die Verbindung von schwacher und elektromagnetischer Wechselwirkung zur elektroschwachen Kraft. Die Quantenchromodynamik erwies sich als erfolgreich bei der Erklärung der Kernkraft. Wie oben bereits erwähnt wurde, sind diese drei Wechselwirkungen (elektromagnetische, schwache und starke) im allgemein akzeptierten Standardmodell der Elementarteilchenphysik vereint.

Doch wie ist dieses Standardmodell mit der der von Newton und Einstein untersuchten Gravitationswechselwirkung bzw. Standardmodell der Kosmologie in Einklang zu bringen? An vielen Instituten weltweit wird hieran intensiv geforscht (in Deutschland u.a. am Albert-Einstein-Institut bei Potsdam).

Eine Theorie, die eine GUT und die Quantengravitation beinhaltet, nennt man auch UT (Unified Theory, Vereinheitlichte Theorie).

Unter den Theorien der Quantengravitation (u.a. Loop Quantum Gravity von Carlo Rovelli und Lee Smolin, die wie die Stringtheorie den Test mit der Bekenstein-Hawking-Formel bestanden hat (s.u.), Twistoren von Roger Penrose) ist die Stringtheorie der aussichtsreichste Kandidat.

Die Stringtheorie ist gut 30 Jahre alt. Sie hat in dieser Zeit große Fortschritte gemacht, steckt jedoch noch immer in den Kinderschuhen. Dies liegt zum einen daran, dass die Mathematik, die sie benötigt, wohl größtenteils noch gar nicht entdeckt ist. Und die Mathematik, die schon in ihr Anwendung fand, erstreckt sich über weite Gebiete und ist alles andere als einfach (K-Theorie, Algebraische Topologie, Algebraische Geometrie (Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten, Mirror Symmetry etc.), exzeptionelle Lie-Gruppen, Kac-Moody-Algebren u.v.m.). Sehr wichtig für die Stringtheorie scheint die Nichtkommutative Geometrie von Alain Connes (Paris), Joachim Cuntz (Münster) und anderen namhaften Mathematikern zu sein, an der intensiv geforscht wird. Selbstverständlich ist auch eine profunde Kenntnis von physikalischen Theorien wie ART, QFT, SUSY, SUGRA etc. nötig, wenn man eine TOE finden will. Doch gerade in der Vielfalt der Schnittstellen zwischen Stringtheorie und Mathematik bzw. Stringtheorie und anderen physikalischen Theorien liegen ja auch ihre enormen Reize. Und auch wenn man die Stringtheorie noch nicht als ausgereift ansehen kann, was auch ihre vehementesten Verfechter zugeben, so hat sie doch schon wichtige Impulse für die Forschung gesetzt. Die Mathematik hat schon enorm von ihr profitiert. Allein aus diesem Grunde schon hat die Stringtheorie eine Daseinsberechtigung. Die Stringtheorie hat auch Gegner, wie z.B. den berühmten Stephen Hawking aus Cambridge. Oder auch der Nobelpreisträger Richard Feynman stand ihr skeptisch gegenueber. Doch die Stringtheorie ist nicht "nur" Mathematik, sie ist ernst zu nehmende Physik.

Einen sehr wichtigen nichttrivialen Test hat die Stringtheorie nämlich "schon" bestanden: Aus ihr wurde die Bekenstein-Hawking-Formel für die Entropie S eines schwarzen Lochs hergeleitet. S ist proportional zur Fläche des Horizonts des schwarzen Lochs, $S = \frac{2\pi A}{\kappa^2} = \frac{k_B c^3}{4\hbar G} = \frac{4\pi G k_B}{\hbar c} M^2$. Hawking leitete die Formel 1973 her und veröffentlichte sie in dem Artikel "The Four Laws of Black Holes Dynamics". Er nahm dabei Bezug auf J.D. Beknsteins Dissertation aus dem Jahr 1972. Die Entropie des schwarzen Lochs hat die Eigenschaften einer thermodynamischen Entropie: Sie nimmt nicht ab in der klassischen Allgemeinen Relativität und die Summe aus der "black hole entropy" und der gewöhnlichen Entropie nimmt nicht zu, sogar dann nicht, wenn man die Hawking-Strahlung des schwarzen Lochs hinzunimmt. In diesem Zusammenhang sei noch das Informationsparadoxon eines schwarzen Lochs erwähnt: Hierbei handelt es sich um einen weiteren Konflikt zwischen Quantenmechanik und Allgemeiner Relativitätstheorie. Es geht um einen Informationsverlust. Information, die in ein schwarzes Loch fällt, geht verloren und taucht nicht wieder auf, wenn das schwarze Loch verdampft; dies ist inkonsistent mit gewöhnlicher quantenmechanischer Entwicklung. Offensichtlich erfordert dies eine signifikante Modifikation der Quantenmechanik oder einen signifikanten Zusammenbruch des Verständnisses von Lokalität. Die Erforschung schwarzer Löcher - auch im Rahmen der Stringtheorie - und von quantentheoretischen schwarzen Löchern (quantum black holes) ist sehr wichtig und wird u.a. vom Nobelpreisträger Gerard 't Hooft oder am Albert-Einstein-Institut in Golm bei Potsdam betrieben. Vielleicht kann die Stringtheorie im Zusammenhang mit dem Informationsparadoxon helfen. An weiteren theoretischen und experimentellen Tests der Stringtheorie wird intensiv geforscht.

Jährlich treffen sich ca. 400 der besten Stringtheoretiker u.a. auf den "Strings"-Konferenzen. Diese fanden

1995 in Los Angeles, 1996 in Santa Barbara, 1997 in Amsterdam, 1998 wieder in Santa Barbara, 1999 am AEI in Potsdam, 2000 in Ann Arbor, 2001 in Mumbai, 2002 in Cambridge und 2003 in Kyoto statt und werden 2004 in Paris und 2005 in Toronto abgehalten werden.

Nach zwei Superstringrevolutionen (Beseitigung von Anomalien und Entdeckung gewisser Dualitäten zwischen den verbliebenen fünf Superstringtheorien), die u.a. auf Michael Green und John Schwarz zurückgehen, und der Entdeckung der M-Theorie sowie der AdS-CFT-Korrespondenz durch Maldacena, die wichtige Erkenntnisse für die Yang-Mills-Theorie geliefert hat, sind trotz intensiver Forschung in den letzten Jahren weitere entscheidende Durchbrüche in der String- bzw. M-Theorie in den letzten Jahren ausgeblieben. Neue Ansätze werden gesucht. Die dritte Stringrevolution wäre willkommen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Strings der Stringtheorie nicht mit den sog. Kosmischen Strings in der Astrophysik verwechselt werden dürfen. Beide Objekte haben lediglich eine topologische Ähnlichkeit und sind schlauch- oder fadenförmig. Bei den Kosmischen Strings handelt es sich um eine Form von topologischen Defekten, die in einem Higgs-Mechanismus (s.o.) mit komplexem Higgs-Feld auftauchen. Sie sind die topologische Erweiterung von domain walls, den topologischen Defekten, die bei einer spontanen Symmetriebrechung reellwertiger Higgs-Felder generiert werden. Als neuere Variante gibt es auch die supraleitenden Kosmischen Strings, in denen die Fermionen keine Ruhemasse haben. Die Ruhemasse erhalten sie erst beim Übergang vom falschen ins echte Vakuum. Dieser energetisch ungünstige Übergang tritt aber nicht ein, so dass die Fermionen im String gehalten werden. Sie unterscheidet aber, dass die Strings der Stringtheorien Teilchen beschreiben, während Kosmische Strings aus falschen Vakua bestehen und Relikte einer gebrochenen Symmetrie sind (deshalb ist das Attribut "kosmisch" wesentlich). Es ist denkbar, dass die Kosmischen Strings in der Evolution des Universums verschwunden sind. Astronomen haben bisher keinerlei Hinweise beobachtet, dass Kosmische Strings existieren oder existiert haben.

Verschiedene Wirkungen für punktförmige Teilchen und für Strings:

Wir wollen eine Wirkung für einen sich durch den d-dimensionalen Minkowskiraum bewegenden String herleiten, die sog. Nambu-Goto-Wirkung.

Zuvor wollen wir die Wirkung für ein sich ebenfalls durch den d-dimensionalen Minkowskiraum bewegendes Punktteilchen herleiten.

Der Metrik habe die Signatur $(-)(+)^{d-1}$.

Die Koordinaten seien gegeben durch $x = (x^\mu) = (x^0, x^i) = (x^0, \vec{x}) = (t, \vec{x})$.

Wir setzen c=1.

Die Weltlinie eines Punktteilchens ist eine zeitartige Kurve C, i.e. eine stetige Abbildung von R nach M^d, unserem d-dimensionalen Minkowskiraum, die einem Parameter σ die Koordinaten des Teilchens $x^\mu(\sigma)$ zuordnet. σ ist ein allgemeiner Kurvenparameter, nicht unbedingt die Eigenzeit oder die Zeit, die in einem festen Lorentzrahmen gemessen wird.

Der Tangentenvektor (die "Geschwindigkeit")

$\dot{x}^\mu = \frac{dx^\mu}{d\sigma}$

muss zeitartig sein: $\dot{x}^2 = \eta_{\mu\nu}\dot{x}^\mu\dot{x}^\nu < 0$

(oder lichtartig für ein masseloses Teilchen).

Die invariante Länge einer zeitartigen Kurve ist gleich der Eigenzeit τ.

Die Wirkung ist proportional zur Eigenzeit: $S = -m\tau[C] = -m\int_C d\tau$,
wobei m die Dimension einer Masse hat.

Für das Linienelement $d\tau$ gilt $-d\tau^2 = -(dx^0)^2 + (d\vec{x})^2 \Rightarrow d\tau = \sqrt{-\dot{x}^2}d\sigma$.

Daher haben wir $S = -m\int\sqrt{-\dot{x}^2}d\sigma$.

Diese Wirkung ist invariant unter Umparametrisierung der Kurve.

Selbstverständlich sind andere Wirkungen denkbar, aber wir wählen diese, um später mit der Wirkung für einen String zu vergleichen.

Ein Punktteilchen überstreicht eine Weltlinie (Spur der Kurve), ein String eine Weltfläche (world sheet) Σ.

Für den String wählen wir denselben Minkowskiraum M etc. wie für das Punktteilchen. Auf M wählen wir Koordinaten bezogen auf einen Lorentzrahmen und schreiben $X = (X^\mu)$, wo $\mu = 0, 1, ..., d-1$.

