

# F-Theory und der 'Open String Landscape'

Andreas Braun

September 11, 2007

Institut für theoretische Physik,  
Universität Heidelberg

39. Herbstschule für Hochenergiephysik Maria Laach

In diesem Vortrag geht es darum aus der String Theorie heraus Modelle für die Teilchenphysik zu konstruieren.

- Hier starten wir von der 'Typ IIB' Theorie, welche eine der fünf konsistenten Superstringtheorien in zehn Dimensionen ist.

In diesem Vortrag geht es darum aus der String Theorie heraus Modelle für die Teilchenphysik zu konstruieren.

- Hier starten wir von der 'Typ IIB' Theorie, welche eine der fünf konsistenten Superstringtheorien in zehn Dimensionen ist.
- Die anderen Stringtheorien sind mit dieser durch **Dualitäten** verbunden.

In diesem Vortrag geht es darum aus der String Theorie heraus Modelle für die Teilchenphysik zu konstruieren.

- Hier starten wir von der 'Typ IIB' Theorie, welche eine der fünf konsistenten Superstringtheorien in zehn Dimensionen ist.
- Die anderen Stringtheorien sind mit dieser durch **Dualitäten** verbunden.
- Da die Stringskaala sehr hoch sein sollte ( $m_s \sim m_{p,10}, m_{p,4} = 10^{19} \text{ GeV}$ ), sind für diese Betrachtungen nur die masselosen Anregungen von Belang.

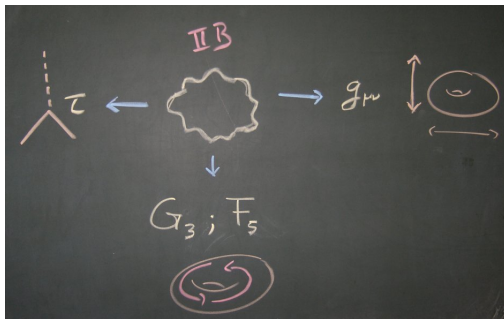
In diesem Vortrag geht es darum aus der String Theorie heraus Modelle für die Teilchenphysik zu konstruieren.

- Hier starten wir von der 'Typ IIB' Theorie, welche eine der fünf konsistenten Superstringtheorien in zehn Dimensionen ist.
- Die anderen Stringtheorien sind mit dieser durch **Dualitäten** verbunden.
- Da die Stringskaala sehr hoch sein sollte ( $m_s \sim m_{p,10}, m_{p,4} = 10^{19} \text{ GeV}$ ), sind für diese Betrachtungen nur die masselosen Anregungen von Belang.
- Die Typ IIB Theorie wird im **Niederenergielimes** von einer Feldtheorie in 10 Dimensionen beschrieben: der **Typ IIB Supergravitation**.

In diesem Vortrag geht es darum aus der String Theorie heraus Modelle für die Teilchenphysik zu konstruieren.

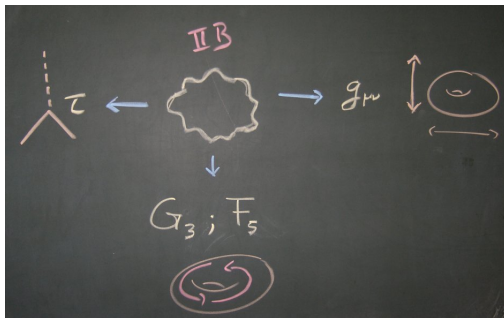
- Hier starten wir von der 'Typ IIB' Theorie, welche eine der fünf konsistenten Superstringtheorien in zehn Dimensionen ist.
- Die anderen Stringtheorien sind mit dieser durch **Dualitäten** verbunden.
- Da die Stringskaala sehr hoch sein sollte ( $m_s \sim m_p, m_p,4 = 10^{19} GeV$ ), sind für diese Betrachtungen nur die masselosen Anregungen von Belang.
- Die Typ IIB Theorie wird im **Niederenergielimes** von einer Feldtheorie in 10 Dimensionen beschrieben: der **Typ IIB Supergravitation**.

