

Stringtheorie: Grundlagen, Erfolge, Probleme

Habilitationsvortrag

Marc Wagner

Goethe-Universität Frankfurt am Main, Institut für Theoretische Physik

mwagner@th.physik.uni-frankfurt.de

<http://th.physik.uni-frankfurt.de/~mwagner/>

17. Juni 2015



Motivation / Ziele

Warum ist Stringtheorie wichtig?

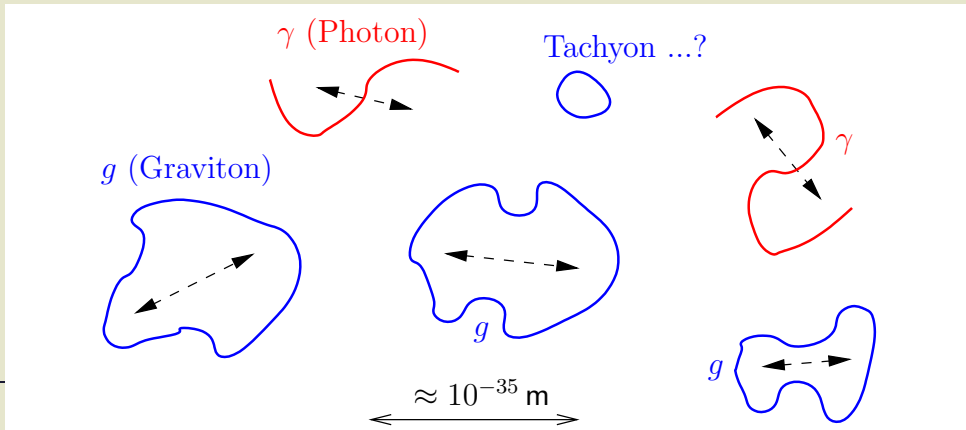
- **Stringtheorie ist eine Theorie der Quantengravitation.**
(Die Quantisierung der Gravitation z.B. im Rahmen der Quantenfeldtheorie bereitet Probleme.)
- **Stringtheorie ist ein Kandidat für eine Theory-Of-Everything**, d.h. um Gravitation, die anderen fundamentalen Wechselwirkungen und Materie innerhalb eines Formalismus zu beschreiben.

Ziele und Gliederung dieses Vortrags: “Stringtheorie: Grundlagen, Erfolge, Probleme”

- (1) Grundidee und **Grundlagen** der Stringtheorie skizzieren.
- (2) Fortgeschrittene Konzepte, **(+) Erfolge** und **(-) Probleme** der Stringtheorie nennen.

Grundidee der Stringtheorie

- Strings sind winzige “Gummibänder”, **offen** oder **geschlossen**, Ausdehnung $\approx 10^{-35}$ m.
 - Jedes Elementarteilchen wird durch einen String beschrieben.
 - Derselbe String kann verschiedene Typen von Elementarteilchen beschreiben, je nachdem, in welchem Schwingungszustand er sich befindet.
- (+) Nur ein Typ von String zur Beschreibung der Natur erforderlich, nicht eine Reihe verschiedener Elementarteilchen (Vereinheitlichung).**
- Auf unseren experimentell zugänglichen Längenskalen, $\gtrsim 10^{-18}$ m, sehen Strings wie Punktteilchen aus.

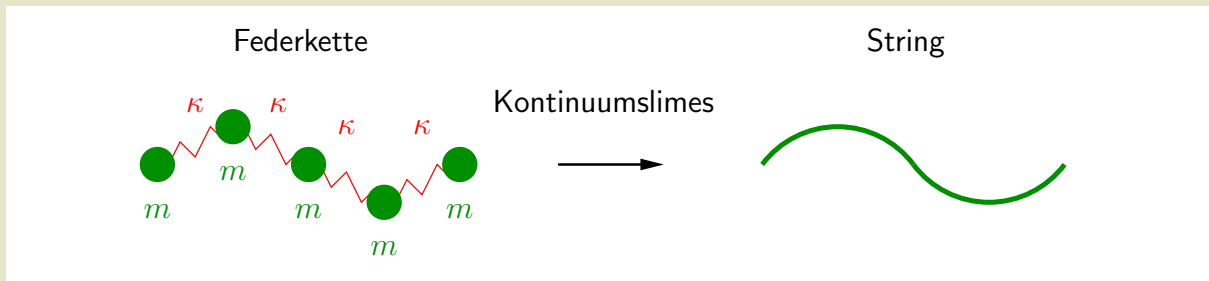


Mathematische Beschreibung (1)

- Erforderliche Vorkenntnisse: Grundlagen **Mechanik**, **spezielle Relativitätstheorie**, **Quantenmechanik** (\approx 4. Semester).