Auf der Weltfläche wählen wir lokale Koordinaten $\sigma = (\sigma^0\sigma^1)$, wobei σ^0 zeitartig (oder lichtartig) sein soll und σ^1 raumartig:

$\dot{X}^2 \leq 0, (X'^2) > 0,$

wo wir $\dot{X} := (\partial_0 X^\mu) = (\frac{\partial X^\mu}{\partial\sigma^0})$ und
$X' := (\partial_1 X^\mu) = (\frac{\partial X^\mu}{\partial\sigma^1})$
definiert haben. $\sigma^1 \in [0, \pi], \sigma^0 \in (-\infty, \infty)$ bzw. $\sigma \in [a, b]$, je nachdem ob der String unendlich lange oder von einem bestimmten Zeitpunkt zu einem anderen propagiert.

Analog dazu, dass die obige Wirkung für das Punktteilchen proportional zur Bogenlänge ist, macht es Sinn, die folgende Wirkung für den String hinzuschreiben, die proportional zum Flächeninhalt A der Weltfläche Σ ist. Es ist dies die Nambu-Goto-Wirkung: $S_{NG} = -TA(\Sigma) = -T\int_\Sigma dA$

T hat die Dimension $(Länge)^{-2}$ oder Energie/Länge = Stringspannung (string tension), $\hbar = c = 1$. $T = \frac{1}{2\pi\alpha'}$, wo α' der Regge-Anstieg ist (Erläuterung dazu weiter unten im Zusammenhang mit den Hadronentheorien der 1960er Jahre).

Die induzierte Volumenform auf Σ ist dann $dA = d^2\sigma\sqrt{|det(g_{\alpha\beta})|}$, wobei $g_{\alpha\beta} = \partial_\alpha X^\mu \partial_\beta X^\nu \eta_{\mu\nu}$ die induzierte Metrik ist (Pullback). Man beachte $det(g_{\alpha\beta}) < 0$.

Die Nambu-Goto-Wirkung ist invariant unter Umparametrisierungen von Σ.

Wir können die Nambu-Goto-Wirkung noch expliziter hinschreiben:
$S_{NG} = \int d^2\sigma\mathcal{L} = -T\int d^2\sigma\sqrt{(\dot{X}X')^2 - \dot{X}^2(X')^2}$.

Die Nambu-Goto-Wirkung hat eine direkte geometrische Bedeutung, aber sie ist technisch gesehen wegen der Quadratwurzel nicht sehr nützlich. Man bevorzugt die sog. Polyakov-Wirkung, die die Quadratwurzel nicht mehr hat. Man führt eine intrinsische Metrik $h_{\alpha\beta}(\sigma)$ auf der Weltfläche Σ ein mit der Signatur (-)(+). Dann lautet die Polyakov-Wirkung:

$S_P = -\frac{T}{2}\int d^2\sigma\sqrt{h}h^{\alpha\beta}\partial_\alpha X^\mu\partial_\beta X^\nu\eta_{\mu\nu}$, wobei $h = -det(h_{\alpha\beta}) = |det(h_{\alpha\beta})|$ ist. Die Polyakov-Wirkung ist äquivalent zur Nambu-Goto-Wirkung. Die Polyakov-Wirkung hat die Form eines nichtlinearen Sigma-Modells auf der Weltfläche.

Die Bewegungsgleichung für $h_{\alpha\beta}$ ist algebraisch. Daher ist die intrinsische Metrik nichtdynamisch und kann eliminiert werden (vgl. Vorgehen beim Beseitigen des Hilfsfeldes F beim Übergang von der Off-Shell-Wess-Zumino-Lagrangedichte zur On-Shell-Wess-Zumino-Lagrangedichte, also unter Berücksichtigung der Euler-Lagrangeschen Bewegungsgleichung in meinem Vortrag über das Wess-Zumino-Modell vom 23.07.2003), was uns zur Nambu-Goto-Wirkung zurückführt.

Da $T_{\alpha\beta} := (2\pi\alpha'\sqrt{h})^{-1}\frac{\delta S_P}{\delta h^{\alpha\beta}} = \partial_\alpha X^\mu\partial_\beta X^\mu - \frac{1}{2}h_{\alpha\beta}\partial_\gamma X^\mu\partial^\gamma X_\mu$ der Energieimpuls (Energie-Impuls-Tensor) der zweidimensionalen Feldtheorie ist, die durch die Polyakov-Wirkung definiert wird, können wir die Bewegungsgleichung für $h_{\alpha\beta}$ als die zweidimensionale Einstein-Gleichung interpretieren. Die zweidimensionale Metrik ist nichtdynamisch, da die zweidimensionale Einstein-Hilbert-Wirkung eine topologische Invariante ist, die proportional zur Euler-Zahl von Σ ist. Daher verschwindet ihre Variation und die Einsteinsche Feldgleichung der Polyakov-Wirkung, die gekoppelt an zweidimensionale Gravitation ist, reduziert sich auf $T_{\alpha\beta} = 0$. Man beachte, dass der Energie-Impuls-Tensor spurfrei ist, $h^{\alpha\beta}T_{\alpha\beta} = 0$. Dies gilt off shell. Daher hat $T_{\alpha\beta}$ nur zwei unabhängige Komponenten, die für Lösungen der Bewegungsgleichungen (on shell) verschwinden. Da die Spur des Energie-Impuls-Tensors der Noether-Strom der Skalentransformationen ist, zeigt dies, dass die zur Polyakov-Wirkung gehörige zweidimensionale Feldtheorie invariant unter Skalentransformationen ist. Man kann zeigen, dass es sich in Wahrheit um eine konforme Feldtheorie handelt.

Die Polyakov-Wirkung hat drei lokale Symmetrien, von denen sie zwei mit der Nambu-Goto-Wirkung gemeinsam hat, nämlich die Invarianz unter Umparametrisierung. Darüber hinaus ist die Polyakov-Wirkung invariant unter Weyl-Transformationen (konformen Transformationen).

Ich möchte im Folgenden auf die historische Entwicklung der Stringtheorie(n) eingehen und einzelne physikalische Phänomene, die z.T. schon oben erwähnt worden sind, genauer erläutern. Dabei bitte ich um Verständnis und Entschuldigung dafür, dass in diesem Vortrag viele Begriffe nur angekratzt werden können. Insbesondere auf die Quantisierung von Strings, Stringfeldtheorie etc. kann ich hier nicht näher eingehen. Ich habe eine Literaturliste erstellt, die für weitere Studien nützlich ist.

Dieser Vortrag passt aus mehreren Gründen in den Rahmen dieses Seminars, da in der Superstringtheorie, wie das Präfix "Super-" schon vermuten lässt, die Supersymmetrie wiederzufinden ist und in der M-Theorie viele interessante Symmetrien (Dualitätssymmetrien etc.) untersucht werden. Es handelt sich um eine besonders symmetrische und besonders ästhetische Theorie. Laut einem "Scientific American"-Artikel (Ausgabe April 1999, Review "Aesthetic Science") von Chris Quigg (selbst theoretischer Physiker) ist die Stringtheorie die symmetrischste Theorie ueberhaupt. Die Ästhetik ist ein weiterer Anhaltspunkt dafür, dass die Physiker mit der Stringtheorie auf dem richtigen Weg sind. So hat z.B. seinerzeit Dirac seine Gleichung, als er sie gefunden hatte, allein auf Grund ihrer Ästhetik für richtig gehalten.

Da dieser Vortrag nur eine Einführung in die Stringtheorie bzw. einen (historischen) Überblick und Literaturempfehlungen geben kann und soll, möchte ich nach der geschichtlichen und physikalischen Erläuterung noch Literatur zu diesem hochinteressanten Gebiet der Physik vorstellen, so dass hoffentlich die offen gebliebenen Fragen seitens der Zuhörerschaft bzw. Leserschaft mit Hilfe dieser Literatur angegangen und im Idealfall sogar geklärt werden können.

Historische Entwicklung der Superstringtheorie

Ende der 1960er: Duale Resonanzmodelle für Hadronen, Regge-Trajektorien, Bootstrap-Programm, durch Nambu, Susskind und Nielsen Entdeckung der ersten Stringtheorie

Stringtheorie kam in den späten 1960er Jahren im Zusammenhang mit den sog. Duale Resonanz-Modellen (dual resonance models) auf als Versuch, eine Theorie der starken Wechselwirkung zu konstruieren. Experimente in den 1960ern enthüllten ein reichhaltiges Spektrum von stark wechselwirkenden Teilchen (Hadronen), die auf (näherungsweise) geraden und parallelen Regge-Trajektorien lagen - benannt nach dem italienischen Physiker Tullio Regge. Das bedeutet, dass Teilchenfamilien identifiziert wurden, deren Spin linear mit dem Quadrat ihrer Masse wächst. Man stellte sich wegen dieses Zusammenhangs zwischen Masse und Spin bzw. Drehmoment die Mesonen wie zwei Kugeln (Quarks) vor, die durch ein Gummiband (Flussschlauch, flux tube bzw. String) miteinander verbunden sind. Die Kugeln bewegen sich auf einer Kreisbahn und das Band hat eine gewisse Spannung (Regge-Anstieg, Regge slope bzw. Stringspannung, string tension). Man wollte den wesentlichen Unterschied der starken Kernkraft zu den anderen fundamentalen Wechselwirkungen - nämlich dass sie umso stärker wird, je weiter die unter ihr geladenen Teilchen (Farbladungen) voneinander entfernt sind - dadurch erklären, dass sich die Kraftlinien dieser Kraft zu Flussschläuchen (flux tubes) zusammenziehen, die die beiden Quarks eines Mesons miteinander verbinden. Die Flussschläuche wirken dann, wie bereits erläutert, wie Gummibänder, die dafuer sorgen, dass die Quarks sich nicht voneinander trennen koennen. Weil man die Quarks nie alleine, als makroskopisch freie Teilchen beobachten kann, spricht man von quark confinement ("confinement" heißt "Einsperrung", "Haft", "Beschränkung").

Man kann also die Stringtheorie, wie damals u.a. Yoichiro Nambu entdeckte, als den Ansatz verstehen, diese Gummibänder oder Saiten, als die fundamentalen Objekte der Theorie zu betrachten. Später fand man zwar heraus, dass dies nicht die korrekte Beschreibung der starken Kernkraft ist. Doch die Stringtheorie war damit geboren und sollte noch besondere Bedeutung erlangen.

