P

Brian Greene

DAS ELEGANTE UNIVERSUM

Superstrings, verborgene Dimensionen und die Suche nach der Weltformel

Aus dem Amerikanischen
von Hainer Kober

Pantheon

Die Originalausgabe erschien 1999 unter dem Titel
»The Elegant Universe. Superstrings, Hidden Dimensions,
and the Quest for the Ultimate Theory«
bei W. W. Norton & Company, New York.

Der Verlag behält sich die Verwertung des urheberrechtlich
geschützten Inhalts dieses Werkes für Zwecke des
Text- und Data-Minings nach § 44 b UrhG ausdrücklich vor.
Jegliche unbefugte Nutzung ist hiermit ausgeschlossen.

FSC www.fsc.org MIX Papier | Fördert gute Waldnutzung FSC® C083411

Penguin Random House Verlagsgruppe FSC® N001967

1. Auflage
Copyright © 2024 by Pantheon Verlag
in der Penguin Random House Verlagsgruppe GmbH,
Neumarkter Straße 28, 81673 München
Copyright © 2024 by Brian Greene
Copyright © der deutschsprachigen Ausgabe 2000/2024
by Siedler Verlag, München
Die Seiten 464–477 wurden von Markus Pössel übersetzt
Wissenschaftliche Beratung und Redaktion: Markus Pössel
Umschlaggestaltung: Büro Jorge Schmidt,
unter Verwendung einer Vorlage von Design Team München
Umschlagillustration: The ATTIK Design Inc., San Francisco
Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck
Printed in Germany
ISBN 978-3-570-55501-9

www.pantheon-verlag.de

Meiner Mutter
und dem Andenken meines Vaters
in Liebe und Dankbarkeit

Inhalt

Vorwort zum fünfundzwanzigjährigen Jubiläum
von *Das elegante Universum* I

Vorwort 9

Teil I
An vorderster Wissensfront 15

KAPITEL 1
Von Strings gefesselt 17

Teil II
Das Dilemma von Raum, Zeit und Quanten 37

KAPITEL 2
Raum, Zeit und das Auge des Betrachters 39

KAPITEL 3
Von Krümmungen und Kräuselwellen 72

KAPITEL 4
Mikroskopische Mysterien 108

KAPITEL 5
Notwendigkeit einer neuen Theorie:
Allgemeine Relativitätstheorie versus Quantenmechanik 145

Teil III
Kosmische Symphonie 161

KAPITEL 6
Nichts als Musik: Die Grundlagen der Superstringtheorie 163

KAPITEL 7
Das »Super« in Superstrings 198

KAPITEL 8
Mehr Dimensionen, als das Auge sieht 218

KAPITEL 9
Der unwiderlegbare Beweis: Experimentalspuren 246

Teil IV
Stringtheorie und die Beschaffenheit der Raumzeit 267

KAPITEL 10
Quantengeometrie 269

KAPITEL 11
Risse in der Raumzeit 305

KAPITEL 12
Jenseits der Strings: Auf der Suche nach der M-Theorie 327

KAPITEL 13
Schwarze Löcher: Aus der Sicht der String/M-Theorie 370

KAPITEL 14
Kosmologische Gedankenspiele 399

Teil V
Vereinigung im 21. Jahrhundert 429

KAPITEL 15
Aussichten 431

Anmerkungen 449

Glossar der Fachbegriffe 479

Literatur 495

Register 497

Nachwort zur Jubiläumsausgabe 513

Vorwort zum fünfundzwanzigjährigen Jubiläum von *Das elegante Universum*

Es ist ein Sakrileg, wenn Eltern bekennen, dass sie ihre Kinder nicht alle gleich lieben, was jedoch nicht für Autoren gilt, die gestehen, dass sie Favoriten unter ihren Büchern haben. Zwar trug jedes meiner Bücher entscheidend zu meinen Ansichten über wichtige Aspekte meiner Disziplin bei – unter anderem die Raumzeit (*Der Stoff, aus dem der Kosmos ist*), das Multiversum (*Die verborgene Wirklichkeit*) und die Sinnsuche der Menschheit (*Bis zum Ende der Zeit*), doch mein erstes Buch – in erster Linie der Stringtheorie gewidmet – nimmt für mich eine Sonderstellung ein.

Ich muss zugeben, dass mein Herz einen Aussetzer tat, als sich die Erstauflage des *Eleganten Universums* zum fünfundzwanzigsten Mal jähren sollte. Nicht, weil mein erstes literarisches Erzeugnis der Welt noch einmal präsentiert werden sollte, sondern des beunruhigenden Umstands wegen, dass ein Vierteljahrhundert vergangen war seit jenem Schaffensrausch, in dem ich bis spät in die Nacht an den Berechnungen saß und die jugendliche Energie spürte, die die Begeisterung für den Schreibprozess befeuerte. Zwar zähle ich mich noch nicht zur alten Garde – eine Einordnung, gegen die ich mich entschieden wehren werde, bis ich, so Gott will, ein neues Vorwort für die Ausgabe zum fünfzigjährigen Jubiläum schreibe. Da meine erste Forschungsarbeit vor etwa vierzig Jahren erschien, habe ich mit dem *Eleganten Universum* erheblich mehr als die Hälfte meiner Zeit als Physiker gelebt, weit mehr als mit meiner Frau und meinen Kindern. Außerdem habe ich zwei Jahre lang eine Fernsehadaption von *Das elegante Universum* geschrieben und moderiert, Hunderte von öffentlichen Vorträgen über das Buch gehalten (einen besonders erwähnenswerten vor der Königin der Niederlande) und Zehntausende von Briefen und E-Mails zu dem Thema erhalten. Insofern besteht kein Zweifel daran, dass *Das elegante Universum* mein Leben nachhaltig geprägt hat.