Die masselosen Anregungen des Typ IIB Strings sind:



- Die Metrik  $\rightarrow$  Gravitation = Deformationen der Raumzeit.

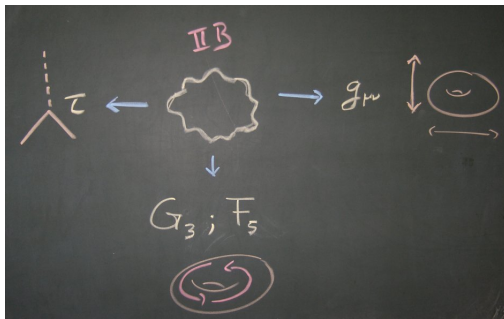
Die masselosen Anregungen des Typ IIB Strings sind:



- Die Metrik  $\rightarrow$  Gravitation = Deformationen der Raumzeit.
- Das Dilaton  $\tau$ : die Kopplungsstärke des Strings und der 10 SUGRA.

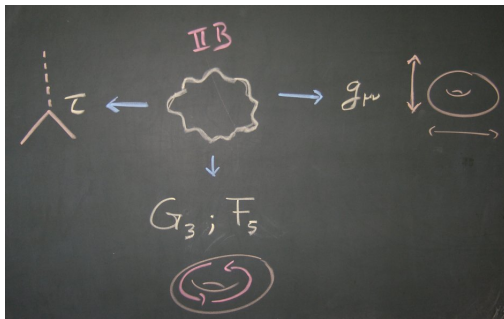


Die masselosen Anregungen des Typ IIB Strings sind:



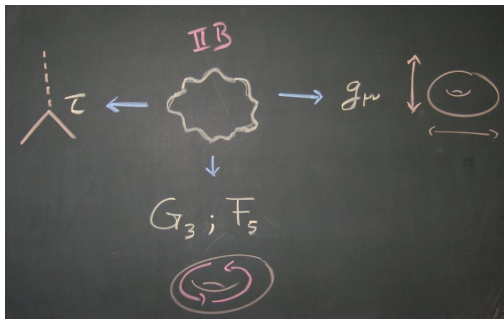
- Die Metrik  $\rightarrow$  Gravitation = Deformationen der Raumzeit.
- Das Dilaton  $\tau$ : die Kopplungsstärke des Strings und der 10 SUGRA.
- antisymmetrische Tensorfelder (höherdimensionale Analoga von  $F_{\mu\nu}$ ).

Die masselosen Anregungen des Typ IIB Strings sind:



- Die Metrik  $\rightarrow$  Gravitation = Deformationen der Raumzeit.
- Das Dilaton  $\tau$ : die Kopplungsstärke des Strings und der 10 SUGRA.
- antisymmetrische Tensorfelder (höherdimensionale Analoga von  $F_{\mu\nu}$ ).
- Die Superpartner all dieser Felder.

Die masselosen Anregungen des Typ IIB Strings sind:



- Die Metrik  $\rightarrow$  Gravitation = Deformationen der Raumzeit.
- Das Dilaton  $\tau$ : die Kopplungsstärke des Strings und der 10 SUGRA.
- antisymmetrische Tensorfelder (höherdimensionale Analoga von  $F_{\mu\nu}$ ).
- Die Superpartner all dieser Felder.

D-branes sind (dynamische) Membranen welche ebenfalls Teil der IIB Theorie sind.

- Man kann sie dadurch charakterisieren, daß offene Strings auf ihnen enden können.

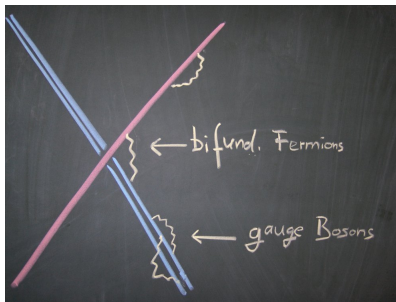
D-branes sind (dynamische) Membranen welche ebenfalls Teil der IIB Theorie sind.

