

# Die vielen Saiten der Stringtheorie

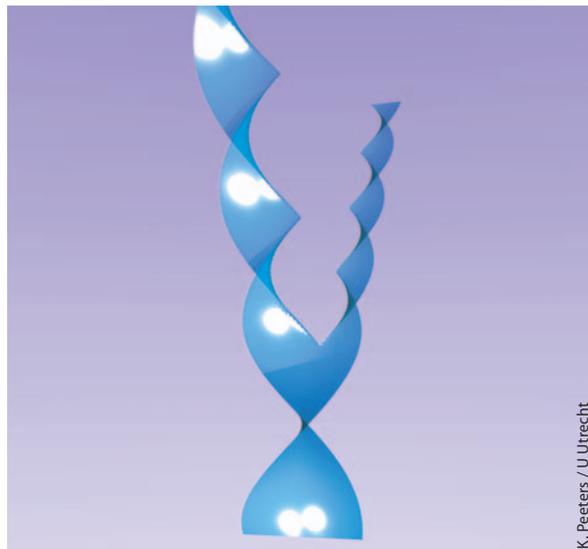
Auf dem Weg zu einer Theorie der Quantengravitation

Jan Louis

Die jüngsten kosmologischen Beobachtungen haben das Bild eines expandierenden Universums ausgehend von einem heißen Urknall beeindruckend bestätigt. Die Expansion und die Entwicklung des Kosmos lassen sich überzeugend mit den bestehenden physikalischen Theorien beschreiben. Lediglich der Anfang, die Urknallsingularität, entzieht sich bislang einer physikalischen Beschreibung. Dazu ist eine Theorie notwendig, die Quantenmechanik (bzw. die Teilchenphysik) und die Allgemeine Relativitätstheorie vereint. Ein möglicher Kandidat für eine solche Quantengravitationstheorie ist die Stringtheorie.

Nähern wir uns immer weiter dem Urknall, so erreichen wir irgendwann Distanzen unterhalb der Planck-Länge  $l_{\text{pl}} = \sqrt{\hbar G/c^3} \approx 10^{-35}$  m – das ist 20 Größenordnungen kleiner als der Durchmesser eines Protons. Spätestens hier verlassen wir den Bereich, in dem sich die uns bislang bekannten physikalischen Theorien anwenden lassen. Hier wird der Schwarzschild-Radius eines Teilchens gleich seiner Compton-Wellenlänge, d. h. die charakteristischen Skalen von Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantentheorie sind von gleicher Größenordnung. Wenn auch diese Größenordnungen nur schwer dem Experiment oder der Beobachtung zugänglich sind, so ist die Existenz einer physikalischen Theorie an der Planck-Länge doch unumgänglich. Die Stringtheorie, die Ende der Sechzigerjahre entwickelt worden war, um die starke Wechselwirkung zu beschreiben, gilt heute als ein möglicher Kandidat für eine Theorie der Quantengravitation [1, 2].

Die Grundidee der Stringtheorie ist zunächst einfach: Statt des klassischen punktförmigen Teilchens fungiert ein eindimensionales Objekt, der „String“ (engl. für Saite), als idealisierter Baustein der Materie. Dieser String lässt sich weitgehend analog zur Quantenmechanik eines Punktteilchens quantisieren. Um die Quantisierungsvorschriften anwenden zu können, ist es allerdings notwendig, eine Minkowski-artige Raum-Zeit vorzugeben, in der sich der String bewegt. Somit überstreicht der String eine zwei-dimensionale Weltfläche in einer höher-dimensionalen Raum-Zeit. Die quantisierten Schwingungsanregungen des Strings übernehmen in der Stringtheorie nun die Rolle der Elementarteilchen. Im resultierenden Anregungsspektrum findet sich eine endliche Anzahl von masselosen



K. Peeters / U Utrecht

Die Stringtheorie beschreibt Elementarteilchen als verschiedene Oszillationen eines ausgedehnten saitenartigen Objekts. Hier ist das Raum-Zeit-Diagramm eines Stringprozesses zu sehen, der den Zerfall eines Teilchens in zwei andere beschreibt.

Anregungen mit den Spins  $s = 0, 1/2, 1, 3/2, 2$ , sowie eine unendliche Anzahl von massiven Anregungen mit beliebig hohen Spins. Die Masse dieser Anregungen steht direkt mit der Stringspannung in Verbindung und ist ein ganzzahliges Vielfaches einer charakteristischen Massenskala  $M_s$ . Diese ist zunächst frei wählbar und durch die Theorie nicht festgelegt.

Unter den masselosen Anregungen findet sich notwendigerweise immer eine Anregung mit Spin 2. Diese wird mit dem Graviton, dem Austauschteilchen der Schwerkraft, identifiziert. Oder anders ausgedrückt: Diese Anregung ist das Analogon des Photons für das

## KOMPAKT

- Im Rahmen der Stringtheorie sind die Bausteine der Materie nicht punktförmige Teilchen, sondern eindimensionale „Saiten“ (engl. strings).
- Im Rahmen eines störungstheoretischen Zugangs vereinigt die Stringtheorie alle uns bekannten Wechselwirkungen inklusive der Gravitation.
- Qualitativ findet man Übereinstimmung mit supersymmetrischen Versionen des Standardmodells sowie kosmologischen Beobachtungen.
- Vieles deutet darauf hin, dass die bekannten fünf unterschiedlichen Stringtheorien verschiedene Grenzfälle einer fundamentalen „M-Theorie“ sind.