Ursprünglich dachte ich daran, jedes Kapitel einer neuen Ausgabe auf den aktuellsten wissenschaftlichen Stand zu bringen, wobei

ich alle Abschnitte neu schreiben wollte, die einem jungen Autor an der Wende zum 21. Jahrhundert gut zu Gesicht gestanden haben mochten, aber Jahrzehnte später anachronistisch wirken dürften. Als ich damit begann, bemerkte ich jedoch rasch, dass die wissenschaftlichen Ausführungen kaum einer Korrektur bedurften und die Unmittelbarkeit der Darstellung verloren zu gehen drohte. Daher beschloss ich, den ursprünglichen Text nicht zu verändern, sondern stattdessen ein zusätzliches Kapitel in Gestalt eines Nachworts hinzuzufügen, in dem ich die Hauptentwicklungen seit der Erstveröffentlichung des *Eleganten Universums* umreißen wollte.

Bei der Abfassung dieses Kapitels kristallisierte sich noch ein anderer Umstand heraus: Die vergangenen fünfundzwanzig Jahre waren eine so erstaunlich produktive Phase, dass eine vollständige Beschreibung der Fortschritte ein neues Buch erfordert hätte. Ja, ich bin in der Tat versucht, eine Fortsetzung des *Eleganten Universums* zu schreiben – und eines Tages mache ich es vielleicht auch –, aber in dieser Ausgabe zum fünfundzwanzigjährigen Jubiläum liefere ich dem Leser stattdessen eine straffere Zusammenfassung der wichtigsten Ereignisse, die ich auf drei grundlegende Entwicklungen beziehe.

Die erste Kategorie dieser Neuerungen umfasst Laborexperimente und astronomische Beobachtungen. Das erfreulichste Experimentalergebnis seit der Veröffentlichung des *Eleganten Universums* war die Entdeckung des Higgs-Boson – des letzten fehlenden Teils des Standardmodells der Teilchenphysik, ein beeindruckendes, wenn auch weithin erwartetes Resultat, das Peter Higgs und François Englert verdientermaßen den Nobelpreis eintrug. Hingegen war das bedeutendste negative Ereignis der erfolglose Versuch, Belege für eine hypothetische Eigenschaft der Natur zu finden, die wir als Supersymmetrie bezeichnen (wie in Kapitel 7 erörtert und im Nachwort rückblickend betrachtet). Da das »Super« in Superstringtheorie eine Abkürzung für Supersymmetrie ist, bedarf der Umstand, dass experimentelle Bestätigung bisher nicht gelungen ist, einer eingehenden Bewertung, die ich im Nachwort vornehme.

In der beobachtenden Astronomie waren der unerwartetste Fortschritt während des letzten Vierteljahrhunderts die Forschungsarbeiten von Saul Perlmutter, Adam Riess und Brian Schmidt und ihren jeweiligen Teams, in denen sich bei eingehender Beobachtung von Supernova-Explosionen zeigte, dass sich die Expansion des Weltraums nicht etwa, wie fast einhellig erwartet, verlangsamt, sondern beschleunigt. Zugegeben, die Bedeutung dieses Resultats für eine Theorie, die sich mit subatomaren Strings beschäftigt, ist nicht unbe-

dingt ersichtlich, bezieht es sich doch auf kosmische Größenverhältnisse. Doch wie ich im Nachwort erläutere, steht die beschleunigte Expansion des Raums in enger Beziehung zu den Quantenmerkmalen der Mikrowelt und wirft verblüffende Fragen auf, für die die Stringtheorie eine neue, wenn auch umstrittene Antwort liefert.

Die zweite Entwicklung betrifft Einsteins philosophische Vorliebe für eine Realität, in der die Antwort auf seine zentrale Frage »Hatte Gott eine Wahl bei der Erschaffung des Universums?« Nein lauten würde – eines Universums nämlich, dessen Gesetze und Eigenschaften keine Willkür oder Flexibilität erlauben und daher so unausweichlich sind wie das U nach dem Q im traditionellen Schriftdeutsch. Die uralte Frage »Warum ist das Universum, wie es ist?« fände dann die bestechende Antwort: »Weil das Universum nicht anders hätte sein können.« In den frühen Tagen der Stringtheorie nahmen viele Forscher an, die Theorie werde diese Erwartung erfüllen. Schließlich weist die Stringtheorie viele unvermeidliche Aspekte auf: Materie- und Kraftteilchen werden nicht willkürlich in die Theorie eingegeben, sondern ergeben sich aus ein und derselben Quelle – schwingenden Strings. Außerdem werden die Eigenschaften von Teilchen nicht entsprechend der experimentellen Werte ausgewählt, sondern in allen Einzelheiten von den Schwingungsmustern bestimmt, zu denen die Strings fähig sind, wodurch die Merkmale dieser grundlegenden Bestandteile im Prinzip festgelegt werden.