- Man kann sie dadurch charakterisieren, daß offene Strings auf ihnen enden können.
- Eichfelder und geladene Materie treten durch D-branes in Erscheinung.

# D-branes

D-branes sind (dynamische) Membranen welche ebenfalls Teil der IIB Theorie sind.

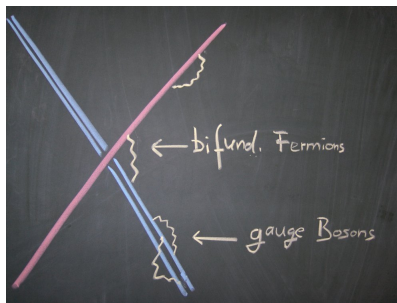
- Man kann sie dadurch charakterisieren, daß offene Strings auf ihnen enden können.
- Eichfelder und geladene Materie treten durch D-branes in Erscheinung.



# D-branes

D-branes sind (dynamische) Membranen welche ebenfalls Teil der IIB Theorie sind.

- Man kann sie dadurch charakterisieren, daß offene Strings auf ihnen enden können.
- Eichfelder und geladene Materie treten durch D-branes in Erscheinung.



Wie kann unsere Welt aus String Theorie entspringen ?

- Es kann keine 10 flachen Dimensionen geben: 6 davon sollten klein ( $\rightarrow$ hohe Skala) und kompakt sein, so daß ein **effektives 4 dimensionales Modell** bei niedrigen Energien entsteht.



Wie kann unsere Welt aus String Theorie entspringen ?

- Es kann keine 10 flachen Dimensionen geben: 6 davon sollten klein ( $\rightarrow$ hohe Skala) und kompakt sein, so daß ein **effektives 4 dimensionales Modell** bei niedrigen Energien entsteht.
- Dies bedeutet daß wir einen Hintergrundwert für die Metrik annehmen.

Wie kann unsere Welt aus String Theorie entspringen ?

- Es kann keine 10 flachen Dimensionen geben: 6 davon sollten klein ( $\rightarrow$ hohe Skala) und kompakt sein, so daß ein **effektives 4 dimensionales Modell** bei niedrigen Energien entsteht.
- Dies bedeutet daß wir einen Hintergrundwert für die Metrik annehmen.
- Wir können (und sollten) auch den anderen Feldern einen Hintergrundwert geben und D-branes hinzufügen.

Wie kann unsere Welt aus String Theorie entspringen ?

- Es kann keine 10 flachen Dimensionen geben: 6 davon sollten klein ( $\rightarrow$  hohe Skala) und kompakt sein, so daß ein **effektives 4 dimensionales Modell** bei niedrigen Energien entsteht.
- Dies bedeutet daß wir einen Hintergrundwert für die Metrik annehmen.
- Wir können (und sollten) auch den anderen Feldern einen Hintergrundwert geben und D-branes hinzufügen.
- Die **antisymmetrischen Tensorfelder** nehmen in einem kompakten Hintergrund **quantisierte** Werte an.  
( $\rightarrow$  Dirac Monopol) 'Flüsse'

Wie kann unsere Welt aus String Theorie entspringen ?

- Es kann keine 10 flachen Dimensionen geben: 6 davon sollten klein ( $\rightarrow$  hohe Skala) und kompakt sein, so daß ein **effektives 4 dimensionales Modell** bei niedrigen Energien entsteht.
- Dies bedeutet daß wir einen Hintergrundwert für die Metrik annehmen.
- Wir können (und sollten) auch den anderen Feldern einen Hintergrundwert geben und D-branes hinzufügen.
- Die **antisymmetrischen Tensorfelder** nehmen in einem kompakten Hintergrund **quantisierte** Werte an.  
( $\rightarrow$  Dirac Monopol) 'Flüsse'
- D-branes führen zu Eichtheorien wie dem Standard Modell

Wie kann unsere Welt aus String Theorie entspringen ?