Prof. Dr. Jan Louis,  
II. Institut für Theoretische Physik der  
Universität Hamburg,  
Luruper Chaussee 149,  
22761 Hamburg

Gravitationsfeld (Abb. 1). In der Tat muss das Graviton Ruhemasse Null haben, um über beliebig große Distanzen wirken zu können, und auch sein Spin 2 ist schon eine Eigenschaft der Allgemeinen Relativitätstheorie. Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt sehr erfolgreich die starke, schwache und elektromagnetische Wechselwirkung, klammert jedoch die Gravitation aus. Daher ist es eine bemerkenswerte Eigenschaft, dass die Stringtheorie zwangsläufig eine Spin-2-Anregung und somit die Gravitationswechselwirkung enthält. In diesem Sinne kann man die Existenz der Gravitationskraft als eine erste „Vorhersage“ der Stringtheorie identifizieren.

Mit der Forderung, dass diese Anregung auch quantitativ die Einsteinsche Gravitationskraft überträgt, lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Stringskala  $M_s$  und der Planck-Masse  $M_{Pl} = \sqrt{\hbar c/G} \approx 10^{-8}$  kg bzw. der Newton-Konstante  $G$  herstellen. In der Teilchenphysik verwendet man über  $E = mc^2$  eher die Planck-Energie von  $10^{19}$  GeV. Diese Energie, bei der die Beschreibung durch die Allgemeine Relativitätstheorie versagt, legt somit die Skala der Stringtheorie fest. Allerdings liegt sie 16 Größenordnungen über den Energien, die der Large Hadron Collider erreichen soll. Damit sind in der Regel alle massiven Anregungen des Strings ultra-schwer (von der Ordnung  $M_{Pl}$ ) und mit Beschleunigern nicht beobachtbar.

Die uns bekannten Elementarteilchen sind somit unter den masselosen Anregungen zu suchen (Abb. 2). In der Tat lassen sich die Anregungen mit Spin 1/2 als die Bausteine der Materie, also als Quarks und Leptonen des Standardmodells der Teilchenphysik auffassen. Die Spin-1-Anregungen sind mögliche Austauschpartikel (Eichbosonen) einer Eichtheorie, also die Teilchen, die die Wechselwirkung zwischen den Materieteilchen übertragen. Im Standardmodell der Teilchenphysik sind das die Gluonen der starken Wechselwirkung sowie das Photon und die  $W^\pm, Z^0$ -Teilchen der elektro-schwachen Wechselwirkung. Die Spin-0-Anregungen entsprechen elementaren Skalarfeldern, insbesondere dem Higgs-Feld, das im Standardmodell die Massen der fundamentalen Teilchen erzeugt. Somit

entstehen alle uns bekannten Teilchen – die Bausteine der Materie sowie die Träger ihrer Wechselwirkungen – als unterschiedliche Quantenanregungen eines fundamentalen Objektes, des Strings. Da seine Ausdehnung typisch von der Ordnung der Planck-Länge  $l_{Pl}$  ist, erscheinen die masselosen Anregungen in bisherigen Beschleunigerexperimenten als punktförmig. Die Stringtheorie liefert also nicht nur eine Quantengravitation, sondern vereinigt alle uns bekannten Wechselwirkungen.

Ein zentrales Element in der Konstruktion von Stringtheorien ist die Supersymmetrie. Dabei handelt es sich um eine Symmetrie zwischen Zuständen bzw. Teilchen verschiedenen Spins. Insbesondere setzt diese Symmetrie Fermionen und Bosonen miteinander in Beziehung (Abb. 2). Im augenblicklichen Verständnis der Stringtheorie ist Supersymmetrie notwendig, um die Konsistenz der Theorie sicherzustellen. Es zeigt sich, dass fünf verschiedene konsistente und supersymmetrische Stringtheorien, die sich im Anregungsspektrum und in den Wechselwirkungen unterscheiden, definiert werden können.<sup>1)</sup> Dabei wird die oben bereits erwähnte Spin-3/2-Anregung im masselosen Spektrum des Strings mit dem Gravitino – dem supersymmetrischen Partner des Gravitons – identifiziert. In diesem Sinne kann man Supersymmetrie als eine weitere Vorhersage der Stringtheorie ansehen.

Die ursprüngliche Idee für diese Symmetrie kam aus der Stringtheorie, wurde später aber auch in Quantenfeldtheorien entwickelt. Angesichts ihrer bemerkenswerten Eigenschaften gehört die Supersymmetrie heute zu einem der dominierenden Forschungsfeldern in der Teilchenphysik und der mathematischen Physik [3].

### Die Störung der Theorie

In der Stringtheorie lassen sich die Streuprozesse dadurch beschreiben, dass zunächst der freie String quantisiert wird und dann die Wechselwirkungen im Rahmen einer Störungstheorie in der Kopplungskonstanten  $g_s$  eingeführt werden. Die Wechselwirkung zwischen Strings besteht darin, dass sich diese verbinden und in andere Strings zerfallen können (Abb. 1). Die Stärke dieser fundamentalen Wechselwirkung gibt eine dimensionslose Kopplungskonstante  $g_s$  an. Wie die Massenskala  $M_s$  ist auch  $g_s$  zunächst ein freier Parameter der Theorie. Mithilfe dieser fundamentalen Wechselwirkung lassen sich dann verschiedene Stringdiagramme „zusammensetzen“, um beliebige Streuprozesse zu beschreiben. Analog zur gewöhnlichen Störungstheorie kann man dabei die Diagramme nach der Potenz sortieren, in der die Kopplungskonstante auftritt. Diese Potenz ist auch ein Maß für die Anzahl der Schleifen eines solchen Stringdiagramms. Der Wechselwirkungsquerschnitt für einen Streuprozess hängt unmittelbar mit den sog. Streuamplituden zusammen. Es zeigt sich, dass für kleine charakteristische Impulse im Streuprozess, also für  $p \ll M_s$ , die Streuamplituden der Stringtheorie und einer entsprechenden Quanten-

