

Besondere Lernleistung im Fach Physik

Schuljahr 2008/2009

Thema: **Was Einstein noch nicht wusste...**
*Eine populärwissenschaftliche Einführung in die
Grundlagen der Stringtheorie*

Fachlehrer: Frau Ina Müller

externer wissenschaftlicher

Betreuer: Rene Meyer (Max-Planck-Institut für
Physik, München)

vorgelegt von: Patrick Fröhner / Tom Päßler

Kurs/Hj.: Hj. 13.2

Abgabedatum: 13.03.2009

Inhaltsverzeichnis	Seite
8 Einsteins Vision – Grundlage für die Stringtheorie?	04
1 Bestandteile der Materie	04
2 Die vier elementaren Grundkräfte	10
2.1 Ausgangsposition	10
2.2 Kräfte	10
2.2.1 Die starke Wechselwirkung	10
2.2.2 Die elektromagnetische Kraft	14
2.2.3 Die schwache Wechselwirkung	15
2.2.4 Die Gravitation	16
2.3 Eichsymmetrien	17
3 Relativitätstheorien	18
3.1 Historisches	18
3.2 Die spezielle Relativitätstheorie	19
3.2.1 Das Relativitätsprinzip / die Relativität der Geschwindigkeiten	20
3.2.2 Die Beschaffenheit von Raum und Zeit in deren Relativität	21
3.2.3 Die Lichtgeschwindigkeit	24
3.2.4 $E=mc^2$	26
3.3 Die Allgemeine Relativitätstheorie	27
4 Die Quantenmechanik und Quantenfeldtheorien	29
4.1 Die Quantenmechanik	29
4.2 Der Quantenschaum	32
4.3 Die Quantenfeldtheorien	33
5 Das Schwarze Loch und seine Folgen	35
6 Stringtheorie	36
6.1 Entstehungsgeschichte	36
6.1.1 Erste Ideen	36
6.1.2 Stringtheorie in der Krise	37
6.1.3 Comeback der Stringtheorie	37
6.2 Begrifflichkeit „String“	38
6.3 Grundlagen der Stringtheorie	42
6.3.1 Enorme Spannungen	42
6.3.2 Wechselwirkung von Strings	43
6.3.3 Spin – Supersymmetrie – Superpartner	47
6.3.4 Veränderungen der Raumdimensionen	49
6.3.4.1 Ideen von Kaluza und Klein	50

	Seite
6.3.4.2 Stringtheorie und Zusatzdimensionen	53
6.3.4.3 Calabi-Yau-Räume und deren physikalische Auswirkungen	55
6.3.5 Raumzeit aus der Sicht der Stringtheorie	59
6.3.5.1 Eigenschaften der Raumzeit	59
6.3.5.2 Risse in der Raumzeit	62
7 Wegweisende neue Theorien	64
7.1 Fünf verschiedene Stringtheorien	64
7.2 M-Theorie	67
8 Branen und Urknalltheorien	72
8.1 Branen und Branwelten	72
1. Begrifflichkeit „Brane“	72
2. Das ADD-Szenario	74
3. Das ekpyrotische und das zyklische Universum	75
8.2 Die Entstehung des Universums aus Sicht der Stringtheorie	76
9 Erkenntnisse, Zukunftsaussichten und Kritik	78
Anhang	

0 Einsteins Vision – Grundlage für die Stringtheorie?

Albert Einstein - eine Koryphäe auf dem Gebiet der Physik, der mit seiner Relativitätstheorie die Welt der Wissenschaft aus den Angeln hob und revolutionierte. Sein Leben lang führte er theoretische Arbeiten durch, um eines Tages sein höchstes Ziel zu erreichen: die Entwicklung der Weltformel. Einer Formel, mit der sich das gesamte Geschehen im Universum einfach und doch umfassend beschreiben lässt. Selbst auf seinem Sterbebett trug er immer einen Schreibblock bei sich, für den Fall, dass ihm doch noch die leuchtende, letzte Idee kommt. Vergeblich. Er starb im Alter von 76 Jahren. Bis heute ist es noch keinem anderen Forscher gelungen, Einsteins Traum zu verwirklichen. Doch selbst ein solches Genie wie Albert Einstein hatte seine Fehler. So glaubte er sein Leben lang nur an die Dinge, die er glauben wollte. Seine Abneigung zur damals noch in den Kinderschuhen steckenden Quantentheorie war nicht zu übersehen. So versuchte er mit Sprüchen wie: „Gott würfelt nicht.“ diese Theorie der Lächerlichkeit Preis zu geben. Hätte er damals bereits etwas von der String-Theorie gewusst, wäre er mit dieser sicherlich nicht anders umgegangen. Doch mit seiner berühmtesten Formel:

$$E = mc^2,$$

aus der sich herauslesen lässt, dass jede Energie einer Masse gleichzusetzen ist, hat er vielleicht mehr von der ihm so unpassenden Theorien den Weg bereitet, als er glaubte. Denn gerade die String-Theorie, welche die kleinsten Baueinheiten der Materie als winzige, schwingende Energiefäden betrachtet, kann von einer solchen Formel zwar nicht ausgiebig beschrieben, aber durchaus gerechtfertigt werden. Könnte es sein, dass Einstein zu seinen Lebzeiten doch näher an der Entwicklung einer ultimativen Formel war, als er selber dachte...

1 Bestandteile der Materie

Bereits in der griechischen Antike kam unter den vielen Naturphilosophen die Frage auf, woraus die Materie eigentlich bestehe. Allen voran stand der Philosoph Demokrit, der fast 500 Jahre vor Christi lebte. Er stellte die Theorie des Atomistischen Materialismus auf, in der er behauptet, dass eben besagte Materie aus vielen kleinen nicht weiter teilbaren Teilchen besteht. Diese hätten verschiedene Formen, manche kugelförmig, manche oval oder auch pyramidenförmig. Er benannte diese nach dem griechischen Wort für „unteilbar“, nämlich „atomos“. Allerdings fand seine Theorie sehr lange Zeit keine Beachtung und wurde bald darauf wieder verworfen.

Zu Beginn des 18. Jahrhunderts entdeckte man dann erneut, dass die Materie aus etwas Kleinerem zusammengesetzt sein muss und begann dieses Phänomen wissenschaftlich zu untersuchen. Der russische Chemiker Dimitri Mendelejew befasste sich mit diesem Thema und ordnete die in der Natur vorkommenden verschiedenen Atome in einem periodischen System an.

Das Wissen, über welches wir heute verfügen, entwickelte sich erst seit Beginn des 20. Jahrhunderts nachhaltig. Man entdeckte, dass ein Atom zu größtem Teil aus leerem Raum besteht, in dem eine dünne Wolke von negativ geladenen Teilchen, den Elektronen, existiert. In der Mitte dieses Raumes befindet sich der Atomkern, der positiv geladen und 100.000 mal kleiner als das eigentliche Atom ist. Trotz dieser winzigen Größe ist darin der größte Teil der Masse konzentriert. Bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts nahm man an, dass die kleinsten Bausteine des Universums lediglich Protonen, Neutronen und Elektronen sind. Doch mit dem Fortschreiten der Technik entwickelte sich auch diese Theorie weiter. Durch die Entwicklung von hochauflösenden Rastertunnel-Elektronenmikroskopen war es zu Beginn des 21. Jahrhunderts erstmals möglich Atome direkt zu sehen. Mit Hilfe davon wurden neue, noch kleinere Elementarteilchen entdeckt. Man fand heraus, dass Protonen und Neutronen aus sog. Quarks bestehen. Die Elektronen hingegen bestehen nicht aus diesen Quarks und gehören deshalb einer höheren Teilchenfamilie, den Leptonen an (siehe dazu Abbildung 1). Sowohl Quarks und Leptonen als auch Bosonen, auf welche später noch eingegangen werden wird, sind Elementarteilchen, im Sinne von kleinsten bekannten Teilchen. Der Unterschied zwischen Fermionen und Bosonen ist der unterschiedliche Spin, eine Art quantisierter Drehimpuls. Diesen können Physiker für jede Teilchenart berechnen. Teilchen mit einem Spin von $\frac{1}{2}$ - zu welchen Quarks und Leptonen zählen – genügen dem Pauliprinzip. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei Teilchen im exakt gleichen Quantenzustand befinden, ist exakt Null. So können zum Beispiel auf dem s-Orbital eines Heliumatoms niemals zwei Elektronen mit Spinausrichtung parallel zum Magnetfeld gleichzeitig existieren. Quantenmechanisch ist es also verboten, dass zwei Fermionen exakt den gleichen Zustand annehmen. Dies ist auch der Grund aus dem die Anzahl der Elektronen, die auf den verschiedenen Orbitalen eines Atoms Platz haben, begrenzt ist.

Für Bosonen gilt dieses Prinzip nicht, da sie einen ganzzahligen Spin besitzen. Daher können sich unbegrenzt viele dieser Teilchen in dem gleichen Zustand befinden.

Von den Leptonen existieren zwei verschiedene Arten und drei verschiedene Familien, den sog. Generationen. Die Partikel der zweiten Familie sind genaue Abbilder der ersten Familie, allerdings sehr instabil und mit einer 200mal größeren Masse. Die dritte Familie ist noch instabiler und wiegt bis zu 3600mal so viel. Die Leptonen der ersten Familie heißen Elektronen und Elektronen-Neutrinos. Sie sind die Teilchenart, die am häufigsten vorkommt. Die Teil-

chen der zweiten und dritten Familie sind aufgrund ihrer, für Teilchenverhältnisse, unglaublich großen Masse nur wenige Sekundenbruchteile nach bestimmten Teilchenumwandlungen vorhanden und zerfallen anschließend wieder in die der ersten Familie. Genau dasselbe Prinzip herrscht bei den Quarks vor. Bei ihnen gibt es sechs verschiedene Flavours – auf deutsch „Geschmacksrichtungen“ – welche die Namen Up-, Down-, Strange-, Charm-, Top- und Bottom-Quark tragen. Die Quarks der ersten Familie sind hierbei die Up- und Down-Quarks. Auch hier sind die Teilchen der höheren Familien zu schwer um lange zu existieren und sie teilen sich in die Quarks der ersten Familie auf.

Materieteilchen

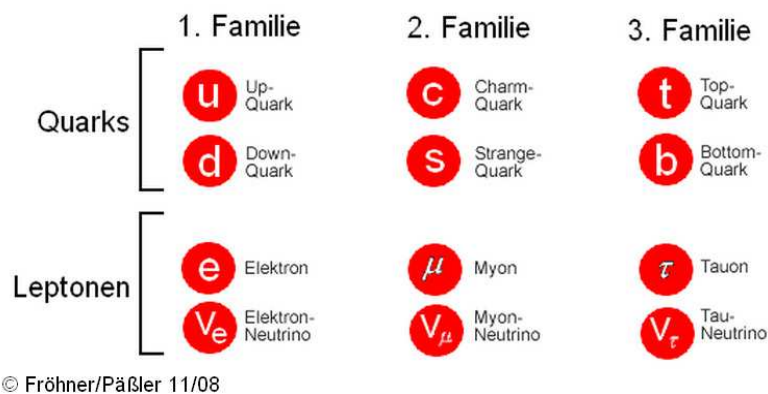


Abbildung 1: Materieteilchen und deren Zuordnung zu Familien

Leptonen			
Name	Ladung	Masse	Entdeckung
ν_e	0	2,2 eV	1956
e^-	-1	0,5110 MeV	1900
ν_μ	0	190 keV	1962
μ^-	-1	105,7 MeV	1936
ν_τ	0	18,2 MeV	1997-2000
τ^-	-1	1777 MeV	1975

© Fröhner/Päßler 12/08

Tabelle 1:

Leptonen der verschiedenen Familien und deren Werte

Quarks			
Name	Ladung	Masse	Entdeckung
down	-0,33	5 MeV	1964
up	0,66	7 MeV	1964
strange	-0,33	150 MeV	1964
charm	0,66	1,4 GeV	1974
bottom	-0,33	4,5 GeV	1977
top	0,66	174,3 GeV	1994

© Fröhner/Päßler 12/08

Tabelle 2:

Quarks der verschiedenen Familien und deren Werte

Zu jedem Elementarteilchen existiert ein korrespondierendes Antiteilchen mit entgegengesetzter Ladungszahl aber gleicher Masse und Lebensdauer. Dies ist aufgrund des CPT-Theorems nachgewiesen. Das CPT-Theorem (Charge-Parity-Time, also Ladung-Parität-Zeit) ist ein Gesetz der Physik, welches besagt, dass Antimaterie im Bezug auf Materieteilchen spiegelbildlich aufgebaut (transformiert) ist. Eine solche Transformation spielt sich in drei einzelnen diskreten Transformationen ab:

C-Transformation: Das Teilchen wird durch das Antiteilchen ausgetauscht, wobei die Ladung das Vorzeichen ändert. Sie wird auch Ladungskonjugation genannt.

P-Transformation: Alle drei Raumkoordinaten der beteiligten Teilchen und deren Strukturen werden gespiegelt. Parität bedeutet also die Umkehrung einer Raumrichtung. Die Formel hierzu lautet also $Z_{\text{neu}} = Z_{\text{alt}}$. Dies nennt man Paritätstransformation.

T-Transformation: Umkehrung der Zeitkoordinaten der beteiligten Teilchen und Strukturen. Als Formel hierfür gilt $t_{\text{alt}} = t_{\text{neu}}$. Diese Transformation wird auch Zeitumkehr genannt.

Man kennzeichnet alle Antiteilchen im Allgemeinen indem man den Begriff des jeweiligen Teilchens um die Vorsilbe „Anti-“ ergänzt und beim Zeichen für besagtes Teilchen einen waagerechten Strich darüber zeichnet.

Die Zusammenfassung all dieser Teilchen und deren Relation zueinander bezeichnet man als das Standardmodell der Teilchen.

Eine weitere Teilchenart sind die Kraft- oder Austauschteilchen, auch Bosonen genannt. Diese Teilchen ermöglichen die „Kommunikation“ zwischen verschiedenen Partikeln, wie Quarks und Leptonen. Ohne diese Kraftteilchen wäre eine Anziehung, Abstoßung oder Bindung von Elementarteilchen nicht möglich. Diese Kraftteilchen werden zwischen den Elementarpartikeln immer wieder ausgetauscht, so wie wir uns manchmal untereinander einen Ball zu werfen. Allerdings ist diese Metapher nur ein Bild für ein mathematisches Hilfsmittel, nämlich die Störungstheorie der Quantenfeldtheorie. Diese funktioniert im Wesentlichen wie folgt. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Kraftteilchen von einem Fermion absorbiert bzw. emittiert wird, ist proportional zur Ladung des jeweiligen Fermions. Wählen wir uns als Beispiel dafür ein Photon, dass von einem Elektron absorbiert/emittiert werden soll, so wird die Wahrscheinlichkeit für dieses Ereignis von der Ladung des Elektrons, der Elementarladung, be-

stimmt. Da ein emittiertes Photon immer von einem zweiten Teilchen wieder absorbiert werden muss, ist jede physikalische Größe F eine Funktion vom Quadrat der Elektronenladung (Formelzeichen e): $F = F(e; \dots)$. F ist hierbei eine Funktion in Abhängigkeit der Elektronenladung e und anderer Parameter. Wenn nun e^2 klein genug ist, kann es als 0 angenommen werden ($e^2 = 0$) und in eine sog. Taylorreihe, ein mathematisches Rechenmittel, entwickelt werden. Die gesamte Formel hierfür lautet:

$$F(e) = F_0 + F_1 * e^2 + F_2 * e^4 + \text{höhere Terme.}$$

Der Term F_0 verkörpert demnach den physikalischen Prozess, dass kein Photon ausgetauscht wird, F_1 den Prozess, dass ein Photon ausgetauscht wird, und so weiter.

Für das Photon an sich stellt sich heraus, dass der reale Entwicklungsparameter nicht e^2 ist, sondern vielmehr die Feinstrukturkonstante $\alpha = e^2 / (4\pi * c * \epsilon * h) = 1/137$. Hierbei ist c die Lichtgeschwindigkeit, ϵ die Vakuumdielektrizitätskonstante und h das Plancksche Wirkungsquantum. Dies ist in wesentlichen Zügen der mathematische Hintergrund der vereinfachten Darstellung mit dem Ball, der hin- und hergeworfen wird. Der ständige Austausch bewirkt dann eine individuelle Reaktion. Jede der vier elementaren Grundkräfte, auf die später noch näher eingegangen wird, besitzt eigene Austauschteilchen. So bewirkt die starke Wechselwirkung mit acht versch. sog. Gluonen eine feste Bindung von Quarks zu einem Neutron/Proton. Die elektromagnetische Kraft erreicht die für sie typische Anziehung oder Abstoßung von elektrisch geladenen Teilchen durch den Austausch von Photonen. Die schwache Wechselwirkung, die für verschiedene Teilchenumwandlungen zuständig ist, erreicht dies durch die Teilchen Z^0 , W^+ und W^- . Das „Graviton“, welches als Austauschteilchen für die Gravitation gilt, ist jedoch noch nicht experimentell nachgewiesen. Aufgrund des enormen mathematischen Erfolges jedoch, glaubt niemand daran, dass es nicht existiert. Theoretisch ist es also bereits vorhergesagt, nur ein direkter Nachweis wird wahrscheinlich niemals möglich sein. An indirekten Nachweismethoden, z.B. mit Hilfe von Gravitationstheorie, wird derzeit noch gearbeitet.

Alle existierenden Teilchen lassen sich in die Gruppen der Fermionen oder Bosonen einordnen. Eine weitere Einteilung von Teilchengruppen ist die in Hadronen, in welche die Mesonen und die Baryonen gehören, und in Leptonen. Die Unterscheidung hierbei ist wie folgt:

- Hadronen sind alle aus Quarks zusammengesetzten Teilchen, da all diese an der starken Wechselwirkung teilnehmen. Allerdings zählen die Quarks an sich nicht dazu, sondern nur die aus Quarks zusammengesetzten Teilchen. Der Name stammt vom griechischen „adros“, was stark bedeutet.
 - Baryonen sind alle Hadronen mit halbzahligem Spin, also fermionische Hadronen. Der Name stammt vom griechischen „baris“, was schwer bedeutet.

- Mesonen sind alle Hadronen mit ganzzahligem Spin, also bosonische Hadronen. Der Name stammt vom griechischen „mesos“, was mittel bedeutet (hier ist mittelschwer gemeint).
- Leptonen wechselwirken nicht stark, was bedeutet, dass sie keine Gluonen aussenden, sondern nur Photonen und W- bzw. Z-Teilchen. Der Name stammt vom griechischen „leptos“, was leicht bedeutet.

Wechselwirkungen und Austauschteilchen				
Kraft	Relative Stärke	hat Wirkung auf	wird vermittelt durch	Theorie
Starke Wechselwirkung	1	Quarks und Gluonen mit Farbladungen	8 Gluonen (g)	Quantenchromodynamik (QCD)
Elektromagnetische Wechselwirkung	10^{-3}	Elektrisch geladene Teilchen	Photon (γ)	Quantenelektrodynamik (QED)
Schwache Wechselwirkung	10^{-5}	Quarks, Leptonen, W^+ , W^- , Z^0	W^+ , W^- , Z^0	Quantenflavourdynamik (QFD)
Gravitation	10^{-38}	Alle Teilchen	Evtl. Graviton	Allg. Relativitätstheorie (ART)

© Fröhner/Päßler 12/08

Tabelle 3: Die elementaren Grundkräfte und deren Wechselwirkungen

Abschließend lässt sich feststellen, dass das Standardmodell der Teilchen ein sehr komplexes Gebilde ist, in dem man aufgrund der großen Anzahl verschiedener Teilchen schnell die Orientierung verlieren kann. Für Physiker jedoch ist es absolut unabdingbar.

2 Die vier elementaren Grundkräfte

2.1 Ausgangsposition

Jeden Tag haben wir alle es mit dutzenden verschiedenen Arten von Kräften zu tun. Sei es Muskelkraft, mit der wir uns bewegen können, die Reibungskraft oder die Gewichtskraft. Wir kennen die Antriebskraft, die ein Auto fahren lässt und auch die Kraft, die eine gespannte Feder ausübt. Doch auch die Kräfte, die im Inneren von Atomen wirken, sie zusammenhalten und somit unsere Existenz ermöglichen, sollten wir nicht vergessen. Doch kein Physiker kann hinnehmen, dass diese Kräfte einfach so existieren. So begann man der Frage nachzugehen, woraus diese Kräfte bestehen. Tatsächlich: Nach vielen Jahren der Forschung ent-

deckte man, dass all diesen verwirrend vielen Kräften lediglich vier elementare Kräfte zu Grunde liegen.

Mit diesen vier Kräften werden wir, die Verfasser, uns im folgenden Abschnitt näher befassen.

2.2 Kräfte

2.2.1 Die starke Wechselwirkung

Die starke Wechselwirkung ist die stärkste aller Grundkräfte. Sie hat nur Kraft auf Teilchen, die aus Quarks aufgebaut sind. Auf Leptonen, wie z.B. das Elektron, hat sie also keinen Einfluss. Die starke Kernkraft ist dafür verantwortlich, dass verschiedene Quarks zu Hadronen gebunden werden. Die bekanntesten Hadronen sind die Nukleonen (Neutronen und Protonen), aus denen die Atomkerne aufgebaut sind. Aus dem Umstand, dass sich benachbarte Atomkerne nicht gegenseitig anziehen, lässt sich außerdem schließen, dass sie nur eine sehr geringe Reichweite besitzt. Der Zusammenhang ist bei näherer Betrachtung aber noch ein wenig komplizierter. Eigentlich ist die starke Wechselwirkung nämlich eine langreichweitige Kraft. Lediglich in dem Universum in dem wir leben, also bei unseren niedrigen Temperaturen, befindet sie sich in einer Phase, in der alle wechselwirkenden Teilchen farbneutral sein müssen, der sog. „einschließenden Phase“. Allerdings ist dies nicht die natürlichste Phase dieser Kraft. Wenn die Temperaturen und Energien ausreichend hoch sind, dann bestehen die Quarks und Gluonen als freie Teilchen. Momentan wird ein Teilchenbeschleunigerexperiment auf Long Island in New York durchgeführt, der Relativistic Heavy Ion Collider (kurz RHIC). Durch den Zusammenstoß von Goldatomen wird dort versucht die Kernmaterie auf solch hohe Dichten und Temperaturen zu bringen, dass die Phase mit freien Gluonen und Quarks erreicht wird. Bei unseren niedrigen Temperaturen sind diese Teilchen aber nicht frei, sondern farbladungsgebunden. Jetzt kann man leicht errechnen, dass die Austauschteilchen in diesem Fall Mesonen, insbesondere Pionen sind.

Um jetzt aber zu verstehen, wieso die Kernkraft zwischen den Nukleonen (Protonen und Neutronen) so eine kurze Reichweite hat, wird hier der Zusammenhang zwischen der Masse der Austauschteilchen und dem Potenzial der Kraft gezeigt. Er sieht wie folgt aus:

$$\text{Potenzial}(V) = \frac{\text{Ladung1} * \text{Ladung2}}{\text{Abstand}}$$

Für masselose Austauschteilchen gilt nun, dass sie in der vierdimensionalen Raumzeit ein Potenzial haben, das proportional zum inversen räumlichen Abstand der beiden Ladungen ist. Es gilt also: $|x-y|^{-1}$

Die Kraft ergibt sich aus der negativen Ableitung des Potentials nach dem Abstand, also

$$F = - \frac{dV}{d\text{Abstand}}$$

Wir erhalten also das Newtonsche Gravitationsgesetz.

Wenn die Austauscheteilchen nun eine Masse besitzen, dann hat das Potenzial die Exponentialform: $V \sim e^{(-m \cdot |x-y|)}$

Die Variable m steht hierbei für die Masse des Austauscheteilchens. Da diese Funktion nun exponentiell, also sehr schnell abfällt, ist die Reichweite eines solchen Teilchens sehr gering. Für das Pion, mit dem wir uns beschäftigt haben und welches eine Masse von etwa 140 meV besitzt, kommen wir auf eine Größenordnung von etwa 2,5 Femtometer. Dies ist ein ziemlich kurzer Abstand, weshalb sich Atomkerne normalerweise tatsächlich kaum anziehen.

Wie bereits angesprochen, kann diese Kraft nicht einfach zwischen die Quarks wirken, sondern ist an Ladungen gebunden. Doch hierbei gibt es nicht, wie bei der elektrischen Ladung, nur die positive und die negative Ladung, sondern es gibt gleich drei verschiedene Ladungsarten.

Diese werden mit den Farben Rot, Gelb und Grün bezeichnet. Die entsprechenden Anti-quarks werden mit den Anti-Farben Anti-Rot, Anti-Grün und Anti-Blau bezeichnet.

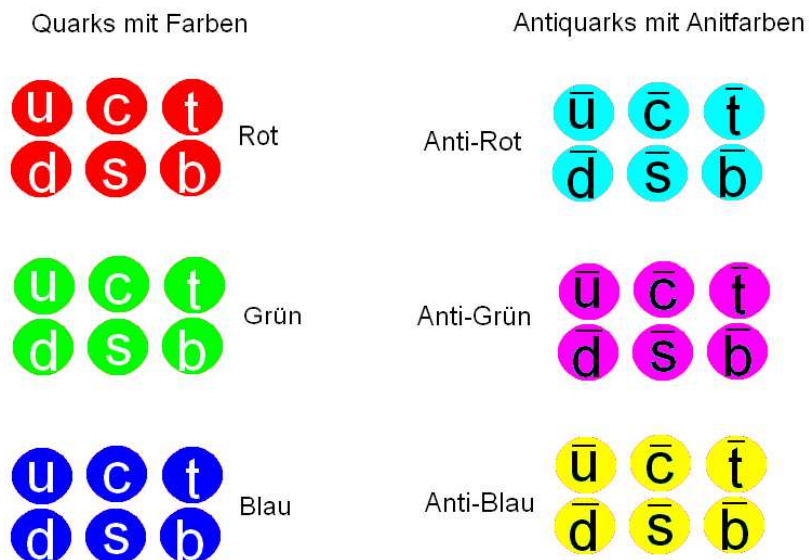


Abbildung 2:

Quarks und Antiquarks mit deren Farbladungen

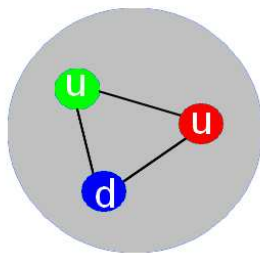
Doch wie kann man sich nun die Anziehungskraft zwischen diesen Quarks vorstellen? Im Standardmodell wird dies durch sog. Austauscheteilchen beschrieben. Diese Teilchen sind masselos und werden untereinander ausgetauscht und verursachen somit eine Wechselwir-

kung. Im Falle der starken Wechselwirkung nennt man diese Gluonen (engl. Glue = Leim, Kleber). Außerdem können nur zwei verschiedene Arten von Bindungen eingegangen werden. Das sind entweder Verbindungen, in denen alle drei Farben miteinander verbunden werden oder bei denen sich Farbe und Anti-Farbe kompensieren („farbneutrale“ Verbindung).

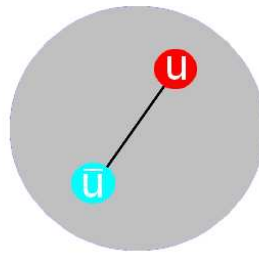
Die zwei verschiedenen Bindungsarten

Abbildung 3:

Mögliche Bindungsarten von Quarks



Alle drei Farben vertreten,
z.B. Baryon



"farbneutrale" Verbindung,
z.B. Meson

© Fröhner/Päßler 11/08

Wenn man nun versucht ein Quark aus einem Hadron zu lösen, stößt man auf eine sehr seltsame Eigenschaft der starken Wechselwirkung: Je größer die Entfernung, desto stärker die Kraft. In der Physik wird dies gern mit der Wirkung eines Gummibandes verglichen. Zwischen den Quarks bildet sich ein Kraftfeld. Sobald die darin befindliche Energie groß genug ist, bildet sich aus eben dieser Energie ein neues Quark-Antiquark-Paar.

Anstatt die Quarks innerhalb des Mesons voneinander zu lösen, wurden nun zwei Mesonen geschaffen. Die Tatsache, dass Quarks sich trennen lassen, ist eine Eigenschaft der „einschließenden Phase“, die bereits erläutert wurde.

Interessant hierbei ist, dass das Potenzial zwischen den Quarks linear mit dem Abstand steigt. Es gilt: $V = T \cdot r$

Und damit ist die Kraft $F = -dV / dr = -T$ konstant.

Das ist auch die Erklärung dafür, wieso die Austauschteilchen, die Gluonen, nur in winzig kleinen Abständen von ca. 1 Femtometer ($=10^{-15}\text{m} = 0,000\,000\,000\,000\,001\text{m}$) vorkommen.