- Es kann keine 10 flachen Dimensionen geben: 6 davon sollten klein ( $\rightarrow$  hohe Skala) und kompakt sein, so daß ein **effektives 4 dimensionales Modell** bei niedrigen Energien entsteht.
- Dies bedeutet daß wir einen Hintergrundwert für die Metrik annehmen.
- Wir können (und sollten) auch den anderen Feldern einen Hintergrundwert geben und D-branes hinzufügen.
- Die **antisymmetrischen Tensorfelder** nehmen in einem kompakten Hintergrund **quantisierte** Werte an.  
( $\rightarrow$  Dirac Monopol) 'Flüsse'
- D-branes führen zu Eichtheorien wie dem Standard Modell

Benutze so viel Freiheit wie möglich bei der Konstruktion einer Lösung der Theorie !!

(unter Erfüllung von Feldgleichungen, Konsistenzbedingungen...)

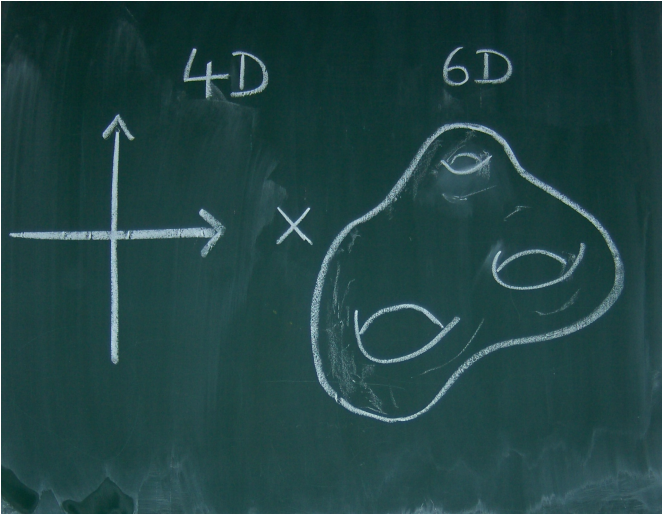
Wie kann unsere Welt aus String Theorie entspringen ?

- Es kann keine 10 flachen Dimensionen geben: 6 davon sollten klein ( $\rightarrow$  hohe Skala) und kompakt sein, so daß ein **effektives 4 dimensionales Modell** bei niedrigen Energien entsteht.
- Dies bedeutet daß wir einen Hintergrundwert für die Metrik annehmen.
- Wir können (und sollten) auch den anderen Feldern einen Hintergrundwert geben und D-branes hinzufügen.
- Die **antisymmetrischen Tensorfelder** nehmen in einem kompakten Hintergrund **quantisierte** Werte an.  
( $\rightarrow$  Dirac Monopol) 'Flüsse'
- D-branes führen zu Eichtheorien wie dem Standard Modell

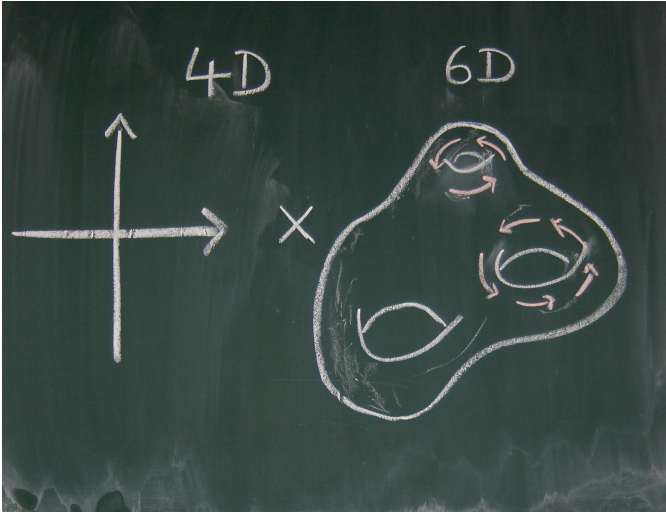
**Benutze so viel Freiheit wie möglich bei der Konstruktion einer Lösung der Theorie !!**

(unter Erfüllung von Feldgleichungen, Konsistenzbedingungen...)