Ausgangspunkt: Klassische Mechanik und spezielle Relativitätstheorie

- Beschreibung eines Strings durch eine **Federkette**, bestehend aus N **Massenpunkten** der **Masse** m , verbunden mit $N - 1$ **Federn** der **Stärke** κ .
- Kontinuumsliches: $N \rightarrow \infty$, $m \sim 1/N \rightarrow 0$, $\kappa \sim N \rightarrow \infty$ liefert einen **nicht-relativistischen String**.
- Auf ähnliche Weise kann im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie ein **relativistischer String** beschrieben werden.



Mathematische Beschreibung (2)

Quantisierung des Strings (1)

- N Federn entsprechen N gekoppelten harmonischen Oszillatoren.
- Hamilton-Funktion und Bewegungsgleichungen können einfach entkoppelt werden (Fouriertransformation) ... **Quantisierung also nicht schwieriger als die Quantisierung des ordinären harmonischen Oszillators.**
- Quantisierung des harmonischen Oszillators (Erinnerung an “Quantenmechanik 1”):
 - Geschickte Behandlung durch **Auf-** und **Absteigeoperatoren** (**Erzeuger** und **Vernichter**) \hat{a}^\dagger und \hat{a} .
 - $\hat{a}^\dagger \hat{a}$ zählt die Energiequanten im harmonischen Oszillator, d.h. $\hat{a}^\dagger \hat{a} \rightarrow 0, 1, 2, \dots$
 - **Da der Hamilton-Operator durch $\hat{a}^\dagger \hat{a}$ ausgedrückt werden kann, können die Energieeigenwerte (das “Spektrum”) direkt abgelesen werden:**

$$\begin{aligned}\hat{H} &= \frac{\hat{p}^2}{2m} + \frac{m\omega^2 \hat{x}^2}{2} = \hbar\omega \left(\underbrace{\hat{a}^\dagger \hat{a}} + \frac{1}{2} \right) \\ &\rightarrow E_n = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2} \right) \quad (n = 0, 1, 2, \dots).\end{aligned}$$

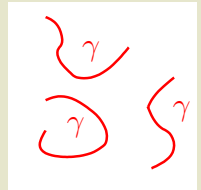
Mathematische Beschreibung (3)

Quantisierung des Strings (2)

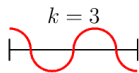
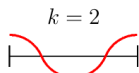
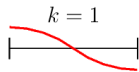
(-) Rechnung liefert Widersprüche für $D = d + 1 \neq 26$ Raumzeitdimensionen.

- Offene Strings, Massenquadrat:

$$M_{\text{offen}}^2 = \frac{1}{\alpha'} \left(-1 + \sum_{j=1}^{d-1} \sum_{k>0} k \underbrace{\hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k)}_{=n_j(k)=0,1,2,\dots} \right) \quad (1/\alpha' \sim \text{Stringspannung}).$$



Schwingungsmoden
offener String



- Der Index $k = 1, 2, 3, \dots$ in $\hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k)$ nummeriert die **Schwingungsmoden des Strings**.
- Der Index $j = 1, \dots, d - 1$ in $\hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k)$ entspricht der **Raumrichtung, in der die Schwingung stattfindet**. (Unabhängige Schwingungen nur in 24 der $d = 25$ Raumdimensionen.)
- Schwingungsmoden des Strings quantisiert, Massenquadratdifferenz k/α' .
- Typische Energien/Temperaturen \rightarrow es liegen nur sehr niederenergetische Zustände vor:
 - $n_j(k) = 0$ für alle j, k
 $\rightarrow 0$ Anregungsquanten $M^2 = -1/\alpha'$ (-) **Tachyon**
 - $n_j(1) = 1$ für ein $j = 1, \dots, 24$, $n_j(k) = 0$ sonst
 $\rightarrow 1$ Anregungsquant ($d - 1$ -fach entartet, Polarisation) $M^2 = 0$ (+) **Photon**

Mathematische Beschreibung (4)

Quantisierung des Strings (3)

- Geschlossene Strings, Massenquadrat:

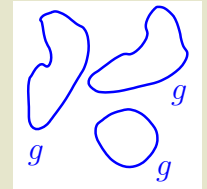
- Analog zu offenen Strings.

- Niederenergetische Zustände:

- 0 Anregungsquanten $M^2 = -4/\alpha'$ (-) **Tachyon**

- 1 Anregungsquant ($((d+1)(d-2)/2$ -fach entartet)) $M^2 = 0$ (+) **Graviton**

(+) **Stringtheorie ist eine Theorie der Quantengravitation.**



Beschreibt Stringtheorie unsere Welt?

- **Kann das von uns beobachtete Universum im Rahmen der Stringtheorie erklärt werden?**
 - Bisher keine Fermionen ...?
 - Was ist mit Tachyonen, d.h. $M^2 < 0$...?
 - $D = 26$ Raumzeitdimensionen statt $D = 4$...?
 - Können massive Teilchen beschrieben werden ...?
 - ...