Schematische Darstellung der zunehmenden Kraftwirkung der starken Wechselwirkung

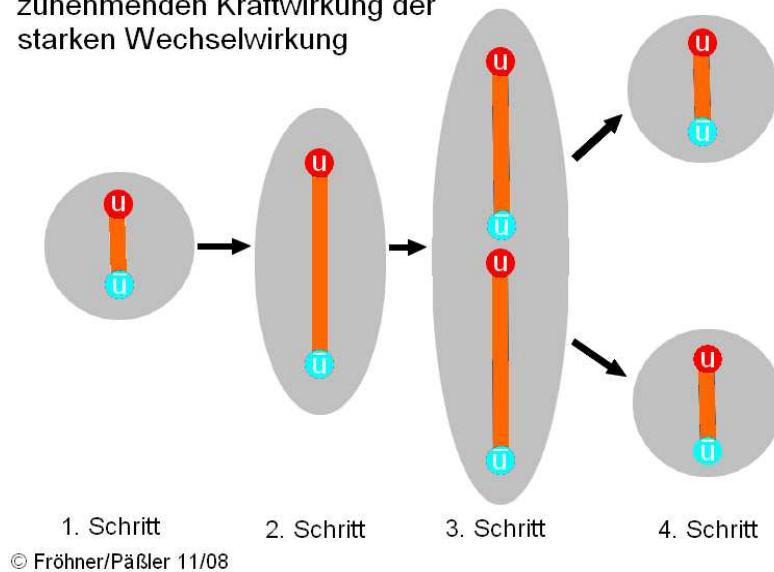


Abbildung 4:
Zunehmende Kraftwirkung bei der starken Wechselwirkung und deren Folgen

Fazit:

Die starke Wechselwirkung ist die Kraft, die Quarks zu Hadronen *bindet* und ebenfalls dafür verantwortlich ist, dass Protonen und Neutronen im Atomkern zusammengehalten werden.

2.2.2 Die elektromagnetische Kraft

Seit dem antiken Zeitalter sind dem Menschen elektrische und magnetische Phänomene bekannt. Dass es hierbei zwei Ladungen gibt, die positive und die negative Ladung, wurde schon sehr früh entdeckt. Der Kompass zum Beispiel wurde im Abendland für Zwecke der Navigation erstmals um das Jahr 1200 herum benutzt. Der französische Gelehrte Petrus Peregrinus de Maharncuria beschrieb 1269 in seiner Abhandlung „Epistola de Magnete“ erstmals die Polarität von Magneten. Hierbei stoßen sich gleichnamige Ladungen ab (d.h. positiv – positiv) und ungleichnamige Ladungen (d.h. positiv – negativ) ziehen sich an. Auch die magnetischen Kräfte wurden sehr früh entdeckt und fanden einen Verwendungszweck, nämlich in Kompassen. Eine lange Zeit wurden nun die elektrische und die magnetische Kraft als zwei unterschiedliche Kräfte gesondert betrachtet.

Erst im 18. Jahrhundert entdeckten die Physiker Oerstedt und Faraday die magnetische Wirkung des elektrischen Stroms und die elektrischen Effekte von sich ändernden Magnetfeldern.

Auf dieser Grundlage entwickelte der Physiker James Clark Maxwell im 19. Jahrhundert eine einheitliche Feldtheorie, die beide Kräfte gleichermaßen beschrieb. Er fand heraus, dass eine ruhende Ladung nur ein elektrisches Feld besitzt, während eine sich bewegende Ladung zusätzlich noch ein magnetisches Feld hat. Ferner entdeckte er, dass die Bewegung von beschleunigten elektrischen Ladungen die Aussendung elektromagnetischer Wellen bewirkt. Diese können verschiedene Wellenlängen besitzen und werden dementsprechend benannt, wie zum Beispiel Radiowellen, Röntgenstrahlen oder Licht. Ohne diese Kraft wäre es auch unmöglich elektrischen Strom fließen zu lassen. Die Austauschteilchen für diese Kraft nennt man Photonen, die sog. „Lichtteilchen“.

Mit der Entdeckung der Tatsache, dass auch Atome aus einem elektrisch positiv geladenen Kern und negativ geladenen Elektronen bestehen wurde aufgezeigt, dass auch der Zusammenhalt eben dieser Atome auf die elektromagnetische Kraft zurückzuführen ist und diese somit für deren chemischen Eigenschaften verantwortlich ist. Die elektromagnetische Kraft kann sich allerdings kompensieren, sodass sich im Atom positive und negative Ladungen aufheben und besagte Atome eine neutrale Ladung besitzen.

Fazit:

Die elektromagnetische Kraft ist die Kraft, die Elektronen und Atomkern zusammenhalten und allen Stoffen somit ihre individuellen chemischen Eigenschaften geben und elektrischen Strom ermöglichen.

2.2.3 Die schwache Wechselwirkung

Im Vergleich mit den anderen Kräften, ist die schwache Wechselwirkung die Kraft, mit der geringsten Reichweite. Des Weiteren verlaufen all diese Prozesse sehr langsam, was auf die sehr große Masse der Austauschteilchen zurückzuführen ist. Diese Teilchen sind hierbei die Z^0 -, W^+ - und W^- -Teilchen, welche eine Masse von ca. 80 GeV besitzen. Das entspricht 160 mal einer Elektronenmasse oder 80 mal der Masse eines Nukleons. An dieser Wechselwirkung nehmen außerdem alle Elementarteilchen, also sowohl Quarks als auch Leptonen, teil.

Entdeckt wurde diese Kraft bei der Analyse des Betazerfalls, also einer Form der Radioaktivität. Hierbei bewirkt sie nämlich, dass sich im Atomkern ein Neutron in ein Proton umwandelt und dabei ein Elektron und ein Antielektronneutrino abgestoßen werden.

Da ein Neutron jedoch aus zwei down-Quarks und einem up-Quark besteht und ein Proton aus zwei up-Quarks und einem down-Quark, wird lediglich ein down-Quark des Neutrons in ein up-Quark umgewandelt. Dabei wird ein W^- -Teilchen abgestoßen, welches nur wenig später in das oben genannte Elektron und das Antielektronneutrino zerfällt. Dieser Prozess ist ein semileptonischer Prozess, d.h. es sind sowohl Leptonen als auch Quarks an dieser

Reaktion beteiligt. Daneben existieren auch noch hadronische Prozesse (nur Quarks beteiligt, z.B.: Zerfall von Kaonen) und leptonische Prozesse (nur Leptonen beteiligt, z.B.: Zerfall von Tauonen).

Umwandlung eines Elektrons in ein Proton

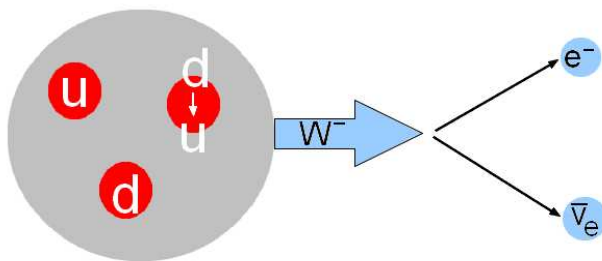


Abbildung 5:

Umwandlung eines Elektrons in ein Proton

© Fröhner/Päßler 11/08

Auf ähnliche Weise bewirkt die schwache Wechselwirkung auch den Zerfall instabiler Hadronen oder den Zerfall des Myon in Elektron und Neutrino. Doch die absolut wichtigste Aufgabe dieser Kraft ist es, Wasserstoffatome zu Helium zu fusionieren und somit die Sonne und alle Sterne zum Leuchten zu bringen. Dies vollzieht sich ähnlich wie der Betazerfall, nur dass sich beim Betazerfall Protonen in Neutronen umwandeln.

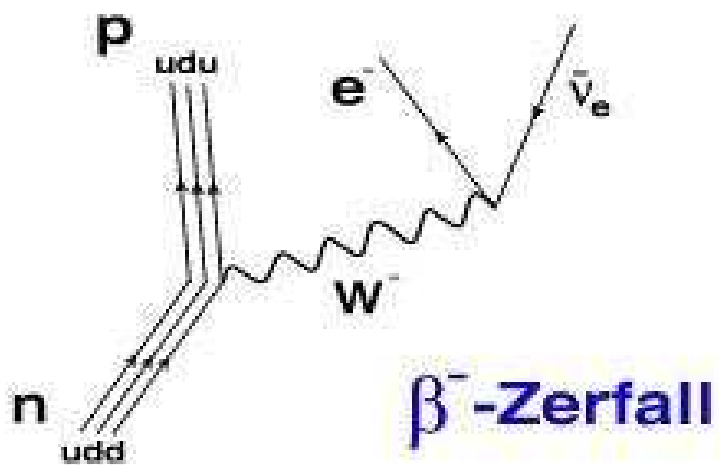


Abbildung 6:

Feynmann-Diagramm des Beta-Zerfalls

[vgl. Quelle 6]

Die Fusion von Wasserstoffatomen zu Helium wird auch inverser Betazerfall genannt. Am Ende entstehen Heliumkerne, die aus je zwei Protonen und Neutronen bestehen.

Fazit:

Die schwache Wechselwirkung ist die Kraft, die es ermöglicht, verschiedene Teilchenumwandlungen zu vollziehen und ist somit für das Leuchten der Sonne oder die Radioaktivität verantwortlich.

2.2.4 Die Gravitation

Bereits Isaac Newton formulierte eine Gleichung um die Gravitation zu berechnen – das Gravitationsgesetz. Später dann, im Jahre 1915, veröffentlichte Albert Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie, in der er außerdem die Idee einer eng mit der Gravitation verknüpften Raumzeit vorstellte. Die Newtonsche Gravitationstheorie allein ist für den alltäglichen Gebrauch nicht ausreichend. GPS-Systeme beispielsweise würden ohne die Anwendung der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie nicht so exakt funktionieren.

Die Gravitationskraft ist die schwächste aller Grundkräfte. Sie ist allerdings diejenige, deren Auswirkungen wir am meisten spüren. Hier auf der Erde erfahren wir sie als Schwerkraft. Sie ist aber auch für die Planetenbewegungen verantwortlich. Im Allgemeinen kann man sagen, dass die Gravitation zwischen allen Objekten wirkt, die eine Masse haben. Ferner wirkt sie immer anziehend, kann sich also nicht kompensieren sondern sich nur addieren und besitzt außerdem eine unbegrenzte Reichweite. Dafür sind die Austauschteilchen für diese Kraft verantwortlich, die „Gravitonen“. Obwohl sich diese Teilchen bereits berechnen lassen, sind sie wissenschaftlich nicht nachgewiesen und momentan noch eine Vermutung.

Da jedoch im Inneren der Teilchen die anderen drei Grundkräfte herrschen, wird die Gravitation in der Teilchenphysik in der Regel ignoriert. Da sie aber, allein vom logischen Standpunkt aus, nicht vernachlässigt werden dürfte, wird immer weiter nach einer allumfassenden Theorie gesucht. Des Weiteren wird vermutet, dass die Gravitationskraft kurz nach dem Urknall durchaus den anderen Kräften ebenbürtig gewesen sein könnte.

Fazit:

Die Gravitation ist die Kraft, die uns und alle Objekte um uns herum auf der Erde hält und für die Bewegung der Planeten verantwortlich ist.

2.3 Eichsymmetrien

Als Eichsymmetrie bezeichnet man eine sehr interessante Beobachtung, die sich bei allen vier der elementaren Grundkräfte machen lässt. Das heißt, dass jede einzelne der Kräfte spezielle Eigenschaften hat, die unverändert bleiben, egal aus welcher Richtung man sie anschaut. Um dies zu veranschaulichen, werden hier einige Beispiele näher erläutert. Bei der Gravitation sieht die Symmetrie wie folgt aus. Wie bereits in Einsteins Relativitätstheorie erläutert, können alle Beobachter bzw. Bezugssysteme, egal in welchem Bewegungszustand sie sich befinden, als vollkommen gleichberechtigt angesehen werden. Selbst diejenigen, die wir normalerweise als beschleunigt ansehen würden, können von sich aus sagen, dass sie sich in Ruhe befinden, und wir uns eigentlich bewegen, wenn sie sich dabei auf die Gravitation beziehen. Das ist dadurch möglich, da sie die Kraft, die auf sie einwirkt auf die Anwesenheit eines Gravitationsfeldes zurückführen können. Die Symmetrie der Gravitation sorgt also dafür, dass alle Beobachter und Bezugssysteme als gleichberechtigt angesehen werden können.

Die Erläuterung der Symmetrien der drei verbleibenden nicht gravitativen Kräfte ist ein wenig komplexer als die der Gravitation. Bei der starken Kernkraft hat sie etwas mit den Farbladungen der Quarks zu tun, die man im Allgemeinen als Rot, Grün und Blau bezeichnet. Die Symmetrie hier zeigt, dass die gegenseitige Wechselwirkung zwischen Quarks gleicher Farbe (Rot-Rot, Grün-Grün, Blau-Blau) bei allen identisch ist. Genauso verhält es sich mit Quarkverbindungen unterschiedlicher Farben (z.B. Blau-Grün, Rot-Blau, Grün-Rot, ...). Auch diese sind als völlig gleichwertig anzusehen. Ferner lässt sich diese Gleichheit der Wechselwirkungen aufrechterhalten, wenn man die Farbladungen auf eine bestimmte Art und Weise „verschiebt“. Wenn wir also, um es etwas bildhafter zu beschreiben, die Farbladungen Rot zu Gelb, Grün zu Indigo und Blau zu Violett verschieben würden, sie also alle um denselben Wert verändern, hat dies keinerlei Auswirkungen auf die Wechselwirkung zwischen den Quarks. Die Symmetrie der starken Kernkraft sagt also aus, dass die Wechselwirkungen der Quarks untereinander gegenüber diesen eben erläuterten Verschiebungen immun sind. Solche Eichsymmetrien sind natürlich auch bei der schwachen Kernkraft und der elektromagnetischen Kraft zu finden, doch auf diese müssen wir hier nicht näher eingehen. Doch jede einzelne dieser Symmetrien ist an eine essenzielle Bedingung gebunden. Diese Bedingung ist die Existenz der jeweiligen Kraft an sich. Denn für die Gleichberechtigung aller Beobachter und Bezugssysteme muss man sich auf die Anwesenheit der Gravitation beziehen. Auch die Immunität gegenüber Ladungsverschiebungen bei Quarks ist auf das Dasein der starken Wechselwirkung angewiesen.

Die elementaren Grundkräfte sind also dafür verantwortlich, dass das Universum, so wie wir es kennen, gewisse Symmetrien aufweist und damit so aussieht, wie wir es kennen.

3 Relativitätstheorien

3.1 Historisches

Im Mittelalter war die aristotelische Physik weitgehend verbreitet. Laut dieser war der natürliche Zustand eines Objektes, die Ruhe im Mittelpunkt des Universums. Da alles auf der Erde zu Boden fällt, dachte man, der Mittelpunkt der Erde sei der Mittelpunkt des Universums. Weiterhin war man davon überzeugt, dass jedes Objekt, das sich bewegt, ständig angetrieben werden muss. Je schneller es sich bewegt, umso stärker muss es angetrieben werden. Ohne jeglichen Antrieb würde es sofort stillstehen. Die Relativität der Bewegungen war also immer mit der Frage nach dem Mittelpunkt des Universums verbunden. Nikolaus Kopernikus hatte schon früh entdeckt, dass sich die Bewegungen der Himmelskörper besser erklären lassen, wenn man die Sonne als Mittelpunkt des Universums annimmt. Warum merkte man dann aber nichts von der Bewegung der Erde? Immerhin hat die Erde relativ zur Sonne eine Geschwindigkeit von 30.000 m/s.

Galileo Galilei löste dieses Problem erst viele Jahre später, indem er als erster das Trägheitsprinzip (Galileis Relativitätsprinzip) beschrieb: *„Ein Körper bleibt in gleichmäßiger Bewegung wenn er nicht durch eine Kraft beschleunigt wird.“ [9]*

Vor Galilei dachte man, dass die Bewegung der Sonne um die Erde eine Gegenkraft erzeugt. Seit Galilei weiß man, dass es nicht so ist. Jedoch musste es eine Kraft geben, die den Bewegungszustand der Erde bzw. eines Objektes auf der Erde ändert.

Viel später erst zeigte der britische Physiker Isaac Newton, dass sich die Bewegung der Planeten und ein Steinwurf auf dieselbe Weise berechnen lassen. Das Galileiische Relativitätsprinzip hatte sich so gut bewährt, sodass bis heute kein Physiker daran zweifelt.

Dem schottischen Physiker James Clark Maxwell gelang es, die von Michael Faraday entdeckten magnetischen und elektrischen Felder, zum Elektromagnetismus zu vereinigen. 1864 veröffentlichte Maxwell seine vier Gleichungen über den Elektromagnetismus. Dies machte eine Erweiterung und Verbesserung des Galileiischen Relativitätsprinzip notwendig....

3.2 Die spezielle Relativitätstheorie

Nach Maxwells Gleichungen breitet sich eine elektromagnetische Störung immer mit einer bestimmten unveränderlichen Geschwindigkeit aus, der Lichtgeschwindigkeit. Maxwell schloss aus seinen Gleichungen, dass Licht selbst lediglich eine elektromagnetische Welle

ist. Außerdem fiel ihm auf, dass sich alle elektromagnetischen Wellen mit konstanter Geschwindigkeit fortbewegen. Licht bewegt sich also immer mit Lichtgeschwindigkeit fort, ohne schneller zu werden oder sich zu verlangsamen.

Die Lichtgeschwindigkeit wurde bereits 1862 von dem amerikanischen Physiker mit deutscher Herkunft Albert Michelson mit 1% Abweichung genau berechnet. Er führte das Verfahren zur Berechnung der Lichtgeschwindigkeit an mehreren Orten der Erde durch und bekam immer dasselbe Ergebnis: 299.792,5 km/s. Michelson entdeckte, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant war.

Der 16-jährige Albert Einstein stellte sich 1895 folgende Frage: „Was geschieht, wenn wir einem Lichtstrahl mit Lichtgeschwindigkeit folgen“? [2, S.38] Nach Newtons Bewegungsgesetzen würden wir uns parallel zum Lichtstrahl bewegen und dieser würde uns als ruhend erscheinen. Das Licht würde quasi stillstehen. Das ist paradox, denn nach Maxwells Gleichungen gibt es kein ruhendes Licht. Heute könnte man dieses Paradoxon als ersten großen Konflikt der Physik des 20. Jahrhunderts bezeichnen.

Mit diesem Paradoxon setzte sich Einstein die nächsten 10 Jahre auseinander. Angestellt im Berner Patentamt veröffentlichte Albert Einstein 1905 in der Zeitschrift „Annalen der Physik“ seine „Spezielle Relativitätstheorie“ kurz SRT.

Einsteins Theorie sollte unsere Vorstellung von Raum und Zeit nachhaltig verändern.

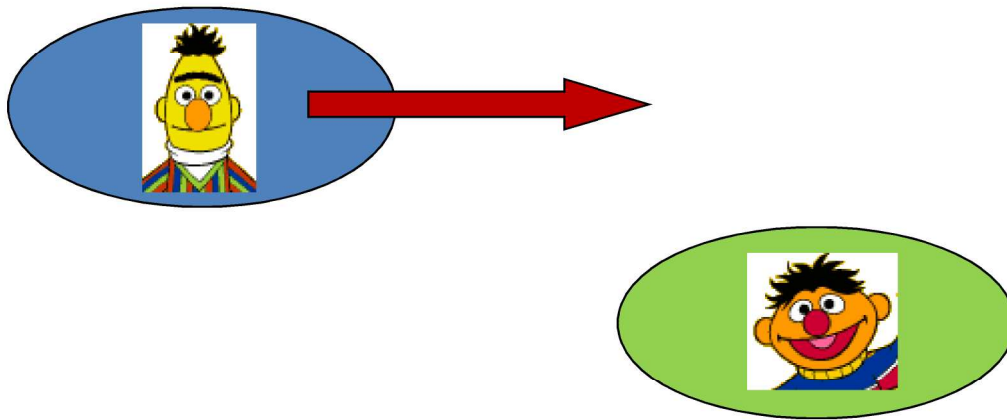
Zuerst einmal müssen wir einen allgegenwärtigen Begriff in der SRT klären. Stellen wir uns vor in den Tiefen unseres Universums, fernab von Sternen, Planeten und jeglichen Gravitationsquellen treiben zwei Raumschiffe frei herum. Auf dem einen Raumschiff lebt Ernie und auf dem anderen Bert. Beide führen viele Experimente durch um die Naturgesetze zu ergründen. Solche *freien, unbeschleunigten* Bezugssysteme nennt man Inertialsysteme. Die Beobachter, in unserem Fall Ernie und Bert, werden Inertialbeobachter genannt. In der SRT geht es um Relativität oder Absolutheit der Aussagen, die die Beobachter auf relativ zueinander bewegten Raumstationen treffen. Sind die Aussagen nun beobachterabhängig, also relativ oder beobachterunabhängig, also absolut?

Die SRT besteht aus vier Grundprinzipien: Dem Relativitätsprinzip, der Relativität von Raum und Zeit, der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und der Äquivalenz von Masse und Energie.

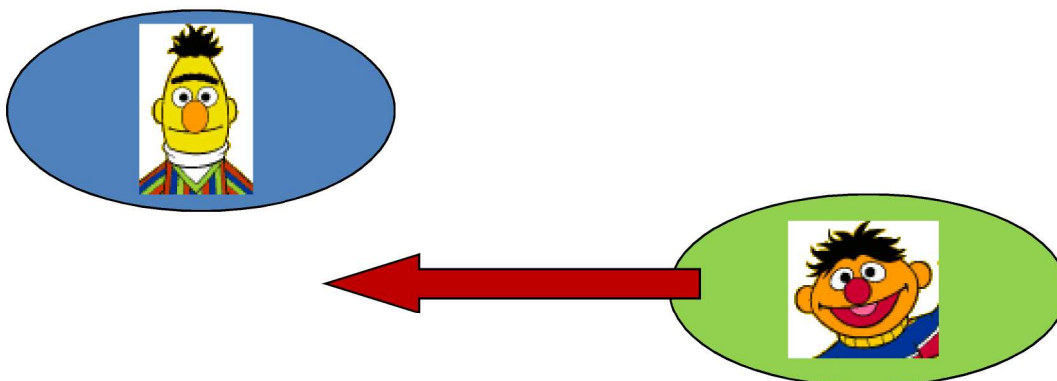
3.2.1 Das Relativitätsprinzip / die Relativität von Geschwindigkeiten

Stellen wir uns vor, dass die beiden Raumstationen von Ernie und Bert im leeren Weltraum aneinander vorbeitreiben. Ernie nimmt seine Raumstation als in Ruhe befindlich war und be-

hauptet, dass Bert in seiner Raumstation mit beachtlicher Geschwindigkeit an ihm vorbeizieht.



Aus Sicht von Bert dagegen ruht seine Raumstation, und Ernie zieht an ihm vorbei:



Auf die Frage, wer sich nun bewegt, werden Ernie und Bert uns beide eine andere Antwort geben, denn ob sich eine Raumstation bewegt oder nicht und mit welcher Geschwindigkeit sie sich bewegt, ist beobachterabhängig, also relativ. Aber gibt es vielleicht ein Experiment mit dem man tatsächlich einen Zustand absoluter Ruhe nachweisen kann? Ernie und Bert müssten es beide in ihrer Raumstation durchführen und für den absolut ruhenden Beobachter müsste ein anderes Resultat herauskommen als für den Bewegten. Jeder von beiden könnte am Ergebnis eindeutig und ohne Bezug zur Außenwelt ablesen, ob er sich in Ruhe oder in einem bewegten Zustand befindet.

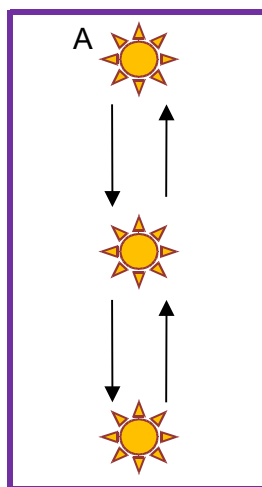
Da es kein solches Experiment gibt, folgerte Einstein, dass Geschwindigkeiten relativ sind. Dies verfasste er in seinem Relativitätsprinzip : „*Wann immer einer der Beobachter in seiner Raumstation, die sich ohne Beschleunigung mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, ein Experiment durchführt- das Ergebnis wird das selbe sein, wie das eines anderen Beobachters, der auf seiner Raumstation, welche sich natürlich auch mit konstanter Geschwindigkeit ohne Beschleunigung bewegt, haargenau den selben experimentellen Aufbau verwendet*“. [9]

Beschleunigungen stehen zwar in engem Zusammenhang mit Geschwindigkeiten, jedoch können diese durch Inertialkräfte gemessen werden. Dies bedeutet das Beschleunigungen nicht relativ sind.

3.2.2 Die Beschaffenheit von Raum und Zeit und deren Relativität

Das zweite Grundprinzip der SRT ist die Relativität von Raum und Zeit. Aus unseren Alltagserfahrungen wissen wir, dass Längen und zeitliche Abstände absolut sind. Doch sind sie das wirklich? Einstein bewies das Gegenteil mithilfe des folgenden Gedankenexperimentes:

Wir befinden uns mal wieder irgendwo im Universum ohne jegliche Art von gravitativen Beeinflussungen. Ernie kocht in seinem Raumschiff Eier, weil sich Bert zum Frühstück angemeldet hat. Er isst allerdings nur Eier, die exakt drei Minuten gekocht wurden. Da Ernie nur seine Atomuhr bei sich hat, liest er an ihr die 3 Minuten ab, die die Eier kochen müssen. Er startet die Uhr und jedesmal, wenn das Atom an seinem Startpunkt angekommen ist, sind 30 Sekunden vergangen. Als das Atom das 6. Mal am Startpunkt ankommt, piept Ernies Uhr und stoppt. Die Eier sind fertig!

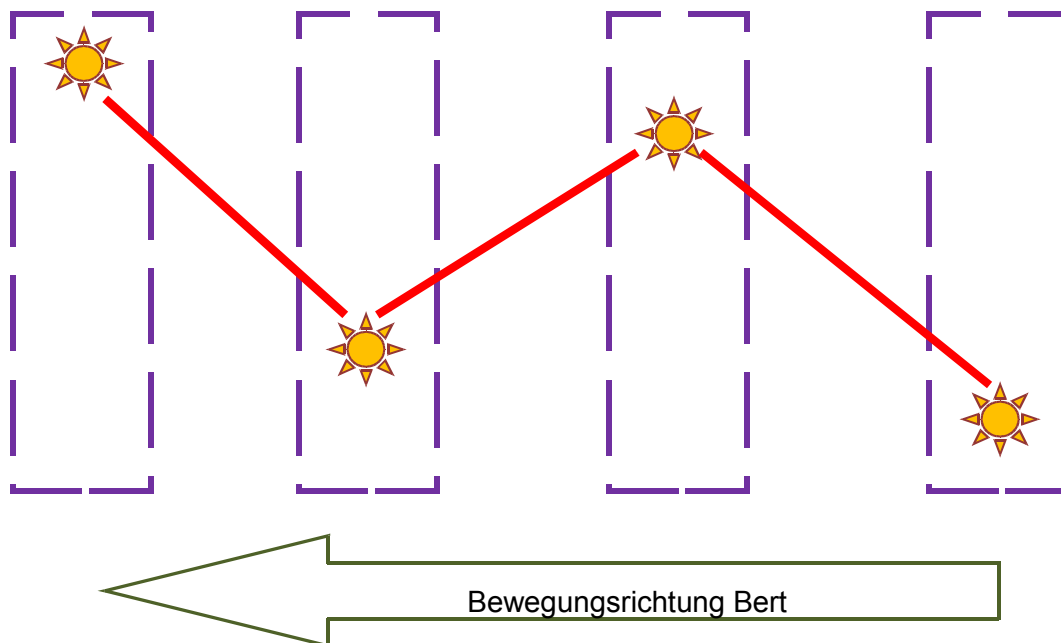


©Fröhner/Päßler 10/08

Abbildung 7:

*Ernies Atomuhr: A = Startpunkt
Das Atom läuft nach unten, wird dort gespiegelt und läuft wieder nach oben wo es wieder gespiegelt wird usw. Immer wenn das Atom oben Ankommt sind 30 Sekunden vorbei*

Bert, dessen Raumschiff an Ernies vorbeifliegt beobachtet Ernie beim Eierkochen. Da Bert Ernie nicht vertraut, will er die Zeit auf seinem Raumschiff mit derselben, baugleichen Atomuhr mit stoppen. Nun passiert das Entscheidende: Bert, dessen Raumschiff an dem von Ernie vorbeifliegt, schaut die ganze Zeit auf Ernies Atomuhr. Berts Uhr beginnt wie eingestellt nach 3 Minuten zu stoppen und piept. Er ist erstaunt als er bemerkt, dass Ernies Uhr noch 30 Sekunden weiter läuft bis sie auch piept und stoppt. Würde Ernie Berts Uhr aus dem Fenster seines Raumschiffes beobachten würde er sehen, dass Berts Uhr noch 30 Sekunden länger läuft als seine.



©Fröhner/Päßler 10/08

Abbildung 8:

Berts blick aus dem Fenster auf Ernies Atomuhr

Während das Atom nach oben läuft, bewegt sich für Bert die Uhr nach rechts. Von Ernie aus betrachtet läuft das Atom wie gehabt senkrecht von oben nach unten und wieder zurück. Aber von Bert aus betrachtet legt das Atom eine Schräge - und somit längere! - Strecke zurück.

Da die Lichtgeschwindigkeit konstant ist muss es entsprechend länger dauern, bis das Atom von Bert aus außen gesehen auf der schrägen Bahn das Ziel oben in der Atomuhr erreicht hat.

Von Bert aus betrachtet dauert eine Zeiteinheit auf Ernies Atomuhr also länger als auf seiner Eigenen. Ernie selbst merkt von diesem Phänomen nichts. Würde Ernie zu Bert ins Raumschiff schauen, würden sich die Ereignisse umkehren.

Bert weiß natürlich nichts von diesem Phänomen, welches Einstein entdeckte, und vermutet, Ernie lässt die Eier länger kochen, um ihn zu ärgern. Einstein sagte dazu: „Bewegte Uhren laufen langsamer“. Dieser Effekt der Speziellen Relativitätstheorie wird „Zeitdilatation“ oder „Zeitdehnung“ genannt.