Doch in der Praxis mussten die Forscher, als sie die Stringtheorie eingehender untersuchten, von der erwarteten Unausweichlichkeit einige Abstriche machen. Es begannen sich andere Gründe für größere Flexibilität zu zeigen (z. B. in Form der von der Theorie verlangten Extradimensionen, wie in Kapitel 8 erörtert). Und so zeichnete sich in den 2000er Jahren eine alternative Auffassung ab, die denkbar weit von Einzigartigkeit und Unvermeidlichkeit entfernt war. Demnach könnte unsere Wirklichkeit in Wahrheit Teil eines ausgedehnten Multiversums sein – eine Wirklichkeit also, die viele, vielleicht sogar unendlich viele, Universen umfasst. Unter diesem Aspekt wird aus der Frage »Warum ist das Universum, wie es ist?« die so ganz andere Aussage: »Dort draußen gibt es jedes mögliche Universum, und wir befinden uns in diesem, weil seine Merkmale die Existenz unserer Lebensform ermöglichen.« Im Nachwort werde ich diese Ideen erläutern, aber ich muss darauf hinweisen, dass das Konzept des Multiversums auch in der Stringtheorie strittig ist.

Die dritte Entwicklung, die wichtigste von allen, trägt die einschüchternde Bezeichnung AdS/CFT-Korrespondenz. Der Physiker

Juan Maldacena hat sie in einer Arbeit vorgeschlagen, die just zu dem Zeitpunkt erschien, als ich letzte Hand an *Das elegante Universum* legte. Damals habe ich das Papier in einer Endnote zu Kapitel 15 erwähnt, konnte aber die glorreiche Zukunft des Artikels nicht ahnen, die ihn zum meistzitierten Artikel der Physikgeschichte werden ließ. Im Nachwort werde ich Sie mit der Kernaussage und den umwälzenden Implikationen des Aufsatzes bekannt machen, doch hier soll die Feststellung genügen, dass die Arbeit eine grundlegende Neubewertung von Raum, Zeit, Gravitation und Stringtheorie liefert. Gar nicht so schlecht.

Schließen möchte ich dieses Vorwort mit zwei Bemerkungen, die als Richtlinien zu einer vernünftigen Bewertung aller wissenschaftlichen Unterfangen beitragen können, etwa der Stringtheorie, aber auch zur Klärung meiner Gedanken über die Rolle von Büchern wie dem *Eleganten Universum*.

Theoretische Forschung lässt sich nicht nach Zeitplan betreiben. Man kann nicht auf die Uhr blicken, ungeduldig mit dem Fuß wippen, jene Menschen zur Eile antreiben, die die Grenzen unseres Wissens entscheidend erweitern, und sie tadeln, weil ein revolutionärer Durchbruch auf sich warten lässt. Anders verhält es sich mit einem Teleskop oder einem Teilchenbeschleuniger. Dort ergeben sich aus gut durchdachten Plänen Zeitvorgaben (und Kostenrahmen), an die sich die Forscher zu halten haben. Zwar lassen sich auch einige theoretische Arbeiten planen (Software zu schreiben, um eine Simulation durchzuführen, oder eine bestimmte Anzahl von Quantenprozessen zu berechnen), aber die Fortschritte wirklich grundlegender Forschungsarbeiten (Suche nach den urzeitlichen Gesetzen des Universums, Beschaffenheit der Raumzeit und so fort) lassen sich beim besten Willen nicht vorhersagen. Dabei handelt es sich nicht allein um die Feststellung, dass die meisten von uns nicht angeben können, wann sie den nächsten guten Einfall zur Lösung dieses Problems oder zur Überwindung jener Hürde haben werden. Zwar trifft das sicherlich zu, aber mir geht es noch um einen anderen, charakteristischen Aspekt des Forschungsprozesses: Fortschritte erschließen häufig unbekannte Gebiete, die es zu vermessen gilt. Die Sichtung dieser neuen Forschungsbereiche ist zeitaufwendig und fördert im besten Fall noch weitere fruchtbare Felder zutage, die der weiteren Erkundung harren.