Die Regge-Trajektorien wurden als ein Teil des S-Matrix-Theorie-/bootstrap-Programmes entwickelt, welches in den 1960ern in der Mode war. Die linearen Regge-Trajektorien wurden als Pole der analytischen S-Matrix in der Drehmomentebene interpretiert. Dieses Bild erklärte erfolgreich gewisse asymptotische Eigenschaften von Streuamplituden bei hoher Energie. Dies führte Gabriele Veneziano 1968 dazu, eine sehr einfache mathematische Funktion - im Wesentlichen die Eulersche Beta-Funktion - als einen approximierten Ausdruck für eine Streuamplitude (Veneziano-Amplitude) vorzuschlagen, die diese Eigenschaften realisierte. In den folgenden zwei Jahren verallgemeinerte eine kleine Gemeinschaft von Theoretikern die Venezianoformel bzw. das Venezianomodell auf Formeln für N-Körper-Streuamplituden mit mehreren miteinander in Wechselbeziehung stehenden Konsistenzeigenschaften. Die Tatsache, dass dies erreicht werden konnte, suggerierte die Möglichkeit, dass Venezianos Formel nicht einfach nur eine phänomenologische Amplitude war - wie ursprünglich beabsichtigt -, sondern in Wirklichkeit Teil einer voll ausgewachsenen Theorie. Die Venezianoamplitude ist im Zusammenhang mit der Entstehung der Stringtheorie besonders hervorzuheben.

Wenig später wurde unabhängig voneinander von Yoichiro Nambu (1970), Leonard Susskind (1970) und Holger B. Nielsen (1970) erkannt, dass die Theorie, die man entwickelte, physikalisch als eine solche verstanden werden konnte, die auf eindimensionalen Strukturen (Strings) basierte statt auf punktartigen Teilchen. Dann wurde klar, wie eine solche Theorie die verschiedenen qualitativen Merkmale von Hadronen und ihren Wechselwirkungen erklären konnte. Die Grundidee ist, dass bestimmte Teilchen bestimmten Oszillationsmoden des Strings entsprechen. S-Matrix-Theorie, das bootstrap-Programm und die Regge-Pole wurden vor langer Zeit (aus guten Gründen) fallen gelassen. Wie dem auch sei, man kann nicht leugnen, dass sie ein überdauerndes Erbe hinterlassen haben. Stringtheorie hätte wahrscheinlich auch auf einer anderen Route der Erkenntnisgewinnung entdeckt werden können, aber das hätte wahrscheinlich viele Jahre zusätzlich gedauert. Edward Witten pflegte zu sagen, dass die Stringtheorie Physik des 21. Jahrhunderts ist, die zufällig im 20. Jahrhundert entdeckt wurde. Diese Auffassung hatte ihm gegenüber zuerst der Italiener Daniele Amati am 11. Mai 1998 in einem persönlichen Gespräch geäußert. Jedenfalls kann man konstatieren, dass die Versuche, eine Stringtheorie der Hadronen zu konstruieren, nicht gänzlich erfolgreich waren. Darüber hinaus wurde eine quantenfeldtheoretische Beschreibung der starken Kraft - nämlich die Quantenchromodynamik (QCD) - entwickelt. Diese wurde universell akzeptiert und die Stringtheorie fiel stark im Ansehen der Theoretiker.

Anfang der 1970er auch:

Entwicklung der Supersymmetrie (z.B. Wess-Zumino-Modell 1974)

Es erfolgte als logische Konsequenz der "Einbau" der Supersymmetrie in die Stringtheorie: Dies war die Geburt der SUPERstringtheorie.

Hier wird erneut der Bezug der Superstringtheorie zu unserem Seminarthema "Symmetrie und Supersymmetrie" deutlich.

Zuvor hatte man nämlich "nur" eine rein bosonische Stringtheorie, die daran litt, ein Tachyon (Teilchen, dass sich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegt) im Spektrum ihrer Quantenzustände zu haben. Diese bosonische Stringtheorie lebt in 26 Dimensionen. Mit Hilfe der SUSY, die wir in diesem Seminar in mehreren Vorträgen kennengelernt haben, sind dann auch die Fermionen hinzugekommen.

Die Untersuchung dieser bosonischen Stringtheorie war jedoch natürlich auch sehr wichtig und ist es auch noch z.B. für den Studierenden, der sich in die Stringtheorie einarbeiten will. Es handelt sich bei der bosonischen Stringtheorie um eine Spielzeugtheorie, deren didaktischer Wert allerdings hoch eingestuft werden muss (z.B. Polchinskis Standardwerk Bd. 1 ausschließlich über den bosonischen String).

Es gibt zwei Wege, die Supersymmetrie in der Stringtheorie einzuführen und somit auch Fermionen zu erhalten:

1.) Ramond-Neveu-Schwarz (RNS)-Formalismus: Dies ist er ursprüngliche Zugang, der schon im Kontext der Dualen Resonanz-Modelle um 1971 herum aufkam. Er benutzt zweidimensionale Weltflächen-Supersymmetrie und erfordert die sog. "Gliozzi-Scherck-Olive (GSO)-Projektion", um Raumzeit-Supersymmetrie, ein tachyonenfreies Spektrum sowie modulare Invarianz zu realisieren.

2.) Lichtkegel-Green-Schwarz-Formalismus: In diesem Zugang, der um 1981 herum zu Tage trat, ist die Raumzeit-Supersymmetrie von Anfang an explizit vorhanden und er vermeidet die GSO-Projektion. Jedoch kann diese Superstringtheorie im Gegensatz zum RNS-Zugang nicht auf eine völlig kovariante Art quantisiert werden (wie der Name schon sagt, beruht er stark auf der Lichtkegeleichungsfixierung der Raumzeit-Koordinaten).

In der ursprünglichen Version der Superstringtheorie (Neveu Schwarz 1971; Ramond 1971) mit dem Tachyon war die Supersymmetrie nur auf der zweidimensionalen Weltfläche präsent, wie zuerst Gervais und Sakita 1971 hervorhoben. Die Pionierarbeit von Wess und Zumino (1974) in der Konstruktion von supersymmetrischen Quantenfeldtheorien (vgl. meinen Vortrag vom 23.07.2003 über supersymmetrische Lagrangedichten und das Wess-Zumino-Modell) wurde durch die Suche nach vierdimensionalen Analoga dieser zweidimensionalen Symmetrie motiviert. Einige Jahre später bemerkten Gliozzi, Scherk - ein genialer französischer Physiker, der leider viel zu früh verstorben ist (1980) - und Olive (1976), dass das die Methode ("truncation" genannt), die das Tachyon beseitigt, sich auch in zehndimensionaler Raumzeit-Supersymmetrie ergibt.

Die Supersymmetrie ist aus mehreren Gründen eine sehr wichtige Idee. Sie ist - mit sehr schwachen Annahmen auskommend - die eindeutige Möglichkeit einer nichttrivialen Erweiterung der Symmetrien von Raum und Zeit (i.e. der Poincaré-Gruppe). Darüber hinaus ist sie eine Symmetrie, die Bosonen und Fermionen miteinander in Beziehung setzt. Wir haben eine gute Chance, dass die neuen Teilchen, die von der Supersymmetrie benötigt werden, noch in diesem Jahrzehnt an Beschleunigern entdeckt werden. Es gibt mehrere verschiedene Gründe für die Annahme, dass die Massen der Superpartner ungefähr auf der TeV-Skala liegen. Diese zu finden (z.B. am LHC, Large Hadron Collider), könnte die beste experimentelle Unterstützung für die Superstringtheorie in der näheren Zukunft darstellen. Es besteht eine relativ hohe Wahrscheinlichkeit, dass das leichteste Superteilchen (das LSP, Lightest SUSY Particle) vollkommen stabil ist. Es ist außerdem ein führender Kandidat für ein CDM-WIMP (CDM: Cold Dark Matter (Kalte Dunkle Materie), WIMP: Weakly Interacting Massive Particle (schwach wechselwirkendes massives Teilchen)).

1973: Um es nochmals zu betonen: Die Quantenchromodynamik (QCD) schien die korrekte Theorie der Hadronen zu sein. Viele Forscher wandten sich ihr zu und das Interesse an der Superstringtheorie nahm leider stark ab. Letztere schien keine vernünftige Hadronentheorie zu sein.

1974: Einige hartnäckige Stringtheoretiker (Michael Green, John Schwarz usw.) blieben den Superstrings treu und fanden mit Hilfe diverser Berechnungen zum großen Erstaunen der Fachwelt heraus, dass die zur Beschreibung der starken Kernkraft entwickelte Stringtheorie immer auch die Einsteinschen Feldgleichungen der Gravitation umfasst und dass es unter den masselosen Stringzuständen theoretisch ein Spin 2-Teilchen geben muss, das Graviton (Scherk, Schwarz; Yoneya). Dies war eine Sensation und ließ die Vermutung bzw. Hoffnung aufkommen, dass es sich bei der Stringtheorie um die lange vergeblich gesuchte Vereinheitlichte Theorie handeln könnte, in der insbesondere das Short-Distance-Problem der Quantengravitation gelöst sein könnte. In der herkömmlichen Quantenfeldtheorie (QFT) tauchen lästige Ultraviolettdivergenzen im Zusammenhang mit dem Graviton, dem Feldquant der Gravitation, auf und die QFT ist hier nicht renormierbar. Die Stringtheorie ist frei von Ultraviolettdivergenzen. Die Größe der Strings wurde drastisch von 10^{-13} cm (typische Größe eines Hadrons) auf 10^{-32} cm (Plackskala) herabgesetzt. Da die Planck-Energie 10^{19} GeV beträgt, wird deutlich, dass direkte experimentelle Nachweise von Strings als solche an Teilchenbeschleunigern schwierig sein werden. Da mit der theoretischen (!) Entdeckung des Gravitons in der Stringtheorie Hoffnung aufgekommen war, dass es sich bei ihr um eine Grand Unified Theory (GUT) bzw. Theory of Everything (TOE) handeln könnte, wandten sich ihr Mitte der 1970er Jahre wieder viele Forscher zu. Z.B. glaubt nach wie vor der Nobelpreisträger Steven Weinberg, dass die Stringtheorie eines Tages die Weltformel bringen könnte.