Allgemein formuliert gilt: *„Aus Sicht eines Beobachters auf Raumstation A, der die zeitliche Dauer von Vorgängen anhand seiner Borduhr bestimmt, geht die baugleiche Borduhr der Raumstation B, die an ihm vorbeifliegt, langsamer als seine eigene.“* [9]

Bleiben wir bei unserem Gedankenexperiment und stellen uns vor, dass Bert keine Eier kocht, sondern dass er Gardinenstoff abmisst, welchen er an Ernie verkaufen will. Auch hier tritt derselbe Effekt auf. Ernie sieht in Berts vorbeifliegendes Raumschiff und bemerkt, dass dessen Maßband viel kürzer ist als sein eigenes Baugleiches. Dieser Effekt wird Längenkontraktion genannt.

Allgemein gilt hier: *„Vom Standpunkt eines Beobachters auf der Raumstation A aus, der Längen mit Hilfe eines an Bord befindlichen Längenmaßstabs bestimmt, erweist sich der baugleiche Längenmaßstab an Bord der vorbeifliegenden Raumstation B als kürzer als sein eigener Maßstab“* [9]

Wenn für kleine Orts und dazugehörige Zeitintervalle (am besten unendlich klein, da dies eine differenzielle Beziehung ist), Ernie bei Bert sowohl den Maßstab als auch den Uhren- gang bezüglich seines eigenen Maßstabes und der eigenen Uhr misst, wird er feststellen, dass

$$\Delta s^2 = -c^2 * \Delta t^2 + \Delta l^2$$

bei Bert gleich ist. Dies nennt man invarianten Abstand. Dieser ist die eigentliche Größe die in der SRT genutzt wird.

Einstein geht in der SRT davon aus, dass Raum und Zeit keine einzelnen absoluten Strukturen mehr sind, denn wie wir eben gesehen haben, sind alle Beobachtungen und Angaben beobachterabhängig, also relativ. Nur noch die Gesamtheit aller Ereignisse ist absolut, deshalb fasste Einstein Raum und Zeit zu einem gemeinsamen Gebilde – Die Raumzeit- zusammen. Einstein hat uns bis hierher gezeigt, dass viele Alltagssituationen, die uns als absolut erscheinen eigentlich relativ sind. Doch etwas ist immer und überall in unserem Universum konstant und absolut:

3.2.3 Die Lichtgeschwindigkeit

Nachdem Maxwell die Gleichungen zur Berechnung des Elektromagnetismus veröffentlichte und feststellte, dass Licht auch nur eine elektromagnetische Welle ist, brachte dies Einstein mächtig ins Grübeln. Nach Newtons Bewegungsgesetzen, die die letzten 200 Jahre galten, konnte man Geschwindigkeiten addieren oder subtrahieren und erhielt somit Relativgeschwindigkeiten.

Nehmen wir an, ein blaues Auto überholt mit konstant mit 60 km/h ein oranges Auto, dass nur 30km/h fährt. Der Fahrer des orangen Autos schaut aus seinem Fenster und sieht das blaue Auto mit einer Geschwindigkeit relativ zu seiner eigenen mit 30km/h an ihm vorbeifahren. Um die Relativgeschwindigkeit zu erhalten, zieht man also die eine gemessene Geschwindigkeit von der anderen ab.

Nun könnte man annehmen, dass dies auch mit Licht funktioniert. Ernie und Bert sitzen in einem gemeinsamen Raumschiff und reisen mit einer Geschwindigkeit von $c/2$ einem Lichtstrahl mit der Geschwindigkeit c (299792,458 km/s) hinterher. Nach Newtons Bewegungsgesetzen könnte man nun schlussfolgern, dass der Lichtstrahl dem Raumschiff von Ernie und Bert um $c/2$ vorauseilt, denn $c - c/2 = c/2$. Gehen wir noch einen Schritt weiter, wie oben schon mal erwähnt, würde das Licht für uns stillstehen, wenn wir uns mit Lichtgeschwindigkeit neben einem Lichtstrahl herbewegen, dann ist die Relativgeschwindigkeit gleich 0. Doch wie Maxwell schon erfasste bewegt sich das Licht immer mit derselben Geschwindigkeit und steht nie still.

Jetzt kommt der Punkt, an dem Einsteins spezielle Relativitätstheorie einsetzt. Newtons Bewegungsgesetze gehen davon aus, dass Längen- und Zeitmessungen bei beiden Inertialsystemen dieselben sind. Einstein jedoch erkannte, dass dies nicht so ist und dass sich die beiden oben erläuterten relativistischen Effekte (Zeitdilatation und Längenkontraktion) so kombinieren, dass die Lichtgeschwindigkeit immer $c = 299792,458$ km/s beträgt.

Ein weiteres wichtiges Grundprinzip der speziellen Relativitätstheorie ist also das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit: *„Für jeden Inertialbeobachter hat jedes Lichtsignal dieselbe, konstante Geschwindigkeit von $c=299\,792,458$ Kilometern pro Sekunde, unabhängig von der Geschwindigkeit der Lichtquelle, denn diverse relativistische Effekte kombinieren sich stets so.“* [9]

Wie ausgeprägt die relativistischen Effekte sind, hängt ganz davon ab, wie groß der Unterschied von Relativgeschwindigkeit im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit ist.

Da die Lichtgeschwindigkeit die einzige absolute Geschwindigkeit ist, gilt sie als allgegenwertiger Parameter in den Gleichungen der SRT. Außerdem lässt sich daraus schließen, dass die Lichtgeschwindigkeit die Höchstgeschwindigkeit für die Übertragung von Materie, Informationen und Energie ist. Wie wir im nächsten Abschnitt erläutern werden, kann kein Objekt so stark beschleunigt werden, dass es die Lichtgeschwindigkeit erreicht.

3.2.4 $E=mc^2$

Nun stellte sich Einstein die Frage wie die Bewegung von Körpern im Raum durch äußere Kräfte beeinflusst wird.

Bisher war es wie folgt: Das Verhältnis zwischen der Beschleunigung (Geschwindigkeitsveränderung) eines Körpers und der Kraft, welche auf ihn einwirkt, war konstant. Kurz gesagt: Man stellte die Beschleunigung und die einwirkende Kraft in ein Verhältnis. Dies ist auch logisch, denn wenn ich mehr Kraft aufwende, um einen Schlitten anzuschieben, rutscht dieser auch schneller.

Laut Einsteins Relativitätstheorie ist dies anders: Die Masse eines Körpers wird umso größer, je höher seine Geschwindigkeit ist. Für unser Schlittenbeispiel würde das bedeuten, dass der Schlitten nach dem Anstoß immer schneller wird, und dabei seine Masse zunimmt. Man nennt diesen Vorgang relativistische Massezunahme. Dies ist ein allgemeines Phänomen der SRT und ergibt sich aus der Äquivalenz von Masse und Energie. Jede Energie, die ich einem Körper zuführe, erhöht seine Masse und umgekehrt verringert sich die Masse eines Körpers, wenn ich ihm Energie entziehe. Seit Einstein sind Masse und Energie untrennbar miteinander verknüpft, was er mit der wohl berühmtesten Formel der Welt,

$$E=mc^2$$

zeigte.

Diese ist auch dafür verantwortlich, dass es nie gelingen wird, irgendein Objekt in unserem Universum auf Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen. Warum? Ganz einfach: Je schneller der Körper umso größer seine Masse und somit auch sein Widerstand, den er der weiteren Beschleunigung entgegensetzt. Je näher man also den Körper auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, umso größer wird seine Masse. Um ihn ganz auf Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen, müsste man demnach also eine unendlich große Kraft aufbringen.

Diese Massezunahme ist jedoch nur ein scheinbarer Effekt, der von der Konstanz invarianter Größen erzeugt wird. In diesem Fall ist die Ruhemasse m eines Teilchens die invariante

Größe. Lediglich, der überall auftretende Faktor $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ erhöht scheinbar die Masse.

Dies ist allerdings nur so, wenn man versucht die relativistische Mechanik in eine Newton-ähnliche Form zu bringen.

Warum kannten die Physiker vor Einstein diesen Zusammenhang nicht? Sie kannten die relativistischen Effekte nicht. Einstein war der erste, der sie nutzte. Wir auf der Erde bemerken leider so gut wie nie etwas von den relativistischen Effekten, weil die Geschwindigkeiten, die wir aufbringen, weit entfernt von der Lichtgeschwindigkeit liegen. Jedoch existieren sie und mithilfe von genauer Atomuhren und kosmologischen Beobachtungen lassen sie sich nachweisen.

Mit der SRT ist es Einstein gelungen, den ersten großen Konflikt der Physik des 20. Jahrhunderts zu lösen, den Konflikt zwischen Newtons Bewegungsgesetzen und Maxwells Elektromagnetismus.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das Galileische Relativitätsprinzip in der SRT erhalten bleibt, denn die bestehenden Gesetze mussten nicht verändert werden. Nur das Gesetz der Addition von Geschwindigkeiten musste so abgeändert werden, dass die Lichtgeschwindigkeit immer konstant ist. Dieses führt zu den relativistischen Effekten.

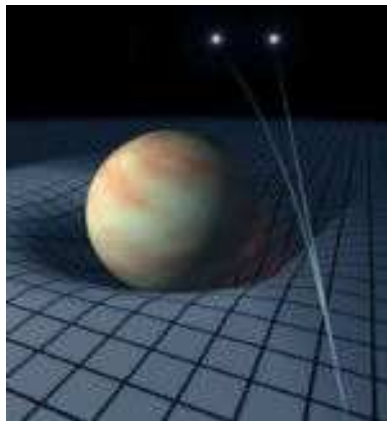
Außerdem schaffte er mit der SRT einen Rahmen, in dem sich andere physikalische Naturgesetze bestens einbetten ließen. Die schwache und die starke Kernkraft waren noch nicht entdeckt und die elektromagnetische Kraft war geradezu maßgeschneidert für die SRT. Nur eine Kraft konnte Einstein nicht in die Rahmenbedingungen der SRT eingliedern, die Gravitation. Dies war der zweite große Konflikt des 20. Jahrhunderts. Einstein wollte auch diesen lösen und war quasi gezwungen, noch weitreichendere Naturbeschreibungen vorzunehmen, in denen auch die Gravitation einen Platz fand. Er erweiterte seine Spezielle Relativitätstheorie zur Allgemeinen Relativitätstheorie (ART).

3.3 Die Allgemeine Relativitätstheorie

Einstein verabschiedete sich von der Idee der statischen Raumzeit, die wie eine Hintergrundbild ist vor der sich alles abspielt. Er widmete sich dem revolutionären Gedanken, dass die Raumzeit dynamisch ist, sich von Materie verzerren und verformen lässt und mit der Materie wechselwirkt.

Außerdem sieht Einstein die Gravitation nicht als Kraft sondern als Eigenschaft der Raumzeit an.

Um dies etwas zu verdeutlichen stellen wir uns ein Gummituch vor. Dieses Gummituch soll die 4-Dimensionale Raumzeit darstellen. Schmeißen wir nun einen Ball, der eine Masse besitzt in die Mitte des Tuches, so wird es sich nach unten hin ausbeulen. Genauso kann man sich es mit der Gravitation vorstellen. Wirkt keine Masse auf die glatte Raumzeit (kein Ball auf Gummituch) so existiert auch keine Gravitation. Krümmt allerdings eine Masse, vielleicht ein Planet wie unsere Erde, die Raumzeit (Ball auf Gummituch), so existiert Gravitation.



*Abbildung 9:
Eine Masse (Planet) krümmt die
Raumzeit.
[vgl.4,S.89]*

Nach Newton war die Gravitation eine Kraft, die einen Körper oder besser ein Teilchen von seiner ursprünglichen, geradlinigen Bahn beschleunigt ablenkt. Nach Einsteins Theorie der Gravitation oder besser gesagt Allgemeinen Relativitätstheorie, jedoch folgen Teilchen nach wie vor den geraden Bahnen in der Raumzeit, doch aufgrund der Verzerrung werden sie, selbst auf ihren geraden Bahnen, relativ zueinander beschleunigt - gerade so, als wären sie unter dem Einfluss dessen, was bei Newton die Gravitationskraft ist.

Einstein fand heraus, dass man die Folgen einer beschleunigten Bewegung nicht von den Folgen der Gravitation unterscheiden kann. Das heißt: Beschleunigte Bewegungen und die Gravitation verhalten sich äquivalent zueinander.

Die Anwesenheit von Materie verzerrt die Geometrie der Raumzeit, was wiederum die folgende Bewegungsbahn der Materie beeinflusst. Dadurch verändert sich wieder die Geome-

trie der Raumzeit und somit wieder die Bewegungsbahn der Materie. Dieses Spiel könnte man nun ewig so weitertreiben. Materie und Raumzeit beeinflussen sich also ständig gegenseitig. Nach Einstein hatte Newton nur einen Teil der Wahrheit entdeckt. Newton konnte zwar sagen, was Gravitation ist und wie man sie berechnet, jedoch konnte er nicht erklären wie sie entsteht und was für Konsequenzen sie haben wird.

4 Quantenmechanik und Quantenfeldtheorien

4.1 Die Quantenmechanik

Die Quantenmechanik ist eine der bedeutendsten neuen Theorien des 20. Jahrhunderts. In dieser Welt ist vieles anders, als man es aus unserer alltäglichen Welt, der makroskopischen Welt, kennt. Um diese so fremde und für uns unvorstellbare Welt einigermaßen beschreiben zu können, wurde eine mathematische Theorie, die Quantenmechanik, eingeführt. Wir wollen uns hier, natürlich auf das Wichtigste beschränkt, mit dieser Theorie befassen und einige fundamentale Eigenschaften der Quanten erläutern.

Beginnen wir mit einer der, für uns, absurden Eigenschaften von quantenmechanischen Objekten, dem sog. Welle-Teilchen-Dualismus. Hierbei wurde beobachtet, dass kleinste Elementarteilchen nicht nur (wie es der Name eigentlich sagt) Teilchen sind, sondern ebenso die Eigenschaften von Wellen haben können, die sog. Eigenschaft des Welle-Teilchen-Dualismus. Dies wurde sehr eindrucksvoll durch das Doppelspaltexperiment gezeigt. In der folgenden Skizze wird der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Wie man erkennt, wird ein Lichtstrahl in zwei Experimenten durch jeweils einen Spalt auf einen Projektionsschirm gestrahlt. Stellen wir uns selbiges Experiment doch zunächst mit alltäglichen, makroskopischen Dingen wie Sand vor. Hinter jedem der Spalte würde sich ein Sandhaufen bilden, der der entsprechenden Menge an verschüttetem Sand entspricht. Öffnen wir beide Spalte, würden sich zwei Haufen hinter den Spalten ansammeln, deren Gesamtmenge der Menge des verschütteten Sandes entspricht.

Versuch mit Licht (Photonen)

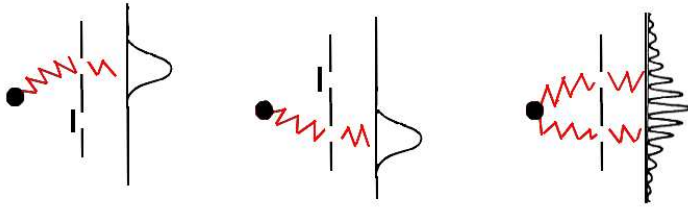
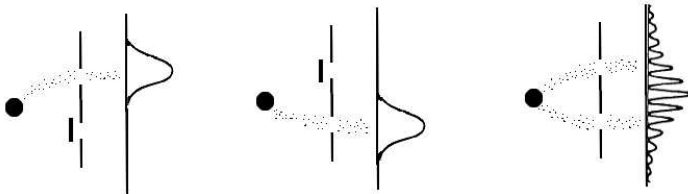


Abbildung 10:

Doppelspaltexperiment bei Versuchen mit Photonen und Elektronen

Versuch mit Elektronen



© Fröhner/Päßler 11/08

Es gilt also: $P_{1+2} = P_1 + P_2$

P gibt hierbei die Menge des verschütteten Sandes an.

Wie erwartet ist genau hinter dem Spalt die Lichtkonzentration an höchsten. Senden wir die Elektronen nun durch beide Spalte zugleich, erkennen wir hellere und dunklere Striche. Dies ist auf die Interferenz, welche von der Welleneigenschaft des Lichts zeugt, zurückzuführen.

Wenn wir den Projektionsschirm nun durch eine Photoplatte ersetzen und denselben Versuch mit Elektronen durchführen, ändert sich in den ersten beiden Experimenten nicht viel.

Wie erwartet, ist auch hier die Konzentration der Teilchen hinter dem Spalt am größten.

Wenn wir beide Spalte öffnen wird erwartet, dass sich die Teilchen zu einer großen Ansammlung von Elektronen in der Mitte der beiden Spalte aufhäufen. Vergleichbar mit Sand, den man durch ein Sieb schüttet. Doch dem ist nicht so. Auch hier zeigt sich das bereits bekannte Interferenzmuster. Für das Experiment mit Photonen und für selbiges mit Elektronen gilt also: $P_{1+2} \neq P_1 + P_2$

Hier ist P eine Angabe für die abgegebenen Photonen bzw. Elektronen.

Uns bleibt also keine andere Wahl als hinzunehmen, dass mikroskopische Objekte nicht entweder Teilchen oder Welle, sondern sowohl als auch sind. Wir landen also beim Begriff des Welle-Teilchen-Dualismus.

Eine weitere Eigenschaft quantenmechanischer Objekte bildet sozusagen den Kern der Quantenmechanik.

Wenn man sich als Beispiel ein beliebiges makroskopisches, klassisches Objekt hernimmt und davon den exakten Aufenthaltsort $\mathbf{x}$ und den genauen Impuls $\mathbf{p}$ bestimmt, kann man aus den klassischen Gesetzen der Mechanik die exakte Position dieses Teilchens zu jedem be-

liebigen Zeitpunkt bestimmen. Auf dieser Tatsache basierte die Überlegung des Physikers Pierre Simon Laplace, der mit seinem Konzept des Laplaceschen Dämons bekannt wurde. Dabei stellte er die Vermutung auf, dass eine fiktive, übermenschliche Intelligenz, die zu einem beliebigen Zeitpunkt den Ort und den Impuls aller Teilchen des Universums kennt, das gesamte Weltgeschehen der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft berechnen könnte. Das würde bedeuten, dass alles Geschehen seit der Entstehung des Universums bereits festgelegt war. Allerdings widersprach der Quantenphysiker Werner Heisenberg dem Ganzen. Er stellte mit seiner Unschärferelation eine vollkommen revolutionäre Beziehung auf. Mit seiner Gleichung zeigt er, dass, je genauer man versucht x zu ermitteln, p immer ungenauer messbar wird. Das Ganze ist natürlich auch umgekehrt so. Je genauer man versucht den Impuls eines Quantenobjekts zu messen, desto ungenauer lässt sich der Aufenthaltsort ermitteln. Dasselbe gilt bei der Beziehung zwischen Energie und Zeit. Hierbei lässt sich ebenfalls nur einer der beiden Werte exakt ausrechnen. Bei allen Berechnungen nimmt Heisenberg an, dass dies nicht aufgrund von technisch begründeten Messungenauigkeiten der Fall ist, sondern eine grundlegende Eigenschaft im Mikrokosmos darstellt. Doch auch der Messprozess an sich erfährt schon grundlegende Einschränkungen. Der Grund hierfür ist, dass man Quantenobjekte nur mit Hilfe von anderen Quantenobjekten messen kann. Folgendes Beispiel sei dazu gegeben. Ein „ruhendes“ Elektron soll mit Hilfe von Licht, also Photonen, gemessen werden. Mit „ruhend“ ist hier gemeint, dass das zu messende Elektron so wenig Impuls wie möglich besitzt (aufgrund der Unschärferelation, kann kein Teilchen mit einem Impuls von null erzeugt werden). Jetzt muss das Elektron mit hochenergetischen Photonen, z.B. Röntgenstrahlung, beschossen werden, um aus dem entstehenden Beugungsmuster den Ort des Elektrons zu ermitteln. Das Photon wird am Elektron gestreut und geht in eine Richtung davon. Da aber Energie- und Impulserhaltung gelten, muss das Elektron auch einen Impuls und eine Energie vom Photon bekommen. Der Impuls ist umso größer, je größer die Energie des Photons war. Wenn wir also nun den Impuls noch messen wollen, dann hat der neue Impuls des Elektrons nichts mehr mit dem alten Impuls zu tun. Es ergibt sich eine ziemlich große Unschärfe.

Somit hätten wir eine weitere Eigenschaft der Quanten entdeckt: die Quantenunschärfe

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad \left| \quad \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \right.$$

Je näher wir x (E) zu bestimmen versuchen, also gegen 0 laufen lassen, desto größer und damit ungenauer wird die Bestimmung von p (t) und umgekehrt.

Ein weiteres Phänomen in der Quantenwelt ist das sog. Superpositionsprinzip. Hierbei handelt es sich um die Eigenschaft mehrere, oftmals für uns unvereinbare Zustände zu einem neuen zu überlagern. Nach allem, was wir heute über die Quantenmechanik wissen, können wir sicher behaupten, dass sich die Mechanik eines Elektrons sehr von der eines Fußballs unterscheidet. Oder wann hätte ein Fußballspieler schon einmal gesehen, dass sein Ball gleichzeitig da und nicht da oder aufgeblasen und nicht aufgeblasen gewesen wäre. Natürlich nie. Doch im Reich der Quanten, ist es an der Tagesordnung, dass ein Teilchen gleichzeitig an verschiedenen Orten oder gleichzeitig den Zustand zerfallen und nicht zerfallen annimmt. Doch dies ist nur gewährleistet, wenn diese Quanten in einem ausreichend isolierten System existieren. Wenn man nämlich versucht eines dieser Teilchen näher zu betrachten, nimmt es wieder nur einen Zustand an. Um dies zu verdeutlichen, hat der Physiker Erwin Schrödinger ein noch bis heute bekanntes Gedankenexperiment namens „Schrödingers Katze“ erstellt. Der Versuchsaufbau ist dabei so simpel wie makaber: In einer, von jeglichen von außen einwirkenden Faktoren versiegelten Kiste befindet sich eine Katze, zusammen mit einem radioaktiven Präparat, einem Geiger-Müller-Zählrohr, einem Hammer und einem Fläschchen

Cyankali. Diese vier Einzelobjekte sind dabei zu einem Mechanismus verbunden. Der Mechanismus ist dabei wie folgt gedacht: Wenn das radioaktive Präparat, welches wir hier nur als ein einziges radioaktives Atom annehmen, zerfällt und der Geiger-Müller-Zähler dies registriert, löst er einen Mechanismus aus, der den Hammer auf die Flasche Cyankali fallen lässt. Auf Grund dessen stirbt die Katze. Da nun aber in der Quantenwelt verschiedene Zustände gleichzeitig möglich sind, kann es sein, dass das Atom gleichzeitig zerfallen und nicht zerfallen ist, wodurch das Cyankali zugleich austritt und nicht austritt. Also ist die Katze tot und lebendig und das GLEICHZEITIG! Wenn wir jetzt aber die Kiste öffnen, um nach der Katze zu sehen, wird aufgrund der nun herrschenden Wechselwirkung mit der Umgebung wieder nur ein Zustand angenommen. Die Katze ist nun also entweder tot oder lebendig. Wie genau der Zusammenbruch der Quantensuperposition von statten geht, ist ein bisweilen noch ziemlich unbefriedigend beantwortetes Forschungsthema.

Als ob diese Eigenschaft des Superpositionsprinzips noch nicht verwirrend genug wäre, gibt es in Verbindung damit noch die sog. „instantane Informationsübertragung“. Wenn man, wie in „Schrödingers Katze“, versucht die überlagerten Zustände zu beobachten, nimmt nicht nur das Quant, welches man beobachtet wieder nur einen Zustand an, sondern alle anderen Quanten in diesem System, die den selben überlagerten Zustand hatten, nehmen ohne Zeitverzögerung (instantan) einen fixierten Ausgangszustand an. Meist sind das sich gegenseitig ausschließende Zustände. Wie nun aber die Information von einem Quant zum anderen gelangt, ist noch immer ein Mysterium.

Doch diese instantane Informationsübertragung, oder - wie sie von Albert Einstein abwertend genannt wurde - „spukhafte Fernwirkung“ ist noch nicht der einzige Widerspruch, den es zwischen der Quantenmechanik und der allgemeinen Relativitätstheorie gibt.

4.2 Der Quantenschaum

Der so genannte Quantenschaum ist ein physikalischer Begriff, der metaphorisch beschreibt, was passiert wenn man diese beiden Theorien auf einer Planck-Länge zusammen anwendet, das heißt auf einem extrem kleinen Maßstab von 10^{-35}m . Der Begriff „Quantenschaum“ an sich war ursprünglich nur ein Begriff, der aus der bildlichen Anschauung entstanden ist, den John Archibald Wheeler diesem gedanklichen Experiment gab. Später wurde er aber dennoch in die Fachliteratur übernommen. Doch wie hat man sich diesen Quantenschaum vorzustellen? Stellen wir uns zunächst ein Vakuum vor. Ein Vakuum ist an sich völlig leer, das heißt, es beinhaltet keine oder zumindest nur eine vernachlässigbar kleine Anzahl von Teilchen. Wenn man nun aber nach der Quantenfeldtheorie geht, ist dieser Raum nicht leer, sondern angefüllt mit so genannten virtuellen Teilchen. Hierbei tritt eine Vakuumfluktuation auf. Als solche bezeichnet man die spontane Entstehung und den ebenso spontanen Zerfall von Teilchen-Antiteilchen-Paaren im Vakuum. Nehmen wir nun noch die Heisenbergsche Unschärferelation hinzu, speziell in der Verbindung von ΔE und Δt , bemerken wir den eigentlich kontroversen Charakter des Quantenschaumes. Es können nämlich theoretisch Teilchen mit beliebig großer Energie entstehen. Je größer dabei die Energie ist, desto kürzer ist die Lebensdauer von selbigem. Hierbei ist es möglich, dass der Energieerhaltungssatz, der eine der wichtigsten und fundamentalsten physikalischen Theorien gilt, für kurze Zeit verletzt wird, da diese Energie scheinbar aus dem Nichts entsteht. Da nun laut Einstein jede Energie mit einer Masse gleichzusetzen ist und jede Masse die Raumzeit krümmt, bedeutet das, dass die Raumzeit im Vakuum laut allgemeiner Relativitätstheorie niemals stillsteht, obwohl man dies berechtigterweise vermuten könnte. Das ständige Entstehen und Vergehen der Teilchen verursacht ein völliges Chaos, in der die Raumzeit in ein wildes Durcheinander verfällt, worauf die Gesetze der ART nicht mehr anzuwenden sind.

Wir sehen also, dass die Quantenwelt so absurd und fremd für uns ist, dass wir es uns oftmals nicht einmal vorstellen können. Diese Tatsache ist insofern recht seltsam, da sie die Welt ist, die der unseren zu Grunde liegt. Die Quantenmechanik ist also ein Versuch, die so verworren wirkenden Vorgänge zu beschreiben und eine Ordnung hineinzubringen.

4.3 Quantenfeldtheorien

Im Laufe der 1930er und 40er Jahre waren verschiedene, zum Teil recht bekannte Physiker, wie zum Beispiel Wolfgang Pauli, Julian Schwinger oder Paul Adrien Maurice Dirac damit beschäftigt eine mathematische Theorie zu entwickeln, die die komplexen und zum Teil recht verworrenen Ereignisse auf der quantenmechanischen Ebene so genau wie möglich beschreibt. Die zuvor noch ziemlich erfolgreich und genau angewendete quantenmechanische Wellengleichung von Erwin Schrödinger hatte nämlich einen entscheidenden Nachteil: Er bezog die spezielle Relativitätstheorie nicht mit in die Betrachtungen ein. Allerdings ist das Wissen darüber, dass sich Energie in den verschiedenartigen Formen, unter anderem auch als Materie, manifestieren kann, von essenzieller Bedeutung. Wenn dieser Umstand nicht gewährleistet ist, dann kann auch die immense Wandlungsfähigkeit von Energie und Materie nicht erklärt werden und eine sehr genaue Beschreibung der quantenmechanischen Vorgänge ist nicht möglich.

Ausgehend von diesem Problem versuchten die Physiker eine Theorie zu finden, die die spezielle Relativitätstheorie mit einbezog. Doch anstelle alle vier Grundkräfte in einer Theorie zu vereinen, gingen sie zunächst kleinere Schritte. Zunächst begannen die Physiker mit der elektromagnetischen Kraft und deren Wechselwirkung mit Materie. Durch eine Folge von Einzelschritten entstand eine Theorie, die den Namen Quantenelektrodynamik bekam und eine relativistische Quantenfeldtheorie ist. Dieser Name setzt sich wie folgt zusammen: Relativistisch ist sie, weil die spezielle Relativitätstheorie mit einbezogen ist. Quantenmechanische Eigenschaften hat sie, weil auch alle relevanten Wahrscheinlichkeits- und Unschärfeaspekte mit einbezogen sind. Als eine Feldtheorie wird sie bezeichnet, weil die quantenmechanischen Aspekte mit denen eines klassischen Kraftfeldes - hier mit denen des elektromagnetischen Feldes von Maxwell – verbunden sind. Experimente in den Folgejahren haben gezeigt, dass die Quantenelektrodynamik eine der genauesten Theorien zur Beschreibung von Naturerscheinungen ist. Dieser durchschlagende Erfolg ist der Anlass für andere Physiker gewesen, in den 1960er und 70er Jahren ähnliche Theorien für die verbleibenden drei elementaren Grundkräfte, starke und schwache Kernkraft und Gravitation, auf die Beine zu stellen. Bei der starken Kernkraft ließ sich eine Theorie aufstellen, die den Namen Quantenchromodynamik (QCD) erhielt. Bei der schwachen Kernkraft wurde eine ähnlich genaue Theorie entdeckt, der man den Namen Quantenfeldtheorie der elektroschwachen Kraft (Quantenflavourdynamik) gab.