Der Aspekt ist so offensichtlich und wird trotzdem gelegentlich in der Bewertung der Stringtheorie übersehen. Es gibt eine kleine, aber lautstarke Gruppe von Kritikern der Stringtheorie, die in vol-

lem Ernst Dinge sagen wie »Vor langer Zeit habt ihr Stringtheoretiker versprochen, alle grundlegenden Gesetze der Quantengravitation vorzulegen. Warum ist das noch nicht geschehen?« oder »Ihr Stringtheoretiker habt jetzt Richtungen eingeschlagen, mit denen ihr nie gerechnet habt«, worauf ich – in umgekehrter Reihenfolge – antworte: »Klar, die Erkundung des Unbekannten ist so spannend, weil man neue Richtungen entdeckt«, und: »Das ist doch nicht euer Ernst!«

Tatsächlich machten die Stringtheoretiker in den letzten Jahren eine Fülle von Entdeckungen, mit denen sie Riesenprobleme bewältigten und der Lösung lange bestehender Rätsel erheblich näher kamen. Deshalb erfreut sich das Thema bei Studierenden auch weiterhin großer Beliebtheit, während die Stringforscher nach wie vor zu neuen Ufern unterwegs sind. Wenn eine wissenschaftliche Disziplin ins Stocken gerät, machen sich natürlich Abnutzungserscheinungen bemerkbar, weil Spitzenforscher ihre Zeit nicht lange auf einem antriebslosen Schiff vergeuden werden. Zwar können Moden das wissenschaftliche Urteil eine Weile trüben, doch die Jahrzehnte, in denen sich die Stringtheorie dank der kreativsten, kritischsten und klügsten Köpfe des Planeten stürmisch entwickelte, sind das überzeugendste Maß für die Lebendigkeit der Disziplin. Wissenschaftler wählen mit dem kostbarsten Gut, das sie haben – ihrer Zeit. Daran gemessen und, entsprechend, an den faszinierenden neuen Ideen gemessen, die überwältigende neue Forschungsperspektiven eröffneten, bleibt die Stringtheorie eine Quelle für Inspiration, Erkenntnis und raschen Fortschritt.

Die zweite Bemerkung betrifft den Ausdruck »populärwissenschaftliches Schreiben«, eine Charakterisierung, für die ich mich nie habe erwärmen können. Gewiss, ein Ziel allgemein verständlicher Wissenschaftsbücher liegt darin, einige der erstaunlichsten wissenschaftlichen Erkenntnisse einem »Laienpublikum« zugänglich zu machen. Aber der Wunsch, dieses Bedürfnis zu befriedigen, dürfte nur teilweise erklären, warum manche Wissenschaftler sich einige Zeit eine Auszeit vom Lehr- oder Forschungsbetrieb nehmen, um Bücher für Nichtwissenschaftler zu schreiben. Denn es gibt noch ein zweites – und für mich wichtigeres – Ziel: meine Denkweise zu verändern. Durch die Wahl der richtigen Metapher oder des richtigen Bildes und deren Vermittlung durch die richtige Anekdote oder das richtige Narrativ kann ein Autor seine Leserschaft – Laien wie Forscher – über die Extreme des vagen Verstehens und des rein mathematischen Wissens hinausführen und ihnen stattdessen einen intui-

tiven Zugriff auf einen Gegenstand ermöglichen, der sonst eine verschwommene wissenschaftliche Entdeckung bliebe. Solch ein »Bauchverständnis« kann sich für junge Forscher und erfahrene Wissenschaftler als wesentliche Orientierungshilfe auf den Reisen durch spärlich erhellte Bereiche erweisen, in denen man bemüht ist, die Grenzen der Erkenntnis hinauszuschieben und gleichzeitig den Horizont des kulturellen Zeitgeistes so zu erweitern, dass Wissenschaft als erstaunlich kreatives, äußerst wirkungsvolles und zutiefst menschliches Bemühen um ein besseres Verständnis für unseren Platz in der kosmischen Ordnung begriffen wird.

Es ist nicht an mir, darüber zu urteilen, ob *Das elegante Universum* oder eines meiner anderen Bücher dieses hehre Ziel erreicht hat, aber zweifellos ist nach jedem Buch meine eigene Fähigkeit, höchst abstrakte Gegenstände zu reflektieren, auf eine neue Stufe gelangt. Etwas Ähnliches wünsche ich mir für alle meine Leserinnen und Leser.

Vorwort

Die letzten dreißig Jahre seines Lebens hat Albert Einstein damit verbracht, unablässig nach einer sogenannten einheitlichen Feldtheorie zu suchen – einer Theorie, die in der Lage sein sollte, die Naturkräfte in einem einzigen umfassenden und schlüssigen System zu beschreiben. Dabei ging es Einstein durchaus nicht um die Dinge, die wir häufig mit wissenschaftlichen Bemühungen verbinden, etwa den Versuch, dieses oder jenes experimentelle Ergebnis zu erklären. Vielmehr beseelte ihn die leidenschaftliche Überzeugung, das Universum werde, richtig verstanden, am Ende seine tiefste und wunderbarste Wahrheit offenbaren: die Einfachheit und Kraft der Prinzipien, auf denen es beruht. Einstein wollte die Gesetzmäßigkeit des Universums mit nie zuvor erreichter Klarheit beschreiben, damit es sich der staunenden Menschheit in seiner ganzen Schönheit und Eleganz erschließe.