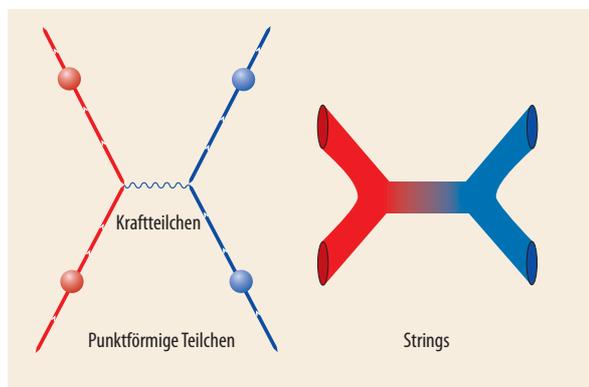


Abb. 1 Punktteilchen des Standardmodells bewegen sich entlang einer eindimensionalen Weltlinie und wechselwirken über den Austausch eines Kraftteilchens (links). Strings hingegen überstreichen eine zwei-dimensionale Weltfläche, und die Wechselwirkung geschieht, indem sich zwei Strings zu einem einzigen verbinden und sich wieder trennen (rechts).

1) Sie tragen die Bezeichnungen Typ I, Typ IIA, Typ IIB,  $E(8) \times E(8)$  heterotisch,  $SO(32)$  heterotisch.

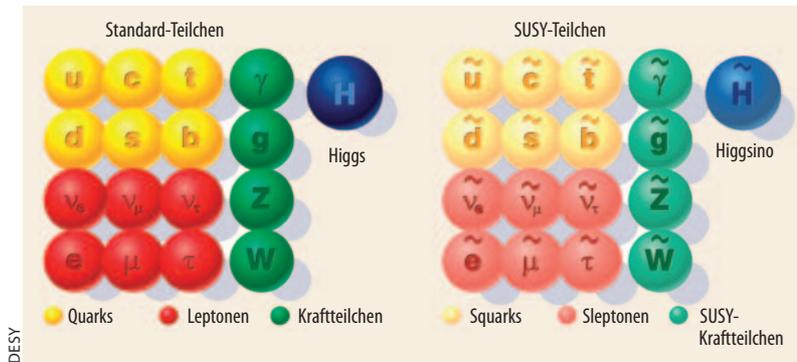


Abb. 2 In der Theorie der Supersymmetrie erhält jedes Teilchen einen supersymmetrischen Partner. Damit verdoppelt sich die Anzahl der Elementarteilchen. Bislang ist es jedoch noch nicht gelungen, supersymmetrische Teilchen nachzuweisen. Mit dem Large Hadron Collider könnte es aber möglich sein, leichte supersymmetrische Teilchen zu entdecken.

feldtheorie übereinstimmen. Oder anders ausgedrückt: Im Niederenergiebereich verhält sich die Stringtheorie wie eine Quantenfeldtheorie.

Bei hohen Energien (bzw. bei kleinen Distanzen) treten in Quantenfeldtheorien typischerweise Divergenzen in den Streuamplituden dadurch auf, dass bei Schleifendiagrammen über beliebig hohe Energien integriert werden muss. Im Standardmodell kann man aufgrund der Struktur der Divergenzen dennoch endliche und damit physikalische Ergebnisse erhalten, man sagt: Eichtheorien sind renormierbar. Der Umgang mit diesen Divergenzen ist hingegen problematisch in quantenfeldtheoretischen Zugängen zu einer Quantengravitation. Im Gegensatz dazu bleiben die Streuamplituden in der Stringtheorie endlich, d. h. es treten keine Divergenzen auf, und die Notwendigkeit einer quantenfeldtheoretischen Renormierung entfällt. Dies liegt an der endlichen Ausdehnung des Strings, welche die Lokalität der Wechselwirkung einer Quantenfeldtheorie aufhebt oder, anders ausgedrückt, diese „verschmiert“ (Abb. 1).

Eine nicht-störungstheoretische Definition der Stringtheorie gibt es zurzeit noch nicht. Hier unterscheidet sie sich von den Quantenfeldtheorien, die in einer deutlich besseren Lage sind: Dort lässt sich die Störungstheorie systematisch z. B. aus einem Pfadintegral herleiten. Die Quantenfeldtheorie ist somit auch nicht-störungstheoretisch definiert, nur ist es meist schwierig, Prozesse (z. B. der starken Wechselwirkung) nicht-störungstheoretisch zu berechnen. In der Stringtheorie ist dagegen eine Größe, die dem Pfadintegral äquivalent ist, bisher nicht bekannt. In diesem Sinne ist die Stringtheorie konzeptionell nur unzureichend verstanden, und viele der im Weiteren diskutierten offenen Fragen resultieren aus dieser Begrenzung auf einen rein störungstheoretischen Zugang. Trotzdem ist es natürlich mehr als bemerkenswert, dass die Stringtheorie im Rahmen einer Störungstheorie in der Lage ist, eine sinnvolle Quantengravitation vorzuschlagen.