Der Name Quantenfeldtheorie der elektroschwachen Kraft zeigt einen essenziellen Zusammenhang innerhalb dieser Theorie. Die Physiker Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdul Salam erhielten einen Nobelpreis für ihre Arbeit, in der sie zeigten, dass die elektromagnetische Kraft und die schwache Wechselwirkung in ihrer theoretischen Beschreibung

gleich und vereinigt sind. Der einzige Unterschied besteht in ihrem physikalischen Auftreten. Die Stärke der schwachen Wechselwirkung wird völlig bedeutungslos, sobald die subatomaren Größenverhältnisse überschritten werden. Die Effekte der elektromagnetischen Kraft hingegen, welche für Licht oder Röntgenstrahlen verantwortlich zeichnen, sind unübersehbar im makroskopischen Bereich anzusiedeln. Glashow und seine Kollegen haben in ihrer Arbeit nachgewiesen, dass die Felder beider untersuchter Kräfte zu einem einzigen verschmelzen, wenn nur die Temperatur und die Energien ausreichend groß sind, etwa so wie kurz nach dem Urknall. Erst bei einer „Abkühlung“ des Universums manifestiert sich dieses einheitliche Kraftfeld in zwei verschiedene Kräfte. Somit sind diese beiden Kräfte als eine einzige unter dem Namen „elektroschwach“ beschreibbar. Dieses Phänomen heißt „spontane Symmetriebrechung“.

Somit existieren nun für drei der vier elementaren Grundkräfte sehr genaue Theorien zur Beschreibung eben dieser. Jede einzelne davon wurde in unzähligen Experimenten auf ihre Tauglichkeit geprüft und bestätigt. Dazu werden wichtige Parameter der jeweiligen Kraft in die Theorie eingesetzt und das theoretische Ergebnis mit den tatsächlich beobachtbaren Ereignissen verglichen. Physikern ist es nämlich möglich insgesamt 19 Parametern zu messen. Jeder dieser Werte gibt eine fundamentale Grundeigenschaft einer Grundkraft an, wie z.B. die Masse der Teilchen, die Kraftladungen, etc. Das Ergebnis dieser Experimente war verblüffend genau.

5 Das Schwarze Loch und seine Folgen

Karl Schwarzschild, ein deutscher Astronom und Physiker, löste im ersten Weltkrieg als erster die Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Damit konnte er sehr genau das „relativistische Gravitationsfeld eines Massepunktes“, also die Metrik eines nicht rotierenden ungeladenen schwarzen Loches beschreiben. Schwarze Löcher haben eine Masse von bis zu 10^9 Sonnenmassen, deshalb ist es richtig, zu ihrer Berechnung die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie zu nutzen. Doch hier tritt ein Widerspruch auf! Ein schwarzes Loch wird dadurch erzeugt, wenn ein Stern unter seiner eigenen Masse kollabiert. An einem Ort im Inneren eines jeden schwarzen Loches, ist die Raumzeitkrümmung, und damit die Gravitationskraft, unendlich groß. Dies nennt man Singularität. Nun existiert ein elementarteilchengroßes Gebilde mit 10^9 Sonnenmassen.

Hier sind die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht mehr anwendbar, denn die Krümmung der Raumzeit ist an dieser Stelle unendlich groß. Nun könnte man sagen, dass man die Gleichungen der Quantenmechanik anwenden könnte. Die Effekte der Quan-

tenmechanik gelten hierbei auch für Objekte im makroskopischen Bereich. Diese Effekte sind dabei aber so klein, dass sie nicht nachweisbar sind. Theoretisch existieren sie aber. Außerdem wird die Gravitation bei quantenphysikalischen Berechnungen völlig außer Acht gelassen. Was ist, wenn man nun genau wissen möchte, was im Inneren eines „Schwarzen Loches“ vor sich geht? Wendet man die Gleichungen der Quantenmechanik oder die der Allgemeinen Relativitätstheorie an? Einstein versuchte, bis zu seinem Tod 1955 diesen Konflikt der Physik durch eine große vereinheitlichende Theorie, welche alle Vorgänge in unserem Universum beschreibt, zu lösen. Dies gelang ihm jedoch nicht!

Zusammenfassend ist festzustellen: Die moderne Physik des 20. Jahrhunderts ruht auf zwei Säulen: Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie und der Quantenmechanik. Die Einsteinschen Relativitätstheorien beschreiben auf mathematische Weise perfekt die makroskopische Welt von Galaxien, Sternen und Planeten. Die Quantenmechanik hingegen beschreibt die Welt des Mikrokosmos, z.B. die der Elementarteilchen. Beide Theorien sind unvereinbar. Warum? Die Raumzeit und Gravitation sind elementare Bestandteil in Einsteins Theorie, jedoch existieren diese in der bekannten Form nicht mehr ab einer Größenordnung von 10^{-33} cm (Plancklänge). Wheeler nannte die neue Art von Raum und Zeit „Quantenschaum“, weil die Raumzeit, ab einer Größenordnung unterhalb der Plancklänge, immer in Bewegung ist. Sie wird verzerrt, gedreht, gedehnt oder reißt sogar auf, wobei Gravitation keine Rolle spielt. Fügt man die beiden Theorien zusammen, ist es sehr schwierig ein geeignetes Ergebnis zu erhalten.

Nach Einstein widmeten sich Generationen von Physikern der Lösung dieses Konfliktes. Erst heute, fast 55 Jahre nach Einsteins Tod, ist man der Lösung so nahe wie nie zuvor. Die klügsten Köpfe der Physik forschen derzeit an einer Theorie, welche Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik verbindet. Die so genannte „Stringtheorie“.

6 Stringtheorie

6.1 Entstehungsgeschichte

6.1.1 Erste Ideen

Im Jahre 1968 war der junge italienische Physiker Gabriele Veneziano bereits einige Jahre auf der Suche nach einer Formel, welche die verschiedenen, experimentell beobachteten Eigenschaften der starken Kernkraft beschreibt. Veneziano arbeitete zu dieser Zeit für das europäische Kernforschungsinstitut CERN, als ihm auffiel, dass eine über 200 Jahre alte Gleichung die Eigenschaften stark wechselwirkender Teilchen perfekt zu beschreiben schien.

Die Eulersche Beta-Funktion, benannt nach ihrem Entdecker dem Schweizer Mathematiker Leonhard Euler, lieferte eine leistungsfähige Zusammenfassung zu fast allen Eigenschaften der starken Kernkraft.

Nun konnte man endlich die Unmengen an Daten, die man an den Teilchenbeschleunigern in aller Welt gesammelt hatte, auswerten. Dies löste weitere Forschungsaktivitäten aus, denn in einem Punkt waren Venezianos Überlegungen unvollständig. Man wusste, dass die Eulersche Beta-Funktion funktionierte, jedoch nicht warum. 1970 fand man endlich die Antwort. Yoichiro Nambu, Holger Nielsen und Leonard Susskind fanden heraus, was wirklich hinter Venezianos Formel steckt.

6.1.2 Stringtheorie in der Krise

Der amerikanische Physiker Leonard Susskind gelangte an Venezianos Gleichungen und begann sich damit ausführlich zu beschäftigen. Zunächst erkannte er, dass durch diese Gleichungen nur die starke Kernkraft beschrieben wurde, bemerkte aber auch, dass noch mehr dahinter stecken musste. Monatelang schloss er sich auf seinem Dachboden ein und experimentierte herum. Nach einiger Zeit gedanklicher Versuche sah er, dass ein Teilchen beschrieben wurde. Doch kein gewöhnliches Teilchen, sondern eine Art Gummiband, welches sich ausdehnen und zusammenziehen konnte. Doch es schien auch die Fähigkeit zu besitzen zu schwingen und zu vibrieren. Er vermutete, wenn Strings klein genug sind, sehen diese aus wie Punktteilchen und somit bestätigten sich experimentell ermittelte Eigenschaften der Elementarteilchen. Zunächst formulierte man die Theorie für Teilchen mit ganzzahligem Spin (Bosonen), 1971 dann auch für Teilchen mit halbzahligem Spin (Fermionen).

Susskind schrieb seine neu entdeckte Theorie auf und veröffentlichte sie. Da Leonard Susskind damals aber noch ein unbekannter Physiker war und punktförmige Teilchen, von denen damals beinahe täglich Neue entdeckt wurden, bevorzugt wurden, wurde der Stringtheorie nicht soviel Beachtung geschenkt, wie ihr vielleicht zugestanden hätte. Zu diesem Zeitpunkt, also Anfang der 1970er Jahre, wurden auch die Teilchenbeschleuniger immer weiter entwickelt und immer neue subatomare Teilchen wurden entdeckt. Nun stimmten die theoretischen Vorhersagen plötzlich nicht mehr mit den experimentellen Ergebnissen überein. Susskind war maßlos enttäuscht. Die weitere Entwicklung in der damaligen physikalischen Welt tat ihr Übriges. Es wurde vorausgesagt, dass die Teilchen die einzige Möglichkeit seien, die Naturkräfte ausreichend zu beschreiben. Auch die Entdeckung der Austauschteilchen der starken und schwachen Kernkraft und die der elektromagnetischen Kraft und deren experimenteller Nachweis versetzten der String-Theorie einen herben Stoß. Sie schien am Ende...

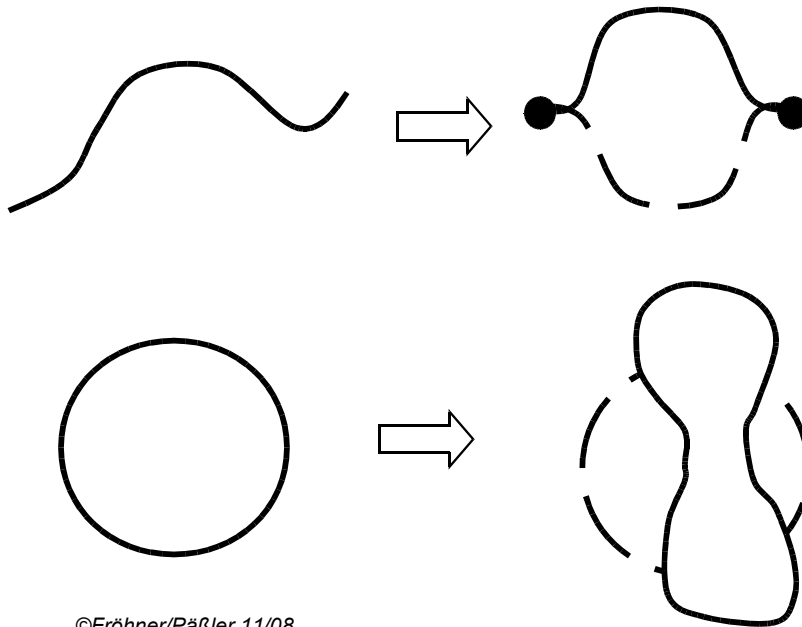
6.1.3 Comeback der Stringtheorie

Im Jahre 1973 wurden die Gleichungen der String-Theorie nur noch von wenigen Wissenschaftlern benutzt und durchdacht. John Schwarz und Joel Scherk waren zwei von ihnen. Ihnen machten die vielen ungeklärten Anomalien, besonders aber die masselosen Teilchen, welche durch die String-Gleichungen beschrieben wurden, aber nicht nachgewiesen werden konnten, zu schaffen. Über einen Zeitraum von etwa 4 Jahren rechneten sie hin und her ohne zu einem brauchbaren Ergebnis zu kommen. Doch kurz bevor sie ihre Forschungen aufgeben wollte, kam ihnen eine letzte Idee. Was, wenn die Gleichungen eigentlich die Gravitation beschrieben, welche in dem Standardmodell der Teilchen einfach vernachlässigt wurde? Damit musste allerdings die Größe der zu errechnenden Teilchen stark nach unten korrigiert werden. Mit dieser Idee konnte - zumindest theoretisch – das bereits erwähnte Austauschteilchen der Gravitation nachgewiesen werden. Es bekam den Namen „Graviton“. Somit konnte mit Hilfe der String-Theorie eine gravierende Lücke im Standardmodell der Teilchen geschlossen werden. Doch damit waren noch nicht alle Fehler aus den Gleichungen bereinigt. Noch immer waren sie von mathematischen Anomalien durchsetzt. Erneut wurde die Stringtheorie als gescheitert erklärt und als Versuch, das Universum zu erklären, zu den Akten gelegt.

6.2 Begrifflichkeit „String“

Bisher wusste man, dass die Dinge aus Atomen bestehen. Diese wiederum aus Protonen und Neutronen im Atomkern und Elektronen, die den Atomkern umkreisen. Später entdeckten Forscher, dass Protonen und Neutronen sich aus jeweils 3 kleineren Teilchen, den Quarks, zusammensetzen. Elektronen und Quarks sind elementar und galten lange Zeit als kleinste, nicht mehr teilbare Teilchen. Dies bedeutet, dass sie die kleinsten bekannten Bausteine der Materie sind. Alle entdeckten Teilchen wurden im Standardmodell der Elementarteilchen zusammengefasst und strukturiert. Die Teilchenphysik des 20. Jahrhunderts geht davon aus, dass alle Elementarteilchen punktförmige, nulldimensionale Objekte ohne innere Struktur und räumliche Ausdehnung sind. Aus Sicht der Stringtheorie gilt jedoch, dass Elementarteilchen eine räumliche Ausdehnung in Form von eindimensionalen, unendlich kleinen und dünnen, schwingenden Fäden haben. Daher kommt auch der Name „String“ („String“ eng.: Faden). Strings bestehen aus purer Energie und sind mit einer schwingenden Violinensaite, die eine physikalische Wellenfunktion ausführt, zu vergleichen. Strings können in offener oder geschlossener Form vorkommen. Offene Strings haben zwei lose Enden, während man sich geschlossene Strings wie eine geschlossene Schleife vorstellen kann. Offene Strings sind topologisch äquivalent zu einer kurzen Linie, Geschlossene zu einem Kreis. Die

niedrigste Schwingung eines offenen Strings besitzt zwei Wellenknoten an den beiden losen Enden, sozusagen den „Einspannenden“ der Welle, und einen Wellenbauch in der Mitte. Dies ist äquivalent zu einer stehenden Welle. Geschlossene Strings besitzen natürlich keine „Einspannpunkte“. Die stehende Welle ist bei geschlossenen Strings eine Welle, die entlang des Strings zwei Bäuche und zwei Minima besitzt.



©Fröhner/Päßler 11/08

Abbildung 11:

oben: offener String und sein daraus folgendes Schwingungsmuster

unten: geschlossener String und ein daraus folgendes Schwingungsmuster

Das Schwingungsmuster eines geschlossenen Strings kann z.B. als Graviton identifiziert werden. Das eines offenen Strings z.B. als Photon oder Gluon.

Die winzige Fadenstruktur der Strings hat riesige physikalische Auswirkungen.

Eigenschaften von Teilchen wie z.B. Ladung, Spin oder Masse werden durch das Schwingungsmuster des Strings festgelegt. Folglich entspricht jedes Schwingungsmuster einer bestimmten Teilchenart.

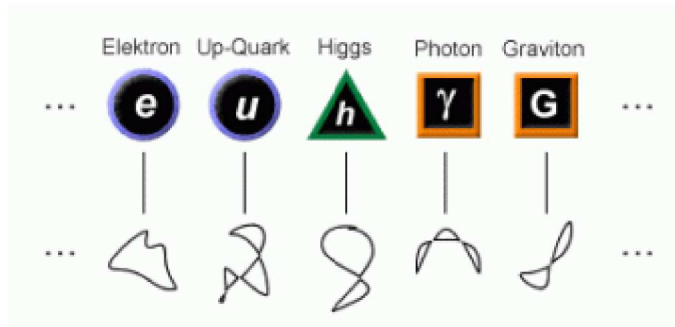


Abbildung 12:

Teilchen und ihre stringtypischen
Schwingungsmuster
[vgl. 14]

Ein Beispiel:

Nach Einsteins quantenmechanischer Beziehung $E = h \cdot \nu$ hängt die Energie eines bestimmten Schwingungsmusters von dessen Frequenz ab. Da Energie und Masse nach Einsteins relativistischer Beziehung $E = mc^2$ ineinander umwandelbar sind, ergibt sich aus diesen Überlegungen Folgendes: Die Energie des Schwingungsmusters eines Strings legt dessen Masse fest und somit auch die Masse eines Teilchens. Daraus lässt sich folgende Abhängigkeit festlegen: ein schwereres Teilchen beruht auf einem String der heftiger, also mit mehr Energie schwingt. Für leichtere Teilchen gilt natürlich das Gegenteil.

Das Schwingungsmuster eines Strings setzt sich immer aus einer normalen Schwingungen und einer Schwerpunktsbewegung zusammen. Bei normalen Schwingungen ändert der String seine Form, bei Schwerpunktsbewegungen nur seine Position. Seine Form bleibt erhalten. Da ein String unterschiedlich viele Schwingungsmuster ausführen kann, können theoretisch unendlich viele verschiedene Teilchen entstehen. Dies erklärt auf einfache Weise die hohe Anzahl an verschiedenen, uns heute bekannten Teilchen.

Zusammengefasst gilt: Das Schwingungsmuster eines Strings bestimmt die Teilchenart. Die Schwingungsstärke eines Strings die Masse des Teilchens.

Man unterscheidet zwischen relativistischen und nichtrelativistischen Strings. Der einzige Unterschied zwischen beiden ist, dass nichtrelativistische Strings eine Wellengeschwindigkeit v_w besitzen, die weit unter der Lichtgeschwindigkeit liegt. Für die Berechnung eines nichtrelativistischen Strings gelten folgende Gleichungen:

Wellenlänge: $\lambda_n = \frac{2l_s}{n}$

Frequenz: $f_n = \frac{n \cdot v_w}{2l_s}$

l_s = Länge des Strings

n = ganzzahlige allgemeine Lösung der eindimensionalen Wellengleichung

Die Physiker Schwarz und Sherk fanden folgendes heraus: Aus dem Zusammenhang, dass die Quantisierung eines geschlossenen bosonischen Strings folgende Massenformel ergibt,

$$M^2 = 4T \cdot (n - 1)$$

$T = \text{Stringspannung}$

$n = \text{Schwingungszahl (Anzahl der Anregungsquanten über dem String)}$

stellten sie fest, dass man bei einer Schwingungszahl $n = 1$ eine Masselose Stringanregung erhält. Diese masselose Anregung des geschlossenen bosonischen Strings entspricht dem Graviton.

Daraus ließ sich ableiten, dass Strings eine Größe von $1,61624 \cdot 10^{-35}$ Meter haben, welche der Plancklänge entspricht. Dies ist rund hundert Milliardstel mal kleiner als der Atomkern.

Für Stringspannungen, die nicht dem Schwingungsmuster eines Gravitons entsprechen, gilt folgende Berechnungsformel:

Stringspannung: $T_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \alpha' \cdot c}$ mit $\alpha' = \frac{l_s^2}{(\hbar \cdot c)^2}$

Warum kommen Forscher durch experimentelle Untersuchungen nicht darauf, dass es keine Punktteilchen, sondern Energiefäden sind? Ganz einfach, mit einer Größe von 10^{-33} cm sind die Strings viel zu klein, um von den heutigen technischen Möglichkeiten als Faden erkannt zu werden. Sie werden aus der Entfernung lediglich als Punktteilchen erkannt.

Wenn sich Teilchen durch die Raumzeit bewegen, überstreichen sie Bereiche des Raumes und der Zeit. Dieser Bereich wird „Weltlinie“ genannt

Da ein String bereits eine „Linie“ ist, kann man sich die „Lebensgeschichte“ eines offenen String als das Überstreichen einer Fläche im Raum („Weltfläche“) vorstellen. Ein geschlossener String überstreicht eine Röhre in der Raumzeit, diese wird „Weltvolumen“ genannt.

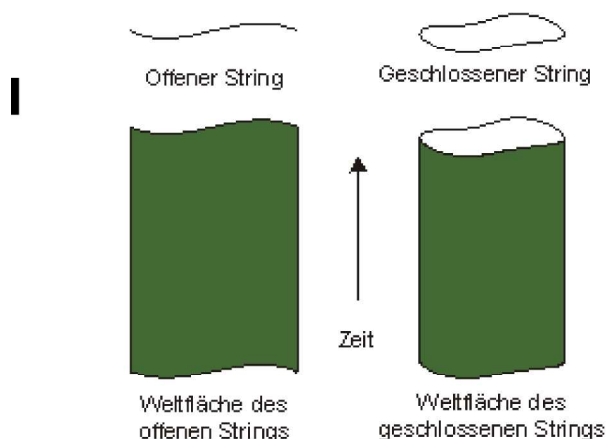


Bild 1

Abbildung 13 :

Entstehung einer Weltfläche bzw. eines Weltvolumens

[vgl.15]

Es existieren fünf verschiedene Stringtheorien. Einige davon enthalten offene Strings, einige nicht. Jedoch enthält jede Stringtheorie geschlossene Strings, da Wechselwirkungen offener Strings immer geschlossene Strings erzeugen. Aber dazu später mehr.

6.3 Grundlagen der Stringtheorie

In diesem Abschnitt gehen wir auf die allgemeinen Grundlagen der Stringtheorie ein.

Da, wie schon erwähnt, Schwarz und Scherk in den 1970er Jahren ein Stringschwingungsmuster entdeckten, welches genau dem eines Gravitons entspricht, und sich die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie völlig von selbst aus der Stringtheorie ergeben, ist die Stringtheorie die einzige uns bekannte Theorie die die Gravitation einwandfrei in den Quantenmechanischen Rahmen einbezieht.

Sie vereinigt also Quantenmechanik und Allgemeine Relativitätstheorie. Deshalb wird uns die Gravitation und im speziellen ihr Austauscheteilchen, das Graviton, besonders beschäftigen.

6.3.1 Enorme Spannungen

Die enorme Spannung eines Strings hat natürlich Folgen für dessen Energie und dessen Masse.

Ein Beispiel: Ein imaginäres Teilchen besteht aus einem String, welcher eine Spannung mit der Größe der Planckspannung besitzt. Die Energie eines Strings, welche durch sein Schwingungsmuster entsteht ist immer ein ganzzahliges ($1;2;3;\dots;n$) Vielfaches der Planckenergie ($n \cdot 1,2209 \cdot 10^{28} \text{ eV}$).

Diese Vielfache sind zur Planckspannung proportional. Da sich nach Einstein Energie in Masse umwandeln lässt hätte unser imaginäres Teilchen eine Masse, die einem ganzzahligen ($1;2;3;\dots$) Vielfachen der Planckmasse ($n \cdot 2,17645 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$) entspricht. Unser imaginäres Teilchen hätte also ca. die Masse eines Sandkorns.

Diese Energien und Massen sind für teilchenphysikalische Maßstäbe enorm hoch, und wir wissen alle, dass solche Teilchen nicht existieren. Aber wieso sind diese mathematisch und physikalisch korrekten Überlegungen zur Erklärung der Teilcheneigenschaften im Rahmen der Stringtheorie nicht mit unseren alltäglichen Erfahrungen und experimentellen Untersuchungen zu vereinbaren?

Dafür gibt es eine plausible Erklärung:

Schwere massereiche Teilchen, welche zu Zeiten des Urknalls vorhanden waren, zerfallen in kurzer Zeit in viele immer leichtere Teilchen mit geringeren Massen, bis diese die Massen der uns heute bekannten Teilchen besitzen. Das gilt natürlich auch für Strings. Da solche schweren massereichen Teilchen in einem sehr frühen Stadium unseres Universums vorhanden waren, ist es eher unwahrscheinlich, dass heute noch ein so massereicher String existiert, geschweige denn von Forschern entdeckt wird. Jedoch wäre die Entdeckung solch eines superschweren Stringzustandes von enormer Bedeutung.

Bei unserem Graviton hat die Quantenschwingung des Strings, wie von Schwarz und Scherk erwartet, nur masselose Anregungen. Dies bedeutet, dass das Graviton keine Masse besitzt. Dieses energiearme Schwingungsmuster stellt eine Besonderheit dar, denn Strings können - wie schon erwähnt - in jeder x-beliebigen Art, und mit jeder x-beliebigen Spannung bzw. Energie schwingen und vibrieren. Typischer sind Strings, welche weitaus mehr Energie und somit mehr Masse besitzen. Wieso wurden solche Teilchen bzw. Strings noch nicht entdeckt? Dies ist einfach erklärbar: Zum Einen wären extrem hohe Energien nötig, die wir aus technischen Gründen noch nicht aufbringen können, um diese Strings zu entdecken. Zum Anderen ist es vielleicht nie direkt möglich Strings mit Hilfe Teilchenbeschleunigern zu entdecken, denn angeregte Stringmoden bilden vielleicht Quantenschwarzlöcher. Das heißt, dass sich kleine schwarze Löcher bilden, in denen die Strings verschwinden, und danach sofort wieder zerfallen.

6.3.2 Wechselwirkung von Strings

Strings wechselwirken ganz ähnlich wie Punktteilchen. Um dies besser zu erklären werden wir uns erst einmal die Wechselwirkung von Punktteilchen ansehen.

Ein Teilchen und sein Antiteilchen, in unserem Beispiel ein Positron und ein Elektron, stoßen an einem bestimmten Punkt im Raum aneinander. Dabei vernichten sich Materie und Antimaterie, z.B. in einem Blitz von reiner Energie und es entsteht ein Eichboson. In unserem Beispiel ist es ein Photon. Dieses Photon legt eine kleine Strecke zurück und anschließend setzt es die, von dem Elektron-Positron-Paar bezogene Energie wieder frei, indem es sich in ein neues Elektron-Positron paar aufspaltet. Elektron und Positron bewegen sich in veränderter Richtung voneinander weg. Hierbei ist zu erwähnen, dass dieser Prozess rein virtuell stattfindet, denn nach der relativistischen Energie – Impuls – Erhaltung können keine massiven Teilchen in ein masseloses Teilchen zerfallen. Das abgestrahlte Photon ist nur ein mathematisches Hilfsmittel in der Störungsrechnung, kein echtes physikalisches Photon.

Zwei Teilchen werden also aufeinander geschossen, wechselwirken durch die elektromagnetische Kraft und zeigen sich am Ende wieder auf veränderten Bahnen.

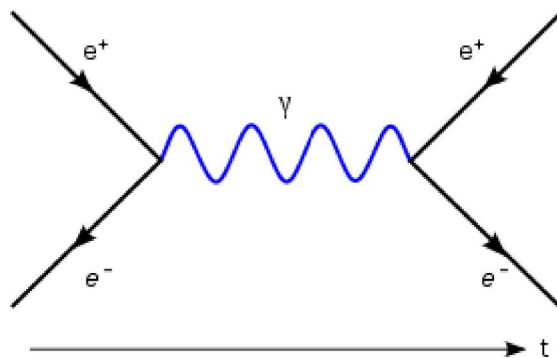


Abbildung 14 :
Wechselwirkung von Punktteilchen (e^+ = Positron,
 e^- = Elektron, γ = Photon
[vgl. 16]

So ähnlich läuft auch die Wechselwirkung bei Strings ab, jedoch steckt der Teufel im Detail.

Betrachten wir nun das Elektron und Positron auf Stringebene. Wenn zwei geschlossene oszillierende Stringschleifen, die mit dem passenden Resonanzmuster schwingen, aufeinander zusteuern und dann zusammenstoßen, öffnen sich beide unter Abgabe von Energie in Form eines Lichtblitzes und annihilieren zu einem offenen String. Dieser neu entstandene String mit einem bestimmten Schwingungsmuster entspricht einem Photon. Wie auch bei den Punktteilchen legt der neue String eine gewisse Strecke zurück ehe er sich unter Verwendung der Energie, die er von den beiden ursprünglichen Strings aufgenommen hat, wieder in zwei neue geschlossene Strings teilt, welche ihren Weg alleine fortsetzen. Natürlich erfolgt dieser Vorgang, genau wie bei Punktteilchen rein virtuell.

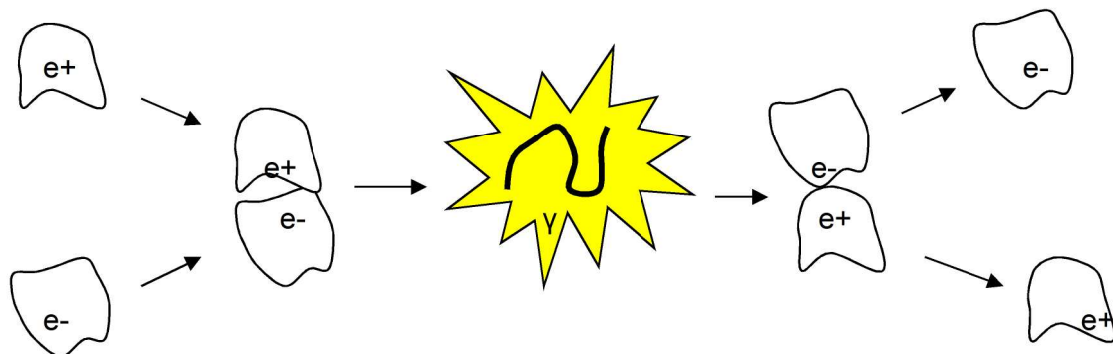


Abbildung 15 :
Wechselwirkung von Strings

Eine wichtige Rolle bei der Wechselwirkung von Strings spielt die String-Kopplungskonstante. Sie ist eine positive Zahl, welche bestimmt, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein gegebener String sich in zwei Strings aufteilt oder, dass sich zwei Strings zu einem vereinigen. Jede der 5 Stringtheorien besitzt ihre eigene Kopplungskonstante.