Diesen Traum hat sich Einstein nicht erfüllen können, vor allem, weil er unter höchst ungünstigen Bedingungen antreten mußte: Damals wurden viele wichtige Eigenschaften der Materie und der Naturkräfte noch gar nicht oder bestenfalls unzulänglich verstanden. Doch in den letzten fünfzig Jahren hat jede neue Physikergeneration – über viele Umwege und Sackgassen – Entdeckung um Entdeckung zusammengetragen, die Arbeit der Vorgänger ergänzt und auf diese Weise die Voraussetzung zu einem immer vollständigeren Bild des Universums geschaffen. Heute, lange nachdem Einstein sich auf seine vergebliche Suche nach einer einheitlichen Theorie begeben hat, glauben Physiker, endlich ein System gefunden zu haben, mit dem sie diese Entdeckungen und Erkenntnisse zu einem bruchlosen Ganzen zusammenfügen können – einer einzigen Theorie, die im Prinzip fähig sein müßte, alle physikalischen Phänomene zu beschreiben. Um diese Theorie, die *Superstringtheorie,* geht es im vorliegenden Buch.

Ich habe *Das elegante Universum* geschrieben, um einer größeren Zahl von Lesern, vor allem solchen ohne mathematische oder physi-

kalische Vorbildung, die Erkenntnisse zugänglich zu machen, die in jüngerer Zeit an vorderster Front der physikalischen Forschung gewonnen worden sind. Bei populärwissenschaftlichen Vorträgen über die Superstringtheorie ist mir in den letzten Jahren aufgefallen, wie groß das Interesse der Öffentlichkeit an vielen aktuellen Forschungsergebnissen ist – an den fundamentalen Gesetzmäßigkeiten des Universums, an den enormen Veränderungen, die wir aufgrund der neu entdeckten Gesetze in Hinblick auf unsere kosmologischen Vorstellungen vornehmen müssen, und an den Aufgaben, die bei der längst nicht abgeschlossenen Suche nach der letztgültigen Theorie noch auf uns warten. Ich hoffe, daß ich dieses Interesse beleben und befriedigen kann, wenn ich, mit Einstein und Heisenberg beginnend, die großen Entdeckungen der Physik erkläre und wenn ich beschreibe, wie sich der rote Faden ihrer Erkenntnisse durch die bahnbrechenden Forschungsergebnisse der heutigen Physik zieht.

Weiter hoffe ich, daß das *Elegante Universum* auch für Leser mit naturwissenschaftlichen Vorkenntnissen interessant ist. Physiklehrer und ihre Schüler können sich in dem Buch, denke ich, über Grundlagen der modernen Physik informieren, etwa die spezielle Relativitätstheorie, die allgemeine Relativitätstheorie und die Quantenmechanik. Gleichzeitig vermittelt es einen Eindruck von der ansteckenden Begeisterung, die die Forscher beseelt, während sich ihnen die lange gesuchte einheitliche Theorie allmählich offenbart. Dem begierigen Leser populärwissenschaftlicher Bücher versuche ich viele der aufregenden Entdeckungen zu erklären, die im Laufe der letzten zehn Jahre unser Verständnis des Kosmos vorangebracht haben. Den Kollegen anderer wissenschaftlicher Disziplinen wird das Buch, so hoffe ich, zutreffend und ohne Voreingenommenheit vor Augen führen, warum die Stringtheoretiker so begeistert über die Fortschritte sind, die bei der Suche nach der Weltformel erreicht worden sind.

Die Superstringtheorie wirft ihre Netze weit aus und zieht viele der Entdeckungen heran, die für die Physik von zentraler Bedeutung sind. Da die Theorie die Gesetze des Großen und des Kleinen in sich vereinigt, Gesetze, die die Physik an den äußersten Rändern des Kosmos ebenso bestimmen wie das Verhalten der kleinsten Materieteilchen, kann man sich ihr auf vielen Wegen nähern. Ich habe mich für unser sich entwickelndes Verständnis von Zeit und Raum entschieden. Hier bietet sich, wie ich finde, eine besonders faszinierende Perspektive, die alle wichtigen neueren Erkenntnisse erfaßt. Einstein hat gezeigt, daß sich Raum und Zeit erstaunlich merkwürdig verhalten.

Die neueste Forschung hat diese Entdeckungen in ein Quantenuniversum eingefügt, dessen zahlreiche verborgene Dimensionen im Gefüge des Kosmos aufgewickelt sind – Dimensionen, deren kompliziert verflochtene Geometrie die Antwort auf einige der wichtigsten Fragen überhaupt enthalten könnte. Obwohl einige dieser Konzepte sehr abstrakt sind, lassen sie sich, wie wir sehen werden, durch sehr konkrete Beispiele veranschaulichen. Haben wir diese Ideen erst einmal verstanden, zeigen sie uns ein verblüffendes und revolutionäres Bild des Universums.