## Neue Dimensionen

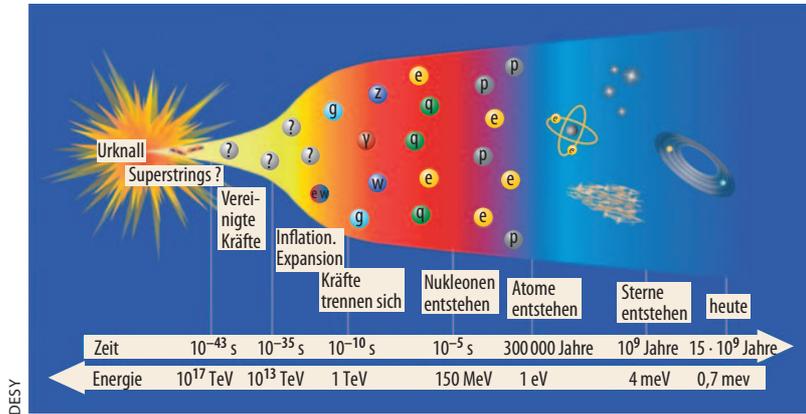
Auf Grund der endlichen Ausdehnung des Strings ist der zugrundeliegende quantenmechanische Hilbert-Raum nicht notwendig positiv definit: Damit wären unphysikalische Zustände mit negativer Norm („Geistfelder“) möglich. Überraschenderweise wird die The-

orie dann konsistent, wenn man die Gesamtzahl der raumzeitlichen Dimensionen auf maximal zehn einschränkt. Neben der Zeitdimension benötigen Strings somit bis zu neun räumliche Dimensionen, um in mathematisch konsistenter Weise „schwingen“ zu können. Eine analoge Schranke gibt es in herkömmlichen Quantenfeldtheorien nicht. Allerdings können auch supersymmetrische Quantenfeldtheorien aufgrund der mathematischen Darstellungstheorie der Lorentz-Gruppe nicht mehr als elf Dimensionen haben. Die Diskrepanz der einen Dimension hat die Stringtheoretiker lange verwundert, bis sie im Rahmen von nicht-störungstheoretischen Überlegungen eine natürliche Erklärung fand.

Um die Diskussion im folgenden zu vereinfachen, beschränken wir uns auf den Fall von genau zehn raumzeitlichen Dimensionen. Dann ergeben sich zwei grundsätzlich unterschiedliche Situationen:

- Wenn die zehn Dimensionen, in denen sich die Strings bewegen können, allesamt unendlich ausgedehnt sind, ist die Situation besonders einfach, denn dann ist als Raum-Zeit-Hintergrund nur ein flacher Minkowski-Raum zugelassen. Da makroskopische Zusatzdimensionen ausgeschlossen sind, scheidet diese Möglichkeit allerdings aus.
- Wenn einige der Dimensionen „kompaktifiziert“ (d. h. auf kleinsten Raum begrenzt) sind, ist eine Vielzahl von konsistenten Lösungen möglich. Die zehndimensionale Raum-Zeit wird dann als das Produkt einer unendlich ausgedehnten  $D$ -dimensionalen Raum-Zeit  $M_D$  mit einer kompakten  $(10-D)$ -dimensionalen Mannigfaltigkeit  $K_{10-D}$  angesehen. Wir wollen hier den naheliegenden Fall  $D=4$  verfolgen und  $M_4$  mit der physikalischen Raum-Zeit identifizieren. Dieser Ansatz folgt zwar nicht zwingend aus der Stringtheorie, ist aber störungstheoretisch eine konsistente Möglichkeit.  $K_6$  ist ebenfalls durch Konsistenzforderungen eingeschränkt.

Das Spektrum und die Wechselwirkungen der resultierenden vierdimensionalen Theorie hängen direkt mit topologischen und differentialgeometrischen Eigenschaften von  $K_6$  zusammen. In diesem Sinne geometrisiert die Stringtheorie die Teilchenphysik. Das ist durchaus analog zur Geometrisierung der Gravitationswechselwirkung in der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie oder noch präziser zur Geometrisierung der Teilchenphysik in sog. Kaluza-Klein-Theorien, die ebenfalls teilchenphysikalische Eigenschaften



**Abb. 3** Die Standardmodelle der Teilchenphysik und der Kosmologie beschreiben die Entwicklung des Universums vom Urknall bis zum heutigen Zeitpunkt fast vollständig. Für den Anfang, also bei sehr hohen Energien (bzw. Temperaturen), gibt es aber bisher noch keine etablierte Theorie.

auf geometrische Eigenschaften einer höher-dimensionalen Raum-Zeit zurückführen.

Im Rahmen der Kompaktifizierung ist jedes konsistente  $K_6$  ein möglicher „Raum-Zeit-Hintergrund“ bzw. anders ausgedrückt ein Grundzustand (Stringvakuum) der Stringtheorie. Die einfachste Form, die man sich für  $K_6$  vorstellen kann, wäre ein sechsdimensionaler Torus, in dem die kompakten Dimensionen alle „aufgerollt“ sind. Diese Möglichkeit führt jedoch auf kein realistisches Teilchenspektrum.