1984-1985: Die erste Superstringrevolution

Hier ist zunächst auf die Kaluza-Klein-Theorie einzugehen: Kaluza und Klein haben 1921 und 1926 vorgeschlagen, den Elektromagnetismus im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie als Krümmungseffekt in einer sehr kleinen fünften Dimension aufzufassen. Diese Idee lässt sich theoretisch auf sehr ansprechende Weise realisieren. Sie fand aber ein halbes Jahrhundert lang wenig Beachtung, weil eine experimentelle Überprüfung ihrer Konsequenzen leider nicht möglich war. Erst mit der Konstruktion der supersymmetrischen Erweiterung der Einsteinschen Gravitationstheorie (SUGRA = Supergravitation) und der Frage, ob erweiterte oder höherdimensionale Supersymmetrie die Inkonsistenz der Quantengravitation beheben kann, wurden diese Überlegungen wieder in Erwägung gezogen. Inzwischen waren jedoch die Kernkräfte entdeckt und analog zum Elektromagnetismus als Eichtheorien formuliert worden, so dass eine geometrische Vereinheitlichung der Naturkräfte nunmehr zumindest ein 11-dimensionales Raum-Zeit-Kontinuum erforderte. Zugleich ist 11 aber die maximale Dimension, in der eine SUGRA existiert. Diese Tatsache weckte große Hoffnungen, die sich allerdings vorerst nicht erfüllten, weil auch die 11-dimensionale SUGRA leider an unheilbaren Divergenzen krankt.

In dieser Situation löste 1984 eine Arbeit von Michael Green und John Schwarz die erste Stringrevolution aus: Es stellte sich nämlich heraus, dass Superstrings automatisch auf eine konsistente 10-dimensionale SUGRA mit Paritätsverletzung führen (d.h. es gibt, wie in der Natur beobachtet, nur linksdrehende Neutrinos, aber keine rechtsdrehenden; die Konstruktion einer konsistenten SUGRA mit dieser Eigenschaft war bis dahin nicht gelungen). Die Superstringtheorie ist darüber hinaus die einzige bekannte Theorie, die eine Vorhersage für die Raumzeit-Dimension liefert und die Vorhersage ist D=10. Damit wurde aus der Idee von Kaluza und Klein viele Jahrzehnte später ein plausibles Szenario: Wir leben in einer zehndimensionalen Welt.

Höchstwahrscheinlich fragen Sie sich: Was ist mit den sechs Dimensionen, die wir nicht sehen?

Diese werden kompaktifiziert: Sechs Raumrichtungen werden kompatifiziert, z.B. zu sehr kleinen Kreisen aufgewickelt (Tori, Orbifolds, Calabi-Yau-Räume etc.). Deren Radius entspricht womöglich der Plancklänge, jedoch zeigten Antoniadis und Bachas, dass die Aufwicklung auch wesentlich gröber sein könnte. In diesem Zusammenhang sind auch die sog. Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten zu nennen. Eine Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit ist eine Kähler-Mannigfaltigkeit mit verschwindender erster Chern-Klasse, wobei eine Kähler-Mannigfaltigkeit eine Mannigfaltigkeit mit SU(3)-Holonomie ist und die erste Chern-Klasse auf einer komplexen Mannigfaltigkeit die Dolbeault-Kohomologie-Klasse der Ricci-Form $R_{i\bar{\imath}}dz^i d\overline{z}^{\bar{\imath}}$. Die Dolbeault-

Kohomologie wiederum ist die Kohomologie der (1,0)- und (0,1)-Teile der äußeren Ableitung auf (p,q)-Formen. Das Kompaktifizieren von Dimensionen ist schon aus der oben erwähnten Kaluza-Klein-Theorie bekannt (z.B. für fünfte Dimension).

Durch die Extradimensionen wird das klassische Newtonsche Gravitationsgesetz modifiziert und der charakteristische Abfall der Gravitationskraft mit r^{-2} könnte stattdessen einem r^{-4}-Gesetz folgen. Dies versuchen Physiker experimentell mit Cavendish-Torsionspendeln zu verifizieren.

Eine noch erstaunlichere Konsequenz der Extradimensionen ist die Reduktion der fundamentalen Planck-Skala von 10^{19} GeV auf den TeV-Bereich. Anschaulich würde die relative Stärke der Gravitation dann schon bei TeV-Energien derjenigen der starken Wechselwirkung entsprechen. In dieser sog. TeV-Quantengravitation (engl. TeV quantum gravity), die mit Hilfe von Branen beschrieben wird, wird davon ausgegangen, dass die Gravitation in allen Dimensionen - den klassischen vier und den Extradimensionen - wirkt, während die Felder des Standardmodells der Teilchenphysik auf einen Unterraum, eine 3-Bran, beschränkt sind. Das hätte zur Folge, dass bereits bei TeV-Experimenten in modernen Teilchenbeschleunigern Gravitonen angeregt werden könnten und diese womöglich in die Extradimensionen entkommen könnten. In diesem Zusammenhang spricht man von "escape to the bulk". Die Experimentalphysiker würden eine Verletztung des Energieerhaltungssatz messen, weil diese Gravitonen Energie fortgetragen hätten. Solche Signaturen versucht man in den Teilchenbeschleunigern der neuesten Generation aufzuspüren. Ihr Nachweis wäre sensationell, weil die Physiker damit eine Spur hätten, die sie zum Ziel Quantengravitation führen würde.

Ende der 1980er: Es gab schon viele Übereinstimmungen der Superstringtheorie mit dem Standardmodell, aber auch fehlende Stellen, was erneut zu einer gewissen Stagnation der Stringforschung führte.

Bis 1995 hatte man "nur" eine perturbative Formulierung der Stringtheorien. Man hätte gerne eine nicht störungstheoretische Formulierung gehabt. Störungstheorie funktioniert gut bei kleiner Kopplungskonstante, wie es z.B. in der Quantenelektrodynamik der Fall ist. Bei großen Kopplungskonstanten hat man Probleme.

1995 fand die zweite Superstringrevolution statt. Es wurden gewisse Symmetrien entdeckt, genauer gesagt gewisse Dualitäten zwischen den einzelnen Stringtheorien. Dank der zweiten Stringrevolution konnte man den Schritt zu nichtperturbativen Stringtheorien machen. Mit Hilfe der unten erläuterten S-Dualität konnte man von einer Theorie mit großer Kopplungskonstante zu einer mit kleiner wechseln.

In Zuge der zweiten Superstringrevolution wurden riesige Fortschritte in der Beseitigung von Inkonsistenzen in der Quantenstringtheorie gemacht (sog. Green-Schwarz Anomaly Cancellation). Das Ergebnis war, dass nur fünf(!) Stringtheorien übrig blieben. Schöner wäre es natürlich gewesen, eine eindeutige Theorie zu haben, doch im Vergleich zu den vielen möglichen Quantenfeldtheorien sind fünf Stringtheorien schon sehr wenig und auf eine einzige Theorie kann so leichter hingearbeitet werden.

Die übriggebliebenen Stringtheorien waren: Typ I, Typ IIA, Typ IIB, SO(32) heterotisch und $E_8 \times E_8$ heterotisch. Diese Theorien leben in zehn Dimensionen. Dies sind zwar nicht vier, aber immerhin schon weniger als die 26 der bosonischen Theorie.

Die Schwingungsmoden auf Strings lassen sich in natürlicher Weise aufteilen in solche, die gegen den Uhrzeigersinn um den String laufen und solche, die im Uhrzeigersinn um den String laufen, also in Links- und Rechtsläufer.

Die Typ I-Theorie ist eine Theorie mit offenen (relativistischen) und geschlossenen nicht orientierten (vgl. Möbiusband) Superstrings mit Eichgruppe SO(32). Die Rechtsläufer und die Linksläufer sind miteinander über die Randbedingung des offenen Strings verbunden und transformieren unter derselben Raumzeit-Supersymmetrie.

Die Typ IIA-Theorie ist eine Theorie mit geschlossenen orientierten Superstrings. Die Rechtläufer und die Linksläufer transformieren unter separaten Raumzeit-Supersymmetrien, welche entgegengesetzte Chiralitäten haben.

Die Typ IIB-Theorie ist wie die Typ IIA-Theorie eine Theorie mit geschlossenen orientierten Superstrings. Die Rechtsläufer und die Linksläufer transformieren unter separaten Raumzeit-Supersymmetrien, welche die gleiche Chiralität haben.

Die heterotischen Stringtheorien - der Begriff "Heterosis" kommt aus der Biologie und bedeutet ungefähr "Kreuzung" oder "Hybrid" - enthalten geschlossene Strings, deren Rechtsläufer denen des Typ II-Strings ähneln und deren Linksläufer die des bosonischen String involvieren. Je nach Eichgruppe - E_8xE_8 bzw. SO(32) - spricht man von heterotischer E-Stringtheorie bzw. heterotischer O-Stringtheorie. Die Rechtsläufer der heterotischen Stringtheorie sehen also aus wie diejenigen der Theorie vom Typ II. Wenn man ausschließlich die Rehtsläufer betrachtet, so gibt es keinen Unterschide zwischen den Typen IIA und IIB. Die Linksläufer der heterotischen Theorie jedoch sind die der ursprünglichen bosonischen Stringtheorie. Die bosonische Stringtheorie alleine führt zu unlösbaren Problemen, wenn man sie sowohl für die Links- als auch die Rechtsläufer wählt.. David Gross, Emil Martinec, Ryan Rhom und Jeffrey Harvey zeigten 1985, dass man in Kombination mit dem Typ II-String vernünftige Ergebnisse erhält. Diese Forscher waren 1985 an der Princeton Universität tätig und als "Princeton String Quartet" bekannt. Der bemerkenswerteste Gesichtspunkt dieser Kombination ist, dass die Linksläufer der heterotischen Theorie in 26, die Rechtsläufer dagegen nur in 10 Dimensionen leben. Gross et al. zeigten, dass die 16 Extradimensionen des bosonischen Anteils auf eine von nur zwei möglichen Arten zu ganz speziellen höherdimensionalen "Donuts" aufgewickelt sein müssen. Dies führt zu den beiden Eichgruppen SO(32) und E_8xE_8. Bei E_8 handel es sich um einer der exzeptionellen Lie-Gruppen. Sie hat den Rang 8 und 248 Generatoren. In der Chevalley-Basis brechen die 496 Generatoren von E_8xE_8 zusammen zu 16 paarweise kommutierenden Generatoren, die die Cartansche Unterfruppe bilden.