Überall in diesem Buch habe ich versucht, mich eng an die wissenschaftlichen Fakten zu halten und dem Leser gleichzeitig – oft durch Vergleiche und Metaphern – ein intuitives Verständnis zu ermöglichen. Obwohl ich auf wissenschaftliche Begriffe und Gleichungen verzichte, werden dem Leser viele Konzepte so neu und unvertraut sein, daß er hin und wieder wird innehalten müssen. Hier wird er über einen Abschnitt nachzudenken und sich dort eine Erklärung zu vergegenwärtigen haben, um dem weiteren Gedankengang folgen zu können. Einige Abschnitte in Teil IV (die sich mit den neuesten Entwicklungen befassen) sind etwas abstrakter als der Rest. Ich habe mich bemüht, den Leser auf diese Abschnitte hinzuweisen und den Text so anzulegen, daß er ohne Folgen für das weitere Verständnis des Buches überflogen oder ausgelassen werden kann. Außerdem habe ich ein Glossar der wissenschaftlichen Begriffe angefügt, in dem die wichtigsten Termini leicht verständlich erklärt werden. Die Anmerkungen sind zum Verständnis des Textes nicht erforderlich, doch der interessierte Leser findet hier genauere Ausführungen zu einigen Punkten des Textes, Erläuterungen zu Ideen, die im Text vereinfacht dargestellt werden, und ein paar Hinweise, die mathematische Vorkenntnisse voraussetzen.

Vielen Menschen schulde ich Dank für die Hilfe, die sie mir bei der Abfassung dieses Buchs zuteil werden ließen. David Steinhardt hat das Manuskript sorgsam gelesen, wußte klugen Rat und hat mich immer wieder ermutigt. David Morrison, Ken Vineberg, Raphael Kasper, Nicholas Boles, Steven Carlip, Arthur Greenspoon, David Mermin, Michael Popowits und Shani Offen haben das Manuskript aufmerksam durchgesehen und detaillierte Vorschläge gemacht, die der endgültigen Fassung sehr zugute gekommen sind. Zu denen, die das Manuskript ganz oder teilweise gelesen haben, denen ich wertvolle Ratschläge verdanke und die mich ermutigt und unterstützt haben, gehören außerdem Paul Aspinwall, Persis Drell, Michael Duff, Kurt Gottfried, Joshua Greene, Teddy Jefferson,

Marc Kamionkowski, Yakov Kanter, Andras Kovacs, David Lee, Megan McEwen, Nari Mistry, Hasan Padamsee, Ronen Plesser, Massimo Poratti, Fred Sherry, Lars Straeter, Steven Strogatz, Andrew Strominger, Henry Tye, Cumrun Vafa und Gabriele Veneziano. Besonder Dank gebührt Raphael Gunner (neben vielen anderen Dingen) für die verständnisvolle Kritik, die er zu einem frühen Zeitpunkt vorgebracht und die daher ganz wesentlich die Konzeption des Buches mitbestimmt hat, sowie Robert Malley für die unaufdringliche, aber hartnäckige Aufforderung, endlich damit aufzuhören, über das Buch nachzudenken, und es zu Papier zu bringen. Rat und Hilfe verdanke ich auch Steven Weinberg und Sidney Coleman. Mit Freude und Dankbarkeit denke ich an den regen Gedankenaustausch mit Carol Archer, Vicky Carstens, David Cassel, Anne Coyle, Michael Duncan, Jane Forman, Wendy Greene, Susan Greene, Erik Jendresen, Gary Kass, Shiva Kumar, Robert Mawhinney, Pam Morehouse, Pierre Ramond, Amanda Salles und Eero Simoncelli. Costas Efthimiou danke ich für die Hilfe bei der Überprüfung von Fakten und Literaturangaben sowie dafür, daß er meine flüchtigen Skizzen in Zeichnungen übersetzte, aus denen dann Tom Rockwell – mit übermenschlicher Geduld und meisterhaftem Kunstverstand – die Abbildungen des vorliegenden Buches schuf. Ferner habe ich Andrew Hanson und Jim Sethna für ihre Hilfe bei einigen Spezialabbildungen zu danken.

Für die Bereitschaft, sich interviewen zu lassen und ihre Auffassung zu einigen der behandelten Themen zu erläutern, danke ich Howard Georgi, Sheldon Glashow, Michael Green, John Schwarz, John Wheeler, Edward Witten und noch einmal Andrew Strominger, Cumrun Vafa und Gabriele Veneziano.

Sehr dankbar bin ich auch meinen Lektorinnen bei W. W. Norton, die beide entscheidend zur Klarheit der endgültigen Fassung beigetragen haben: Angela Von der Lippe durch ihre klugen und wertvollen Vorschläge und Traci Nagle durch ihr unbestechliches Auge fürs Detail. Meinen Literaturagenten John Brockman und Katinka Matson danke ich für die kenntnisreiche Betreuung des Buchs vom ersten Entwurf bis zur Veröffentlichung. Außerdem möchte ich meiner Lektorin bei Siedler, Andrea Böltken, meinem Übersetzer Hainer Kober und Markus Pössel, der die deutsche Übersetzung wissenschaftlich betreut hat, meinen Dank ausdrücken. Sie alle haben dafür gesorgt, daß die deutsche Ausgabe auf hervorragende Weise sowohl den Ton des englischen Originals trifft als auch dem wissenschaftlichen Gehalt gerecht wird.