Die Vielfalt der Mannigfaltigkeiten  $K_6$  bezeichnet man als die Vakuum-entartung der Stringtheorie. Dabei handelt es sich zum einen um die diskrete Wahl topologisch verschiedener  $K_6$ . Jedes  $K_6$  wiederum beinhaltet eine Reihe von kontinuierlichen freien Parametern wie z. B. das Volumen oder die Form der Mannigfaltigkeit. Diese Parameter sind physikalisch und treten als Skalarfelder (Moduli) im Spektrum der Stringtheorie auf, ähnlich wie das Higgs-Feld im Standardmodell der Teilchenphysik.<sup>2)</sup>

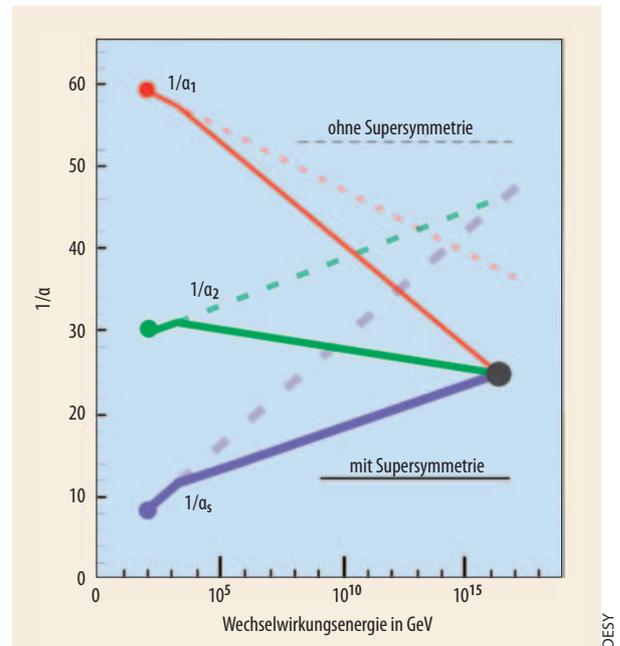
### Anbindung an den Standard

Aufgrund der gigantischen Zahl an konsistenten Stringtheorien stellt sich die Herausforderung, die „physikalisch richtigen“ String-Hintergründe zu finden. Dabei geht es insbesondere darum, die Stringtheorie an die Standardmodelle der Teilchenphysik und der Kosmologie anzubinden (Abb. 3). Dies ist im Rahmen einer störungstheoretischen Analyse zumindest teilweise möglich. Dagegen sind die Fragen, die eine vollständige Theorie der Quantengravitation einmal beantworten soll, insbesondere die quantenmechanische Beschreibung von Schwarzen Löchern oder der Urknallsingularität, nicht-störungstheoretischer Natur. Sie lassen sich daher im Rahmen des bisher vorgestellten Zugangs nicht beantworten. Darauf werden wir später zurückkommen.

Um die Stringtheorie an das Standardmodell der Teilchenphysik anzubinden, berechnet man zunächst eine „effektive Niederenergie-theorie“. Diese beinhaltet

ausschließlich die leichten Anregungen, die Anregungen mit Massen der Ordnung  $M_{Pl}$  sind dagegen „ausintegriert“. Vergleicht man das resultierende Spektrum und seine Wechselwirkung mit denen des Standardmodells, ergibt sich eine Schwierigkeit: Da das Standardmodell nur bis zu einer Energieskala von ca. 100 GeV etabliert ist, ist eine Extrapolation bis zur Planck-Skala nicht unbedingt sinnvoll. Vielmehr besteht gegenwärtig die Vermutung, dass das Standardmodell im TeV-Bereich durch eine supersymmetrische Version abgelöst werden könnte. Aufgrund der Konvergenz der supersymmetrischen Eichkopplungen bei rund  $10^{16}$  GeV ist hier hingegen eine Extrapolation nahe liegend (Abb. 4). Aus diesem Grund studiert man insbesondere String-Hintergründe mit Supersymmetrie. Zusammen mit der Forderung nach chiralen Fermionen (Quarks und Leptonen) schränkt das die möglichen  $K_6$  auf „Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten“ ein (Abb. 5). Im Rahmen von Calabi-Yau-Kompaktifizierungen (bzw. ihren Orbifold-Versionen) ließen sich eine Reihe von Hintergründen identifizieren, die das supersymmetrische Standardmodell beinhalten oder sogar – zumindest im Spektrum – genau reproduzieren.

Da bisher keine supersymmetrischen Teilchen beobachtet wurden, muss die Supersymmetrie allerdings in einer spontan gebrochenen Phase vorliegen. Das größte Problem der stringtheoretischen Untersuchungen besteht nun in der Frage der spontanen Supersymmetriebrechung. Bislang ist es noch nicht gelungen, einen wirklich überzeugenden Brechungsmechanismus zu identifizieren. In der Regel geht man davon aus, dass die spontane Brechung der elektroschwachen Symmetrie durch den Higgs-Mechanismus



**Abb. 4** Die Stärken der elektroschwachen (Kopplungskonstante  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ) und der starken Kraft ( $\alpha_3$ ) ändern sich mit der Energie. Im supersymmetrischen Standardmodell konvergieren sie – im Gegensatz zum Standardmodell ohne diese Symmetrie – bei einer Energieskala von  $10^{16}$  GeV. Das deutet auf einer Vereinigung der Kräfte bei dieser Energie hin.

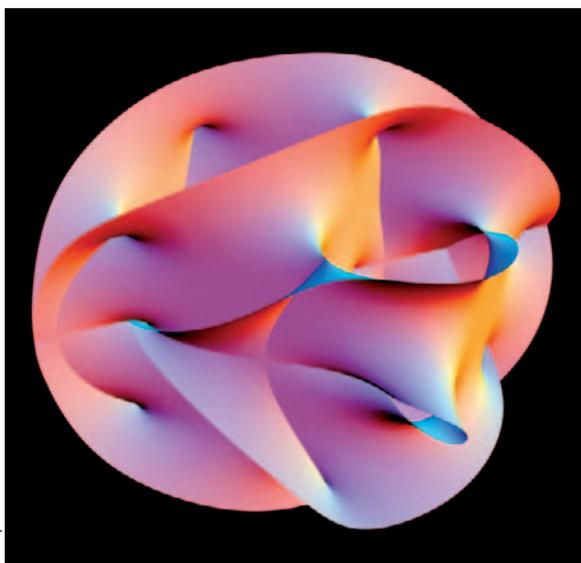
<sup>2)</sup> Ihre Dynamik wird aber durch kein Potential festgelegt und daher parametrisieren sie eine kontinuierliche Vakuum-entartung. Es zeigt sich, dass die Eich- und Yukawa-Kopplungen ebenfalls von den Moduli abhängen und somit effektiv wie die freien Parameter einer Quantenfeldtheorie auftreten.

an die Supersymmetriebrechung gekoppelt ist. Durch die unverstandene Supersymmetriebrechung fehlt somit „das letzte Bindeglied“ zum Standardmodell.