Im Folgenden werden einige dieser Fragen und Probleme angesprochen ...

Fermionen, Superstringtheorie

- Bisher: Strings beschreiben ausschließlich bosonische Elementarteilchen (Photon, Graviton).
- Um fermionische Elementarteilchen zu beschreiben, benötigen Strings **zusätzliche Schwingungsmoden, die das Pauli-Prinzip erfüllen.**
→ **Superstringtheorie.**

(+) Superstrings können sowohl Bosonen als auch Fermionen beschreiben.

(+) Superstrings besitzen i.d.R. keine tachyonischen Zustände, also kein $M^2 < 0$.

(-) Superstringtheorie impliziert Supersymmetrie.

- Jedes Boson besitzt einen fermionischen Partner mit gleichen Eigenschaften (z.B. Masse, Ladung, ...): z.B. Photon \leftrightarrow Photino, Elektron \leftrightarrow Selektion.

(-) Quantisierung von Superstrings liefert Widersprüche für $D \neq 10$ Raumzeitdimensionen.

Vorhersage der Raumzeitdimensionen

- Quantisierung von Strings liefert Widersprüche für $D \neq 26$ (bosonische Strings) bzw. $D \neq 10$ (Superstrings) Raumzeitdimensionen.
- Ursache:
 - Spezielle Relativitätstheorie ... diese bildet das Fundament der Elementarteilchenphysik und soll weiterhin gelten.
 - **Inbesondere sollen sich Lorentz-Transformationen (Drehungen, Boosts) auf Strings angewendet genauso verhalten, wie auf Punktteilchen oder Felder.**
 - Mathematisch durch Kommutatoren ausgedrückt, die Algebra der Lorentz-Gruppe.
 - Ein spezieller Kommutator bereitet Probleme,

$$0 \stackrel{!}{=} [M^{-I}, M^{-J}] = \underbrace{\dots}_{\neq 0} \left(1 - \frac{D-2}{24}\right) \quad (\text{für bosonische Strings})$$

→ $D = 26$ Raumzeitdimensionen.

(+) Stringtheorie “erklärt” die Anzahl der Raumzeitdimensionen.

(-) Stringtheorie legt $D = 26$ bzw. $D = 10$ fest ... wir beobachten aber $D = 4$.

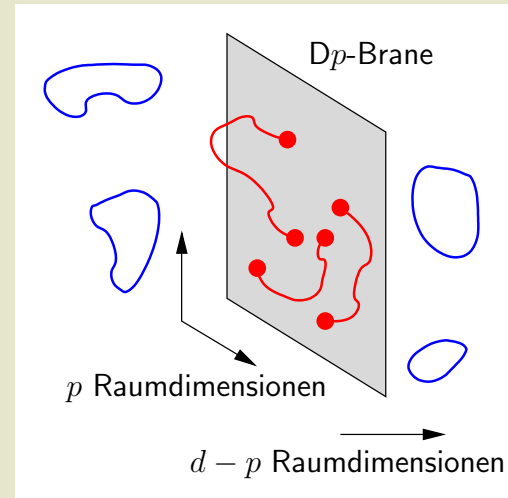
- Ausweg 1: Kompakte Extradimensionen winziger Ausdehnung (→ Backup-Slides).
- Ausweg 2: Brane-World-Szenario.

D-Branes und deren Anwendungen (1)

- Bisher: Offene Strings bewegen sich frei durch den d -dimensionalen Raum.
- Auch möglich: Die Endpunkte offener Strings bewegen sich frei in $p < d$ Raumdimensionen, sind in den verbleibenden $d - p$ Raumdimensionen aber festgehalten.
- Die p -dimensionale räumliche Hyperfläche, auf der sich derartige offene Strings bewegen, wird als **D p -Brane** bezeichnet.

Anwendung 1: Brane-World-Scenario

- **Elementarteilchen (außer Gravitonen)**: Offene Strings, bewegen sich auf einer D3-Brane, die dem 3-dimensionalen Raum unseres Universums entspricht.
- (+) **Obwohl die Raumzeit 26- bzw. 10-dimensional ist, beobachten wir nur 4 Dimensionen.**



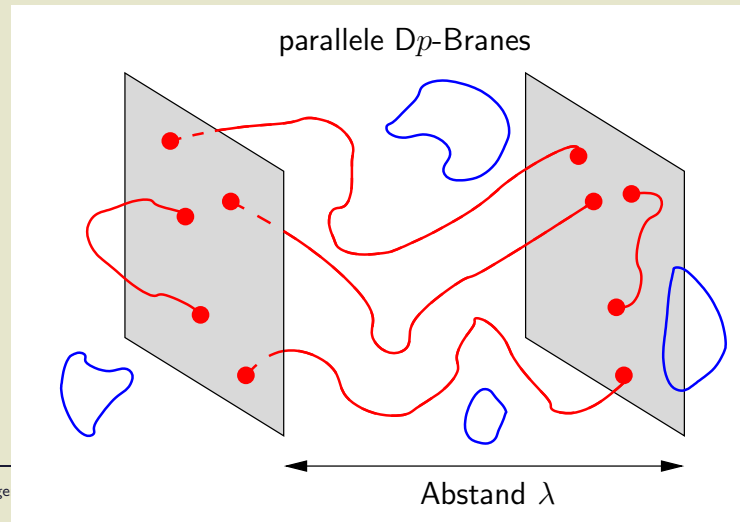
D-Branes und deren Anwendungen (2)