Der Vollständigkeit halber sollte noch der Typ 0-String erwähnt werden, bei dem es sich um ein Paar von nichtsupersymmetrischen Stringtheorien handelt, die Tachyonen und keine Raumzeit-Fermionen haben, mit derselben Weltflächen-Wirkung wie die Typ II-Theorien, aber mit verschiedenen Projektionen auf dem Hilbertraum.

Ein weiteres Ergebnis der zweiten Superstringrevolution war, dass Strings nicht die einzigen Objekte darstellen, die die zehndimensionnale Raumzeit bevölkern. Aehnlich wie bei Defekten in Kristallgittern existieren Defekte in der zehndimensionalen Raumzeit, an denen Strings enden können, d.h. auf denen sich die Enden von Strings bewegen. Solche Defekte können entweder punkt- oder selbst höherdimensional sein (vgl. etwa domain walls in der Festkörperphysik). Die Defekte heißen D-Branes. Das 'D' steht für "Dirichlet-Randbedingungen", da die Position der Stringenden - und nicht ihre Ableitung, wie bei den Neumann-Randbedingungen - ist als auf der (Mem)Bran liegend vorgegeben.

Schliesslich bezeichnet man mit M-Branen die Branen der M-Theorie, die sich aus Strings (1-Branen) und p-Branen konstituieren.

Das theoretische Konzept der Branen bezeichnet man umfassend als Branenwelt (engl. brane world) oder auch Brane World Scenario. Der zugehörige Formalismus hat alle Stringtheorien durchdrungen.

Welche Dualitäten wurden entdeckt?

Die S-Dualität invertiert die (dimensionslose) String-Kopplungskonstante und ist das Analogon der elektrisch-magnetischen Dualität (oder Stark-Schwach-Kopplungsdualität) in vierdimensionalen Eichtheorien. Daher konnte man von einer Theorie mit großer Kopplungskonstante zu einer mit kleiner springen (und umgekehrt). Der nichtperturbativen Stringtheorie war damit der Weg geebnet worden.

Die T-Dualität (von target) invertiert den Radius des Kreises oder die Länge des endlichen Intervalls, entlang derer eine einzelne Richtung der Raumzeit kompaktifiziert wird, wobei der Proportionalitätsfaktor in der Regel das Quadrat der Plancklänge ist.

Beide Dualitäten fasst man unter dem Begriff U-Dualität zusammen.

Das Ergebnis der zweiten Superstringrevolution war also (neben der (Wieder-)Entdeckung der p-Branen), dass alle fünf Superstringtheorien miteinander in Beziehung gesetzt werden konnten. Es stellte sich dabei heraus, das alle fünf äquivalent sind. Dies wiederum impliziert, dass alle eine zu Grunde liegende Theorie haben müssen. Diese zu Grunde liegende Theorie hat eine elfdimensionale Lösung, die bereits erwähnte M-Theorie, die noch mysteriös erscheinende Mutter aller Theorien. Übrigens gibt es auch eine F-Theorie (Father-Theory), auf die ich hier nicht eingehen möchte. Der Niedrigenergielimes der M-Theorie ist, wie Edward Witten und Petr Horava zeigten, die 11-dimensionale SUGRA.

Als klassische Theorien lassen sich die fünf Superstringtheorien klar unterscheiden. Als exakte Quantentheorien sind sie aber vermutlich durch Variation gewisser Parameter (Vakuumerwartungswerte von masselosen Skalarfeldern, genannt Moduli) kontinuierlich miteinander verbunden. String-Dualitäten führen also zu der Vorstellung eines Kontinuums von Stringtheorien (genannt Moduliraum), deren Analyse uns aber derzeit nur in gewissen Grenzfällen möglich ist, in denen die exakte Quantentheorie gut genug durch eine klassische Beschreibung angenähert werden kann. Solche Grenzfälle sind, neben den fünf klassischen Superstring-Theorien und der M-Theorie, eine Vielzahl von niedrigerdimensionalen Modellen, die derzeit Gegenstand intensiver Forschung sind.

Die Typ IIA-Theorie ist mit der Typ IIB-Theorie über T-Dualität auf $S^1 \times R^9$ verbunden, die heterotischen Theorien ebenfalls über diese T-Dualität und die Typ I-Theorie und die heterotische SO(32)-Theorie über die S-Dualität.

Die Hoffnung, das zentrale Problem der Elementarteilchenphysik zu lösen, nämlich das "Verheiraten" von Albert Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie mit der Quantentheorie, wurde erneut enorm genährt.

1996: Strominger und Vafa leiten die Bekenstein-Hawking-Formel für die Entropie eines schwarzen Loches aus der Stringtheorie her:

Im Januar 1996 veröffentlichten Andrew Strominger und Cumrun Vafa einen Artikel mit dem Titel "Microscopic Origin of the Bekenstein-Hawking-Entropy". Strominger und Vafa waren von Ergebnissen von Susskind und Sen ausgegangen und hatten die Bekenstein-Hawking-Formel mit ausschließlich stringtheoretischen Mitteln hergeleitet. Sie untersuchten die Klasse der sog. extremalen schwarzen Löcher. Dabei handelt es sich um schwarze Löcher, welche eine bestimmte Ladung haben und gleichzeitig die kleinste Masse besitzen, die bei ebendieser Ladung für ein schwarzes Loch möglich ist. Strominger und Vafa machten sich dazu die Ähnlichkeit dieser Definition des extremalen schwarzen Loches mit der der sog. Bogomol'nyi-Prasad-Sommerfield-Zustände (BPS-Zustände) zu Nutze. Hierbei handelt es sich um Zustände, die invariant unter einer nichttrivialen Subalgebra der vollen SUSY-Algebra sind. Solche Zustände tragen immer erhaltene Ladungen und die SUSY-Algebra bestimmt die Masse der Zustände exakt über diese Ladungen. Man kann es mit einer Schachtel vergleichen, deren Inhalt schon bekannt ist, sobald man nur weiß, dass dieser so leicht wie möglich ist und dass dieser die angegebene Ladung hat. Entscheidend an den BPS-Zuständen ist also der Umstand, dass all ihre Charakteristika sich auf eindeutige Weise exakt berechnen lassen, ohne auf die Störungsrechnung zurückgreifen zu müssen - und das sogar noch ohne großen Aufwand. Also selbst in Fällen mit großer String-Kopplungskonstante können die exakten Eigenschaften der BPS-Konfigurationen abgeleitet werden. Daher kann man unter "BPS" nicht nur die Initialen der Entdecker, sondern auch "beyond perturbative states" verstehen, wenn man so will. Strominger und Vafa bewiesen, dass sich bestimmte extremale schwarze Löcher theoretisch dadurch konstruieren lassen, dass man mit einer gewissen Anzahl von BPS-Branen mit genau festgelegten Dimensionen startet und sie, einem exakten Algorithmus folgend, miteinander verbindet. Man vergleiche dies mit der theoretischen Konstruktion eines Atoms aus einer gewissen Anzahl von Quarks und Elektronen. Im Gegensatz zum realistischen Entstehungsprozess schwarzer Löcher als möglicher Endprodukte der Sternentwicklung präsentierten Strominger und Vafa also gewissermaßen schwarze "Designer-Löcher". Dieser Ansatz stellte sich als sehr vorteilhaft heraus. Die beiden Forscher konnten dann leicht ausrechnen, auf wie viele verschiedene Arten sich die mikroskopischen Bestandteile ihrer Konstruktion umordnen lassen. Den erhaltenen Wert verglichen sie mit dem aus der Bekenstein-Hawking-Formel erhaltenen Wert für die Fläche des Ereignishorizont des schwarzen Loches, also der von Bekenstein und Hawking vorhergesagten Entropie. Es ergab sich eine exakte Übereinstimmung, womit ein 25 Jahre alte Rätsel gelöst worden war. Darin sahen viele Forscher eine Bestätigung der Stringtheorie. Sogar Sheldon Glashow, der noch in den 1980er Jahren ein Gegner der Stingtheorie gewesen war, äußerte sich in diesem Zusammenhang positiv über die Stringtheorie: "Wenn Stringtheoretiker über schwarze Löcher sprechen, hat man fast den Eindruck, dass sie über beobachtbare Phänomene sprechen - das ist schon beeindruckend."

Übrigens rechneten Strominger und Vafa zur wesentlichen Vereinfachung der mathematischen Arbeit ihrer Herleitung mit fünfdimensionalen schwarzen Löchern. Um mit der Bekenstein-Hawking-Formel vergleichen zu können, die natürlich für vier Dimensionen zuständig ist, mussten sie diese noch auf fünf Dimensionen umrechnen. Denn zu ihrer Überraschung hatten sie festgestellt, dass sich zuvor noch kein Theoretiker mit fünfdimensionalen schwarzen Löchern beschäftigt hatte. Einer der Forscher, die später die Entropierechnungen auf die uns bekanntere vierdimensionale Raumzeit verallgemeinerten, war Curtis Callan aus Princeton.

Eine weitere Dualität bzw. Korrespondenz ist zu nennen, die zunächst nicht die einzelnen Superstringtheorien miteinander, sondern die eine und wegen der Äquivalenz damit jede der Superstringtheorien mit der Yang-Mills-Theorie in Beziehung setzt. Es ist dies die AdS/CFT-Korrespondenz (auch Eichtheorie/Gravitation-Korrespondenz), die der argentinischen Physikers Juan Maldacena (Princeton, vorher Harvard), entdeckte. Maldacena hat das Verhalten von Superstrings untersucht, die sich in einem speziellen Raum konstanter negativer Krümmung, einem sogenannten Anti-de-Sitter (AdS)-Raum bewegen, in dessen Zentrum sich ein fünfdimensionales schwarzes Loch befindet. Dabei zeigte sich, daß die Dynamik im Innern des schwarzen Loches gewissermaßen auf seiner Oberfläche verschlüsselt ist und durch eine Eichfeldtheorie beschrieben werden kann. Dieser tiefe Zusammenhang zwischen der Stringtheorie und einer Eichfeldtheorie, den man schon seit längerem vermutete, hat das Interesse der Teilchenphysiker an der Stringtheorie noch verstärkt. Sog. D-Branes (Branen mit Dirichlet-Randbedingungen, s.o.) transportieren Eichfelder, während sie auf der anderen Seite eine duale Beschreibung der klassischen Bewegungsgleichungen der Stringtheorie und der Supergravitation zulassen. Wenn man fordert, dass diese beiden Beschreibungen äquivalent sind, so impliziert das, dass die Stringtheorie in einigen speziellen Fällen äquivalent zu einer Eichfeldtheorie ist. Dies ist eine explizite Realisierung der alten Ideen, nach denen die Yang-Mills-Theorie als eine gewisse Art Stringtheorie dargestellt werden kann. Diese Entdeckung hat auch neue Erkenntnisse für die Yang-Mills-Theorie gebracht. Auch der berühmte Stephen Hawking aus Cambridge, der der Stringtheorie eigentlich eher kritisch gegenübersteht, nutzte die Möglichkeiten dieser Resultate, um die Stabilität bestimmter schwarzer Löcher zu untersuchen. Maldacenas Entdeckung ist ein Beispiel für das bislang noch unbewiesene und sehr wichtige holographische Prinzip, das zuerst vom niederländischen Nobelpreisträger Gerard 't Hooft (Universität Utrecht) und später von Susskind vorgeschlagen wurde. Demnach soll es im Rahmen einer Quantengravitationstheorie möglich sein, die physikalischen Vorgänge in einem räumlichen Volumen durch geeignete Observable an dessen Oberfläche zu beschreiben. Volumina hätten also wesentlich weniger Freiheitsgrade als bisher angenommen. Doch der Versuch, diese Resultate auch auf andere Räume als den schon erwähnten AdS Raum anzuwenden, blieb bisher erfolglos.