Die Stringtheorie lässt sich auch mit der Kosmologie in Verbindung bringen:

- Für die Dunkle Materie ist bislang die überzeugendste Erklärung ein „schwach wechselwirkendes schweres Teilchen“, ein WIMP (weakly interacting massive particle). Das leichteste supersymmetrische Teilchen ist in der Regel so ein WIMP, und damit beinhaltet das supersymmetrische Standardmodell einen vielversprechenden Kandidaten für die Dunkle Materie.<sup>3)</sup> Wenn die Stringtheorie also das supersymmetrische Standardmodell beinhaltet, gibt es so einen Anknüpfungspunkt auch an kosmologische Beobachtungen.
- Kosmologische Modelle mit einer frühen Inflationsphase beinhalten in der Regel ein (oder mehrere) Skalarfelder mit geeignetem Potential. Skalarfelder hat die Stringtheorie zahlreich zu bieten, z. B. in Form der oben erwähnten Moduli-Felder. Somit steht auch dieser Möglichkeit prinzipiell nichts im Wege. Allerdings besteht hier – genau wie in den Feldtheorien – die Schwierigkeit in der Struktur des skalaren Potentials, das äußerst präzise eingestellt werden muss, um mit den Beobachtungen in Einklang zu stehen.
- Die heutige Expansion des Universums deutet auf eine kleine positive kosmologische Konstante. Dieser „Befund“ ist gleichermaßen für Quantenfeldtheorien wie auch für die Stringtheorie problematisch, da die Quantenkorrekturen im Allgemeinen viel zu groß sind. Alternativ werden Modelle diskutiert, in denen auch die heutige Expansion durch Skalarfelder hervorgerufen wird. Auch hier besteht die Schwierigkeit, die notwendigen Feineinstellungen der Kopplungen dieser Skalarfelder zu erklären.

Lassen Sie uns an dieser Stelle kurz zusammenfassen: Der Stringtheorie gelingt es, eine perturbative Quantengravitation vorzuschlagen und eine Vereini-



Wikipedia

Abb. 5 Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten sind bereits detailliert in der Mathematik studiert worden, bevor sich zeigte, dass sie eine wichtige Rolle für die supersymmetrische Stringtheorie spielen.

gung aller uns bekannten Wechselwirkungen im Spektrum eines fundamentalen Objektes zu erzielen. Qualitativ findet man Übereinstimmung mit supersymmetrischen Versionen des Standardmodells, und auch die kosmologischen Beobachtungen lassen sich qualitativ reproduzieren. Eine quantitative Analyse ist dagegen auf Grund der unverstandenen Supersymmetriebrechung und der Vielzahl der – zumindest störungstheoretisch konsistenten – String-Hintergründe und der damit verbundenen Vakuumartung problematisch.<sup>4)</sup> Im Grunde gibt es nun zwei prinzipielle Möglichkeiten. Zum einen könnte eine nicht-perturbative Stringtheorie nur einen, eindeutigen Grundzustand haben, der dann hoffentlich mit unserem Universum übereinstimmt. Die zweite logische Möglichkeit besteht darin, dass die Theorie eine ganze „Landschaft“ von Grundzuständen zulässt. Lassen Sie uns deshalb zunächst die Entwicklung einer nicht-störungstheoretischen Stringtheorie vorstellen.

### Eine Theorie für fünf

In einem ersten Schritt wurden die nicht-störungstheoretischen Effekte, die aus Quantenfeldtheorien bekannt sind, im Rahmen der Stringtheorie untersucht. Zum Beispiel entstehen in einer stark gekoppelten supersymmetrischen Eichtheorie gebundene Zustände aus den fermionischen Partnern (Gauginos) der Eichbosonen. Diese sog. Gaugino-Kondensation generiert in der Tat ein Potential für die Skalarfelder und hebt die Vakuumartung zumindest teilweise auf. Darüber hinaus kann dieser Effekt eine spontane Supersymmetriebrechung induzieren. Je nach den Eigenschaften der kondensierenden Eichtheorie kann aber auch ein Potential entstehen, das einen störungstheoretisch konsistenten Hintergrund destabilisiert. Damit wird in der Tat klar, dass nicht-störungstheoretische Effekte aus der Vielzahl der störungstheoretisch konsistenten Grundzustände eine Untermenge auswählen, die spontan gebrochene Supersymmetrie aufweisen können. Berücksichtigt man nur diese feldtheoretischen Effekte, ist allerdings auch klar, dass der Grundzustand niemals eindeutig sein kann.