Anwendung 2: Massive Teilchen

- Betrachte offene Strings, deren Endpunkte auf zwei verschiedenen parallelen Dp -Branes (Abstand λ) fixiert sind.
- Besitzen minimale Länge λ , sind damit gespannt, erhalten entsprechend zusätzliche Energie bzw. Masse.
- Geeignete bzw. hinreichend große Wahl von λ :

(+) **Massive Elementarteilchen im p -dimensionalen Raum**
(z.B. $p = 3$).

(+) **Keine Tachyonen.**



Stringtheorie und Experimente

(–) Aufgrund der geringen Ausdehnung von Strings ($\approx 10^{-35}$ m) keine direkten Experimente zur Verifikation oder Falsifikation von Stringtheorie.

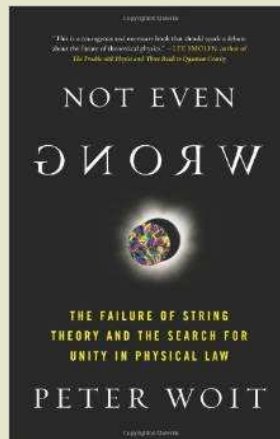
- Indirekte Hinweise auf die Gültigkeit der Stringtheorie wären experimentelle Signale für
 - Extradimensionen,
 - Supersymmetrie.

Kritik an der Stringtheorie

- **Fragwürdige Vorhersagekraft:**

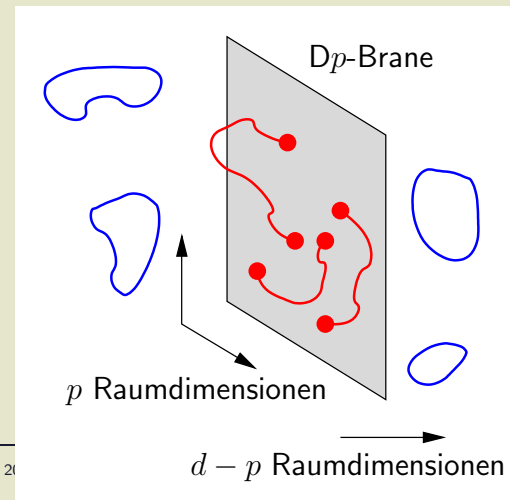
"To construct models of particle physics based on string theory, physicists typically begin by specifying a shape for the extra dimensions of spacetime. Each of these different shapes corresponds to a different possible universe ... with a different collection of particles and forces. String theory ... has an enormous number of vacuum states, typically estimated to be around 10^{500} , and these might be sufficiently diverse to accommodate almost any phenomena that might be observed at low energies."

(P. Woit, "Not even wrong: the failure of string theory and the search for unity in physical law", 2006)



Zusammenfassung

- Grundidee einfach zu verstehen:
 - Elementarteilchen werden durch winzige offene oder geschlossene Strings beschrieben.
 - Der Schwingungszustand eines Strings legt den Typ des Elementarteilchens fest.
 - Geeignete Kombination von Strings und D-Branes erlaubt die Modellierung von Universen, die dem unseren ähneln.
- Meine persönliche Einschätzung der Stringtheorie:
 - (–) **Aufgrund der mathematischen Komplexität kaum geeignet, um konkrete Rechnungen auszuführen und präzise quantitative Vorhersagen zu treffen.**
 - (–) **Praktisch keine Chance einer experimentellen Verifikation oder Falsifikation.**
 - (+) **Gegenwärtig einziger Kandidat für eine Theory-Of-Everything.**
 - (+) **Eine mathematisch elegante und faszinierende Theorie.**



Stringtheorie: Grundlagen, Erfolge, Probleme (Backup-Slides)

Habilitationsvortrag

Marc Wagner

Goethe-Universität Frankfurt am Main, Institut für Theoretische Physik

mwagner@th.physik.uni-frankfurt.de

<http://th.physik.uni-frankfurt.de/~mwagner/>

17. Juni 2015



Mathematische Beschreibung (A)

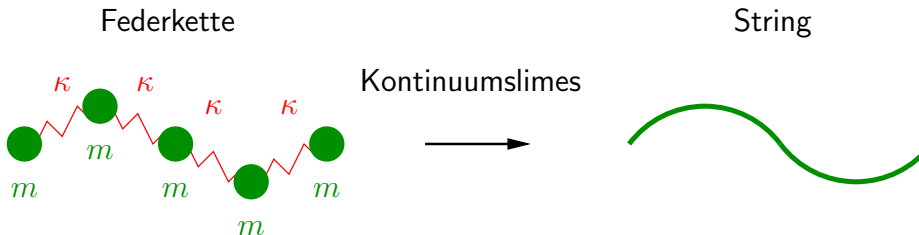
- Erforderliche Vorkenntnisse: Grundlagen **Mechanik**, **Quantenmechanik**, **spezielle Relativitätstheorie** (\approx 4. Semester).