Die Wechselwirkung von Strings sieht aufgrund des winzigen Maßstabs natürlich aus der Entfernung aus wie der Austausch von Eichbosonen. Doch es gibt einen entscheidenden Unterschied: Die Punktteilchen-Wechselwirkung findet an einem lokalisierten Punkt im Raum statt. Für jeden Beobachter ist dieser Punkt absolut. Egal ob er sich in Ruhe oder in Bewegung befindet. Bei einer String-Wechselwirkung ist dies nicht so. Wie schon erwähnt erzeugt ein sich bewegendes String im Raum eine „Weltfläche“ oder ein „Weltvolumen“. Befinden sich nun zwei Beobachter, in unserem Fall Ernie (B1) und Bert (B2), in Relativbewegung zu dem String und zueinander, kommen beide zu dem Ergebnis, dass beide einen anderen Punkt und Winkel des Zusammenstoßes der Strings angeben. Ihre Relativbewegung und somit die Gesetze der Allgemeinen Relativitätstheorie sind der Grund dafür.

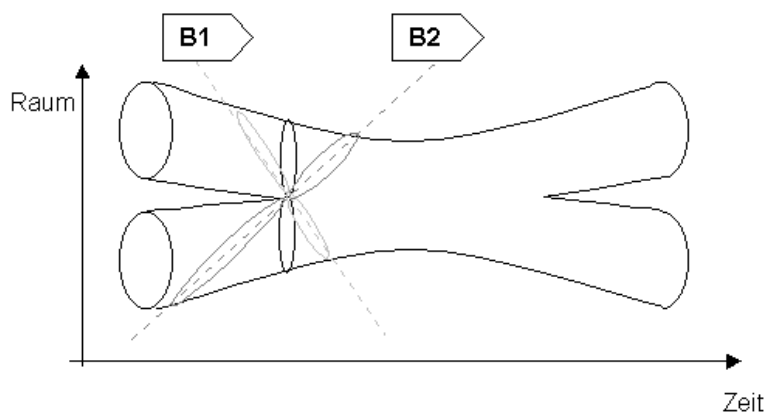


Abbildung 16 :

Wechselwirkung von Strings

Da die Koordinatenachsen unter zwei verschiedenen Winkelverlaufen, können die Beiden Beobachter B1 und B2 keine gemeinsame Aussage darüber treffen wo und wann der String wechselwirkt.

[vgl. 15]

Dies ist ein Grund dafür, warum die Stringtheorie es ermöglicht ART und QM zu vereinigen. Stellen wir uns vor, statt dem Photon wäre ein Graviton an der Wechselwirkung beteiligt. Nach dem Standardmodell hat die Konzentration des gesamten Energieaufwandes auf einen winzigen Punkt fatale Auswirkungen, z.B. die unendlichen Rechenergebnisse, von denen anfangs gesprochen wurde.

Strings „verschmieren“ den Ort der Wechselwirkung, da aus Sicht verschiedener Beobachter die Wechselwirkung an verschiedenen Punkten in der Raumzeit stattfindet. Durch diese „Verschmierung“ wird die Wirkung der Gravitationskraft gestreut, was zur Folge hat, dass die Eigenschaften der Gravitation im mikroskopischen Bereich deutlich logischer werden. So erhalten wir z.B. keine unendlichen Ergebnisse mehr, sondern eine endliche Anzahl an Ergebnissen.

Diese „Verschmierung“ führt zu einer Glättung des Quantenschaums, da die Abstände unterhalb der Plancklänge miteinander verschwimmen. *„Die Unvereinbarkeit von ART und QM, die sich erst bei Abständen unterhalb der Plancklänge offenbaren, wird vermieden bei einem Universum, das sich nicht mehr bei so winzigen Abständen erschließen lässt.“* [2, S.196]

Dies war aber nur eine Antwort auf die Frage:

Warum vereinigt die Stringtheorie die QM und die ART?

Wie bereits dargelegt, basiert die ART auf einer glatten Raumzeit und laut der Quantenmechanik ist das gesamte Universum den Quantenfluktuationen unterworfen, welche bei immer kleiner werdenden Abständen immer größer werden. Die punktförmigen, eindimensionalen Teilchen des Standardmodells können in Abstände, die unterhalb der Plancklänge liegen, „eintauchen“ und die Quantenfluktuationen erfassen.

Die Stringtheorie umgeht dieses Problem, indem sie annimmt, dass Strings die fundamentalen Bausteine des Universums sind. Da Strings die räumliche Ausdehnung der Plancklänge haben, gibt es keine Möglichkeit, diese Abstände unterhalb der Plancklänge zu erfassen.

Strings haben die Eigenschaft, bei Größen unterhalb ihrer Stringlänge, Quantenkorrekturen zu den klassischen Einsteins Gleichungen zu induzieren. Diese Korrekturen sind genau berechenbar – was eine Stärke der Stringtheorie ist, denn dadurch ist sie eine Theorie der Quantengravitation.

Bei Punktteilchen führt die Erhöhung ihrer Energie zu einer Verkürzung der Quantenwellenlänge, womit diese noch tiefer in die Quantenfluktuationen eintauchen können. Nun stellt sich doch die Frage: Wenn man die Energie der Strings erhöht, können diese dann auch noch tiefer in den Raum eindringen?

Die Antwort lautet: NEIN!

Forscher fanden folgendes heraus: Erhöht man die Energie eines Strings, verhält sich dieser vorerst wie ein normales Punktteilchen. Er dringt in tiefere und kürzere Raumstrukturen ein. Man kann ihm nur so viel Energie zufügen, bis er Abstände so groß wie die Plancklänge sondieren kann. Die Plancklänge ist die maximalste Raumgröße, in die ein String „eintauchen“ kann. Führt man ihm immer mehr Energie zu, nutzt er diese, um immer größer zu werden, womit sich seine Fähigkeit kurze Abstände zu sondieren, verringert. Obwohl ein String die Größe der Plancklänge besitzt, kann er auf makroskopische Größe anwachsen, ähnlich wie beim Urknall. Die ausgedehnte Beschaffenheit eines Strings hindert uns also daran, die Abstände unterhalb der Plancklänge zu untersuchen.

Damit wird abschließend festgestellt: „Wenn die elementaren Bausteine des Universums nicht in der Lage sind, in Abstände unterhalb der Plancklänge vorzudringen, dann können weder sie noch irgend etwas, das aus ihnen besteht, von den vermeintlich katastrophalen Quantenfluktuationen bei winzigen Abständen beeinflusst werden.“ [5]

Die Stringtheorie schafft also die Vereinigung von ART und QM zur Quantenfeldtheorie der Gravitation.

6.3.3 Spin – Supersymmetrie - Superpartner

Die Supersymmetrie ist nicht nur ein wichtiger Teil der Stringtheorie, sondern ist auch Bestandteil anderer physikalischer Theorien wie z.B. der supersymmetrischen Erweiterung des Standardmodells. Aber bevor wir zur Supersymmetrie kommen ist es erst einmal notwendig den Begriff des „Spin“ zu klären.

1925 entdeckten die holländischen Physiker Uhlenbeck und Goudsmit, dass Elektronen ganz bestimmte magnetische Eigenschaften besitzen. Sie gingen der Spur weiter nach und fanden heraus, dass eine Eigenbewegung des Elektrons um seinen eigenen Mittelpunkt der Grund dafür ist. Elektronen kreisen also um den Atomkern, wie die Erde um die Sonne und führen eine Eigenrotation durch, wie die Erde um ihre eigene Achse. Diese Eigenrotation nannten die beiden „Spin“. Die beiden fanden weiter heraus, dass jedes Elektron im Universum immer mit festgesetzter und unveränderlicher Drehgeschwindigkeit rotiert. Der Spin ist also eine innere Eigenschaft des Elektrons wie z.B. seine Masse oder seine elektrische Ladung.

Spätere Untersuchungen haben gezeigt, dass alle Fermionen und deren Anti-Partner einen Spin von $\frac{1}{2}$ besitzen. Dieser Wert ist grob gesagt ein quantenmechanisches Maß für die Rotationsgeschwindigkeit eines Teilchens. Man fand auch heraus, dass die Austauschteilchen nichtgravitativer Kräfte, also Photonen, schwache Eichbosonen und Gluonen ebenfalls einen Spin besitzen. Sie haben den Spin von 1. Das hypothetische Graviton dagegen besitzt den Spin von 2. Im Rahmen der Stringtheorie ist ein Spin natürlich auch das Resultat eines ganz bestimmten String-Schwingungsmusters, genau wie bei der Masse oder Ladung eines Teilchens.

Anfang der 1970er Jahre entstand die erste Stringtheorie, welche als bosonische Stringtheorie bezeichnet wird. Diese Theorie war noch lange nicht ausgereift und Forscher stießen auf das Problem, dass in ihr nur Stringschwingungsmuster mit ganzzahligem Spin auftraten. Es existierten in ihr also nur Bosonen, was bedeutete, dass man mit ihr keine Materie beschreiben konnte. Dies war aber das Ziel der Stringtheorie: Die Beschreibung von Kraft und Materie gleichzeitig. Außerdem sagte diese Theorie ein Teilchen mit negativer Masse (genauer: dessen quadrierte negative Masse) voraus, welches sich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegte, ein Tachyon. Dessen Existenz ist bis heute noch nicht bestätigt. Deswegen würde diese Theorie nur funktionieren, wenn man nicht von vier, sondern 26 Raumzeitdimensionen

ausgeht. Da dies absolut indiskutabel war, wurde diese Theorie erst einmal wieder auf Eis gelegt bis man die Supersymmetrie entdeckte.

Als man herausgefunden hatte, dass alle Arten von Teilchen einen Spin besitzen, kam die Frage auf, ob die komplizierte Rotationsbewegung, die mit einem Spin verbunden ist, nicht eine weitere Symmetrie der Naturgesetze aufzeigte? Wenn wir den Spin betrachten, dann gibt es noch genau eine weitere, mit den Raumzeitsymmetrien verbundene Symmetrie der Naturgesetze, welche mathematisch möglich ist, die Supersymmetrie.

Anfang der 1970er Jahre wurde einigen Physikern klar, wenn das Universum supersymmetrisch ist, dann kommen die Teilchen der Natur nur als Paare vor, deren Spins sich um eine halbe Einheit unterscheiden. Solche Teilchenpaare, egal ob man sie sich als Punktteilchen oder Stringschleifen vorstellt, nennt man Superpartner. Da wie schon erwähnt, alle Materieteilchen einen Spin von $\frac{1}{2}$ haben und alle Austauschteilchen den Spin von 1, führte dies zur Paarung von jeweils einem Materie- und einem Austauschteilchen. Auf unser oben genanntes Bosonen-Problem bezogen, bedeutet dies, dass Fermionen und Bosonen immer paarweise auftreten.

Mitte der 1970er, als Physiker versuchten die Supersymmetrie in das Standardmodell einzugliedern merkte man, dass keines der bisher entdeckten Materieteilchen als Superpartner für ein anderes Teilchen in Frage kam. Man revidierte die Aussage, dass Austauschteilchen (Bosonen) die Superpartner von Materieteilchen (Fermionen) waren, und man kam durch eingehende theoretische Analysen zu dem Punkt, dass jedes bekannte Teilchen einen bisher nicht entdeckten Superteilchen-Partner besitzt. Der Spin dieser Superteilchen-Partner ist um den Spin von $\frac{1}{2}$ kleiner als der eines bereits entdeckten Teilchens. Es wurden bereits Namen für diese Superteilchen-Partner gefunden. So heißt der Spin-0-Partner eines Elektron „Selektron“, der eines Neutrinos „Sneutrino“ und der eines Quark „Squark“. Diese Namen leiten sich aus dem Namen des bereits entdeckten Teilchens ab und dem S als Abkürzung für Superpartner. Auch die Austauschteilchen haben Superpartner, welche einen Spin von $\frac{1}{2}$ besitzen. So heißt der Superpartner eines Photons Photino, der eines Gluon Gluino. W- und Z-Bosonen heißen Winos und Zinos. Mit der Entdeckung dieser hypothetischen Superteilchen würde sich die Liste der fundamentalen Bausteine verdoppeln. Jedoch hat man bis heute keines dieser Teilchen entdeckt. Aber es gibt jede Menge Gründe dafür, dass es die Supersymmetrie trotzdem gibt. Ein wichtiger Grund und auch die Lösung unseres Bosonen Problems ist, dass sich Bosonen und Fermionen problemlos mit Hilfe von SUSY-Transformationen ineinander umwandeln lassen. Sie sind sozusagen Superpartner. Somit konnte man nun auch Materieteilchen in die Stringtheorie eingliedern. Auch die Tachyonen waren aus der Stringtheorie verschwunden. Man benötigte auch keine 25 Raumdimensionen mehr, sondern nur noch neun Raumdimensionen und einer Zeitdimension.

Aber nicht nur stringtheoretisch gibt es Gründe für die Existenz von Superpartnern. Ein sehr wichtiger Grund für die Existenz der Supersymmetrie ist die Vereinheitlichung der nichtgravitativen Kräfte zu einer gemeinsamen „Urkraft“. 1974 stellte man fest, dass sich die Stärken der elektromagnetischen Kraft, der starken und der schwachen Kernkraft bei extrem kleinen Abständen (ca. 10^{-31} m) einander annähern. Dies liegt an den Quantenfluktuationen. Jedoch nähern die Kräfte sich nur einander an. Bezieht man aber die Supersymmetrie mit in die Rechnungen ein, so bewirken die Superpartner, dass sich alle drei nichtgravitativen Kräfte exakt in einem Punkt treffen. Dies wäre der Beweis für eine „Urkraft“. Auch hier ist wieder das Problem, dass man die Superpartner-Teilchen aufgrund ihrer enormen Masse und den heutigen technischen Mitteln noch nicht entdeckt hat.

Die Supersymmetrie ist aufgrund ihrer Umwandlung von Bosonen in Fermionen ein wichtiger Bestandteil der Stringtheorie geworden, denn nun kann man mit den fermionischen Schwingungsmustern die Materieteilchen, aus denen die Welt um uns herum besteht, erklären. Die Supersymmetrie hat also einen wesentlichen Anteil an dem stringtheoretischen Entwurf einer Quantentheorie der Gravitation und somit der Zusammenfassung aller Kräfte und Materie. Ist die Stringtheorie richtig, wäre damit auch die Existenz der Supersymmetrie bestätigt.

6.3.4 Veränderungen der Raumdimensionen

Wie schon erwähnt ging die erste Stringtheorie von 26 Raumzeitdimensionen aus. Für die Physiker war dies damals eine Unmöglichkeit und man verdrängte die Idee der Stringtheorie wieder. Doch als die Supersymmetrie einige Fehler in der bosonischen Stringtheorie behob, erinnerten sich einige Physiker an die bereits einige Jahre zuvor ausgearbeitete Theorie von Kaluza und Klein.

6.3.4.1 Ideen von Kaluza und Klein

Als Einstein im Jahr 1919 einen Aufsatz vom polnischen Mathematiker Theodor Kaluza erhielt, war dieser zunächst sehr interessiert. Einstein war schon lange auf der Suche nach vereinheitlichenden Feldtheorien klassischer Art. Da man damals nur die Gravitation und Elektromagnetismus als Feldtheorie kannte, schien Einstein die Idee von Kaluza sehr vielversprechend.

Wesentlicher Inhalt des Aufsatzes war folgender:

Einsteins Relativitätstheorien gingen davon aus, dass es drei räumliche Dimensionen und eine Zeitdimension gibt. Kaluza jedoch besaß die Kühnheit zu behaupten, dass unser Universum noch weitere Raumdimensionen besitzt, welche wir aber nicht direkt wahrnehmen. Die mathematischen Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie ließen sich analog auf ein Universum mit den drei Raumdimensionen, einer Zeitdimension und einer zusätzlichen Dimension übertragen. Kaluza führte diese mathematische Analyse durch, und leitete daraus zum einen die drei Gleichungen ab, welche die Alltagsdimensionen beschrieben. Diese Gleichungen waren identisch mit denen, die Einstein aufgestellt hatte. Da Kaluza, aber eine zusätzliche Dimension einbezogen hatte, erhielt er natürlich auch Gleichungen, die in Einsteins Relativitätstheorie nicht vorkamen. Ihm fiel auf, dass diese Gleichungen genau den Gleichungen entsprachen, die Maxwells Elektromagnetismus beschrieben. Genauer gesagt macht Kaluza durch seine Theorie aus einer 5 dimensional Gravitation eine 4 dimensionale Gravitation plus Elektromagnetismus plus ein zusätzliches Skalarfeld, das Dilaton, welches auch in der Stringtheorie vorkommt.

Durch das Hinzufügen einer weiteren Raumdimension gelang es Kaluza also, Einsteins Relativitätstheorie und Maxwells Elektromagnetismus miteinander zu verbinden. Durch seinen revolutionären Einfall stieß Kaluza viel tiefer in die Beschaffenheit unseres Universums vor als jeder andere vor ihm. Denn bisher waren Physiker der Ansicht, dass Gravitation und Elektromagnetismus zwei völlig unterschiedliche Kräfte sind, die unabhängig von einander sind. Nach Kaluza wird die Gravitation durch die Krümmung der drei uns bekannten Raumdimensionen übertragen, der Elektromagnetismus durch die Krümmung der zusätzlichen Raumdimension.

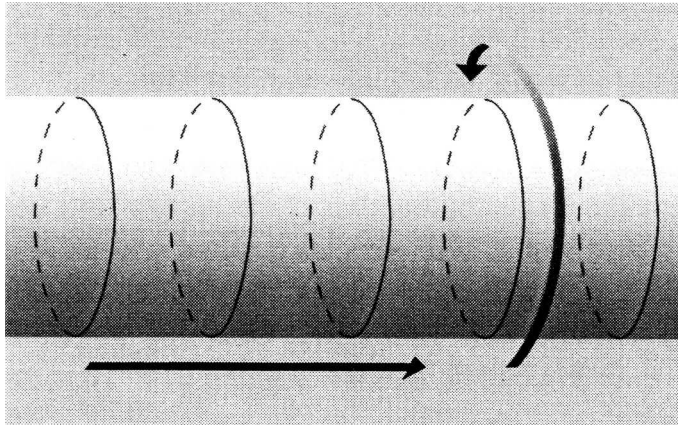
Wie kann man sich diese zusätzliche Dimension vorstellen?

Die Antwort lieferte der schwedische Mathematiker Oskar Klein im Jahr 1929: „*Die Raumstruktur unseres Universums besitzt möglicherweise nicht nur ausgedehnte, sondern auch aufgewickelte Dimensionen*“ [2, S.222]

Das heißt also, dass neben den drei ausgedehnten Raumdimensionen (oben-unten, rechts-links, vorn-hinten), die wir aus unseren Alltagserfahrungen kennen, noch weitere winzige, eng aufgewickelte Raumdimensionen vorhanden sind.

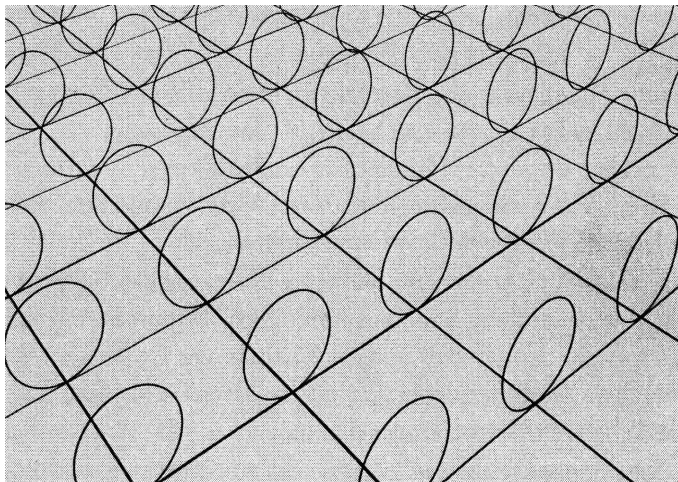
Am Besten lässt sich dies an einem Beispiel erklären: Stellen wir uns ein langes Kopfhair vor. Die Länge des Haares, ist aus Vereinfachungsgründen nur eine der drei ausgedehnten Raumdimensionen (rechts-links). Sie ist ausgedehnt und deshalb gut sichtbar. Wir wissen alle, dass ein Haar auch eine kreisförmige Dicke besitzt. Die kreisförmige Richtung, welche

die Dicke des Haares umgibt ist jedoch so winzig, dass sie mit bloßem Auge schwer zu erkennen ist.



*Abbildung 17 :
Längsausdehnung des Haares
und Dicke des Haares als aufgewickelte Dimension
[vgl.2]*

So wie die Dicke des Haares, kann man sich die winzigen aufgewickelten Dimensionen vorstellen. Sie sind ungefähr so groß wie die Plancklänge, folglich sind sie auch mit unseren modernsten Geräten nicht zu sehen. Nach der Theorie von Kaluza und Klein gibt es an jedem Punkt der drei uns bekannten ausgedehnten Raumdimensionen eine weitere sehr kleine aufgewickelte Raumdimension. Diese Raumdimension ist keine Wölbung einer der drei ausgedehnten Raumdimensionen. Sie ist eine völlig neue und unabhängige Raumdimension.



*Abbildung 18 :
Die Gitterlinien stellen die 3 ausgedehnten Dimensionen dar, während die Kreise eine neue Dimension repräsentieren, die winzig und aufgewickelt ist. Diese existieren an jedem Punkt der ausgedehnten Dimensionen unserer Alltagswelt. Aus anschaulichen Gründen zeigen wir sie jedoch nur an den Schnittpunkten.
[vgl.2, S.225]*

Wir nehmen nur die drei ausgedehnten Raumdimensionen und eine Zeitdimension wahr. Aber Kaluza und Klein haben uns gezeigt, dass die Möglichkeit besteht, dass auch noch andere Dimensionen in unserem Universum vorhanden sind, solange diese aufgewickelt und

sehr klein sind. Da wir zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch nicht wissen, wo die Grenzen unseres Universums liegen, geschweige denn wie diese aussehen, könnte es sein, dass die drei uns bekannten Dimensionen auch aufgewickelt sind. Sie sind nur zu einer enormen Größe von ca. 100 Milliarden Lichtjahren angewachsen, sodass unsere leistungsfähigsten Teleskope sie nicht erkennen.

Nach langem Überlegen erkannte Einstein, dass die Theorie von winzigen, aufgewickelten Zusatzdimensionen, die Kaluza und Klein aufgestellt hatten, durchaus etwas für sich hatte. Mathematisch gesehen war die Theorie einwandfrei. Als man versuchte das Elektron in die Theorie einzubinden erkannte man, dass die errechnete Masse und Ladung weit von den experimentellen Ergebnissen abwich. Da man diese Problematik nicht lösen konnte verloren die Physiker ganz schnell ihr Interesse an der Theorie von Kaluza und Klein. Die nächsten vierzig Jahre hatten die Physiker alle Hände voll zu tun. Die Experimentalphysiker erkundeten die Eigenschaften von Atomen und Elementarteilchen, und die Theoretiker formulierten die Quantenmechanik und die Quantenfeldtheorie aus. Diese Zeit war geprägt von neuen Entdeckungen und Erfolgen – keiner dachte mehr an die absurde Idee von Zusatzdimensionen. Anfang der 1970er Jahre war das Standardmodell so gut wie vollständig, Mitte der 1980er Jahre waren einige Quantenmechanischen Vorhersagen experimentell bestätigt und die grundlegenden Fragen zur schwachen, starken und elektromagnetischen Kraft beantwortet. Ihre bisherigen Erfolge ermutigten die Theoretiker sich nun mit der Unvereinbarkeit von Quantenmechanik und Allgemeiner Relativitätstheorie zu befassen. Jedoch scheiterten alle Versuche diese zu vereinigen und man versuchte es mit radikaleren Ansätzen. Die Kaluza-Klein-Theorie war zurück!

An dieser Stelle möchten die Verfasser einmal auf zwei quantenphysikalische Probleme eingehen, die bis heute noch nicht gelöst sind. Das wäre zum einen das „Hierarchieproblem“ und zum anderen das „Confinementproblem“ in der QCD.

Zum Hierarchieproblem: Laut der Standardtheorie sollte das Higgs-Teilchen durch die Quantenkorrektur eine Masse von $2,176 \cdot 10^{-8}$ kg (Planckmasse) besitzen.

– Das Higgs-Teilchen kannte man bereits 1985, jedoch wurde es bis heute nicht entdeckt. – Die Masse des Higgs ist jedoch viel zu groß für ein Elementarteilchen. Daraus schlussfolgern Physiker, dass es ein weiteres unbekanntes Teilchen geben muss, dessen Quanteneffekte die große Quantenkorrektur des Higgs-Teilchens wieder verringern. Es würde quasi gelten: „große Zahl – große Zahl = kleine Zahl“. Die Supersymmetrie ist nur eine Theorie, die eine Antwort auf das Hierarchieproblem geben könnte.

Nun zum Confinementproblem : Man benötigt eine nicht-störungstheoretische Formulierung der Quantenfeldtheorie um mathematisch exakt zu beweisen, dass die starke Wechselwir-

kung bei niedrigen Energien so stark wird, dass es einen Phasenübergang zur einschließenden Phase (also nur farbneutrale Teilchen) gibt.

Diese beiden Probleme sollen uns noch einmal verdeutlichen wie komplex unser Universum ist und wie viel es noch zu erforschen und zu entdecken gibt.

6.3.4.2 Stringtheorie und Zusatzdimensionen

In den letzten sechzig Jahren hatte man die starke und schwache Kernkraft entdeckt, die Quantenmechanik war ausformuliert und teilweise experimentell bestätigt, und somit hatte sich das physikalische Verständnis deutlich verbessert. Man konnte nun auch die starke und die schwache Kernkraft mit in die Untersuchungen einbeziehen und so forschten Physiker bereits Mitte der 1970er Jahre an Theorien, die mehr als drei Raumdimensionen vorhersahen. Man fand heraus, dass man eine beliebige Anzahl an zusätzlichen Dimensionen annehmen kann und diese in einer Vielzahl von exotischen Formen vorkommen.

Die Grundgedanken von Kaluza und Klein bleiben jedoch erhalten:

1. Die räumlichen Abstände und die Ausdehnung dieser Dimensionen, falls sie wirklich existieren, betragen im Allgemeinen weniger als $10\mu\text{m}$, da bis zu einem Abstand von $10\mu\text{m}$ das Newtonsche Gravitationsgesetz experimentell bestätigt wurde. Stringtheoretisch geht man jedoch eher davon aus, dass Extradimensionen eine räumliche Ausdehnung von $10 \cdot \text{Stringlänge}$ oder mehr besitzen. Der Grund dafür ist, dass man dann in Rechnungen die Effekte der Stringlänge vernachlässigen kann und dabei Strings fast wie Punktteilchen behandeln kann.
2. Die Zusatzdimensionen sind mit jedem Punkt der ausgedehnten Raumdimensionen verknüpft.

Für Theorien, die Zusatzdimensionen, Gravitation und Supersymmetrie verbinden prägte man den Begriff *höherdimensionale Supergravitation*. Verschiedene höherdimensionale Supergravitationstheorien hatten das Potenzial zu einer vereinheitlichenden Theorie zu werden, jedoch tauchten bei genaueren Untersuchungen immer wieder die gleichen Probleme auf. Als dann 1984 die Stringtheorie in den Mittelpunkt der physikalischen Forschung rückte fügte sich ein Teil zum anderen...

Mit der Stringtheorie hatte man eine plausible Möglichkeit gefunden wie man den Konflikt der Unvereinbarkeit von ART und QM lösen konnte. Jedoch kann man dies nur erreichen, wenn man davon ausgeht, dass unser Universum Zusatzdimensionen besitzt.

Gehen wir bei der Vereinigung von ART und QM von Punktteilchen aus, so kommt es wie schon erwähnt zu unendlichen und negativen Wahrscheinlichkeiten. Die unendlichen Wahrscheinlichkeiten sind die Physiker umgangen, indem sie davon ausgehen, dass die Strings nicht kleiner als die Plancklänge sind. Mathematische Berechnungen haben gezeigt, dass sich alle negativen Wahrscheinlichkeiten in Luft auflösen, wenn man davon ausgeht, dass Strings in neun unabhängigen Raumdimensionen schwingen.

Durch ihre winzige Größe können Strings nicht nur durch unsere drei ausgedehnten Raumdimensionen schwingen, sondern auch durch sechs winzige aufgewickelte Dimensionen. Die Theorie von Kaluza und Klein war schon vor fünfzig Jahren verworfen worden, und von den Inhalten der Stringtheorie waren die meisten Physiker auch nicht überzeugt, doch beide sind voneinander abhängig und gelten nur in Verbindung miteinander. Zusammenfassend ist nun also festzustellen: Die Stringtheorie liefert den Forschern nur sinnvolle Ergebnisse, wenn man von neun Raumdimensionen und einer Zeitdimension, also insgesamt zehn Raumzeitdimensionen ausgeht. Diese sechs Zusatzdimensionen können laut der Kaluza-Klein-Theorie vorhanden sein. Dabei müssen wir uns aber immer wieder ins Gedächtnis rufen, dass alle physikalischen Aussagen zur Kaluza-Klein-Theorie nur Spekulationen sind, da diese Theorie nicht bestätigt ist.

Diese Zusatzdimensionen haben eine entscheidende Auswirkung auf die Physik unseres Universums. Wie wir wissen, bestimmt das Schwingungsmuster eines Strings die Ladung und Masse einer Teilchenart. Da Strings so winzig sind, dass sie durch ausgedehnte und aufgewickelte Raumdimensionen schwingen können, hat die Art und Weise, wie die Zusatzdimensionen aufgewickelt und miteinander verflochten sind, enorme Auswirkungen auf die Schwingungsmuster der Strings und damit auf die uns bekannten Teilcheneigenschaften. Im Ergebnis: Die Geometrie der Zusatzdimensionen bestimmt maßgeblich die physikalischen Eigenschaften der Elementarteilchen, die wir aus unseren Alltagserfahrungen in den drei ausgedehnten Raumdimensionen beobachten.