# Geometrie

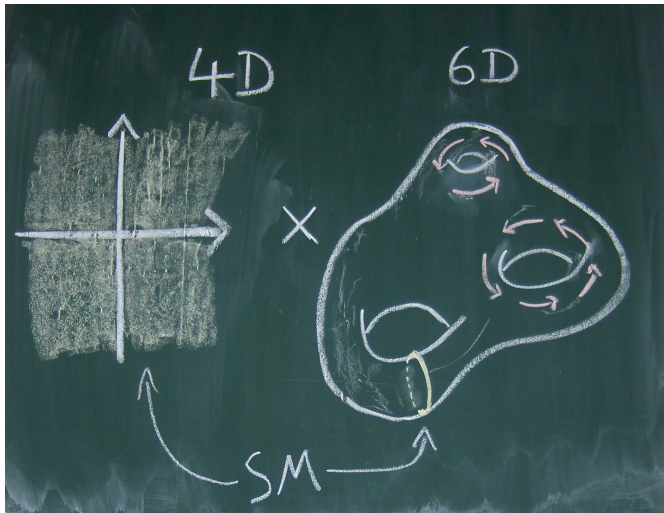


# Geometrie, Flüsse

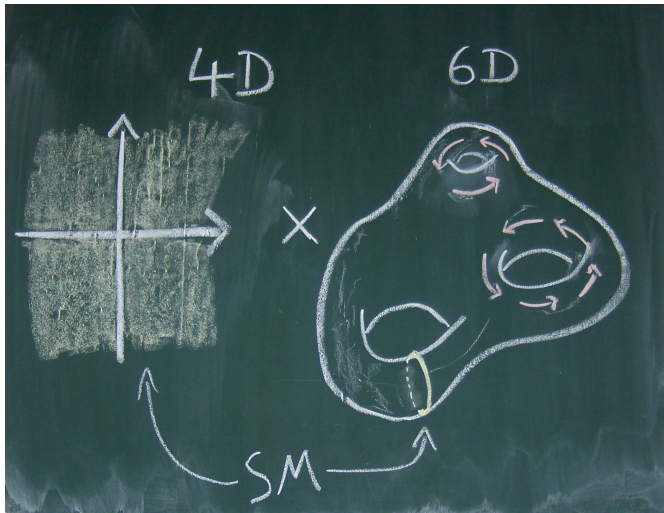




# Geometrie, Flüsse und D-branes

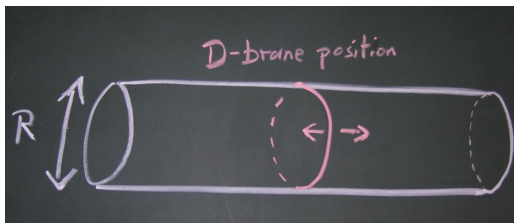


# Geometrie, Flüsse und D-branes



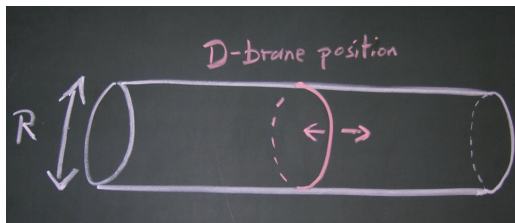
# Moduli

Die Deformationen der Hintergrundgeometrie und der D-branes sind (verknüpfte) physikalische Freiheitsgrade. 'Moduli'.



Sie sollten aus zwei Gründen stabilisiert werden:

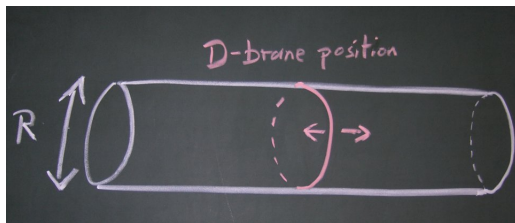
Die Deformationen der Hintergrundgeometrie und der D-branes sind (verknüpfte) physikalische Freiheitsgrade. 'Moduli'.