Ausgangspunkt: Klassische Mechanik

- Beschreibung eines Strings durch eine **Federkette**, bestehend aus N **Massenpunkten** der Masse m , verbunden mit $N - 1$ oder N **Federn** der Stärke k und Ruhelänge 0:

$$H = \underbrace{\sum_{j=1}^N \frac{m}{2} \dot{\mathbf{r}}_j^2}_{=E_{\text{kin}}} + \underbrace{\sum_{j=1}^N \frac{k}{2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_{j-1})^2}_{=E_{\text{pot}}} \quad (\mathbf{r}_0 \equiv \mathbf{r}_N \text{ falls geschlossen}).$$

- Kontinuumslimites: $N \rightarrow \infty$, $m \sim 1/N \rightarrow 0$, $k \sim N \rightarrow \infty$ liefert einen **String**.



Mathematische Beschreibung (B)

Quantisierung der Federkette (1)

- N Federn entsprechen N gekoppelten harmonischen Oszillatoren.
- Hamilton-Funktion und Bewegungsgleichungen können einfach entkoppelt werden (Fouriertransformation) ... **Quantisierung also nicht schwieriger als die Quantisierung des ordinären harmonischen Oszillators.**
- Quantisierung des harmonischen Oszillators (Erinnerung an “Quantenmechanik 1”):
 - Geschickte Behandlung durch **Auf-** und **Absteigeoperatoren** (**Erzeuger** und **Vernichter**):

$$\hat{a}^\dagger = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}} \left(\hat{x} - \frac{i}{m\omega} \hat{p} \right) \quad , \quad \hat{a} = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}} \left(\hat{x} + \frac{i}{m\omega} \hat{p} \right).$$

- * \hat{a}^\dagger erzeugt ein Energiequant, \hat{a} vernichtet ein Energiequant.
- * $\hat{a}^\dagger \hat{a}$ zählt die Energiequanten im harmonischen Oszillator.
- **Da der Hamilton-Operator durch $\hat{a}^\dagger \hat{a}$ ausgedrückt werden kann, können die Energieeigenwerte (das “Spektrum”) direkt abgelesen werden:**

$$\hat{H} = \hbar\omega \left(\hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{1}{2} \right) \quad \rightarrow \quad E_n = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2} \right) \quad (n = 0, 1, 2, \dots).$$

Mathematische Beschreibung (C)

Quantisierung der Federkette (2)

- Hamilton-Operator der kontinuierlichen Federkette bzw. des Strings:

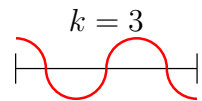
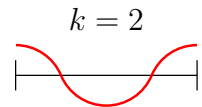
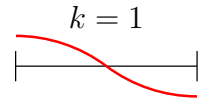
$$H_{\text{offen}} = \frac{\mathbf{p}_0^2}{2M} + \sum_{j=x,y,z} \sum_{k>0} \hbar \omega k \hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k) + \text{const}$$

$$H_{\text{geschlossen}} = \frac{\mathbf{p}_0^2}{2M} + \sum_{j=x,y,z} \sum_{k>0} \hbar \omega k \left(\hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k) + \hat{b}_j^\dagger(k) \hat{b}_j(k) \right) + \text{const}$$

(M : Masse des Strings; $v \sim \sqrt{\kappa/m}$: Wellengeschwindigkeit).

- Der Index $k = 1, 2, 3, \dots$ in $\hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k)$ und $\hat{b}_j^\dagger(k) \hat{b}_j(k)$ nummeriert die **Schwingungsmoden des Strings**.
- Der Index $j = x, y, z$ in $\hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k)$ und $\hat{b}_j^\dagger(k) \hat{b}_j(k)$ entspricht der **Raumrichtung in der die Schwingung stattfindet**.
- Die in jeder Mode enthaltene Energie ist quantisiert mit **Energiedifferenz $\hbar \omega k$** .

Schwingungsmoden
offener String



Mathematische Beschreibung (D)

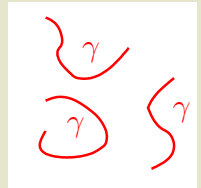
Analoge relativistische Rechnung (1)

- Keine zusätzlichen konzeptionellen Schwierigkeiten.
- An Stelle des Hamilton-Operators H tritt das **Massenquadrat** M^2 (Lorentz-invariant).