Jetzt stellen sich noch drei Fragen:

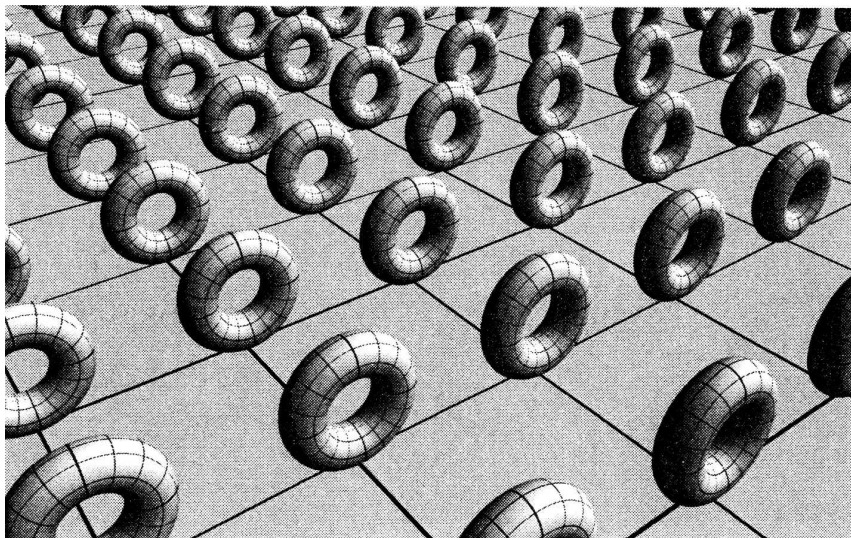
1. Wieso sind die Zusatzdimensionen Raumdimensionen und keine Zeitdimensionen?
2. Wieso sind drei Raumdimensionen ausgedehnt und die sechs anderen aufgewickelt?
3. Warum geht die Stringtheorie laut einer Näherungsrechnung von insgesamt elf Dimensionen und nicht nur zehn aus?

Zu Erstens und Zweitens gibt es keine eindeutigen Antworten, da Physiker bis heute noch nach Erklärungen dafür suchen. Allerdings gibt es zu Frage zwei eine Theorie die später noch näher erläutert wird. Mit dem dritten Sachverhalt jedoch, wird sich das Kapitel 7 näher beschäftigen.

6.3.4.3 Calabi-Yau-Räume und deren physikalischen Auswirkungen

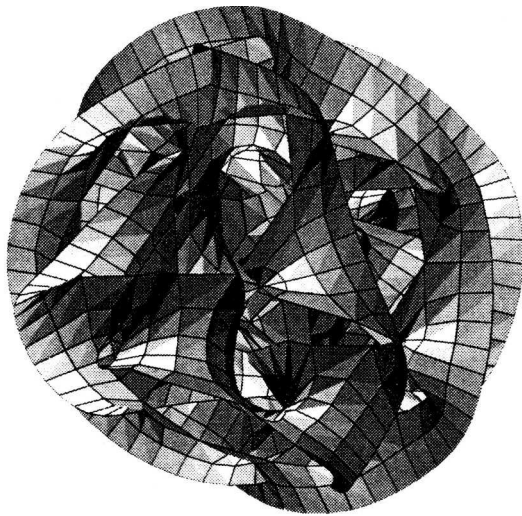
Die Zusatzdimensionen lassen sich nicht einfach x-beliebig „zusammenknüllen“, denn die Gleichungen der Stringtheorie lassen nur eine geringe Möglichkeit an geometrischen Formen der Dimensionen zu. 1984 entdeckten Physiker, dass nur eine bestimmte Klasse von sechs-dimensionalen geometrischen Formen die Bedingungen der Stringtheorie erfüllt. Genauer gesagt ist es so, dass in vier Dimensionen eine Theorie ohne Gravitation maximal 16 verschiedene Supersymmetrien haben kann. Wenn man die Gleichungen der Stringtheorie IIB – Supergravitation in 10 Dimensionen löst, dann findet man heraus, dass die Lösungen der Struktur eines vier dimensional nicht kompakten Raumes plus eines sechs dimensional kompakten Raumes nicht existieren können, wenn man den Erhalt von 16 Supersymmetrien fordert. Wenn man aber nur 8 Supersymmetrien fordert (einhalfsupersymmetrisch), dann findet man, dass der interne kompakte Raum ein Calabi-Yau-Raum sein muss.

Diese werden zu Ehren von Eugenio Calabi und Shing-Tuang Yau als Calabi-Yau-Räume oder Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten bezeichnet. Die Beiden haben bereits lange vor der Stringtheorie am mathematischen Verständnis der Räume gearbeitet. Calabi-Yau-Räume sind vereinfacht gesagt komplexe Räume, welche kompakt und gleichzeitig lokal flach sind. Dies bedeutet, die Krümmung verschwindet in einem bestimmten Sinn. In diesem Fall bedeutet komplexer Raum, dass man auf dem Raum global, also überall stetig, komplexe Zahlen definieren kann. Dies funktioniert nicht überall, z.B. nicht auf einer Kugel, da jedes Koordinatensystem an 2 Punkten (Nord-und Südpol) degeneriert. Auf einem Torus hingegen funktioniert dies. Das bedeutet, dass ein Torus eine komplexe Mannigfaltigkeit ist.



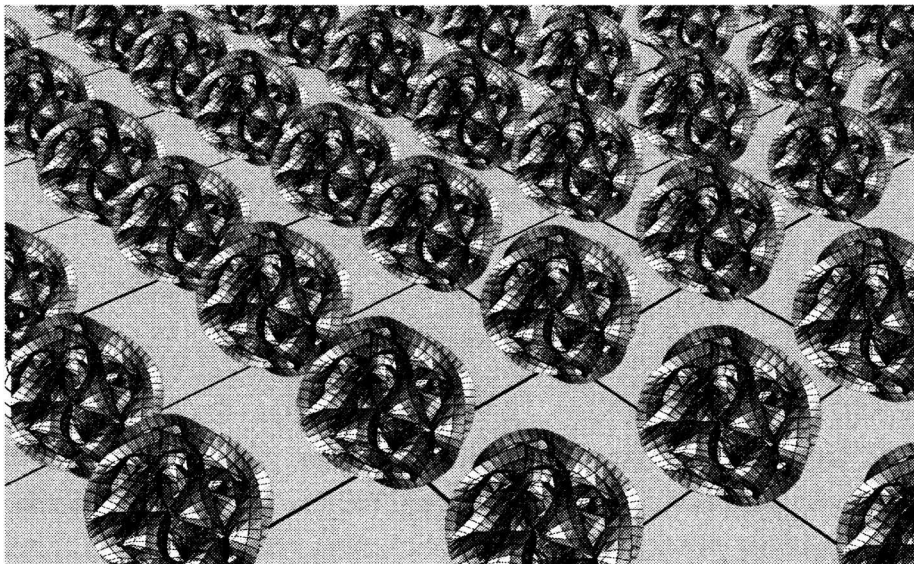
*Abbildung 19 :
Toren an jedem Punkt der Ausge-
dehnten Raumdimensionen
[vgl.2, S.236]*

Zusatzdimensionen können in unendlich vielen verschiedenen Formen aufgewickelt sein. Ein Calabi-Yau-Raum ist nur eine Form davon.



*Abbildung 20 :
Calabi-Yau-Raum
[vgl.2 S.244]*

Aus den Gleichungen der Stringtheorie lassen sich unendlich viele verschiedene Calabi-Yau-Räume ableiten. Wie schon erwähnt, befindet sich ein Gebilde aus sechs Zusatzdimensionen (ab jetzt werden dieses Calabi-Yau-Raum genannt) fest an jedem Punkt der drei ausgedehnten Raumdimensionen.



*Abbildung 21 :
Calabi-Yau-Räume als aufgewinkelte Zusatzdimensionen, an jedem Punkt der Ausgedehnten Raumdimensionen
[vgl.2, S. 245]*

Laut dem Standardmodell gibt es drei große Teilchenfamilien, in denen die Massen der Teilchen von Familie zu Familie zunehmen. Aber warum? Bisher konnte man diese Frage nicht beantworten. War es Zufall? Oder eine göttliche Laune? Nein! Mithilfe der Calabi-Yau-Räume lässt sich dies erklären.

Zunächst einmal enthält jeder Calabi-Yau-Raum Löcher, ähnlich wie ein Schweizer Käse. Calabi-Yau-Räume besitzen verschiedene Locharten, welche mehrdimensional sind. Diese Löcher haben natürlich Einfluss auf das Schwingungsmuster eines Strings. Untersuchungen ergaben, dass man eine ganze Reihe von energieärmsten Schwingungsmustern erhält, wenn man von einem Loch im Calabi-Yau-Raum ausgeht. Diese energieärmsten Schwingungsmuster entsprechen den Massen der uns bekannten Teilchen der ersten Familie. Spinnen wir den Gedanken einmal weiter: Wenn ein Universum aufgrund eines Lochs im Calabi-Yau-Raum eine Teilchenfamilie besitzt, dann muss unser Universum drei Löcher im Calabi-Yau-Raum aufweisen, denn die Experimente bestätigten, dass unser Universum drei Teilchenfamilien besitzt. Wieso hat ein Elektron nun genau die Masse von $9,109 \cdot 10^{-31}$ kg? Dies liegt daran, wie die mehrdimensionalen Löcher angeordnet sind, sich überschneiden und überlappen sowie von der Faltung des gesamten Calabi-Yau-Raumes. Es existiert natürlich noch eine physikalisch viel komplexere Erklärung, die wir hier aber nicht anführen wollen, da dies eine populärwissenschaftliche Arbeit ist.

Um Quanteneffekte zu vernachlässigen, weil man die volle effektive Supergravitationswirkung mit allen Quanteneffekten nicht kennt, wählt man Calabi-Yau-Räume immer 10 – 100 mal so groß wie die Plancklänge. Da Strings eine räumliche Ausdehnung von mindestens der Plancklänge besitzen, können diese ungehindert durch die sechs Zusatzdimensionen und den Löchern mit deren Eigenschaften schwingen. Die Löcher und deren Eigenschaften nehmen also direkt Einfluss auf das Schwingungsmuster und damit auch auf die Masse der Elementarteilchen. Bis hierher ist alles gut durchdacht.

Doch auch hier tritt wieder das Problem auf, dass die Calabi-Yau-Räume viel zu klein sind, um sie mit heutigen experimentellen Mitteln sichtbar zu machen. Auch in der theoretischen Betrachtung tauchte bisher ein schwerwiegendes Problem auf: Keiner wusste wie DER EINE Calabi-Yau-Raum aussieht, der die zusätzlichen Raumdimensionen verkörpert und somit unser komplettes Universum perfekt beschreibt. Korrekte mathematische Vorhersagen über Teilcheneigenschaften oder Nachhersagen, warum gerade das Elektron eine Masse von $9,109 \cdot 10^{-31}$ kg besitzt, ließen sich deshalb noch nicht treffen. Da man weiß, dass UNSER Calabi-Yau-Raum genau drei Löcher besitzen muss, kann man schon einige Räume ausschließen. Jedoch kommt noch eine entscheidende Eigenschaft der Calabi-Yau-Räume hinzu, welche das Entdecken zusätzlich erschwert. Calabi-Yau-Räume können sich verformen, ohne die Anzahl der Löcher bzw. Unterräume, und deren Lage zu einander zu verändern. Das heißt, dass aus einem Calabi-Yau-Raum durch Umformung unendlich viele neue Calabi-Yau-Räume entstehen können. Jeder dieser Verformungsfreiheitsgrade, sogenannte Moduli, ergibt in der effektiven Feldtheorie ein zusätzliches masseloses Skalarfeld mit dem Spin von 0. Da die Physiker bisher keine Spin-0-Felder gefunden haben, und außerdem nur das

Higgs-Boson erwarten, kann die Calabi-Yau-Theorie selbst keine Beschreibung der Natur sein. Was muss geschehen? Die Physiker müssen physikalische Effekte in der Stringtheorie finden, welche diesen Skalarfeldern eine hohe Masse von mehr als 1 TeV geben. Außerdem sind die mathematischen Mittel der Theoretiker noch nicht ausgereift genug, deshalb können sie meist nur Näherungsrechnungen anstellen. Man nutzt dazu das Verfahren der Störungstheorie, welches später näher erläutert wird.

Das eben erörterte Problem, der Suche nach DEM EINEN Calabi-Yau-Raum, hat sich erübrigt, denn neueste Forschungen haben ergeben, dass die wirkliche Lösung der Stringtheorie, die unser Standardmodell beschreibt, kann eigentlich kein Calabi-Yau-Raum sein. Dieser geht von acht Supersymmetrien aus. Physiker fanden jedoch heraus, dass unsere Welt keine einzige Supersymmetrie enthält. Die Supersymmetrie muss also gebrochen sein. Daran wird derzeit noch hart gearbeitet...

6.3.5 Raumzeit aus Sicht der Stringtheorie

6.3.5.1 Eigenschaften der Raumzeit

Um diese Eigenschaft der Stringtheorie besser zu verstehen, müssen wir zuerst über die Windungsmöglichkeiten von Strings sprechen. Da Strings, anders als Punktteilchen, eine räumliche Ausdehnung besitzen, können sie sich auf zwei unterschiedliche Arten durch die Calabi-Yau-Räume (aufgewickelte Zusatzdimensionen) bewegen. Dabei unterscheidet man zwischen gewundenen und nichtgewundenen Strings. Bisher sind wir in unseren Ausführungen immer von nichtgewundenen Strings ausgegangen. Nun wird es Zeit, dass wir uns kurz mit gewundenen Strings befassen. Gewundene Strings haben ihren Namen daher, weil sie sich um den kreisförmigen Teil der Calabi-Yau-Räume beliebig oft herumwickeln können. Natürlich können diese Strings weiterhin schwingen und beliebig umher gleiten.

Gewundene Strings besitzen grundsätzlich dieselben Eigenschaften wie nichtgewundene Strings. Jedoch besitzen gewundene Strings im Gegensatz zu Nichtgewundenen eine Mindestmasse. Diese wird durch seine Mindestlänge festgelegt, welche von der Windungszahl (Vorzeichen legt die Richtung fest) und dem Durchmesser der kreisförmigen Dimension abhängt. Es gilt: Je Länger der String desto mehr Mindestmasse besitzt er. Da der Umfang eines Kreises seinem Radius direkt proportional ist, ist die Mindestmasse dem Radius der umwundenen Dimension proportional. Aus Einsteins Formel $E=mc^2$ geht hervor, dass auch die Mindestenergie eines gewundenen Strings dem Radius der kreisförmigen Dimension direkt

proportional ist. Da nicht gewundene Strings keine Mindestmasse besitzen, erzeugen diese masselosen Teilchen, z.B. Photonen.

Was haben nun gewundene Strings mit der Struktur unseres Universums zu tun? Die Gesamtenergie eines Strings ist die Summe aus der Windungsenergie und der Schwingungsenergie des Strings. Wir beziehen nur die Schwerpunktsbewegung in unsere folgende Überlegung ein, denn man hat herausgefunden, dass die Schwingungsenergie einer normalen Schwingung keinen Einfluss auf unsere folgende Überlegung und deren Ergebnis hat. Die Schwingungsenergie einer Schwerpunktsbewegung ist umgekehrt proportional zu dem Radius der umwundenen Dimension, denn ein kleinerer Radius schränkt den String ein und erhöht somit den Energiegehalt seiner Bewegung. Dies ergibt sich aus der quantenmechanischen Unschärferelation. Wie oben schon erwähnt ist die Windungsenergie eines Strings dem Radius der umwickelten Dimension direkt proportional. Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang: Ein großer Radius bedeutet eine kleine Schwingungsenergie und eine große Windungsenergie. Dagegen bedeutet ein kleiner Radius eine große Schwingungsenergie und eine kleine Windungsenergie.	R = 10		
	Schwingungszahl	Windungszahl	Gesamtenergie
	1	1	$1/10 + 10 = 10,1$
	1	2	$1/10 + 20 = 20,1$
	1	3	$1/10 + 30 = 30,1$
	1	4	$1/10 + 40 = 40,1$
	2	1	$2/10 + 10 = 10,2$
	2	2	$2/10 + 20 = 20,2$
	2	3	$2/10 + 30 = 30,2$
	2	4	$2/10 + 40 = 40,2$
	3	1	$3/10 + 10 = 10,3$
	3	2	$3/10 + 20 = 20,3$
	3	3	$3/10 + 30 = 30,3$
	3	4	$3/10 + 40 = 40,3$
	4	1	$4/10 + 10 = 10,4$
	4	2	$4/10 + 20 = 20,4$
	4	3	$4/10 + 30 = 30,4$
	4	4	$4/10 + 40 = 40,4$

	R = 1/10		
	Schwingungszahl	Windungszahl	Gesamtenergie
	1	1	$10 + 1/10 = 10,1$
	1	2	$10 + 2/10 = 10,2$
	1	3	$10 + 3/10 = 10,3$
	1	4	$10 + 4/10 = 10,4$
	2	1	$20 + 1/10 = 20,1$
	2	2	$20 + 2/10 = 20,2$
	2	3	$20 + 3/10 = 20,3$
	2	4	$20 + 4/10 = 20,4$
	3	1	$30 + 1/10 = 30,1$
	3	2	$30 + 2/10 = 30,2$
	3	3	$30 + 3/10 = 30,3$
	3	4	$30 + 4/10 = 30,4$
	4	1	$40 + 1/10 = 40,1$
	4	2	$40 + 2/10 = 40,2$
	4	3	$40 + 3/10 = 40,3$
	4	4	$40 + 4/10 = 40,4$

Tabelle 5 und 6: Die Tabellen zeigen, dass beide Situationen äquivalent zueinander sind [vgl.5]

Der springende Punkt ist nun folgender: Die Windungsenergie eines Strings bei großem Radius ist gleich der Schwingungsenergie eines Strings bei kleinem Radius und die Schwingungsenergie eines Strings bei großem Radius ist gleich der Windungsenergie eines Strings bei kleinem Radius.

Daraus folgt, dass kein physikalischer Unterschied zwischen einem Universum mit großem Radius und einem Universum mit kleinem Radius existiert. Dies liegt wie oben schon erwähnt an der Zusammensetzung der Gesamtenergie eines Strings.

Schauen wir uns ein Beispiel zur Verdeutlichung an:

Das Universum A hat eine Zusatzdimension mit dem Radius der zehnfachen Plancklänge ($R=10 \cdot P$). Das Universum B hat eine Zusatzdimension mit dem Radius ein Zehntel der Plancklänge ($R=(1/10)P$). Bei Universum A sind die Windungsenergien Vielfache von $10 \cdot P$ und Schwingungsenergien Vielfache von $(1/10) \cdot P$. Bei Universum B sind die Windungsenergien Vielfache von $(1/10) \cdot P$ und Schwingungsenergien Vielfache von $10 \cdot P$. Bei Beiden setzt sich die Gesamtenergie des Strings aus der Summe von Windungsenergie und Schwingungsenergie zusammen, und bei beiden wird das Ergebnis gleich sein. (siehe dazu auch Abschnitt 7.2)

Die Tabellen bestätigen unser Beispiel.

Unsere Überlegung gilt für eine beliebige Anzahl von kreisförmigen Zusatzdimensionen und bei jedem beliebigen Radius und dessen reziproken Wert. Wir stellen also folgendes fest: In einem Universum X mit einem beliebigen Radius Q und einem Universum Y mit dem Radius $1/Q$ sind die Ladungen und Massen der Teilchen absolut identisch. Diese beiden Universen sind also absolut identisch, obwohl sie durch ihre Größe geometrisch zu unterscheiden sind. Auch Experimentalergebnisse werden die Selben sein, trotz der unterschiedlichen Radien. Auch unser Universum würde nach dieser Theorie ein komplett gleiches Universum besitzen, was allerdings nur einen Bruchteil der Größe des Unseren besitzt.

Wie kann dies sein?

Dafür gibt es eine komplexe stringtheoretische Erklärung. Vereinfacht gesagt können sich nicht gewundene Strings frei bewegen und den Umfang der Zusatzdimension frei sondieren. Aus der Unschärferelation geht hervor, dass die sondierte Länge proportional zu R ist und die Energien des Strings ein Vielfaches von $1/R$ sind. Jedoch können diese nur Abstände messen die mindestens den Wert von R betragen. Außerdem geht hervor, dass gewundene Strings eine Mindestenergie besitzen die zu R proportional ist und die sondierte Länge proportional zu $1/R$ ist. Diese können wiederum erfolgreich Abstände bzw. Längen messen die kleiner als R sind. Mathematisch gesehen sind beide Methoden der Längen- bzw. Abstands-

messung korrekt. Man darf sie nur nicht miteinander vermischen. Entweder wir messen mit gewundenen Strings oder mit nicht gewundenen Strings. Beide Verfahren sind vom Schwierigkeitsgrad her äquivalent, jedoch wird im Alltag eher mit nichtgewundenen Strings gerechnet. Dies hat folgenden Grund: Nehmen wir an $R=10 l_s$ (l_s =Stringlänge) dann ist die Windungsenergie eines Strings z.B. $R \cdot T = 10/(2\pi l_s)$, und damit sehr groß. Dieser Wert übersteigt den Wert der Planckenergie. Deshalb können Physiker diese Moden gar nicht anregen, sie können nur die Schwingungsmoden von nichtgewundenen Strings anregen.

Wenden wir also das Messverfahren der nicht gewundenen Strings an stoßen wir auf eine konstante Mindestlänge von $1,61624 \cdot 10^{-35}$ m, welche der Plancklänge entspricht. Dies ist der Grund warum die Plancklänge der kleinste Abstand in der Stringtheorie ist und sie uns so oft in der Stringtheorie begegnet. Wenn wir Abstände oder Längen im Alltag messen dann basiert dies auch auf nicht gewundenen Strings, jedoch geschieht dies unbewusst. Die beiden unterschiedlichen und doch korrekten Messverfahren bringen die Physiker zu zwei grundlegenden Gedanken.

1. Nach der Messmethode mit nichtgewundenen Strings verhält sich unser Universum so wie wir es kennen. Es hat eine enorm große Ausdehnung und expandiert. Nach der Messmethode der gewundenen Strings jedoch ist es winzig und zieht sich weiter zusammen. Obwohl uns die erste Situation vertrauter ist, sind beide Szenarien möglich.

2. Der zweite Gedanke betrifft den Urknall und den eventuell eintreffenden Endkollaps. Bisher vermutete man immer, dass beim Urknall, und ebenfalls beim Endkollaps, alle Massen des Universums in einem winzigen Punkt mit einer Ausdehnung von null zusammengepresst waren. Die Umstände einer enormen Masse und unendlichen Dichte in einem Punkt der Ausdehnung null ist ein physikalisches, mathematisches, philosophisches und logisches Rätsel. An dieser Stelle tritt unsere Messmethode der nicht gewundenen Strings auf. Wendet man diese an so hat der Punkt in allen Dimensionen mindestens die Ausdehnung der Plancklänge, was die Forschungsarbeiten deutlich erleichtert.

Die Physikalische Erklärung dafür ist folgende: Wenn ein Universum mit kompakten Dimensionen sich zusammenzieht, also komprimiert, dann überschreitet es irgendwann die Plancklänge. Eigentlich müsste man jetzt starke quantengravitative Effekte erwarten, da die Plancklänge die Länge ist, wo Quantenmechanik und Gravitation eine gleich große Rolle spielen. Die Stringtheorie gibt den Physikern folgende Erklärung, was passiert: Da Strings auf einem Kreis mit Radius l_s^2/R äquivalent zu einem Kreis mit Radius R sind, ist die minimale Ausdehnung des Universums, welche physikalisch relevant ist, $R=l_s$. Wenn das Universum sich nämlich auf kleinere Größen zusammenzieht, können wir einfach eine T-Dualität machen, und es in Termen von einem größeren Universum physikalisch äquivalent beschreiben. Da T-Dualität, die Zeitrichtung nicht ändert, bedeutet das, dass die bessere Beschreibung des Durch-

gangs des Universums durch $R=I_s$ ist, dass hinter diesem "Flaschenhals" wieder ein neues Universum wächst (weil das alte, T-duale, Universum sich ja weiter zusammenzieht), d.h. man hat den Flaschenhals der kosmologischen Singularität schon durchschritten, wenn das Universum Ausdehnung ungefähr I_s hat. Es kommt also nichtmehr zu dieser punktförmigen Singularität wie in der ART.

6.3.5.2 Risse in der Raumzeit

Wie oben erläutert, beruhen Einsteins Relativitätstheorien auf einer glatten Raumzeit ohne Löcher, Risse, Unebenheiten oder Ähnlichem. Die Raumzeit dehnt und verformt sich wenn großen Massen auf sie einwirken, jedoch reißt sie nie. Würde dies passieren, würden Einsteins Gleichungen ihre Gültigkeit verlieren und es käme zu einer kosmischen Katastrophe. Doch was ist, wenn die Massen so groß sind, dass die Raumzeit doch einmal reißt, ähnlich wie ein Gummituch? Nach langen und komplizierten Forschungen fanden Theoretiker heraus, dass die Raumzeit doch reißen kann.

Nun kommt natürlich die Frage auf, warum wir bisher von dieser kosmischen Katastrophe nichts bemerkt haben? Edward Witten, zurzeit einer der besten theoretischen Physiker auf der Welt, fand 1993 folgende Antwort: In der Nähe eines Risses führt ein String zwei Bewegungen aus. Zum Einen bewegt er sich entlang des Risses fort und zum Anderen umschließt er den Riss. Bei Punktteilchen wäre dies nicht möglich. Die Weltfläche, die ein String während der Bewegung durch den Raum überstreicht, legt sich wie eine Schutzhülle über den Riss und bewahrt unser Universum somit vor einer kosmischen Katastrophe. Doch was ist, wenn kein String in der Nähe ist um den Riss zu umschließen? E. Witten hat nachgewiesen, dass aufgrund der Quantenmechanik, welche gleichzeitig sämtliche Wege (unendlich viele), die ein String einschlägt, um von A nach B zu kommen berücksichtigt, immer ein String in der Nähe eines Risses ist, um diesen zu schließen. Dieser Vorgang geschieht nicht nur in den Zusatzdimensionen der Calabi-Yau-Räume, sondern auch in den uns bekannten drei großen, ausgedehnten Raumdimensionen, welche Spekulationen über Zeitreisen und Wurm-löcher zulassen.

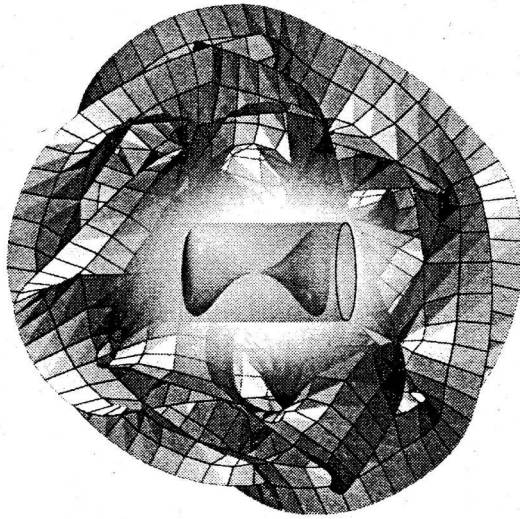


Abbildung 22 :
Weltlinie eines Strings legt sich
über den Riss im Calabi-Yau-Raum
[vgl. 2, S.309]

7 Wegweisende neue Theorien

7.1 Fünf verschiedene String-Theorien

Etwa in der Zeit um 1985 war die Stringtheorie auf dem Vormarsch und die Supersymmetrie war bereits zu einer nicht mehr wegzudenkenden fundamentalen Eigenschaft herangereift. Unglücklicherweise stellte man im selben Jahr fest, dass diese Eigenschaft nicht nur auf eine, sondern gleich auf fünf verschiedene Weisen in die Stringtheorie integriert werden konnte. Zwar war jede der fünf verschiedenen Typen in der Lage die Paarbildung von bosonischen und fermionischen Schwingungsmustern zu gewährleisten, doch unterschieden sie sich in jeweils kleinen aber feinen Einzelheiten. Diesen Theorien gab man den Namen Typ I, Typ IIA, Typ IIB, heterotische Theorie mit Eichgruppe O_{32} (kurz: O-heterotisch) und heterotische Theorie mit Eichgruppe $E_8 \times E_8$ (kurz: E-heterotisch). Zu den letzten beiden Typen, den heterotischen Typen, ist es hier angebracht, das Prinzip der Eichsymmetrien noch einmal kurz anhand eines Beispiels aufzugreifen. Alle diese Theorien teilen sich die grundlegendsten Eigenschaften, die eine String-Theorie besitzen sollte.