Von mindestens zwei Seiten her könnte die Stringtheorie in naher Zukunft eine experimentelle Bestätigung finden. Zum einen wird am Large Hadron Collider (LHC) des CERN nach supersymmetrischen Partnern der bekannten Elementarteilchen gesucht. Da diese Partner, falls sie existieren, nicht dieselben Massen haben wie die bekannten Teilchen, kann die Supersymmetrie nicht exakt gelten, sie muß gebrochen sein. Ashoke Sen vom Mehta Research Institute in Allahabad, Indien, forscht daran, wie dies im Rahmen der Stringtheorie möglich ist, in der die Supersymmetrie ja exakt gilt. Dazu hat er nichtsupersymmetrische D-Branen konstruiert. Auf diesen höherdimensionalen Anregungen, die gewissermaßen Schnittflächen im 11-dimensionalen Raum sind, können sich Eichfelder ausbreiten. Die Gravitation hingegen beherrscht den gesamten Raum. Ziel dieser Arbeit ist es, das uns bekannte Universum und der in ihm herrschenden Wechselwirkungen mit Hilfe einer geeigneten D-Bran zu beschreiben.

Zum anderen nahm man, wie bereits erläutert wurde, bisher an, dass die Kompaktifizierung der überschüssigen Raumdimensionen auf der Skala der Planck-Länge erfolgt, die das natürliche Längenmaß in einer Quantengravitationstheorie ist und ca. 10^{-35} m beträgt. Doch die Arbeiten von Ignatios Antoniadis und Costas Bachas von der École Normale Supérieure (ENS) in Paris haben interessanterweise gezeigt, dass zumindest einige der Dimensionen wesentlich gröber aufgewickelt sein könnten, ohne dass dies mit bekannten Resultaten in Widerspruch gerät. Diese Dimensionen ließen sich möglicherweise mit Beschleunigerexperimenten im TeV-Bereich direkt nachweisen. Darüber hinaus würden sie sich auch durch Abweichungen von Newtons Gravitationsgesetz bemerkbar machen. In diesem Bereich gibt es bislang noch keine experimentellen Ergebnisse, doch inzwischen bereitet man entsprechende Messungen vor. Die Stringtheoretiker sind fasziniert von der Möglichkeit, die Extradimensionen experimentell beobachten zu können, wenn auch die meisten eher ein negatives Ergebnis erwarten. Unabhängig davon, auf welcher Größenskala die überschüssigen Dimensionen kompaktifiziert sind, muß sich die Stringtheorie die Frage stellen, was bei hinreichend kleinen räumlichen Abständen geschieht. Bislang nahm man vereinfachend an, daß sich die Strings in einem glatten Raum-Zeit-Kontinuum bewegen. Doch in einer Quantengravitationstheorie wird nicht nur der Begriff des punktförmigen Teilchens bedeutungslos, sondern sogar der des Punktes im Raum-Zeit-Kontinuum. In der Stringtheorie müssen sich auch Raum und Zeit in der Sprache der Strings beschreiben lassen.

Ein besonders wichtiger Versuch, die Geometrie quantenmechanisch zu verallgemeinern, ist die sogenannte Nichtkommutative Geometrie, die vor allem auf den Franzosen Alain Connes (Field-Medaillenträger, IHES und Collége de France, Paris) zurückgeht und an der auch der hier in Münster tätige Leibniz-Preisträger Joachim Cuntz intensiv und erfolgreich arbeitet. Demnach werden die räumlichen Koordinaten zu nichtkommutierenden Größen. Edward Witten und Nathan Seiberg vom Institute for Advanced Study in Princeton haben diese Idee aufgegriffen und gezeigt, dass sie sich in die Stringtheorie einfügen lässt. Witten untersuchte dazu das Verhalten von Strings in Magnetfeldern. In starken Feldern treten neuartige Phänomene auf, die man mit herkömmlichen Eichtheorien nicht mehr beschreiben kann. Deshalb wurden die sogenannten nichtkommutativen Eichtheorien entwickelt. Die Ergebnisse in der Nichtkommutativen Geometrie seien zwar noch nicht sehr weit gediehen (?!), meinte Witten, doch er finde sie aufregend genug.

Es bleiben zahlreiche Fragen in der Stringtheorie offen.

Die M-Theorie ist erst zu einem kleinen Teil und nur näherungsweise bekannt.

David Gross von der University of California in Santa Barbara formulierte einige wichtige offene Fragen:

Was geschieht auf mikroskopischer Ebene, wenn Schwarze Löcher entstehen oder verdampfen?

Wie beschreibt man dynamische Probleme, z. B. die Entwicklung des Universums?

Wie kann man die Stringtheorie unabhängig von einem raumzeitlichen Hintergrund machen und dabei ohne Störungstheorie auskommen?

Wie läßt sich das holographische Prinzip präzisieren?

Michael Green von der University of Cambridge, einer der Begründer der Stringtheorie, sieht Parallelen zwischen der heutigen Situation und der vor 1925. Die Physiker hätten in den Jahren von 1900 bis 1924 die Bohrsche Quantenmechanik entwickelt, ohne eigentlich zu wissen, was sie da taten. Doch im Jahre 1925 änderte sich alles mit Heisenbergs Matrizenmechanik. In der Stringtheorie hingegen fehlt weiterhin das fundamentale Prinzip. Um es zu finden, ist wahrscheinlich eine radikal andere Sichtweise nötig.

Man hat z.B. auch noch keine Lagrangedichte für die M-Theorie gefunden.

Es gilt, eine komplette und optimale Formulierung der String- bzw. M-Theorie zu finden: Obwohl man Techniken hat, um große Klassen von konsistenten Quantenvakua zu finden, hat man keine kurze und zwingende Formulierung der zu Grunde liegenden Theorie, von der sie die Vakua sind. Viele Dinge, die man für selbstverständlich hält, wie die Existenz einer Raumzeit- Mannigfaltigkeit , sollten wahrscheinlich eher hervortretende Eigenschaften von spezifischen Vakua sein als identifizierbare Merkmale der zu Grunde liegenden Theorie. Falls dies korrekt ist, brauchen wir hier eine Theorie, die sich von denen, die wir gewohnt sind, deutlich unterscheidet. Es ist möglich, dass der Name "Stringtheorie" nach der Entdeckung der passenden Formulierung veraltet sein wird.

Des Weiteren gilt es insbesondere für Elementarteilchenphysiker, an die sich dieses Seminar ja auch wendet, zu verstehen, warum die kosmologische Konstante (die Energiedichte des leeren Raums) verschwindet. Der exakte Wert mag ungleich Null sein, aber eine Lorentz-invariante Minkowski-Raumzeit, die eine verschwindende Vakuumsenergie erfordert, ist sicherlich eine exzellente Approximation an die wirkliche Welt, was Zwecke der Teilchenphysik anbelangt. Die kosmologische Konstante wird auch Lambda-Term der Einsteinschen Feldgleichungen genannt. Es handelt sich um einen additiven Term in den Feldgleichungen neben dem Energie-Impuls-Tensor, der die Interpretation einer Vakuumenergiedichte hat. Diese Grösse geht auf Albert Einstein zurück und wurde von ihm seiner Zeit eingeführt um das damals von ihm aus ästhetischen Gründen favorisierte statische Universum physikalisch zu erklären. Als sich dann in den 20er Jahren des 19. Jahrhunderts herausstellte, dass die Galaxien einer Fluchtbewegung unterliegen und sich das Universum ausdehnt (Hubble-Effekt), verwarf Einstein die kosmologische Konstante und bezeichnete sie als seine "größte Eselei". Nach aktuellen Messungen erlebt die kosmologische Konstante (ein nicht-verschwindender Lambda-Term) eine Renaissance und ist sogar die entscheidende Kraft im Universum: Sie überwiegt den baryonischen und nicht-baryonischen Anteil um einen Faktor 2. Damit ist die Dunkle Energie die entscheidende Substanz noch vor der Dunklen Materie. Das Schicksal des Universums (pulsierendes Universum, kaltes Universum etc.) hängt von seinem Materieinhalt (bzw. präzise formuliert von den Massen- und Energiedichten) ab. Was kann die Stringtheorie hier leisten?

Ein Kosmologe würde die Fragestellung zur kosmologischen Konstanten in Gegensatz zum Elementarteilchenphysiker vielleicht eher folgendermaßen formulieren: Es gilt zu verstehen, warum die kosmologische Konstante sehr klein ist, aber nicht Null. Die Beobachtungen (Messungen der Hintergrundstrahlung (Cosmic

Microwave Background, CMB) von Ballon-Experimenten (BOOMERANG, MAXIMA) sowie Messungen des Mikrowellen-Satelliten WMAP 2003) weisen darauf hin, dass 70 % der kosmischen Materie aus Dunkler Energie besteht. Die Zustandsgleichung der Dunklen Energie ist dominiert von einem hohen negativen Druck, der das Universum auseinandertreibt und beschleunigt. Wie kann die Stringtheorie hier helfen?

Man will weiter alle statischen Lösungen für Quantenvakua der Theorie finden. Dies sind sehr viele. Sehr viele Familien von konsistenten supersymmetrischen Vakua sind gefunden worden. Die Analyse gestaltet sich sehr schwierig.