Sie sollten aus zwei Gründen stabilisiert werden:

- Aus ihren Werten ergeben sich die Parameter des 4D Modells .

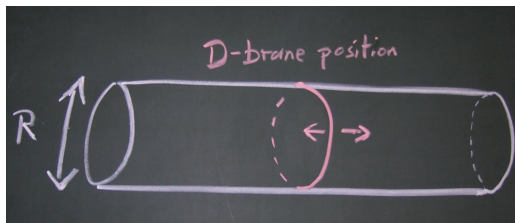
Die Deformationen der Hintergrundgeometrie und der D-branes sind (verknüpfte) physikalische Freiheitsgrade. 'Moduli'.



Sie sollten aus zwei Gründen stabilisiert werden:

- Aus ihren Werten ergeben sich die Parameter des 4D Modells .
- Ohne Potential entsprechen die Moduli masselosen Teilchen und vermitteln Wechselwirkung, deren Stärke mit der Gravitation vergleichbar ist ( $\rightarrow$  problematisch für Kosmologie).

Die Deformationen der Hintergrundgeometrie und der D-branes sind (verknüpfte) physikalische Freiheitsgrade. 'Moduli'.



Sie sollten aus zwei Gründen stabilisiert werden:

- Aus ihren Werten ergeben sich die Parameter des 4D Modells .
- Ohne Potential entsprechen die Moduli masselosen Teilchen und vermitteln Wechselwirkung, deren Stärke mit der Gravitation vergleichbar ist (→ problematisch für Kosmologie).

# Flüsse, D-branes und F-Theorie

## Flüsse generieren Potentiale für die Moduli!!

Dies lässt sich recht leicht für die Moduli der Geometrie verstehen, ist jedoch **sehr schwierig** (vor allem explizit) **für D-branes** zu verifizieren (z.B. Rekombination) [Erdmenger; Marchesano,...] .

## Flüsse generieren Potentiale für die Moduli!!

Dies lässt sich recht leicht für die Moduli der Geometrie verstehen, ist jedoch **sehr schwierig** (vor allem explizit) **für D-branes** zu verifizieren (z.B. Rekombination) [Erdmenger; Marchesano,...] .

- Durch Dualitäten lassen sich die Freiheitsgrade der D-branes geometrisieren.



## Flüsse generieren Potentiale für die Moduli!!

Dies lässt sich recht leicht für die Moduli der Geometrie verstehen, ist jedoch **sehr schwierig** (vor allem explizit) **für D-branes** zu verifizieren (z.B. Rekombination) [Erdmenger; Marchesano,...] .

- Durch Dualitäten lassen sich die Freiheitsgrade der D-branes geometrisieren.
- Im dualen Bild (namens **F-Theory**) sind sämtliche Moduli Deformationen einer (komplizierteren) Mannigfaltigkeit, [Vafa; Sen; Morrison].

## Flüsse generieren Potentiale für die Moduli!!

Dies lässt sich recht leicht für die Moduli der Geometrie verstehen, ist jedoch **sehr schwierig** (vor allem explizit) **für D-branes** zu verifizieren (z.B. Rekombination) [Erdmenger; Marchesano,...] .

- Durch Dualitäten lassen sich die Freiheitsgrade der D-branes geometrisieren.
- Im dualen Bild (namens **F-Theory**) sind sämtliche Moduli Deformationen einer (komplizierteren) Mannigfaltigkeit, [Vafa; Sen; Morrison]. Man kann hier die **Stabilisierung explizit behandeln** [K.Becker, M.Becker,...] und die resultierende Konfiguration der D-branes berechnen. [Kachru; Lüst]

## Flüsse generieren Potentiale für die Moduli!!

Dies lässt sich recht leicht für die Moduli der Geometrie verstehen, ist jedoch **sehr schwierig** (vor allem explizit) **für D-branes** zu verifizieren (z.B. Rekombination) [Erdmenger; Marchesano,...] .