(-) Rechnung liefert Widersprüche für $D = d + 1 \neq 26$ Raumzeitdimensionen.

- **Offene Strings:**

$$M_{\text{offen}}^2 = \frac{1}{\alpha'} \left(-1 + \sum_{j=1}^{d-1} \sum_{k>0} n \hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k) \right) \quad (1/\alpha' \sim \text{Stringspannung}).$$



- Schwingungsmoden des Strings quantisiert, Massenquadratdifferenz k/α' .
- Unabhängige Schwingungen in 24 der $d = 25$ Raumdimensionen.
- I.d.R. (d.h. bei typischer Weise verfügbaren Energien oder Temperaturen) liegen nur sehr niederenergetische Zustände vor:

$\hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k) \equiv 0$ für alle j, k

→ 0 Anregungsquanten $M^2 = -1/\alpha'$ **(-) Tachyon**

$\hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k) \equiv 1$ für $k = 1$ und ein $j = 1, \dots, 24$, $\hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k) \equiv 0$ sonst

→ 1 Anregungsquant ($d - 1$ -fach entartet, Polarisation) $M^2 = 0$ **(+) Photon**

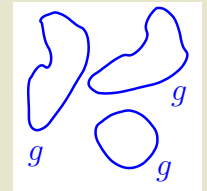
Mathematische Beschreibung (E)

Analoge relativistische Rechnung (2)

- Geschlossene Strings:

$$M_{\text{geschlossen}}^2 = \frac{2}{\alpha'} \left(-2 + \sum_{j=1}^{d-1} \sum_{k>0} n \left(\hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k) + \hat{b}_j^\dagger(k) \hat{b}_j(k) \right) \right)$$

mit Zwangsbedingung $\sum_{j=1}^{d-1} \hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k) \equiv \sum_{j=1}^{d-1} \hat{b}_j^\dagger(k) \hat{b}_j(k)$.



- Schwingungsmoden des Strings quantisiert, Massenquadratdifferenz $4k/\alpha'$.
- Unabhängige Schwingungen in 24 der $d = 25$ Raumdimensionen.
- I.d.R. (d.h. bei typischer Weise verfügbaren Energien oder Temperaturen) liegen nur sehr niederenergetische Zustände vor:

$\hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k) \equiv "0"$ für alle j, k

→ 0 Anregungsquanten $M^2 = -4/\alpha'$ (–) **Tachyon**

$\hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k) \equiv "1"$ für $k = 1$ und ein $j = 1, \dots, 24$, $\hat{a}_j^\dagger(k) \hat{a}_j(k) \equiv "0"$ sonst

→ 1 Anregungsquant ($((d+1)(d-2)/2$ -fach entartet) $M^2 = 0$ (+) **Graviton**

→ 1 Anregungsquant ($((d-1)(d-2)/2$ -fach entartet) $M^2 = 0$ (–) **Kalb-Ramond**

→ 1 Anregungsquant (nicht entartet) $M^2 = 0$ (–) **Dilaton**

(+) **Stringtheorie ist eine Theorie der Quantengravitation.**

Fermionen, Superstringtheorie (A)

- Bisher: Strings beschreiben ausschließlich bosonische Elementarteilchen (Photon, Graviton).
- Um fermionische Elementarteilchen zu beschreiben, benötigen Strings **zusätzliche Schwingungsmoden, die das Pauli-Prinzip erfüllen** (Grassmann-wertige Moden).
→ **Superstringtheorie**.

(+) Superstrings besitzen i.d.R. keine tachyonischen Zustände, also kein $M^2 < 0$.

(-) Superstringtheorie impliziert Supersymmetrie.

- Jedes Boson besitzt einen fermionischen Partner mit gleichen Eigenschaften (z.B. Masse, Ladung, ...): z.B. Photon \leftrightarrow Photino, Elektron \leftrightarrow Selektion.
- Gegenwärtig **fünf konsistente Versionen von Superstringtheorie**:
 - **Typ I, Typ IIA, Typ IIB, heterotische Stringtheorien $SO(32)$ und $E_8 \times E_8$.**
 - Diese Theorien enthalten unterschiedliche Stringtypen und damit Elementarteilchen, z.B.
 - * Typ I → offene und geschlossene Strings,
 - * Typ IIA und Typ IIB → ausschließlich geschlossene Strings.
 - Vermutung: Diese fünf Versionen bilden verschiedene Grenzfälle einer umfassenden Theorie, der **M-Theorie**.