Welches Quantenvakuum beschreibt die gesamte Teilchenphysik?

Welche Mathematik brauchen wir für die M-Theorie?

Man erkennt, dass es auf dem Gebiet der Stringtheorie noch sehr viel zu erforschen gibt. Ich möchte mit diesem Vortrag auch besonders junge Forscher auf dieses hochinteressante Gebiet der Physik aufmerksam machen.

Literatur:

Standardlehrwerke zur Stringtheorie:

Green, M.; Schwarz, J.; Witten, E.: Superstring theory, vol. 1(Introduction) u. 2 (Loop Amplitudes, Anomalies and Phenomenology). Cambridge University Press 1987.

Polchinski, J.: String Theory, vol. 1 (An introduction to the bosonic string) u. 2 (Superstrings and beyond). Cambridge University Press 1998.

Weitere Lehrbücher über Stringtheorie:

Bailin, D.; Love, A.: Supersymmetric Gauge Field Theory and String Theory. IOP Publishing, Bristol, 1994.

Brink, L; Henneaux, M.: Principles of String Theory. Kluwer Academic/Plenum Publishers 1988.

Deligne, P. [Hrsg.]: Quantum Fields and Strings: A Course for Mathematicians, American Mathematical Society 1999.

Duff, M. J. [Hrsg.]: The World in Eleven Dimensions: Supergravity, Supermembranes and M-Theory (Studies in High Energy Physics, Cosmology and Gravitation). Institute of Physics Pub. 1999.

Johnson, C.V.: D-Branes. Cambridge University Press 2003.

Kaku, M.: Strings, Conformal Fields, and Topology (Graduate Texts in Contemporary Physics). Springer 1991.

Kaku, M.: Introduction to Superstrings and M- Theory. Springer 1999.

Kaku, M.: Strings, Conformal Fields, and M- Theory. Springer 2000.

Lüst, D.; Theisen, S.: Lectures on string theory. Springer 1989.

Piran, T.; Weinberg, S.: Strings and Superstrings. World Scientific Pub Co Inc 1987.

Piran, T.; Weinberg, S.: Strings and Superstrings. World Scientific Pub Co Inc 1988.

String-Seiten im www:

- "Offizielle" Superstring-Seite im Netz: http://www.superstringtheory.com/

- Superstrings!-Seite von John M. Pierre: http://www.sukidog.com/jpierre/strings/

- "M-Theory, the theory formerly known as Strings", Teil einer größeren und sehr schönen Webseite der Cambridge Relativity Group: http://www.damtp.cam.ac.uk/user/gr/public/qg_ss.html

- zum Anhören: Kavli ITP Teacher's Educational Forum (University of California) zum Thema "String Theory: Is it the Theory of Everything? What are the Building Blocks of the Universe?": http://online.itp.ucsb.edu/online/mt01teach/ und "Miniprogram on Geometry and Duality" (u.a. Supersymmetrie u. Stringtheorie): http://online.itp.ucsb.edu/online/geom/schedule.html

- Seiten von Stringtheoretikern (s.u.)

Konferenzen ("Strings 'n" etc.) mit Proceedings:

"Strings '95", http://citusc.usc.edu/Seminars/Strings95/proceed.html, Los Angeles, USA;

"Strings '96", http://www.itp.ucsb.edu/ joep/proceedings.html, Santa Barbara, USA;

"Strings '97", http://www.wins.uva.nl/research/strings97/, Amsterdam, Niederlande;

"Strings '98", http://doug-pc.itp.ucsb.edu/ strings98/, Santa Barbara, USA;

"Strings '99", http://strings99.aei-potsdam.mpg.de/, Potsdam, Deutschland;

"Strings 2000", http://feynman.physics.lsa.umich.edu/strings2000/, Ann Arbor, USA;

"Strings 2001", http://theory.theory.tifr.res.in/strings/, Mumbia, Indien;

"Strings 2002", http://www.damtp.cam.ac.uk/strings2002/, Cambridge, UK;

"Strings 2003", http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/ str2003/index.html, Kyoto, Japan;

"Strings 2004", http://windey.home.cern.ch/windey/, Paris, Frankreich;

"Strings 2005", http://www.fields.utoronto.ca/programs/scientific/04-05/string-theory/, Toronto, Kanada;

"String Theory at The Millennium", 2000, http://theory.caltech.edu/conf2000/, Caltech und University of Southern California, USA;

"Avatars of M-Theory", 2001, http://online.itp.ucsb.edu/online/mtheory_c01/, Santa Barbara, USA;

"M Theory Cosmology", 2001, http://www.damtp.cam.ac.uk/user/mt-cosmo/, Cambridge, UK;

"The First International Conference on String Phenomenology",

http://www-thphys.physics.ox.ac.uk/users/AlonFaraggi/conference.html, 2002, Oxford, UK;

"International Conference on String Theory in Běijīng", 2002, http://www.itp.ac.cn/english/string2002/, Běijīng, China.

Einige StringtheoretikerInnen mit interessanten Web-Seiten:

Martin Cederwall, http://fy.chalmers.se/ tfemc/, Chalmers University und Universität Göteborg ;

Eric D'Hoker, http://www.physics.ucla.edu/faculty/ladder/dhoker.html, UCLA;

Robbert Dijkgraaf, http://turing.wins.uva.nl/ rhd/, Universität Amsterdam;

Michael Dine, http://scipp.ucsc.edu/personnel/profiles/dine.html, UC Santa Cruz;

Michael J. Duff, http://feynman.physics.lsa.umich.edu/ mduff/, University of Michigan;

S. J. Gates, Jr., http://www.physics.umd.edu/ep/gates/gates.html, University of Maryland;

Steve Giddings, http://www.physics.ucsb.edu/ giddings/sbg.html, University of California Santa Barbara;

Brian Greene, http://phys.columbia.edu/faculty/greene.htm, Columbia University;

Michael Green, http://www.damtp.cam.ac.uk/user/mbg15/, University of Cambridge;

Clifford Johnson, http://www.maths.dur.ac.uk/ dma0cvj/, University of Durham;

Michio Kaku, http://www.mkaku.org/, City Univ. of New York;

Olaf Lechtenfeld, http://www.itp.uni-hannover.de/ lechtenf/hallo.html, Universität Hannover;

Robert G. Leigh, http://www.physics.uiuc.edu/People/Faculty/profiles/Leigh/, University of Illinois at Urbana-Champaign;

Wolfgang Lerche, http://nxth21.cern.ch/ lerche/, CERN;

Jan Louis, http://www.desy.de/ jlouis/, http://www.desy.de/uni-th/stringth/index.html, DESY, Universität Hamburg;

Dieter Lüst, http://qft.physik.hu-berlin.de/ luest/, Humboldt University, Berlin;

Joseph D. Lykken, http://fnth37.fnal.gov/lykken/, Fermi National Accelerator Laboratory;

Juan Maldacena, http://www.sns.ias.edu/ malda/, Institute for Advanced Study, Princeton;

Thomas Mohaupt, http://www.tpi.uni-jena.de/ moh/welcome.html, Universität Jena;

David Morrison, http://www.math.duke.edu/ drm/, Duke University;

Sunil Mukhi, http://theory.tifr.res.in:80/ mukhi/, Tata Institute of Fundamental Research;

Hermann Nicolai, http://www.aei-potsdam.mpg.de/cgi-bin/interface/people.cgi?key=nicolai, AEI Potsdam und Humboldt-Universität Berlin;

Hans-Peter Nilles, http://www.th.physik.uni-bonn.de/nilles/, Universität Bonn;

Bengt E W Nilsson, http://fy.chalmers.se/ tfebn/, Chalmers University of Technology and Göteborg University;

Amanda W. Peet, http://www.physics.utoronto.ca/ peet/deptwebp/, University of Toronto;

Joe Polchinski, http://www.itp.ucsb.edu/ joep/index.html, Institute for Theoretical Physics, Santa Barbara;

John Schwarz, http://theory.caltech.edu/people/jhs/, California Institute of Technology;

Nathan Seiberg, http://www.sns.ias.edu/ seiberg/, Institute for Advanced Study, Princeton;

Ashoke Sen, http://www.mri.ernet.in/ sen/, Harish-Chandra Research Institute in Allahabad;

Warren Siegel, http://insti.physics.sunysb.edu/ siegel/plan.html, State University of New York, Stony Brook;

Eva Silverstein, http://www.slac.stanford.edu/slac/faculty/hepfaculty/silverstein.html, SLAC und Stanford Physics Department;

Andrew Strominger, http://www.physics.harvard.edu/strominger.htm, Harvard University;

Gerhard 't Hooft, http://www.phys.uu.nl/ thooft/, Universität Utrecht;

Cumrun Vafa, http://www.physics.harvard.edu/vafa.htm, Harvard University;

Edward Witten, http://www.sns.ias.edu/ witten/,
http://www-groups.dcs.st-andrews.ac.uk/ history/Mathematicians/Witten.html, SNS IAS Princeton.

Einführende populärwissenschaftliche Artikel:

Adams, Steve: A theory of everything. New Scientist, v. 161 (Feb. 20, 1999), Inside Science section, 1-4.

Arkani-Hamed, Nima et al.: The universe´s unseen dimensions. Scientific American, v. 283 (Aug. 2000), 62-69.

Duff, Michael J.: The theory formerly known as strings. Scientific American, v. 278 (Feb. 1998), 64-69.

Gibbons, Gary: Brane-worlds. Science, v. 287 (Jan. 7, 2000), 49-50.

Green, Michael: Superstrings. Scientific American, v.255 (Sep. 1986), 44-56.

Green, Michael: Superstrings. Spektrum der Wissenschaft (Nov. 1986).

Greene, Brian: The heart of matter. Natural history, v. 109 (Feb. 2000), 80-83.

Mukerjee, M.: Explaining everything. Scientific American, January 1996.

Mukhi, Sunil: The theory of strings: an introduction. Current science, v. 77 (Dec. 25, 1999), 1624-1634.

Nash, J. Madeleine: Unfinished symphony. Time, v. 154 (Dec. 31, 1999), 83, 86-87.

Taubes, Gary: A Theory of Everything Takes Shape. Science 269 (1995).

Taubes, Gary: String theorists find a Rosetta Stone. Science, v. 285 (July 23, 1999), 512-515, 517.