Seit Mitte der Neunzigerjahre gibt es unter Berücksichtigung weiterer nicht-störungstheoretischer Effekte ein modifiziertes Bild der Stringtheorie: Man geht davon aus, dass die fünf Stringtheorien verschiedene störungstheoretische Grenzwerte einer fundamentalen Quantentheorie sind. Diese wurde M-Theorie getauft, und sie beinhaltet in ihrem Parameterraum die fünf bekannten Stringtheorien (Abb. 6).<sup>5)</sup>

Dieser Vorschlag beruht auf der Beobachtung, dass Stringtheorien zueinander „dual“ sein können [4]. In diesen Dualitäten wird die störungstheoretische Region der einen Stringtheorie (A) auf die nicht-störungstheoretischen Regionen der anderen Stringtheorie (B) abgebildet. Anders ausgedrückt, die Stringkopplungen der beiden Theorien sind invers proportional zueinander  $g_A \sim 1/g_B$ . Dieser Vorschlag ist mit dem augenblicklichen

3) In diesem Sinne ist die Existenz Dunkler Materie eine Vorhersage des supersymmetrischen Standardmodells, wobei allerdings der zahlenmäßige Anteil an der Gesamtenergiedichte des Universums nicht vorhergesagt werden kann.

4) Die Zahl ist so groß, dass auch schon statistische Methoden angewendet wurden.

5) Die Bezeichnung M-Theorie stammt von Edward Witten, wobei er aber offen ließ, ob M für *master*, *mother*, *membrane* oder *magic* steht.

6) Solche so genannten BPS-Zustände existieren allgemein in supersymmetrischen Quantentheorien.

Verständnis der Stringtheorien schwer zu beweisen. Er wurde aber an Zuständen und Kopplungen, deren Quantenkorrekturen exakt berechnet werden können, überprüft.<sup>6)</sup> Alle diese „Tests“ waren erfolgreich und untermauern das Bild einer einzigen fundamentalen Quantentheorie. Darüber hinaus wurden höherdimensionale Objekte, sog. D-Branes, im Spektrum der M-Theorie identifiziert, die sich in diesem Sinne als eine Quantentheorie von allen ausgedehnten Objekten (also nicht nur von eindimensionalen Strings) verstehen lässt.

Dieser Vorschlag hat eine Reihe von interessanten Konsequenzen: Zum Beispiel ergibt sich in einem bestimmten Grenzwert der M-Theorie die bereits erwähnte 11-dimensionale Supergravitationstheorie, die im störungstheoretischen String niemals auftreten konnte. Nicht-kommutative Strukturen entstehen bei kleinen Entfernungen, sodass sich die Beschaffenheit der Raum-Zeit grundlegend ändert und diese u. a. „körnig“ wird. Es ist hier zwar nicht möglich, näher auf diese Aspekte einzugehen, aber es lässt sich festhalten, dass sich durch die Forschungsergebnisse das Bild einer eindeutigen fundamentalen Quantentheorie erhärtet hat.

### Offene Fragen, ...

Die Frage nach der Eindeutigkeit des Grundzustands ist im Rahmen jeder Quantengravitationstheorie von Interesse, da sie letztlich eng mit der Frage nach der Anzahl der möglichen Universen zusammenhängt. Der momentane Kenntnisstand der M-Theorie legt eine Vielzahl (eine Landschaft) von konsistenten Grundzuständen nahe. Daraus könnte man folgern, dass jeder dieser Grundzustände einem möglichen Universum entspricht. Damit würden dann auch nicht alle Eigenschaften unseres Universums zwingend aus der Quantengravitation folgen, sondern manche Parameter könnten willkürlich oder zufällig gewählt sein und in anderen Universen andere Werte annehmen. Unser Universum könnte also dadurch ausgezeichnet sein, dass alles gerade so eingestellt ist, dass wir existieren können. Die Frage nach der Zahl der Grundzustände in der Stringtheorie berührt also das „Anthropische Prinzip“ und wird deshalb zurzeit heftig und kontrovers diskutiert. Natürlich hängt damit auch die Frage nach den Vorhersagen der Stringtheorie eng zusammen. Daher gilt es zunächst zu klären, welche Eigenschaften unseren Universums zwingend aus der Stringtheorie folgen und welche nur Eigenschaften eines bestimmten Grundzustands sind.

Auch wenn sich die Beschaffenheit der Urknallsingularität noch nicht im Rahmen der M-Theorie

beschreiben lässt, haben sich in einer anderen singulären Situation der Allgemeinen Relativitätstheorie erste Fortschritte ergeben: Für Schwarze Löcher vom „extremen Reissner-Nordström-Typ“ ist es Andrew Strominger und Cumrun Vafa gelungen, die von Jacob Bekenstein und Stephen Hawking phänomenologisch vorgeschlagene Entropie eines Schwarzen Lochs durch das Abzählen von Mikrozuständen zu reproduzieren. Hierbei spielt insbesondere der Beitrag der D-Branes eine entscheidende Rolle.

### ... erfolgreiche Anwendungen

Unabhängig von ihrer Rolle als Theorie der Quantengravitation hat sich die String- bzw. M-Theorie auch in ganz anderen Bereichen als sehr effizientes Werkzeug erwiesen:

- Die Störungsreihe der Stringtheorie beinhaltet die Feynman-Diagramme einer Quantenfeldtheorie, organisiert sie aber anders. Diese Reorganisation der Feynmanschen Störungstheorie ist für Schleifen-Amplituden bzw. Amplituden mit „vielen äußeren Beinen“ besonders effizient. Dies wird u. a. für Multi-Jet-Prozesse am LHC genutzt. Die Analyse von Schleifen-Diagrammen höherer Ordnung hat auch zu der überraschenden Einsicht geführt, dass die quantenfeldtheoretischen Divergenzen für eine bestimmte Supergravitationstheorie ( $N=8$ ) erst in höherer Ordnung der Störungstheorie auftreten als bisher angenommen. Ob die Theorie überhaupt divergent ist, wird zurzeit intensiv diskutiert, und es besteht sogar die Vermutung, dass es sich hier um eine endliche Quantenfeldtheorie (ohne Stringtheorie) handeln könnte.