Von $D = 26$ bzw. $D = 10$ zu $D = 4$ (A)

Ausweg 1: $D - 4$ kompakte Extradimensionen winziger Ausdehnung

- Winzige kompakte Dimensionen sind bei niedrigen Energien unsichtbar, da die Energiedifferenzen vom Grundzustand zu angeregten Zuständen gewaltig sind.
- Quantenmechanik eines freien Teilchens auf einem Kreis der Länge L ,

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi_n(x) = E_n \psi_n(x) \quad , \quad \psi_n(x) \equiv \psi_n(x + L)$$
$$\rightarrow E_n = \frac{2\pi^2 \hbar^2}{mL^2} n^2.$$

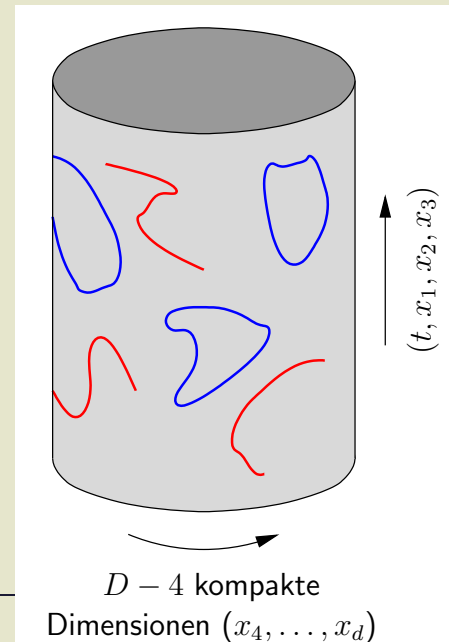
Z.B. Elektron ($m = 0.511 \text{ MeV}/c^2$), Ausdehnung der Extradimension $L = 10^{-30} \text{ m}$

$$\rightarrow E_1 - E_0 = 1.5 \times 10^{30} \text{ TeV}$$

(zum Vergleich: LHC-Energie $\approx 7 \text{ TeV}$).

Ausweg 2: Brane-World-Scenario

- Siehe nächste Folie.

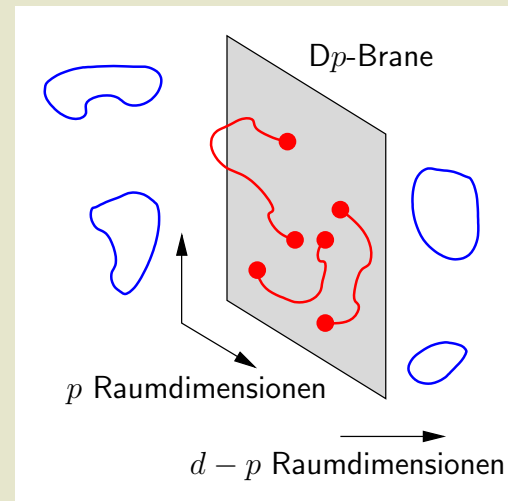


D-Branes und deren Anwendungen (A)

- Bisher: Offene Strings bewegen sich frei durch den d -dimensionalen Raum.
- Auch möglich: Die Endpunkte offener Strings bewegen sich frei in p Raumdimensionen, sind in den verbleibenden $d - p$ Raumdimensionen aber festgehalten.
- Die p -dimensionale räumliche Hyperfläche, auf der sich derartige offene Strings bewegen, wird als **D p -Brane** bezeichnet.

Anwendung 1: Brane-World-Scenario

- **Elementarteilchen (außer Gravitonen)**: Offene Strings, bewegen sich auf einer D3-Brane, die dem 3-dimensionalen Raum unseres Universums entspricht.
- (+) **Obwohl die Raumzeit 26- bzw. 10-dimensional ist, beobachten wir nur 4 Dimensionen.**
- **Gravitonen**: Geschlossene Strings, bewegen sich im d -dimensionalen Raum auch abseits der D3-Brane.
- (+) **Erklärt die relative Schwäche der Gravitation im Vergleich zu anderen Kräften.**



D-Branes und deren Anwendungen (B)