- Durch Dualitäten lassen sich die Freiheitsgrade der D-branes geometrisieren.
- Im dualen Bild (namens **F-Theory**) sind sämtliche Moduli Deformationen einer (komplizierteren) Mannigfaltigkeit, [Vafa; Sen; Morrison]. Man kann hier die **Stabilisierung explizit behandeln** [K.Becker, M.Becker,...] und die resultierende Konfiguration der D-branes berechnen. [Kachru; Lüst]



## Flüsse generieren Potentiale für die Moduli!!

Dies lässt sich recht leicht für die Moduli der Geometrie verstehen, ist jedoch **sehr schwierig** (vor allem explizit) **für D-branes** zu verifizieren (z.B. Rekombination) [Erdmenger; Marchesano,...] .

- Durch Dualitäten lassen sich die Freiheitsgrade der D-branes geometrisieren.
- Im dualen Bild (namens **F-Theory**) sind sämtliche Moduli Deformationen einer (komplizierteren) Mannigfaltigkeit, [Vafa; Sen; Morrison]. Man kann hier die **Stabilisierung explizit behandeln** [K.Becker, M.Becker,...] und die resultierende Konfiguration der D-branes berechnen. [Kachru; Lüst]



Was wir zur Konstruktion einer Lösung wählen müssen ist:

- Ein 6 dimensionaler Raum  
(Niederenergie SUSY  $\rightarrow$  'Calabi-Yau').

Was wir zur Konstruktion einer Lösung wählen müssen ist:

- Ein 6 dimensionaler Raum  
(Niederenergie SUSY  $\rightarrow$  'Calabi-Yau').
- Flüsse und D-branes (  $\sim$  eine Menge ganzer Zahlen ).

Was wir zur Konstruktion einer Lösung wählen müssen ist:

- Ein 6 dimensionaler Raum  
(Niederenergie SUSY  $\rightarrow$  'Calabi-Yau').
- Flüsse und D-branes (  $\sim$  eine Menge ganzer Zahlen ).

Dadurch bestimmt ist:

Was wir zur Konstruktion einer Lösung wählen müssen ist:

- Ein 6 dimensionaler Raum  
(Niederenergie SUSY  $\rightarrow$  'Calabi-Yau').
- Flüsse und D-branes (  $\sim$  eine Menge ganzer Zahlen ).

Dadurch bestimmt ist:

ein vier dimensionales Modell (Eichsymmetrie, Teilchengehalt,  
Kopplungen, kosmologische Konstante,...)



Was wir zur Konstruktion einer Lösung wählen müssen ist:

- Ein 6 dimensionaler Raum  
(Niederenergie SUSY  $\rightarrow$  'Calabi-Yau').
- Flüsse und D-branes (  $\sim$  eine Menge ganzer Zahlen ).

Dadurch bestimmt ist:

ein vier dimensionales Modell (Eichsymmetrie, Teilchengehalt,  
Kopplungen, kosmologische Konstante,...)

Davon gibt es viele !!

Was wir zur Konstruktion einer Lösung wählen müssen ist:

- Ein 6 dimensionaler Raum  
(Niederenergie SUSY  $\rightarrow$  'Calabi-Yau').
- Flüsse und D-branes (  $\sim$  eine Menge ganzer Zahlen ).

Dadurch bestimmt ist:

ein vier dimensionales Modell (Eichsymmetrie, Teilchengehalt,  
Kopplungen, kosmologische Konstante,...)

Davon gibt es viele !!

Was bedeutet das für die Theorie (bzw. unser Weltbild) ??

Was wir zur Konstruktion einer Lösung wählen müssen ist:

- Ein 6 dimensionaler Raum  
(Niederenergie SUSY  $\rightarrow$  'Calabi-Yau').
- Flüsse und D-branes (  $\sim$  eine Menge ganzer Zahlen ).

Dadurch bestimmt ist:

ein vier dimensionales Modell (Eichsymmetrie, Teilchengehalt, Kopplungen, kosmologische Konstante,...)