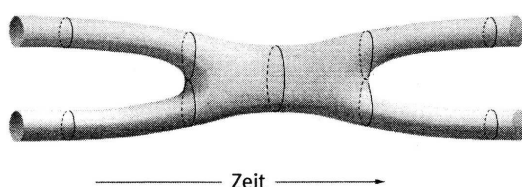
Die Schwingungsmuster der Strings bestimmen die Massen und Kraftladungen der daraus aufgebauten Teilchen, sie sind auf die Existenz von insgesamt zehn Raumdimensionen angewiesen, die aufgewickelten Dimensionen müssen einen Calabi-Yau-Raum bilden und vieles mehr. Im Folgenden wird der Verfasser etwas genauer auf die Unterschiede zwischen den Typen eingehen. Der Unterschied zwischen Typ IIA und Typ IIB besteht darin, dass eine bestimmte Eigenschaft der Strings vom Typ IIB, sowohl von Rechts- als auch von Linksläufers, gleich ist, während eben diese beim Typ IIA nach mathematisch genau definierten Vorgaben entgegengesetzt sind. Dies mag etwas verworren klingen, lässt sich jedoch an einem Beispiel verdeutlichen. Der Spin aller Teilchen, die aus Strings des Typ IIB aufgebaut sind,

ist nur in eine Richtung orientiert, während alle Teilchen vom Typ IIA einen Spin in zwei verschiedene Richtungen haben können. Die Unterschiede in den beiden heterotischen Theorien zeigen sich schon wesentlich gravierender. Betrachtet man nur die Rechtsläufer, unterscheiden sie sich in keinsten Weise von den beiden vorangegangenen Typen. Die Linksläufer jedoch sind die, die schon in der bosonischen Stringtheorie verwendet worden sind. Dies ist eine der ursprünglichen Formen, aus denen sich die heutige String-Theorie entwickelt hat. Das Besondere daran ist, dass in dieser Theorie eine 26-dimensionale Raumzeit, statt der heute üblichen 10-dimensionalen Raumzeit erforderlich ist. Wendet man dies jedoch auf rechts- und linksläufige Strings gleichzeitig an, so stößt man auf unüberwindbare Probleme. Die Physiker David Gross, Jeffrey Harvey, Emil Martinec und Ryan Rhom, die um 1985 nur als das „Princeton String Quartett“ bekannt waren, vereinigten sie dennoch mit den „normalen“ rechtsläufigen Strings und schafften es so vernünftige Ergebnisse zu erzielen. Eine der Schwierigkeiten hierbei war, dass die rechtshändigen Strings nun 10-dimensional waren, während die Linkshändigen 26 Dimensionen benötigen. Dieses Problem schaffte das „Quartett“ aus der Welt, in dem es zeigte, dass die überschüssigen 16 Raumdimensionen in zwei verschiedenen Arten zu höherdimensionalen „Tori“ – welches ein mathematisches Produkt aus mehreren Kreisen ist - zusammengerollt sein müssen, um brauchbare Ergebnisse zu erhalten. Nach der Art des Zusammenrollens unterscheidet man nun die Typen O-heterotisch und E-heterotisch. Wenn die Dimensionen so zusammengerollt sind, dann verhalten sie sich so, als besäßen sie tatsächlich nur 10 Raumdimensionen.

Der Typ I schließlich ist ein Typ, der sehr schnell zu erläutern ist. Der Typ I ist eine Abart der Theorie der Typs IIB, mit dem einzigen Unterschied, dass hier auch - neben den geschlossenen Stringschleifen - offene Strings mit zwei losen Enden beschrieben werden. Natürlich war dieser Umstand für überzeugte String-Theoretiker sehr unangenehm, denn sie glaubten an die Existenz einer einzigen, grundlegenden Theorie. Fünf nicht miteinander zu tun habende Theorien sind nicht das Ideal dafür. Des Weiteren trat ein Problem auf, welches zu großen Umständen führte. Löste man nämlich die Gleichungen der Stringtheorie unter Berücksichtigung der speziellen Eigenschaften der fünf verschiedenen Typen, so erhielt man für jede der Theorien mehrere unterschiedliche Lösungen. Zum Beispiel ergaben sich verschiedene Möglichkeiten die Zusatzdimensionen aufzuwickeln. Jedoch war jedes dieser Ergebnisse für die Welt, wie wir sie kennen, ohne Bedeutung. Zu diesem Zeitpunkt sah es so aus, als wäre dieser Umstand der Unvereinbarkeit eine unvermeidliche Grundeigenschaft der Stringtheorie. Jedoch gab es bereits in der Mitte der 90er Jahre der 20. Jahrhunderts wieder Licht am Ende des Tunnels. Die in diesen Jahren betriebene Forschungsarbeit, mit der die Physiker weiterhin versuchten die Gleichungen der Stringtheorie zu erforschen und zu verstehen, ließ durchaus begründeten Anlass zur Hoffnung. Man verfolgte eine neue Idee: Was, wenn jede der fünf einzelnen Theorien nur jeweils eine Art widerspiegeln, wie die Forscher an diese

Gleichungen herangingen. Die Gleichungen der Stringtheorie sind nämlich so kompliziert, dass niemand sie lösen kann. Lediglich kann mit Näherungswerten der Gleichungen gearbeitet werden. Zwar gibt es auch Lösungen der Stringtheorie, von denen man glaubt, dass sie eine exakte Lösung darstellen, aber die Mehrheit der Ergebnisse sind Näherungen. Der Unterschied zwischen einem Typ und dem nächsten könnte also lediglich an der Form dieser Näherungen liegen. Seit etwa 1995 mehrten sich die Hinweise darauf, dass die tatsächliche Form der Gleichungen der Stringtheorie, die niemand verstehen würde, für alle fünf Typen dieselbe sein könnte und diese somit einheitlich beschreiben würde. Also wären diese verschiedenen Theorien nichts weiter als verschiedene Sichtweisen auf ein und dieselbe Theorie. Doch wieso lässt sich die Gleichung für eine Stringtheorie eigentlich nicht ausformulieren? Nun ja, in der Theorie ist die Aufstellung einer perfekten Gleichung durchaus möglich, doch in der Praxis sind dem Grenzen gesetzt. Diese Grenzen hängen direkt mit der Störungstheorie zusammen. Als solche bezeichnen Physiker eine Methode zur Annäherung an das tatsächliche Ergebnis, um dann selbige Näherung Schritt für Schritt zu verfeinern. Ein Beispiel: Ihr Wagen ist kaputt und Sie bringen ihn zu einer unabhängigen Werkstatt. Der Mechaniker sieht sich den Schaden an und macht Ihnen nach kurzer Inspektion einen Kostenvoranschlag von etwa 1000 €. Nach ein paar Tagen hatte der Mechaniker Zeit sich die Schäden genauer anzusehen und eröffnet Ihnen nun, dass der Preis nun etwa 1250 € betrage, da noch weitere Schäden entdeckt worden sind. Sie lassen den Wagen reparieren und erhalten schließlich die Rechnung in Höhe von 1357,38€. Der Mechaniker erklärt Ihnen, dass aufgrund der ursprünglichen Schäden weiter Folgeschäden entstanden waren, die ebenfalls behoben werden mussten. Von den anfänglichen 1000 €, welche eine erste grobe Näherung darstellten, war nach genauerer Untersuchung des Problems eine bessere, aber noch nicht vollständige Angabe von 1250 € möglich. Erst nachdem wirklich alle Faktoren mit einbezogen wurden, ist eine endgültige Lösung von 1357,38 € zu erwarten. [vgl. Quelle 2 Seite: 333]

Exakt nach diesem Schema gehen auch die Physiker dieses Problem an. Das Schwierige ist, dass die auf die Bewegung der String einwirkenden Faktoren keineswegs mit denen einer Autoreparatur vergleichbar sind. Als wäre das ständige Hin- und Herschwingen der Strings allein nicht schon komplex genug, so gibt es doch theoretisch unendlich viele Faktoren, die diese Schwingung zusätzlich beeinflussen. Normale Strings wechselwirken miteinander indem sie sich miteinander verbinden, eine Zeit lang so bleiben und sich schließlich wieder trennen.



*Abbildung 23 :
Bildung von String-Antistring-Paaren durch Quantenfluktuation
[vgl. 2, S. 337]*

Durch die im vorangegangenen Kapitel erläuterte Quantenfluktuation („Quantenschaum“) ist es möglich, dass sich String-Antistring-Paare bilden, die aus „geliehener“ Energie bestehen. Zwar wird somit der Energieerhaltungssatz verletzt, doch in der Quantenmechanik ist dies ja möglich, wenn sich das Paar nur schnell genug wieder vernichtet. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache, sieht die Wechselwirkung nun schon etwas komplizierter aus. Die Strings verschmelzen zu einem einzigen und überdauern so eine gewisse Zeit. Aufgrund der wilden Quantenfluktuationen kann es nun sein, dass sich ein String-Antistring-Paar bildet und auch dies eine bestimmte Zeit lang in diesem Zustand verharrt, bis es sich wieder vernichtet und wieder zu einem String wird.

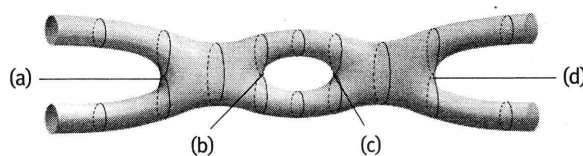


Abbildung 24 :

Verlauf der sog. Quantenhektik
[vgl. 2, S. 337]

Die Quantenhektik kann zur Entstehung (b) und Vernichtung (c) eines String-Antistring-Paars führen, wodurch sich eine kompliziertere Wechselwirkung ergibt.

Wenn dieser Vorgang nur einmal abläuft, wird dies als Ein-Schleifen-Prozess bezeichnet. Nun kann es jedoch passieren, dass dieser Effekt nicht nur einmal, sondern gleich mehrfach hintereinander auftritt und somit die Wechselwirkung immer weiter beeinflusst. Physiker fanden heraus, dass sich die erwünschten Werte für die exakte Wechselwirkung von Strings dann ergeben, wenn man die mathematischen Werte von Diagrammen ohne Schleife mit denen mit einer Schleife, mit denen von zwei Schleifen, mit denen von drei Schleifen,... usw. addiert. Es müssen also alle theoretisch möglichen Wechselwirkungen miteinander addiert werden. Da es aber eine unendliche Anzahl davon gibt und die Gleichungen mit zunehmender Anzahl von Schleifen immer schwieriger werden, erweist sich dieses Problem als unlösbar. Stattdessen gehen die Physiker von einem störungstheoretischen Rahmen aus, bei dem ein vernünftiger Wert bereits aus dem Null-Schleifen-Prozess gewonnen werden kann und die Addition von zusätzlichen Schleifendiagrammen lediglich zu Verfeinerungen führen würden.

7.2 Die M-Theorie

Die alljährliche Konferenz der Stringtheoretiker, die gegen Mitte der 80er Jahre noch erfüllt war von Euphorie und fast schon der Sicherheit, dass die Weltformel nun bald gefunden werden würde, war am Ende der 80er nur noch ein Schatten ihrer selbst. Von der anfänglichen

Zuversicht war nichts mehr zu spüren. Zwar wurden durchaus interessante Neuerungen präsentiert, aber dennoch kam sogar der Gedanke auf, diese Veranstaltung in Zukunft abzuschaffen. Diese Niedergeschlagenheit hielt noch mehrere Jahre an, bis im März 1995 in Southern California der US-Amerikanische Mathematiker und Physiker Edward Witten ans Rednerpult trat, um einen revolutionären Vortrag zu halten. In diesem Vortrag legte er ein vollkommen neues Konzept vor, wie man über den störungstheoretischen Rahmen, unter dem die Stringtheorie bis jetzt immer betrachtet wurde, hinausgehen könnte und so ein vollkommen neues Verständnis dafür entwickeln könnte. Laut seinen Angaben waren die fünf verschiedenen Typen der Stringtheorie, an denen man sich bisher die Zähne ausgebissen hat, nichts anderes als fünf verschiedene Betrachtungsweisen ein und derselben Theorie. Er war der Meinung alle fünf Typen in nur einer Theorie vereinen zu können, wenn man nur die unterschiedlichen Aussagen richtig zu interpretieren weiß. Sein Vortrag stützte sich hierbei auf das Prinzip der Dualität. Der Begriff der Dualität wird in der Physik für Theorien verwendet, die zwar unterschiedlich erscheinen, aber bei genauerer Betrachtung doch denselben Sachverhalt beschreiben. Dabei wird zwischen trivialer und nichttrivialer Dualität unterschieden. Von trivialer Dualität redet man, wenn, vereinfacht gesagt, z.B. ein und dieselbe Formel in englischer und in deutscher Sprache vorliegt. Auf den ersten Blick scheint es sich für einen Außenstehenden um zwei völlig verschiedene Formeln zu handeln. Wenn nun jedoch jemand, der beiden Sprachen mächtig ist, die englische Formel ins Deutsche übersetzt, so sieht er, dass es sich um die gleiche Formel handelt, und sich absolut nichts an den Eigenschaften dieser Physik verändert. Würden sich nun durch die Übersetzung neue Eigenschaften ergeben, die neue physikalische Betrachtungsweise auf die deutsche Formel oder zumindest eine Vereinfachung der ihr zu Grunde liegenden Strukturen zur Folge hätte, so spräche man von einer nichttrivialen Dualität. Die genannten Beispiele mögen zwar sehr einfach erscheinen, aber sie beschreiben den Sachverhalt der Dualität sehr angemessen.

Die verschiedenen Typen der Stringtheorie sind dabei durch zwei sog. „Dualitäten“ miteinander verbunden. Die erste davon ist die T-Dualität. Diese verbindet zwei Theorien miteinander, deren kompaktifizierte Dimensionen gleichzeitig den Radius R und $1/R$ besitzen. Um dies etwas verständlicher zu gestalten, wird hier ein kurzer Abstecher in die Quantengeometrie unternommen. Die Energie eines Strings lässt sich wie folgt ermitteln:

$$\text{Energie} = \text{Spannung} * \text{Länge} = 2\pi r * \text{Spannung}$$

Laut Heisenbergscher Unschärferelation besitzen die Anregungen der Schwerpunktschwingung eines Strings Energien, welche sich zum Radius der kompaktifizierten Dimension umgekehrt proportional verhalten, weil ein kleinerer Radius den String stärker eingrenzt und so den Energiegehalt seiner Bewegung erhöht. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass ein

großer Radius große Windungs- und kleine Schwingungsenergien, ein kleiner Radius kleine Windungs- und große Schwingungsenergien von Strings bedeutet. Das entscheidende hierbei ist nun folgender Zusammenhang. Die Windungsenergien auf einem Kreis mit großem Radius entsprechen den Schwingungsenergien eines entsprechend kleinen Radius. Im Umkehrschluss heißt dies, dass die Windungsenergien dieses kleinen Radius den Schwingungsenergien des entsprechend großen Kreisradius entsprechen. Da die physikalischen Eigenschaften eines Strings von seiner Gesamtenergie (der Summe aus Windungs- und Schwingungsenergie) abhängen, gibt es physikalisch keinen Unterschied zwischen diesen beiden Radien. Verdeutlicht wird dies nun an einem Beispiel. Der Radius der kompaktifizierten Dimension ist hier das Zehnfache bzw. ein Zehntel der Plancklänge. Bei $R = 10 L_P$ sind die Beiträge der Windungsenergien Vielfache von 10 und die der Schwingungsenergien Vielfache von $1/10 L_P$, bei $R = 1/10 L_P$ sind die Beiträge der Windungsenergien Vielfache von $1/10$ und die der Schwingungsenergien Vielfache von 10. Anhand der Schwingungszahl, der Windungszahl und des Radius lässt sich also die Gesamtenergie eines Strings ermitteln. Dies gilt für jeden beliebigen Radius und seinen reziproken Wert und für eine beliebige Anzahl kompaktifizierter Dimensionen. Das lässt folgende unglaubliche Schlussfolgerung zu: In einem Universum mit dem Radius R sind Massen und Ladungen der Teilchen identisch mit denen in einem Universum mit dem Radius $1/R L_P$. Da die Physik maßgeblich von diesen beiden Größen bestimmt wird, sind diese geometrisch so ungleichen Universen physikalisch nicht zu unterscheiden.

Kommen wir also nun zurück zur T-Dualität. Edward Witten war mit Hilfe dieses eben erläuterten Wissens in der Lage zu beweisen, dass sich die String-Theorien vom Typ IIA und Typ IIB miteinander vereinen lässt. Genauso verhält es sich mit den Theorien O-heterotisch und E-heterotisch. Ein Beispiel: Wenn man den reziproken Kompaktisierungsradius eines Universums nimmt, welches auf der Physik des Typs IIA basiert nimmt und tauscht deren Windungs- und Schwingungsfaktoren, dann erhält man ein Universum, welches sich mit der Physik des Typs IIB beschreiben lässt.

Die zweite wichtige Form ist die S-Dualität. Hierfür ist es notwendig, den Begriff der Kopplungskonstante näher zu erläutern. Die Kopplungskonstante ist ein Wert, der die Wahrscheinlichkeit angibt, mit der sich ein String in ein virtuelles Teilchen-Antiteilchen-Paar aufteilt. Wenn der Wert kleiner sehr viel kleiner als 1 ist, dann ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein String aufteilt gering. Ist er hingegen größer als 1, so teilt sich der String wahrscheinlich häufiger. Das Problem bei einer Kopplungskonstante größer 1 ist, dass er sich sehr negativ auf die Störungsrechnung auswirkt. Wie wir im vorherigen Abschnitt gesehen haben, kann man eine Näherungslösung erhalten, wenn man die verschiedenen Mehr-Schleifen-Prozesse miteinander addiert. Je höher jetzt die Wahrscheinlichkeit einer Aufteilung in

virtuelle String-Pärchen ist, desto mehr Additionen müsste man theoretisch durchführen. Da eine Addition unendlich vieler Glieder aber nicht möglich ist, muss die Reihe einen mathematisch wohldefinierten Bereich besitzen, was das Ergebnis immer ungenauer werden lässt, je größer die Kopplungskonstante wird. Die Störungstheorie ist also bei Kopplungskonstante ≥ 1 so gut wie nicht mehr anwendbar. Also muss man sich bei der Berechnung auf die wenigen Werte beschränken, die tatsächlich bekannt sind – die so genannten BPS-Zustände. BPS-Zustände sind Lösungen der Stringtheorie, welche exakt bekannt sind, ohne dass man die Störungstheorie benötigt. Mit Hilfe dieser BPS-Zustände konnte Witten gegen Mitte der 90er Jahre zusammen mit seinem Kollegen Joe Polchinski nachweisen, dass sich der Typ I bei starker Kopplung genauso verhält wie die O-heterotische bei schwacher Kopplung. Des Weiteren entdeckte Witten, dass die Typ IIB-Theorie selbstdual ist. Dies bedeutet, dass die physikalischen Eigenschaften dieser Theorie bei schwacher Kopplung genauso sind wie bei starker Kopplung.

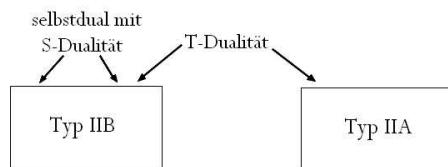
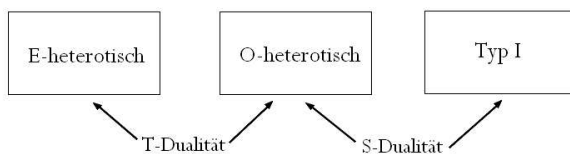


Abbildung 25 :
Verbindung der fünf Theorien mit
Hilfe von Dualitäten

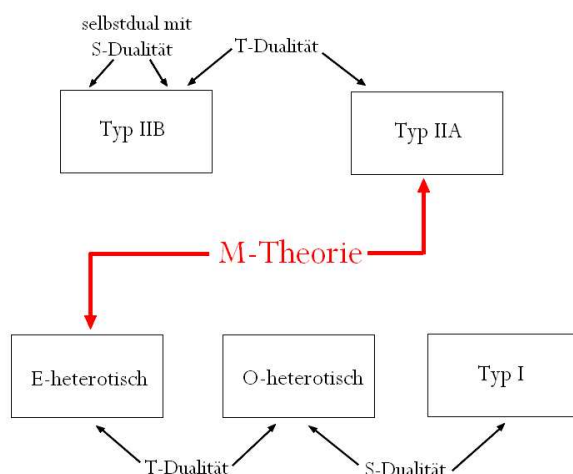


© Fröhner/Päßler 11/08

Diese Erkenntnisse waren ein unglaublicher Durchbruch in der Geschichte der Stringtheorie. Plötzlich war es möglich, die Physik der Stringtheorien bei starker Kopplung zu berechnen, wenn man nur auf die jeweiligen dualen Partner zurückgreift und als Berechnungsgrundlage nutzt. Zwar waren die fünf verschiedenen Theorien nun miteinander verknüpft, aber noch immer fehlte die Vereinigung zu der einheitlichen Theorie, der M-Theorie wie Witten sie nannte. Um das „M“ in diesem Namen ranken sich übrigens viele wilde Vermutungen. Niemand weiß, wofür es wirklich stehen soll. Viele interpretieren es als Membrane, Mystery, Multiverse oder Mother. Einige halten es sogar für ein umgedrehtes W, welches für Witten stehen könnte.

Bei der Erstellung seiner Gleichungen bediente sich Witten einer bereits Jahre vorher aufgestellten Theorie, der Supergravitation. Diese war ein Versuch noch vor der Entdeckung der String-Theorie, die Quantenmechanik und die allgemeine Relativitätstheorie letzten Endes doch noch in einen gemeinsamen Rahmen zu bringen. Dieses Ziel rückte sogar in verhei-

ßungsvolle Nähe, da man sie erstmals in zehn oder auch elf Raumzeitdimensionen formuliert hat. Die elfdimensionale Raumzeit war hierbei am verheißungsvollsten. Unglücklicherweise verlor sich auch diese in hoffnungslosen mathematischen Problemen und Unstimmigkeiten. Zwar erlebte sie in den 80er Jahren ein Comeback, als sich herausstellte, dass sie sich durchaus gut für die Bestimmung von Punktteilchenprozessen bei niedrigen Energien eignet. Auch hieraus entwickelten sich verschiedene Theorien und zwar vier an der Zahl. Eine beschäftigte sich mit der Niederenergie-Punktteilchennäherung vom Stringtheorie Typ I und der O-heterotischen Theorie. Unter der Niederenergie-Punktteilchennäherung versteht man folgendes: Strings sind ausgedehnte Objekte. Wenn man sie aber mit Photonen von viel größerer Wellenlänge beschießt, dann sehen sie aus wie Punktteilchen. Die restlichen drei befassten sich jeweils mit Typ IIA, Typ IIB und dem E-heterotischen Typ. Da zu dieser Zeit die String-Theorien noch von zehn Raumzeitdimensionen ausging, verschwand die Elfdimensionale immer weiter in der Versenkung. Edward Witten war nun nicht nur in der Lage die Dualitäten zwischen den verschiedenen Typen zu zeigen. Er führte nun außerdem eine elfte Raumdimension ein. Sein Ansatz war dabei folgender: Wenn man die Kopplungskonstante eines Strings des Typs IIA oder E-heterotisch stark erhöht, dann erscheint eine weitere Dimension. Der Typ II A-String wächst zu einem geschlossenen so genannten Torus an und der E-heterotische String wird zu einer zweidimensionalen geöffneten Membran. Dadurch war die gesuchte elfte Dimension entdeckt. Dadurch war es nun möglich die elfdimensionale Supergravitation mit der Stringtheorie zu verknüpfen. Bei niederenergetischen Prozessen verhalten sich diese beiden Objekte wie Punktteilchen. Da nun eine zusätzliche Raumdimension besteht, ist deren Niederenergie-Punktteilchennäherung mit der elfdimensionalen Supergravitation gleichzusetzen.



© Fröhner/Päßler 11/08

*Abbildung 26 :
Verbindung der fünf Theorien mit
Hilfe von Dualitäten und der M-
Theorie*

Wie im Bild zu sehen ist, sind nun alle verschiedenen Typen miteinander verknüpft und hochgradig supersymmetrische Situationen lassen sich nun gut berechnen.

Zwar gibt die unglaubliche Komplexität der M-Theorie den Forschern noch immer eine Menge Rätsel auf, da sich mit ihr bemerkenswerte Eigenschaften über die Raumzeit und das gesamte Universum ableiten lassen, aber die Forscher sind zuversichtlich, mit voranschreitender Zeit diese schwierigen Gleichungen immer besser verstehen zu können. Ferner ist die M-Theorie die erste viel versprechende Theorie, die alle vier elementaren Grundkräfte miteinander vereint.

8 Branen und Urknalltheorien

Seit es die Wissenschaft gibt, wird der Frage dem Ursprung der Dinge nachgegangen. In sämtlichen Zeitepochen, in jeglichen Kulturen existierten und existieren noch heute die verschiedensten, oft auch sehr bizarren Geschichten und Erklärungsversuche für die Entstehung der Welt und des gesamten Universums. Auch in der Stringtheorie und in der M-Theorie gibt es solche Erklärungsversuche. Doch um diese zu erläutern, müssen wir erst einmal den Begriff „Brane“ klären.

8.1 Branen und Branwelten

8.1.1 Begrifflichkeit Branen

Die M-Theorie befasst sich mit höher dimensional Objekten, den sogenannten „Branen“ (abgeleitet von dem Wort „Membrane“). Erhöht man die Kopplungskonstante eines eindimensionalen Strings, so wird aus diesem eindimensionalen String ein zweidimensionaler String bzw. eine Brane mit zwei räumlichen Dimensionen, kurz 2-Brane. Eine Brane kann bis zu zehn Raumzeitdimensionen besitzen. Abhängig von der Anzahl „ p “ ihrer Dimensionen werden die Branen als „ p -Brane“ bezeichnet. Jede Brane muss jedoch immer die Zeitdimension enthalten, folglich sind sie $p+1$ -dimensional. Ein Punkt ist also eine „0-Brane“, ein String eine „1-Brane“ und ein Objekt mit 9 Raumdimensionen eine „9-Brane“.

Aufgrund des Zusammenhangs, dass die Masse einer p -Brane ($p > 1$) der String-Kopplungskonstante umgekehrt proportional ist, folgt, dass alle Objekte, außer Strings, auf dieser Brane bei schwacher Kopplung sehr Massereich sind. Um diese zu erzeugen, benötigt man extrem hohe Energien, was zur Folge hat, dass Branen keinerlei Einfluss auf die bisher erörterten Eigenschaften der Strings haben.

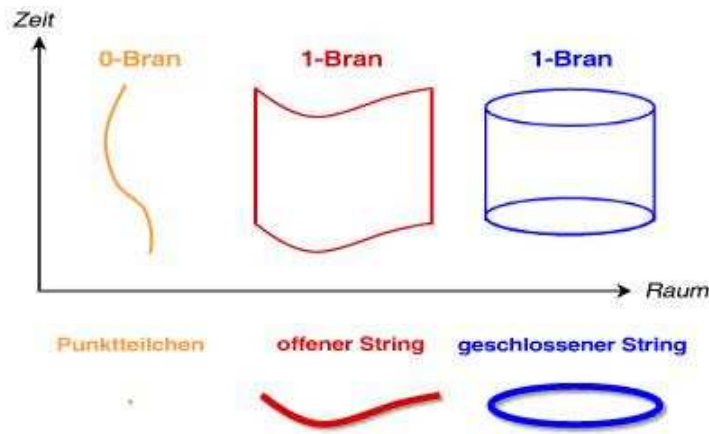


Abbildung 27 :
Entstehung von Branen
[vgl. 18]

Eine besondere Art der p -Branen sind die sogenannten D-Branen. Sie entstehen aus der Tatsache, dass offene Strings im Gegensatz zu geschlossenen Strings zwei offene Enden besitzen, welche bestimmte Randbedingungen erfüllen müssen. Laut der Neumann-Randbedingung können sich die offenen Enden der Strings in allen Dimensionen bewegen. Nach der Dirichlet-Randbedingung können sich die offenen Enden nur in p Dimensionen auf bestimmten p -dimensionalen Objekten bewegen. Dies bedeutet also, dass sich die offenen Enden der Strings nur auf D-Branen bewegen und diese nie verlassen können. Deshalb der Name „D p -Branen“ oder kurz „D-Branen“ wobei das „D“ von Dirichlet kommt. Es existieren allerdings zwei Ausnahmen: die D0-Branen und die D9-Branen. D0-Branen stellen nur einen Punkt in der Raumzeit dar und können sich deshalb nur in der Zeitdimension bewegen. Sie werden als „Solitonen“ bezeichnet.

Vereinfacht gesagt sind „Solitonen“ im Wasser Wellen, die ein bestimmtes, zeitlich konstantes Muster haben und ihre Amplitude nicht mit der Zeit verlieren. Eine Art sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegendes Wellenberg also. Solche Lösungen gibt es auch in Gravitationstheorien. Solitonische Lösungen der Supergravitationstheorien in 10 Dimensionen sind gerade die D p -Branen. Diese duale Beschreibung von D-Branen kommt dadurch zustande, dass sie einerseits Orte sind, wo offene Strings enden, andererseits offene Strings an geschlossene Strings und damit D-Branen an Gravitation koppeln. Das bedeutet D-Branen krümmen den umliegenden Raum, und diese Raumkrümmung ist gerade die Solitonlösung der Supergravitation. Es sind also nicht nur die D0-Branen Solitonen, sondern alle D-Branen.

Da D9-Branen die gesamte Raumzeit einnehmen, können sich Strings mit offenen Enden frei bewegen. Wenn die Enden eines offenen Strings auf verschiedenen D-Branen liegen, sind diese dadurch miteinander verbunden. Es existiert außerdem noch ein Spezialfall: Die D(-1)-Branen. Die sind ein Punkt in Raum und Zeit, trotzdem können Strings darauf enden, sie haben, wegen der fehlenden Raumrichtungen, keine Schwerpunktsbewegung und keine

Vibrationen (also Energie Null) wegen der fehlenden Zeitrichtung. Nichtsdestotrotz treten sie in der Stringtheorie auf, sie repräsentieren nichtstörungstheoretische Anregungen auf Branen, sogenannte Instantonen, und haben damit physikalische Effekte.

Wird einer D-Brane enorme Energie zugefügt, ähnlich der kurz nach dem Urknall, kann diese D-Brane durchaus auf die Größe unseres Universums anwachsen. Aufgrund dieser Überlegung entwickelten Forscher in den letzten Jahren Modelle zur Entstehung und Beschaffenheit unseres Universums.