- Ende der Neunzigerjahre schlug Juan Maldacena eine duale Beschreibung für stark gekoppelte supersymmetrische Eichtheorien vor. Schon Gerard 't Hooft vermutete, dass im Limit starker Kopplung eine Eichtheorie durch eine Stringtheorie beschrieben werden kann. Dieser Vorschlag ist von Maldacena konkretisiert worden und läuft unter dem Kürzel AdS/CFT-Korrespondenz. Die Vermutung besagt, dass konforme supersymmetrische Eichtheorien dual zu

einer Stringtheorie in einem fünfdimensionalen Anti-de Sitter (AdS)-Hintergrund sind. Dabei handelt es sich um einen anderen Hintergrund derselben oben beschriebenen Stringtheorie. Dieser Hintergrund hat eine negative kosmologische Konstante und ist daher zur Beschreibung unseres Universums ungeeignet. Er lässt sich aber als ein technisches Hilfsmittel benutzen, um Eigenschaften stark gekoppelter supersymmetrischer Eichtheorien zu berechnen. Diese Rechnungen haben zum Teil zu bemerkenswerten Ergebnissen geführt. So ist der am RHIC gemessene Wert der Viskosi-

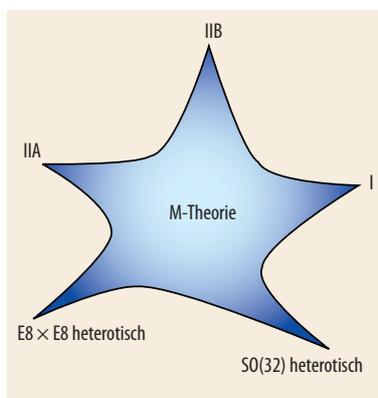


Abb. 6 Derzeit geht man davon aus, dass die existierenden fünf Stringtheorien verschiedene störungstheoretische Limits einer fundamentalen Theorie sind.

tät für das Quark-Gluon-Plasma überraschend nah an der in der Stringtheorie berechneten Schranke.

■ Die Stringtheorie hat auf eine Reihe von mathematischen Fragestellungen einen neuen Blickwinkel eröffnet und die mathematische Forschung inspiriert. Während sich Punktteilchen als Sonde ansehen lassen, die eine kontinuierliche Riemannsche Geometrie abtasten, ergeben sich für ausgedehnte Objekte wie Strings oder Branes neue mathematische Strukturen. Für diese ist es notwendig, eine verallgemeinerte „Quantengeometrie“ zu entwickeln. Hier ist zurzeit die Zusammenarbeit zwischen theoretischer Physik und Mathematik besonders eng und fruchtbar.

Gewiss handelt es sich bei der Stringtheorie immer noch um eine Theorie im Entwicklungsstadium. Doch sie konnte bereits bemerkenswerte Erfolge erzielen: Sie schlägt eine perturbative Quantengravitation vor und vereinigt alle in der Natur bekannten Wechselwirkungen. Zumindest qualitativ stellt sich eine viel versprechende Übereinstimmung mit dem Standardmodell der Teilchenphysik bzw. der Kosmologie ein. Die Stringtheorie lässt eine ganz neue Klasse von Fragen zu, die sich in anderen Theorien nicht sinnvoll stellen lassen und eröffnet einen anderen, oftmals nützlichen Blickwinkel auf alt bekannte Problemstellungen.

### Literatur

- [1] *M. B. Green, J. H. Schwarz* und *E. Witten*, Superstring Theory (2 Bände), Cambridge Univ. Press, Cambridge (1988) ; *D. Lüst* und *S. Theisen*, Lectures on String Theory, Springer Verlag, Heidelberg (1989), *J. Polchinski*, String Theory (2 Bände), Cambridge Univ. Press, Cambridge (1998); *B. Zwiebach*, A First Course in String Theory, Cambridge Univ. Press, Cambridge (2004); *K. Becker, M. Becker* und *J. Schwarz*, String Theory and M-Theory. A Modern Introduction, Cambridge Univ. Press, Cambridge (2007); *E. Kiritsis*, String Theory in a Nutshell. Introduction to Modern String Theory, Princeton Univ. Press, Princeton (2007)
- [2] *B. Greene*, Das elegante Universum, Goldmann, München (2006); *L. Randall*, Verborgene Universen, S. Fischer, Frankfurt/Main (2006)
- [3] *G. Moortgat-Pick* und *P. M. Zerwas*, Physikal. Blätter März 2001, S. 41
- [4] *J. Louis* und *S. Theisen*, Physikal. Blätter, November 1997, S. 1107

### DER AUTOR

**Jan Louis** (Fachverband Theoretische und Mathematische Grundlagen der Physik) studierte Physik in Karlsruhe und London und promovierte 1988 in Philadelphia bei Burt Ovrut. Nach Forschungsaufenthalten am SLAC (Stanford) und CERN (Genf) arbeitete er als Heisenbergstipendiat von 1993 bis 1996 bei Julius Wess in München. 1996 folgte er einem Ruf auf einen Lehrstuhl für Quantenfeldtheorie an die Universität Halle. 2003 wechselte er an die Universität Hamburg. Seit 2006 ist er Sprecher des SFB 676 „Teilchen, Strings und das frühe Universum“.