Mit Dankbarkeit sei auch die großzügige Unterstützung durch die National Science Foundation, die Alfred P. Sloan Foundation und das amerikanische Energieministerium erwähnt, die ich seit fünfzehn Jahren für meine Arbeit auf dem Gebiet der theoretischen Physik erhalte. Es dürfte kaum überraschen, daß meine eigenen Forschungsarbeiten sich vor allem mit den Auswirkungen der Superstringtheorie auf unsere Vorstellungen von Raum und Zeit beschäftigen. In späteren Kapiteln werde ich auf einige Entdeckungen zu sprechen kommen, an denen mitzuwirken ich das Glück hatte. Wenn ich auch glaube, daß sich der Leser für solche »Insiderberichte« interessiert, befürchte ich doch, daß er dadurch eine etwas übertriebene Vorstellung von meiner Rolle bei der Entwicklung der Superstringtheorie gewinnen könnte. Daher möchte ich die Gelegenheit nutzen, den mehr als tausend Physikern in der ganzen Welt zu danken, die so entscheidend und so hingebungsvoll an dem Bemühen beteiligt sind, die endgültige Theorie des Universums, die sogenannte Weltformel, zu entwerfen. Meine Entschuldigung gilt all denen, deren Arbeit in diesem Bericht nicht erwähnt wird. Daran sind allein die besondere Perspektive schuld, die ich gewählt habe, und die Grenzen, die dem Umfang einer solchen allgemeinen Darstellung gezogen sind.

Ganz herzlich möchte ich zum Schluß Ellen Archer danken, ohne deren unerschütterliche Liebe und Unterstützung dieses Buch nicht hätte entstehen können.

Teil I

An vorderster Wissensfront

Kapitel 1

Von Strings gefesselt

Es als Vertuschung zu bezeichnen wäre stark übertrieben. Aber seit mehr als fünfzig Jahren – auch noch inmitten einiger der größten wissenschaftlichen Durchbrüche der Menschheitsgeschichte – waren sich die Physiker stets der dunklen Wolke bewußt, die am Horizont auf sie lauerte. Das Problem ist rasch beschrieben: Die moderne Physik ruht auf zwei Grundpfeilern. Der eine ist Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie, die den theoretischen Rahmen zum Verständnis des extrem großräumigen Universums darstellt: der Sterne, Galaxien, Galaxienhaufen bis hin zu den ungeheuren Räumen des Universums selbst. Der andere Pfeiler ist die Quantenmechanik, die den theoretischen Rahmen zum Verständnis der kleinsten Größenverhältnisse liefert: der Moleküle, Atome bis hinab zu subatomaren Teilchen wie Elektronen und Quarks. Im Laufe vieler Jahre hat man fast alle Vorhersagen dieser beiden Theorien mit fast unvorstellbarer Genauigkeit experimentell bestätigen können. Doch genau diese theoretischen Werkzeuge führen auch zu einer sehr beunruhigenden Schlußfolgerung: So, wie sie gegenwärtig formuliert sind, können allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik *nicht beide richtig sein*. Die beiden Theorien, die für die immensen physikalischen Fortschritte der letzten hundert Jahre verantwortlich sind – Fortschritte, die erklären, wie der Himmel expandiert und wie die Materie im Innersten aufgebaut ist –, wollen partout nicht zueinander passen.

Sollten Sie bisher noch nichts von diesem unversöhnlichen Gegensatz gehört haben, fragen Sie sich vielleicht, wie das möglich war. Die Antwort ist einfach. Von ganz extremen Situationen abgesehen, untersuchen die an den Grundlagen unseres Universums interessierten Physiker Dinge, die entweder klein und leicht sind (etwa Atome und ihre Bestandteile), oder Dinge, die riesengroß und schwer sind (Sterne zum Beispiel und Galaxien), aber nicht beides zusammen. Sie halten sich also entweder nur an die Quantenmechanik oder nur an die allgemeine Relativitätstheorie und können sich mit einem flüchti-

gen Blick über den Zaun begnügen und mit einem Achselzucken über den strengen Tadel der jeweils anderen Theorie hinwegsetzen. Zwar ist diese Vorgehensweise, die seit fünfzig Jahren gang und gäbe ist, nicht aus seliger Unwissenheit geboren, aber auch nicht weit davon entfernt.