8.1.2 Das ADD-Szenario

Zuerst einmal ist zu sagen, dass dieses Szenario selbst unter den Physikern sehr spekulativ und umstritten ist. Wir, die Autoren, wollen es trotzdem erläutern, denn es könnte ja eventuell doch zutreffen.

Nach dem ADD-Szenario, benannt nach den Physikern Arkani-Hamed, Dimopoulos und Dvali, besteht unser Universum aus einer riesigen Drei-Brane, welche in eine zehndimensionale Raumzeit eingebettet ist. Wie schon erwähnt, werden alle Teilchen von Schwingungen eines offenen Strings erzeugt außer eines, das Graviton. Es wird von der Schwingung eines geschlossenen Strings erzeugt. Für das ADD-Szenario bedeutet dies, dass wir nicht mitbekommen, dass wir auf einer Drei-Brane leben. Da sich die Enden offener Strings nur auf D-Branen bewegen können sich alle Teilchen - außer das Graviton - frei in unserem Universum bewegen, jedoch können sie es nicht verlassen. Das Graviton, welches durch die Schwingung eines geschlossenen Strings entsteht, ist nicht an die D-Branen gebunden und kann in den Hyperraum zwischen den Branen gelangen. Das würde auch erklären warum Teilchenbeschleuniger das Graviton nicht entdecken, denn es ist nicht an unser Universum gebunden wie die anderen Teilchen die durch das Schwingungsmuster offener Strings entstehen. Neben unserem Universum könnten noch andere Drei-Brane Universen existieren, welche alle parallel in einer vierten Raumdimension, dem so genannten Bulk (auf Deutsch: „Inneres“), nur wenige Millimeter von einander entfernt liegen. Die restlichen sechs Raumdimensionen sind zu Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten aufgewickelt. Nach dieser Theorie kann es durchaus sein, dass auf den anderen D3-Branenuniversen ganze Universen in unserer unmittelbaren Nähe existieren, ohne dass wir bisher etwas davon mitbekommen haben. Im ADD-Szenario gibt es allerdings nun Möglichkeiten wie wir dieses Geheimnis lüften können. Außerdem könnte das ADD-Szenario das Geheimnis um die dunkle Materie lösen. Die Antwort ist folgende: Da sich Gravitonen in der elfdimensionalen Raumzeit frei bewegen können, können diese mit den einzelnen D3-Branen innerhalb eines Bulks wechselwirken. Das,

was uns als dunkle Materie erscheint, ist eigentlich die Materie der anderen Universen auf den anderen D3-Branen. Dies wäre zum einen die Erklärung für dunkle Materie, zum anderen auch der Beweis für weitere D3-Branenuniversen.

8.1.3 Das ekpyrotische und das zyklische Universum

Die Physiker Paul Steinhardt und Neil Turok veröffentlichten 2001 ein Modell zur Entstehung unseres Universums, das ekpyrotische (griechisch für Weltenbrand) Modell. Das Modell besagt, dass vor 15 Milliarden Jahren unser Universum mit einer anderen parallel liegenden D3-Brane kollidierte. Die kinetische Energie, die dabei vorhanden war, wurde bei der Kollision in die uns bekannten Elementarteilchen umgewandelt. Kurz vor der Kollision sorgten quantenmechanische Effekte für wellenartige Unregelmäßigkeiten auf der Oberfläche der Branen. Dies war der Grund für Temperaturschwankungen während des Urknalls und somit sind auch die Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung zu erklären. Das ekpyrotische Modell wurde später zum zyklischen Modell erweitert. Nach diesem Modell durchläuft unser Universum bzw. die beiden Branen immer denselben, endlosen Zyklus: Kollision, Expansion, Kontraktion und wieder von vorne. Genauer betrachtet bedeutet dies, dass nach der Kollision der Branen, wobei Unmengen von kosmischer Strahlung und Materie erzeugt wurden, die Phase der Expansion beginnt. Während dieser kühlt es sich ab wobei sich Sterne, Galaxien und Planeten bilden. Nach einer Billion Jahren beginnt die Phase der Kontraktion, wobei sich die beiden Branen wieder annähern bis zur Kollision. Der Zyklus beginnt erneut. Jedoch hat dieses Modell einen Haken: Irgendwann muss alles angefangen haben! Wieso, wann und warum es zum ersten Zyklus gekommen ist, muss noch geklärt werden. Die beiden Modelle sind sehr interessante Theorien zur Entstehung des Universums, jedoch sind sie noch lange nicht ausgereift und erfordern experimentelle Bestätigungen. Auch hier gilt wieder, dass diese beiden Modelle rein spekulativ und umstritten sind. Die bis hierher erläuterten Szenarien sind Urknalltheorien aus der Sicht der M-Theorie. Kommen wir nun zu einem Szenario aus der Sicht der Stringtheorie.

8.2 Die Entstehung des Universums

Albert Einstein machte mit seiner allgemeinen Relativitätstheorie einen guten Anfang. Aus seiner Arbeit sticht nämlich, sozusagen als Nebeneffekt, die Tatsache heraus, dass das Universum in dem wir leben nicht statisch oder ewig ist. Einstein nahm diese Tatsache jedoch billigend in Kauf und tat es als kleine mathematische Kuriosität ab, denn er selbst glaubte nicht daran. Doch der Physiker Alexander Friedmann entdeckte anhand der Einsteinschen Gleichungen das, was heute als die Urknall-Lösung bezeichnet wird. Er wies nach, dass das

Universum am Anfang aus einem Zustand unendlicher Dichte hervorgegangen sein muss. Auch heute noch befindet es sich in der Expansion.

Nach acht Monaten der Überzeugungsarbeit schaffte es Friedmann auch Einstein von der Richtigkeit seiner eigenen Betrachtungsweise zu überzeugen. Tatsächlich lässt sich mit der heutigen Technik, besonders mit Hilfe des Hubble-Weltraumteleskopes, die ständige Ausdehnung des Universums beobachten und nachweisen. Die Ansicht von der Entstehung des Universums, wie sie sich aus Alexander Friedmanns Auslegung der Einsteinschen Gleichungen entwickelt hat, nennt man auch „Das Standardmodell der Kosmologie“. Es besagt folgendes: Das Universum entstand vor etwa 15 Milliarden Jahren aus einem unendlich kleinen Punkt, in dem sich alle Materie und alle Energien zusammen befanden. Dieser Punkt wird auch als singulärer Punkt bezeichnet, da die in ihm enthaltenen Materien und Energien nicht so vorlagen, wie man sie heute kennt, also klar trennbar und als eigenständige Elemente oder Kräfte bestimmbar, sondern zu einem einzigen Urplasma verbunden. Dies stellt man sich am besten mit verschiedenen Metallen mit jeweils unterschiedlichen Eigenschaften vor, die in einem Schmelztiegel verschmolzen werden. Die resultierende Masse besitzt nun ihre eigenen Eigenschaften und nichts deutet mehr darauf hin, dass sie aus verschiedenen Stoffen entstanden sein könnte, oder - wie in unserem Fall - verschiedene Stoffe aus ihr entstehen könnten. Die Lokalisation dieses singulären Ur-Punktes ist allerdings unphysikalisch, da man in der Physik Unendlichkeiten in Energien und Dichten als nicht natürlich ansieht. Er befindet sich laut der Quantenmechanik an jeder beliebigen Stelle. Alles, was wir heute kennen, war also in einem einzigen Punkt komprimiert und begann sich plötzlich mit unglaublicher Heftigkeit auszudehnen. 10^{-43} Sekunden nach diesem so genannten Urknall (die so genannte Planckzeit) betrug die Temperatur des Urplasmas ca. 10^{32} Kelvin. Das ist etwa zehn Billionen mal heißer als die heißeste Stelle der Sonne. Die Zeit schritt weiter voran und das Plasma begann sich abzukühlen und kleine Klumpen zu bilden. Nach reichlich einer hunderttausendstel Sekunde war es auf ungefähr zehn Billionen Kelvin abgekühlt (dies ist zwar immer noch eine Million mal heißer als die Sonne, aber wir müssen beim Urknall in Superlativen denken). Bei diesen Temperaturen war es den ersten Quarks möglich, sich in Dreiergruppen zusammen zu finden und somit Mesonen und Baryonen entstehen zu lassen. Danach finden sich Baryonen zu Atomkernen zusammen. Eine hundertstel Sekunde später konnten sich bereits die leichtesten Elemente des Periodensystems aus dem Urplasma herausbilden. Im Laufe der nächsten drei Minuten bildeten sich die ersten Atomkerne, besonders die von Helium und Wasserstoff sowie Lithium. Diese drei Minuten werden in der Wissenschaft als „primordiale Nukleosynthese“, oder einfacher als „Ära der Kernreaktionen“ bezeichnet. In den darauf folgenden hunderttausend Jahren passierte eigentlich nichts anderes als immer weiter voranschreitende Ausdehnung und Abkühlung. Als jedoch eine Temperatur von nur noch ein paar tausend Grad erreicht war, sank auch die Geschwindigkeit der wild

umher schießenden Elektronen so weit, dass diese von Atomkernen eingefangen werden konnten. Damit waren die ersten elektrisch neutralen Atome entstanden. Von diesem Punkt an wird das Universum durchsichtig. In den vorherigen Phasen war das Plasma noch erfüllt von einem dichten Schleier aus umher fliegenden Elektronen und Atomkernen. Die Photonen, welche ja als Überträger des Elektromagnetismus fungieren und mit elektrisch geladenen Teilchen reagieren, wurden von den herumschwirrenden Teilchen immer wieder absorbiert und wieder abgestoßen, so dass sie kaum längere Wege zurücklegen konnten. Da diese ständige Wechselwirkung die Bewegung der Photonen stark einschränkte, dürfte das Universum bis zu eben genannten Punkt weitestgehend undurchsichtig gewesen sein. Doch nun entstanden ja elektrisch neutrale Teilchen, die die Bewegung der Photonen kaum noch behinderten und damit lüftete sich der undurchsichtige Schleier nach und nach.

Etwa eine weitere Milliarde Jahre später waren die Prozesse so weit fortgeschritten, dass sich unter dem Einfluss der Gravitation Planeten, Sterne und ganze Galaxien aus den Urelementen bilden konnten. Dieser Prozess hat sich im Laufe weiterer Milliarden Jahre immer weiterentwickelt, um schließlich zu der Welt zu werden, wie wir sie heute kennen.

Betrachtet man die Thematik des Urknalls aus der Sicht der Stringtheorie, so findet man im Wesentlichen keine gravierenden Unterschiede. Der Anlass für die Stringtheoretiker, sich erneut mit dem Urknall zu befassen, ist folgender: Wie wir wissen, ist das Universum von einer Raumzeit durchzogen. Diese Raumzeit basiert auf der allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein. Sie besitzt aber nur Gültigkeit, wenn die Raumzeit in glatter Form vorliegt. Als am Anfang des Universums aber alles auf einen einzelnen singulären Punkt konzentriert war, war auch die Raumzeit unendlich stark gekrümmt. Also könnte man theoretisch die ART nicht anwenden. Zwar dehnt sich die Raumzeit bereits nach Bruchteilen von Sekunden so stark aus, dass sie ab dann anwendbar ist. Eine Theorie wie die Stringtheorie möchte man also aus dem Grund haben, um genau diese Umgebung, die beim Urknall herrschte, also bei sehr starken Fluktuationen der Raumzeit selbst, mit all der enthaltenen Materie zu beschreiben. Aber die genauen Anfänge sollen anders abgelaufen sein und auch erklären, wieso sich eigentlich nur drei der eigentlich elf Raumdimensionen ausgebildet haben.

Ansatzpunkt hierfür ist folgender: Als zur Planckzeit alle Masse noch auf einen Punkt konzentriert war, waren auch die elf Dimensionen noch auf die Größe eines Calabi-Yau-Raumes zusammengezogen. Als beim Urknall gewaltige Temperaturen auftraten wurden die komprimierten Dimensionen „unruhig“. So wie ein Teilchen schneller und heftiger schwingt, wenn man ihm Energie zuführt, so waren auch die Dimensionen bestrebt auszubrechen und zu expandieren. Durch die heftige Bewegung der Dimensionen bekamen sie immer mehr Risse. Normalerweise werden Risse in Dimensionen dadurch „geflickt“, dass sich gewundene Strings um die Risse wickeln und sie damit verschließen. Wenn sich nun aber gleichzeitig ein

String und ein Antistring um den Riss wickeln wollen, verschmelzen sie zu einem nicht gewundenen String, indem sie sich gegenseitig auslöschen. Ein solcher nicht gewundener String ist nicht in der Lage den entstandenen Riss zu schließen und die Dimension vor der Ausbreitung zu bewahren. Genau dieser Sachverhalt war bei der unsrigen Welt der Fall und zwar gleich an drei Dimensionen. Auch auf die Frage wieso eigentlich genau drei der Dimensionen zur Ausbreitung kamen, gibt es eine recht simple Lösung. Es wurde errechnet, dass sich mit zunehmender Expansion einer Dimension die Wahrscheinlichkeit verringert, dass ein String-Antistring-Paar über einem Riss zusammenstößt und somit ein nicht gewundener String wird. Dieser ganze Sachverhalt ist allerdings nur rein hypothetisch. Bei drei expandierenden Dimensionen ist die Wahrscheinlichkeit für diesen Sachverhalt so gering, dass es eigentlich unmöglich ist. Die Calabi-Yau-Räume verformten sich aufgrund der großen Unruhen zu immer anderen Formen und Gestalten, bis sie schließlich - aufgrund der Abkühlung des Universums - zu ihrer jetzigen Form erstarrten. Das Universum, wie wir es heute kennen, war geboren. Jedoch ist auch diese Erklärung für die Entstehung der drei Dimensionen nur eine von vielen.

9 Erkenntnisse, Zukunftsaussichten und Kritik

Nach all diesen wichtigen und zum Teil auch sehr verworrenen und komplexen Fakten, die die Stringtheorie mit sich bringt, stellt sich natürlich eine Frage: „Was wird in Zukunft aus der Stringtheorie werden?“ Nun ja, diese Frage ist definitiv nicht einfach und vor allem nicht eindeutig zu beantworten. Zunächst wäre zu sagen, dass die Stringtheorie und alles was sie umgibt ein heißer Kandidat ist, um sich zur Weltformel zu entwickeln. Die Idee der Weltformel (engl. Theory of Everything, oder kurz TOE) kursiert schon sehr lange in den Reihen führender Physiker umher. Mit Hilfe dieser Formel sollen sich alle bekannten Phänomene auf Elementarteilchenniveau einheitlich beschreiben lassen. Doch dazu müssten nach der heutigen Ansicht der Dinge die beiden Theorien der Quantenmechanik, welche die mikroskopischen Ereignisse mit verblüffender Genauigkeit zu beschreiben vermag, und die allgemeine Relativitätstheorie, mit der sich der makroskopische Kosmos hervorragend errechnen lässt, zu einer Theorie zusammengefasst werden. Leider ist dies, wie Jahrzehnte lange Forschung gezeigt hat, nicht ganz so einfach und eine Menge hervorragender Wissenschaftler haben sich daran bereits die Zähne ausgebissen. Die Stringtheorie hingegen hat die Besonderheit, dass sie tatsächlich die Quantenmechanik und die allgemeine Relativitätstheorie beinhaltet und diese sinnvoll und anschaulich verbindet.

Damit könnte man nun die Frage nach der Richtigkeit und der Zukunft der Stringtheorie mit einem klaren ja beantworten, oder? Falsch. Eine konkrete Antwort auf diese Frage ist, zu-

mindest momentan, aus verschiedenen Gründen nicht möglich. Zum einen ist vielen „Nicht-Stringtheoretikern“ ein Dorn im Auge, dass die Anwesenheit von eindimensionalen Energiefäden, den Strings eben, oder den vorausgesetzten elf Dimensionen nicht experimentell nachgewiesen worden ist. Die Stringtheorie stützt sich rein auf theoretische Betrachtungen und Gedankenexperimente. Lediglich einige indirekte Messungen sind möglich, doch auch deren Richtigkeit wird von Gegnern der Stringtheorie angezweifelt. Um eine exakte, direkte Messung durchführen zu können, müssten schon Teilchenbeschleuniger von der Größe der Milchstraße gebaut werden, da sich die Größe eines Strings nur auf ein millionstel milliardstel milliardstel Zentimeter (das wäre eine 1 mit 33 Nullen) beläuft. Und dass dies ein unrealisierbares Vorhaben ist, muss, denke ich, nicht näher erklärt werden. Die Teile der Stringtheorie fügen sich nach und nach zu einem einheitlichen Bild zusammen, wie bei einem Puzzle. Allerdings gibt es jetzt dazu einen neuen Ansatz, der in den nächsten Jahren die Frage nach der Existenz von Strings endgültig beantworten könnte. Im Frühjahr 2008 wurde in Cern bei Genf der „Large Hadron Collider“, der größte Teilchenbeschleuniger der Welt, in Betrieb genommen. Mit Hilfe des LHC werden Protonen auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und zur Kollision gebracht. Die Teilchen zerbersten in Unmengen weiterer Teilchen, die in alle Richtungen davonfliegen und von Detektoren für das menschliche Auge sichtbar gemacht werden. Die Signatur dieser „Bruchstücke“ könnte darüber eine Aussage machen, ob es denn tatsächlich höhere Dimensionen gibt. Doch viele Forscher treten der Stringtheorie dennoch mit Skepsis gegenüber, aufgrund der völlig unplausibel scheinenden zusätzlichen Dimensionen, welche neben unserem noch unendlich viele andere Universen, viele davon mit vollkommen unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften als unseres, beschreibt.

Aber auch die extrem komplizierten Gleichungen der Theorie sind ein großes Hindernis. Es gibt derzeit niemanden, der diese Formeln restlos lösen kann. Ferner sind diese komplizierten Gleichungen lediglich perturbativ zu lösen, das heißt man kann, aufgrund der bereits erläuterten Störungstheorie nur einen ungefähren Wert erhalten.

All dies und noch einiges mehr wird der Stringtheorie von nicht Gegnern vorgeworfen, während Befürworter ihre Forschungen immer weiter vertiefen um am Ende vielleicht doch noch alle eines Besseren zu belehren. Wie sich die Stringtheorie im Laufe der nächsten Jahre, Jahrzehnte oder vielleicht sogar Jahrhunderte entwickeln wird, bleibt noch abzuwarten. Vielleicht behält sie ihre jetzige Form bei und wird lediglich immer weiter vertieft, um am Ende doch Anspruch auf die Weltformel erheben zu können. Vielleicht ändert sich ihre Form in den zukünftigen Jahren aber auch so radikal, dass sie selbst heutige führende Physiker nicht mehr wieder erkennen würden. Oder aber sie wird wieder verworfen werden, um einer neuen Theorie Platz zu machen, die zu ihrer Zeit genauso kontrovers und neuartig sein wird, wie es

die Stringtheorie in der heutigen Zeit ist. Was die Zukunft der Stringtheorie bringen wird, bleibt also abzuwarten. Wir können hier nur Vermutungen anstellen und der Dinge harren, die da kommen mögen.

Nachdem wir uns nun ausführlich mit der Stringtheorie und deren Eigenschaften beschäftigt haben, haben wir wichtige Erkenntnisse davon gewonnen. Wir sind der Meinung, dass eine Theorie, bei der so viel zusammenpasst, als wäre es für einander gemacht, nicht gänzlich falsch sein kann. Nicht umsonst haben sich zahlreiche Spitzenphysiker jahrelang mit den anfänglichen Ungereimtheiten herumgeschlagen, um da anzukommen, wo sie jetzt sind. Die extrem paradoxen Ideen, die darin enthalten sind, sind - wie wir finden keinerlei – Anhaltspunkt dafür, dass die Theorie auch tatsächlich falsch sein muss. Einsteins Relativitätstheorie war in ihren jungen Jahren auch noch aufgrund der zum Teil schwer oder für Laien gar nicht vorstellbaren Ergebnisse schwerer Kritik ausgesetzt. Heutzutage wagt es niemand mehr die Richtigkeit dieser Gleichungen anzuzweifeln. Genauso wird es sich unserer Meinung nach mit der Stringtheorie verhalten. Vielleicht wird sie nicht in ihrer jetzigen Form zur „Weltformel“ taugen, aber höchst wahrscheinlich werden die darin enthaltenen Ideen bestehen bleiben. Die Welt braucht von Zeit zu Zeit eine Revolution, um bestehen zu bleiben und sich weiter zu entwickeln. Die Forscher scheinen mit ihrer Arbeit zur Stringtheorie jedoch ganz nah an der Entwicklung der „Weltformel“ zu sein.

Vielleicht nehmen wir uns als Menschen aber auch zu viel heraus, wenn wir versuchen, die Natur komplett zu verstehen und uns zu unterwerfen. Dabei übersehen wir oft, dass wir selber nichts weiter als ein Teil dieser Natur sind. Vielleicht ist dies ja auch die Geschichte der Weiterentwicklung: ein ewiges „Ganz-Nah-Dran“...

Personenrgister: Physiker

Calabi, Eugenio (* 11. Mai 1923)

- italienischer Mathematiker mit Fachgebiet Differentialgeometrie

Demokrit (* 460 v. Chr. † 371 v. Chr.)

- Vorsokratiker und Naturphilosoph

Einstein, Albert (* 14. März 1879 † 18. April 1955)

- schweizerischer Physiker, der mit seiner Physik maßgeblich das Bild der modernen Physik prägte

Euler, Leonhard (* 15. April 1707 † 18. September 1783)

- sehr bedeutender schweizerischer Mathematiker

Galilei, Galileo (* 15. Februar 1564 † 8. Januar 1642)

- italienischer Mathematiker, Physiker und Astronom, der wichtige Entdeckungen auf all diesen Gebieten machte

Faraday, Michael (* 22. September 1791 † 25. August 1867)

- englischer Mathematiker und Chemiker

Glashow, Sheldon Lee (* 5. Dezember 1932)

- US-amerikanischer Physiker und Nobelpreisträger

Goudsmit, Samuel Abraham (* 11. Juli 1902 † 4. Dezember 1978)

- niederländischer Kern- und Atomphysiker

Green, Michael Boris (* 22. Mai 1946)

- ist ein britischer Physiker und Vorreiter in der Stringtheorie

Gross, David Jonathan (* 19. Februar 1941)

- US-amerikanischer Physiker Nobelpreisträger

Harvey, Jeffrey (* 28. Dezember 1957)

- kanadischer Wissenschaftler, der sich in vielen wissenschaftlichen Bereichen, unter anderem Biologie und Physik, betätigte.

Heisenberg, Werner Karl (* 5. Dezember 1901 † 1. Februar 1976)

- bedeutender Physiker des 20. Jahrhunderts und Nobelpreisträger

Kaluza, Theodor Franz Eduard (* 9. November 1885 † 19. Januar 1954)

- deutscher Physiker und Mathematiker

Klein, Oskar Benjamin (* 15. September 1894 † 5. Februar 1977)

- schwedischer Physiker

Kopernikus, Nikolaus (* 19. Februar 1473 † 24. Mai 1543)

- einer der bedeutendsten Astronomen des Abendlandes

Laplace, Pierre Simon (* 28. März 1749 † 5. März 1827)

- französischer Mathematiker und Astronom

Martinec, Emil (* 1958)

- US-amerikanischer theoretischer Physiker mit Spezialisierung auf die Stringtheorie

Maxwell, James Clark (* 13. Juni 1831 † 5. November 1879)
- schottischer Physiker.

Mendelejew, Dimitri Iwanowitsch (* 8. Februar 1834 † 20. Januar 2. Februar 1907)
- russischer Chemiker, der sich schon sehr früh mit den Elementen beschäftigte

Michelson, Albert (* 19. Dezember 1852 † 9. Mai 1931)
- war ein amerikanischer Physiker deutscher Herkunft

Nambu, Yoichiro (* 18. Januar 1921)
- japanischer Physiker und Nobelpreisträger

Newton, Isaac (* 4. Januar 1643 † 31. März 1727)
- englischer Physiker, Mathematiker, Astronom, Alchemist, Philosoph und Verwaltungsbeamter

Nielsen, Holger (* 25. August 1941)
- dänischer theoretischer Physiker und Professor für Hochenergiephysik

Oerstedt, Hans Christian (* 14. August 1777 † 9. März 1851)
- dänischer Physiker und Chemiker

Pauli, Wolfgang (* 25. April 1900 † 15. Dezember 1958)
- einer der bedeutendsten Physiker des 20. Jahrhunderts und Nobelpreisträger

Polchinski, Joe (* 16. Mai 1954)
- US-amerikanischer theoretischer Physiker mit Schwerpunkt auf der Stringtheorie

Rhodes, Ryan
- entwickelte zusammen mit David Gross, Jeff Harvey und Emil Martinec die heterotische Stringtheorie

Salam, Abdul (* 29. Januar 1926 † 21. November 1996)
- pakistanischer Physiker und erster muslimischer Nobelpreisträger

Scherk, Joel (* 1946; † 1979)
- französischer theoretischer Physiker, der hauptsächlich über Stringtheorie und Supergravitation arbeitete

Schrödinger, Erwin (* 12. August 1887 † 4. Januar 1961)
- österreichischer Physiker und Wissenschaftstheoretiker. Er gilt als einer der Väter der Quantenphysik und erhielt dafür 1933 den Nobelpreis für Physik.

Schwarz, John (* 1941)
- ist ein aus den USA stammender theoretischer Physiker. Zusammen mit Michael Green, Leonard Susskind und Edward Witten gilt er als einer der Väter der Stringtheorie.

Schwarzschild, Karl (* 9. Oktober 1873 † 11. Mai 1916)
- war ein deutscher Astronom und Physiker und gilt als einer der Wegbereiter der modernen Astrophysik

Schwinger, Julian (* 12. Februar 1918 – † 16. Juli 1994)
- US-amerikanischer theoretischer Physiker

Susskind, Leonard (* 1940)
- US-amerikanischer theoretischer Physiker und Mitbegründer der Stringtheorie
Uhlenbeck, George Eugene (* 6. Dezember 1900 † 31. Oktober 1988)

- US-amerikanischer Physiker niederländischer Herkunft

Veneziano, Gabriele (* 7. September 1942)

- italienischer Physiker, der als einer der Begründer der Stringtheorie gilt

Weinberg, Steven (* 3. Mai 1933)

- US-amerikanischer Physiker und Nobelpreisträger

Wheeler, John Archibald (* 9. Juli 1911 † 13. April 2008)

- war ein US-amerikanischer theoretischer Physiker

Witten, Edward (* 26. August 1951 in Baltimore, Maryland)

- US-amerikanischer Mathematiker und Physiker

Yau, Shing-Tung (* 4. April 1949)

- chinesischer Mathematiker, der auf dem Gebiet der Differentialgeometrie, insbesondere der Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten arbeitet

Quellenverzeichnis

- [1] Arroyo Camejo, Silvia: Skurrile Quantenwelt. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2006
- [2] Greene, Brian: Das elegante Universum. München: Wilhelm Goldmann-Verlag
- [3] Greene, Brian: Der Stoff, aus dem der Kosmos ist. München: Wilhelm Goldmann-Verlag April 2008
- [4] Gribbin, John: Schrödingers Kätzchen und die Suche nach der Wirklichkeit. Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch Verlag GmbH Juni 1998
- [5] Dirk Huenniger: Die Stringtheorie.
http://de.wikibooks.org/wiki/Die_Stringtheorie__Eine_popul%C3%A4rwissenschaftliche_Einf%C3%BChrung (11:36, 1. Jan. 2008)
- [6] Ulm: Beta Zerfall.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Beta-Zerfall> (12:33, 11.Mär. 2009)
- [7] VolkovBot: Der Quantenschaum.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenschaum> (19:41, 28 Jan. 2009)
- [8] Rjwilmsi: History of String Theory.
http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_string_theory (21:00, 27 Jan. 2009)
- [9] Grundlagen der SRT und ART
<http://einstein-online.info/de/Einsteiger.html> (19:22, 21 Okt. 2008)
- [10] Andreas Müller:
http://www.wissenschaft-online.de/Astrowissen/Astro_sl_schw.html
- [11] http://www.drillingsraum.de/room-10_plus_eine_dimension_2/10_plus_eine_dimension_si... (geöffnet am 23.06.2008)
- [12] <http://www.weltderphysik.de/de/938.php> (geöffnet am 23.06.2008)
- [13] <http://www.gm.nw.schule.de/~moltke/brane.htm> (geöffnet am 23.06.2008)
Bildmaterial:

- [14] <http://www.phylex.de/data/pic/blackhole/strings.gif> (18:50, 12. Jan. 2009)
- [15] http://www.maxmat.de/physik/images/stringtheorie_1.gif (12:39, 10. März 2009)
- [16] <http://de.wikibooks.org/wiki/Datei:ElectronPositronAnnihilation.svg> (13:12, 10. März 2009)
- [17] Stringtheorie, Kandidat für die TOE
[://www.techfreak.de/physikStringtheorie.htm](http://www.techfreak.de/physikStringtheorie.htm) (13:48, 10. März 2009)
- [18] http://www.fs.lmu.de/gaf/Images/einstein/wise_0405/05_profs/dbranes.jpg
(14:01, 10. März 2009)

Selbstständigkeitserklärung

Den Inhalt der BELL erarbeiteten die beiden Autoren grundsätzlich gemeinsam.

Im speziellen bearbeitete:

P. Fröhner die Punkte 1; 2; 4 und 7

T. Päßler die Punkte 3; 5; 6.

Die Punkte 0; 8 und 9 wurden gemeinsam erstellt.

Wir erklären, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Hilfsmittel als angegeben verwendet haben. Insbesondere versichern wir, dass alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht haben.

Niederwürschnitz, den 11.02.2009