Davon gibt es viele !!

Was bedeutet das für die Theorie (bzw. unser Weltbild) ??

- Hinweis auf neue Prinzipien ?

Was wir zur Konstruktion einer Lösung wählen müssen ist:

- Ein 6 dimensionaler Raum  
(Niederenergie SUSY  $\rightarrow$  'Calabi-Yau').
- Flüsse und D-branes (  $\sim$  eine Menge ganzer Zahlen ).

Dadurch bestimmt ist:

ein vier dimensionales Modell (Eichsymmetrie, Teilchengehalt, Kopplungen, kosmologische Konstante,...)

Davon gibt es viele !!

Was bedeutet das für die Theorie (bzw. unser Weltbild) ??

- Hinweis auf neue Prinzipien ?
- Leben wir in einer von vielen möglichen Welten ?  
Antrophisches Prinzip? [Susskind; Linde,...] , Statistik?[Douglas, Denef; Schellekens; Lüst,...],...

Was wir zur Konstruktion einer Lösung wählen müssen ist:

- Ein 6 dimensionaler Raum  
(Niederenergie SUSY  $\rightarrow$  'Calabi-Yau').
- Flüsse und D-branes (  $\sim$  eine Menge ganzer Zahlen ).

Dadurch bestimmt ist:

ein vier dimensionales Modell (Eichsymmetrie, Teilchengehalt, Kopplungen, kosmologische Konstante,...)

Davon gibt es viele !!

Was bedeutet das für die Theorie (bzw. unser Weltbild) ??

- Hinweis auf neue Prinzipien ?
- Leben wir in einer von vielen möglichen Welten ?  
Antrophisches Prinzip? [Susskind; Linde,...] , Statistik?[Douglas, Denef; Schellekens; Lüst,...],...

Auf jeden Fall ist es wichtig den Landscape zu kartographieren !

Was wir zur Konstruktion einer Lösung wählen müssen ist:

- Ein 6 dimensionaler Raum  
(Niederenergie SUSY  $\rightarrow$  'Calabi-Yau').
- Flüsse und D-branes (  $\sim$  eine Menge ganzer Zahlen ).

Dadurch bestimmt ist:

ein vier dimensionales Modell (Eichsymmetrie, Teilchengehalt, Kopplungen, kosmologische Konstante,...)

Davon gibt es viele !!

Was bedeutet das für die Theorie (bzw. unser Weltbild) ??

- Hinweis auf neue Prinzipien ?
- Leben wir in einer von vielen möglichen Welten ?  
Antrophisches Prinzip? [Susskind; Linde,...] , Statistik?[Douglas, Denef; Schellekens; Lüst,...],...

Auf jeden Fall ist es wichtig den Landscape zu kartographieren !

- 1 Ein **besseres Verständnis** der Freiheitsgrade der D-branes (und deren Stabilisierung) im dualen Bild zu erlangen. (zur Zeit)  
Hier kann auf eine weit entwickelte mathematische Literatur zurückgegriffen werden [Batyrev; Candelas; Katz, Peralov, Skarke; Kreuzer, Morrison].

- 1 Ein **besseres Verständnis** der Freiheitsgrade der D-branes (und deren Stabilisierung) im dualen Bild zu erlangen. (zur Zeit) Hier kann auf eine weit entwickelte mathematische Literatur zurückgegriffen werden [Batyrev; Candelas; Katz, Peralov, Skarke; Kreuzer, Morrison].
- 2 Explizite Konstruktion von **realistischen Modellen**; statistische Untersuchungen... (in Zukunft)



- 1 Ein **besseres Verständnis** der Freiheitsgrade der D-branes (und deren Stabilisierung) im dualen Bild zu erlangen. (zur Zeit) Hier kann auf eine weit entwickelte mathematische Literatur zurückgegriffen werden [Batyrev; Candelas; Katz, Peralov, Skarke; Kreuzer, Morrison].
- 2 Explizite Konstruktion von **realistischen Modellen**; statistische Untersuchungen... (in Zukunft)