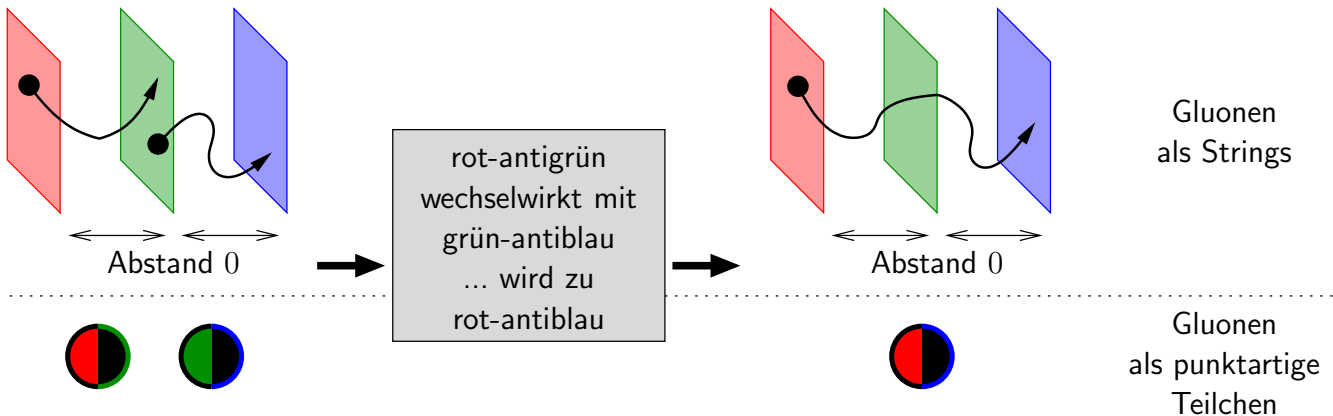
Anwendung 3: "Gluonen", Farbladung

- Betrachte offene Strings, die eine Orientierung besitzen ("vorne" und "hinten"), deren Endpunkte auf einer oder zwei von drei ineinander liegenden aber unterscheidbaren D-Branes ("rot", "grün", "blau") fixiert sind.

(+) Gleiche Struktur, wie U(3)-Eichtheorie, "Gluonen".

(-) **Hinzunahme von Branes benötigt zusätzlichen Input bzw. Parameter.**

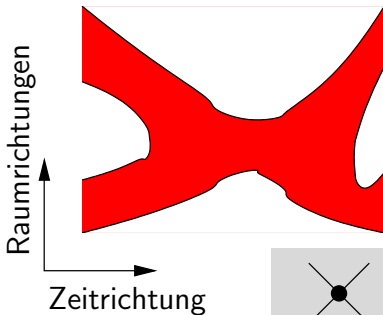
- Branes sind höherdimensionale Verallgemeinerungen von Strings mit eigener Dynamik, d.h. sie können sich ebenfalls bewegen, krümmen, etc.; dynamische Beschreibung möglich.



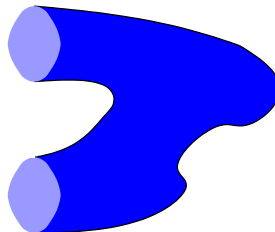
Erzeugung/Vernichtung von Strings (A)

- Bisher: Quantenmechanik einzelner Strings (gleicher Level, wie Quantenmechanik eines Massenpunkts).
- Eine vollständige Theorie erfordert die gleichzeitige Behandlung beliebig vieler Strings einschließlich deren Wechselwirkung, Erzeugung und Vernichtung:
 - Störungstheoretisch verstanden, aber sehr schwierig zu berechnen:
 - (-) **Statt Feynman-Diagramme flächenartige Gebilde, über die integriert werden muss (sehr aufwändig, nur für niedrige Ordnungen möglich).**
 - (+) **Keine punkttartigen Wechselwirkungen, Renormierung nicht erforderlich.**
 - (-) **Nicht-störungstheoretische Formulierung nur für Spezialfälle vorhanden.**

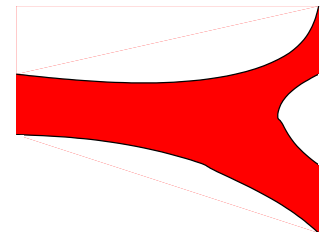
WW zweier offener Strings



Vernichtung zweier geschlossener Strings



ein offener String teilt sich in zwei offene Strings



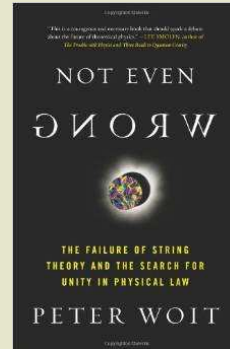
entsprechende
Feynman-Diagramme

Kritik an der Stringtheorie (A)

(1) Fragwürdige Vorhersagekraft

- *“To construct models of particle physics based on string theory, physicists typically begin by specifying a shape for the extra dimensions of spacetime. Each of these different shapes corresponds to a different possible universe ... with a different collection of particles and forces. String theory ... has an enormous number of vacuum states, typically estimated to be around 10^{500} , and these might be sufficiently diverse to accommodate almost any phenomena that might be observed at low energies.”*

(P. Woit, “Not even wrong: the failure of string theory and the search for unity in physical law”, 2006)



(2) Keine hintergrundunabhängige Theorie

- Eine Theorie der (Quanten-)Gravitation sollte die Geometrie der Raumzeit dynamisch festlegen (wie z.B. die allgemeinen Relativitätstheorie).
- Dies ist nicht der Fall in der Stringtheorie, d.h. die Geometrie der Raumzeit muss vorgegeben werden und bestenfalls kleine Störungen dieser können berechnet werden.

(L. Smolin, “The trouble with physics: the rise of string theory, the fall of a science, and what comes next”, 2006)