Townsend, P.: Unity from Duality. Physics World, Sept. 1995.

Von Baeyer, Hans Christian: World on a string. The Sciences, v. 39 (Sept./Oct. 1999), 10-13.

Waldrop, M. M.: Strings as a theory of everything. Science, v. 229 (1985), 1251-1252.

Witten, E.: Reflections on the Fate of Spacetime. Physics Today, April 1996.

Populärwissenschaftliche Bücher über Stringtheorie etc.:

Davies, P.C.; Brown, Julian: Superstrings. Eine Allumfassende Theorie der Natur in der Diskussion. dtv 1992.

Greene, Brian: The Elegant Universe. Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory. Vintage Books 2000. dt. Übersetzung: Das elegante Universum. Berliner Taschenbuch Verlag 2002.

Kaku, M.; Trainer Thompson, J.: Beyond Einstein: Superstrings and the Quest for the Final Theory. Oxford Paperbacks 1997.

Peat, Frederick David: Superstrings and the search for the theory of everything. Chicago: Contemporary

Books 1988. dt. Übersetzung von Hainer Kober: Superstrings, kosmische Fäden. die Suche nach der Theorie, die alles erklärt. Hoffmann und Campe 1989.

't Hooft, Gerard: De bouwstenen van de schepping. Een zoektocht naar het allerkleinste. Prometheus Amsterdam 2002.

't Hooft, Gerard: In Search of the Ultimate Building Blocks. Cambridge University Press 1996.

Einführung in die Stringtheorie (Artikel, Skripta etc.:)

Schwarz, John H.: Introduction to Superstring Theory. hep-ex/0008017 (Aug. 2000).

Schwarz, John H.: String Theory: The Early Years. hep-th/0007118 (Juli 2000).

Schwarz, John H.: Update on String Theory. astro-ph/0304507 (Apr. 2003).

de Boer, J.: String theory: an update. hep-th/0210224 (Jan. 2003).

Dienes, Keith R.: String Theory and the Path to Unification. A Review of Recent Developments. hep-th/9602045 (März 1997).

Goevarts, Jan: String and Superstring Theories: An introduction. Conference Guernavaca 1986, II. Mexican School of Particles and Fields, Eds. J. L. Lucio, A. Zepeda, World Scientific 1987.

Helling, Robert; Hoppe, Jens: M fuer Membran?. http://www.aei-potsdam.mpg.de/ helling/

Nicolai, Hermann: What are String Theories?. Prog. Part. Nucl. Phys. 19 (1987): 1-31.

Kiritsis, Elias: Introduction to Superstring Theory, hep-th/9709062 (März 1998).

Mohaupt, Thomas: Introduction to String Theory. hep-th/0207249 (Juli 2002).

Mohaupt, Thomas: String Theory. Vorlesungsskript SS 2003, erhältlich auf der Web-Seite von Dr. habil. Mohaupt der Uni Jena: http://www.tpi.uni-jena.de/ moh/welcome.html.

Mohaupt, Thomas: Vierdimensionale Supersaiten auf kovarianten Gittern. Diplomarbeit, RWTH Aachen, April 1989,
erhältlich auf der Web-Seite von Dr. habil. Mohaupt der Uni Jena: http://www.tpi.uni-jena.de/ moh/welcome.html.

Ooguri, H.; Yin, Z.: TASI Lectures on Perturbative String Theory, hep-th/9612254

Polchinski, Joseph: What is String Theory?. hep-th/9411028 (Nov. 1994).

't Hooft, G.: Introduction to String Theory. Vorlesungsskript 2003,
erhältlich auf der Web-Seite von Gerard 't Hooft an der Uni Utrecht: http://www.phys.uu.nl/ thooft/lectures/string.html.

Szabo, Richard J.: BUSSTEPP Lectures on String Theory. An Introduction to String Theory and D-Brane Dynamics. hep-th/0207142 (Juli 2002).

Artikel zur Einführung in die M-Theorie:

Bilal, Adel. M(atrix) theory: a pedagogical introduction. hep-th/9710136 (Okt. 1997).

Dine, M.: TASI lectures on M theory phenomenology. hep-th/0003175 (März 2000).

Duff, M. J.: A Layman's Guide to M-Theory. hep-th/9805177 (Juli 1998).

Li, Miao: Introduction to M Theory. hep-th/9811019 (Dez. 1998).

Schwarz, John H.: From Superstrings to M Theory. gr-qc/9812029 (Dez. 1998).

Schwarz, John H.: Introduction to M Theory and AdS/CFT Duality. hep-th/9812037 (Dez. 1998).

Townsend, P. K.: Four lectures on M-Theory. hep-th/9612121 (Sept. 1997).

Speziellere Artikel über M-Theorie:

Horava, Petr; Witten, Edward: Heterotic and type I string dynamics from eleven dimensions. hep-th/9510209 (Nov. 1995).

Horava, Petr; Witten, Edward: Eleven-dimensional supergravity on a manifold with a boundary. hep-th/9603142 (März 1996).

Conrad, Jan O.: Brane Tensions and Coupling Constants from within M-Theory. hep-th/9708031 (Aug. 1997).

Schwarz, John H.: The Power of M Theory. hep-th/9510086 (Okt. 1995).

Einige weiterführende Artikel über Strings, Branen, M-Theorie etc.:

Dijkgraaf, Robbert: Les Houches Lectures on Fields, Strings and Duality. hep-th/9703136 (März 1997).

Duff, M. J.: Supermembranes. hep-th/9607021 (Nov. 1996).

Förste, Stefan: Strings, Branes and Extra Dimensions. hep-th/0110055 (Jan. 2002).

Greene, Brian R.: String theory on Calabi-Yau manifolds. hep-th/9702155 (Feb. 1997).

Gubser, Steven S.: TASI lectures: special holonomy in string theory and M-Theory. hep-th/0201114 (März 2002).

Mohaupt, Thomas: Kompaktifizierungen der heterotischen Stringtheorie auf Tori und Orbifolds. Dissertation, Westfälische Wilhelms Universität Münster, 14. Juli 1993 (verbesserte Version von Kap. 7 s. hep-th/9310184).

Polchinski, Joseph: TASI Lectures on D-Branes. hep-th/9611050 (Apr. 1997).

Quevedo, Fernando: Lectures on Superstring Phenomenology. hep-th/9603074 (März 1996).

Schwarz, John H.: Beyond Gauge Theories. hep-th/9807195 (Sept. 1998).

Schwarz, John H.: Lectures on Superstring and M Theory Dualities. hep-th/9607201 (Sept. 1996).

Schwarz, John. H.: Recent Progress in Superstring Theory. hep-th/0007130 (Juli 2000).

Schwarz, John. H.: Superstring Dualities. hep-th/9509148 (Okt .1995).

Schwarz, John. H.: The Second Superstring Revolution. hep-th/9607067 (Juli 1996).

Schwarz, John H.: The Status of String Theory. hep-th/9711029 (Nov. 1997).

Sen, Ashoke: An Introduction to Non-perturbative String Theory. hep-th/9802051 (Feb. 1998).

Sen, Ashoke: Developments in Superstring Theory. hep-ph/9810356 (Okt. 1998).

Artikel über Stringtheorie und Supersymmetrie:

Schwarz, John H.: String Theory Origins of Supersymmetry. hep-th/0011078 (Nov. 2000).

Schwarz, John H.; Seiberg, Nathan: String Theory, Supersymmetry, Unification, and All That. hep-th/9803179 (Apr. 1998).

Artikel über Stringtheorie und Kosmologie:

Banks, Tom: M theory and cosmology. hep-th/9911067 (Nov. 1999).

Brustein, Ram; Steinhardt, Paul J.: Challenges for superstring cosmology. hep-th/9212049 (Dez. 1992.

Carroll, Sean M.: TASI Lectures: Cosmology for String Theorists. hep-th/0011110 (Nov. 2000).

Duff, M. J.: TASI lectures on branes, black holes and Anti-de Sitter space. hep-th/9912164 (Jan. 2000).

Easson, Damien A.: The interface of cosmology with string and M(illennium) theory. hep-th/0003086 (März 2001).

Lidsey, J. E.; Wands, D.; Copeland, E. J.: Superstring cosmology. hep-th/9909061(Feb. 2000).

Mohaupt, Thomas: Black hole entropy, special geometry and strings. hep-th/0007195 (Sep. 2000).

Mohaupt, Thomas: Black Holes in Supergravity and String Theory. hep-th/0004098 (April 2000).

Ohta, Nobuyoshi: Introduction to branes and M-Theory for relativists and cosmologists. gr-qc/0205036 (Juni 2002).

Peet, Amanda W.: TASI lectures on Black Holes in String Theory. hep-th/0008241(Sept. 2000).

Veneziano, G.: String cosmology: The pre-big bang scenario. hep-th/0002094 (Feb. 2000).

Ambjørn, Jan: Strings, quantum gravity and non-commutative geometry on the lattice. hep-lat/0201012 (Jan. 2002).

Artikel zur Mathematik in und aus der Stringtheorie:

Dijkgraaf, Robbert: The Mathematics of M-Theory.
www.mathematik.uni-bielefeld.de/ rehmann/ ECM/cdrom/3ecm/pdfs/pant3/dijkgr.pdf.

Nag, Suhashis: Mathematics in and out of String Theory. alg-geom/9512010 (Dez. 1995).

Artikel über K-Theorie:

Witten, Edward: Overview of K-Theory Applied to Strings. hep-th/0007175 (Juli 2000).

Witten, Edward: D-Branes and K-Theory. hep-th/9810188 (Nov. 1998).

Artikel über Nichtkommutative Geometrie:

Bigatti, Daniela: Non-commutative spaces in physics and mathematics. hep-th/0006012 (Juni 2000).

Connes, Alain; Douglas, Michael R.; Schwarz, Albert: Noncommutative Geometry and Matrix Theory: Compactification on Tori. hep-th/9711162 (Feb. 1998).

Douglas, Michael R.: Two Lectures on D-Geometry and Noncommutative Geometry. hep-th/9901146 (Feb. 1999).

Madore, J.: Noncommutative Geometry for Pedestrians. gr-qc/9906059 (Juli 1999).

Witten, Edward, Seiberg, Nathan: String Theory and Noncommutative Geometry. hep-th/9908142 (Nov. 1999).

Artikel über Mirror Symmetry:

Hosono, S.; Klemm, A.; Theisen, S.: Lectures on Mirror Symmetry. hep-th/9403096 (März 1994).