Doch das Universum kann *durchaus* extrem sein. In den zentralen Tiefen eines Schwarzen Lochs ist eine enorme Masse zu winziger Größe zusammengepreßt. Im Augenblick des Urknalls brach das ganze Universum aus einem mikroskopischen Klümpchen hervor, neben dem ein Sandkorn gigantisch gewirkt hätte. Das sind Bereiche, die winzig klein und doch unglaublich massereich sind und sich daher nur mit der Quantenmechanik *und* der allgemeinen Relativitätstheorie beschreiben lassen. Aus Gründen, die im Fortgang unserer Überlegungen klarer werden dürften, beginnen die Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik, sobald man sie kombiniert, zu rattern und zu spucken wie ein Auto, das reif für den Schrottplatz ist. Weniger metaphorisch: Auf sinnvolle physikalische Fragen gibt die unglückliche Verbindung der beiden Theorien sinnlose Antworten. Selbst wenn man bereit ist, der innersten Zone eines Schwarzen Lochs und dem Anfang des Universums ihr Geheimnis zu lassen, kann man sich des Eindrucks nicht erwehren, daß die Feindseligkeit zwischen Quantenmechanik und allgemeiner Relativitätstheorie nach einer tieferen Verständnisebene verlangt. Ist es wirklich denkbar, daß das Universum auf seiner fundamentalsten Ebene geteilt ist, daß wir ein System von Gesetzen brauchen, wenn die Dinge groß sind, und ein anderes, wenn die Dinge klein sind? Und daß beide miteinander unverträglich sind?

Die Superstringtheorie, ein absoluter Neuling im Vergleich zu den ehrwürdigen Gebäuden der Quantenmechanik und der allgemeinen Relativitätstheorie, beantwortet diese Frage mit einem klaren und entschiedenen Nein. Seit zehn Jahren fördert die intensive Forschung von Physikern und Mathematikern in aller Welt zutage, daß die neue Methode zur Beschreibung von Materie auf ihrer fundamentalsten Ebene die Spannung zwischen allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenmechanik aufzuheben vermag. Tatsächlich zeigt die Superstringtheorie noch mehr: In diesem neuen theoretischen Rahmen sind allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik *aufeinander angewiesen,* wenn die Theorie sinnvoll sein soll. Laut der Superstringtheorie ist die Ehe zwischen den Gesetzen des Großen und des Kleinen nicht nur glücklich, sondern unvermeidlich.

Damit noch nicht genug. Die Superstringtheorie – die Stringtheorie, wie ihre Kurzbezeichnung lautet – ist geeignet, diese Vereinigung einen gewaltigen Schritt voranzubringen. Dreißig Jahre lang suchte Einstein nach einer einheitlichen Theorie der Physik, einem System, das alle Naturkräfte und Bestandteile der Materie zu einem einzigen theoretischen Geflecht verknüpft. An der Schwelle des neuen Jahrtausends verkünden die Vertreter der Stringtheorie nun, die Fäden dieses so schwer faßbaren einheitlichen Flechtwerks seien endlich entdeckt. Die Stringtheorie könnte unsere Chance sein, zu zeigen, daß sich in all den wundersamen Vorgängen des Universums – vom hektischen Tanz der subatomaren Quarks bis hin zum gemessenen Walzer der Doppelsterne, vom Feuerball des Urknalls bis zum majestätischen Wirbel der kosmischen Galaxien – ein einziges, alles beherrschendes physikalisches Prinzip manifestiert, die Mutter aller Gleichungen.

Da diese Eigenschaften der Stringtheorie verlangen, daß wir unser Verständnis von Raum, Zeit und Materie gründlich verändern, wird es einige Zeit dauern, bis wir uns an sie gewöhnt haben und sie uns zur Selbstverständlichkeit geworden sind. Doch wie deutlich werden wird, ist die Stringtheorie, in den richtigen Zusammenhang gestellt, ein zwar spektakuläres, aber doch natürliches Ergebnis der revolutionären Entdeckungen, die der Physik in den letzten hundert Jahren gelungen sind. Tatsächlich werden wir sehen, daß der Konflikt zwischen allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenmechanik nicht der erste, sondern der dritte in einer Folge von höchst bedeutsamen Auseinandersetzungen ist; und jedesmal hat ihre Lösung unser Verständnis des Universums am Ende auf staunenswerte Weise revidiert.

Die drei Konflikte

Der erste Konflikt reicht bis in die letzten Jahre des neunzehnten Jahrhunderts zurück und betrifft seltsame Eigenschaften der Bewegung von Licht. In kurzen Worten: Nach Isaac Newtons Bewegungsgesetzen können Sie einen davoneilenden Lichtstrahl einholen, wenn Sie schnell genug laufen, während Sie dazu nach James Clerk Maxwells Gesetzen des Elektromagnetismus nicht in der Lage sind. Wie wir in Kapitel zwei erörtern werden, hat Einstein diesen Konflikt durch seine spezielle Relativitätstheorie gelöst und damit unser Verständnis von Raum und Zeit völlig umgekrempelt. Nach der speziellen Relativitätstheorie dürfen wir uns Raum und Zeit nicht mehr als

einen universell festgelegten Rahmen vorstellen, den jeder auf die gleiche Weise erlebt. Vielmehr sind sie nach Einsteins Interpretation veränderliche Konstrukte, deren Form und Erscheinung von dem Bewegungszustand des einzelnen abhängt.

Die Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie löste augenblicklich den zweiten Konflikt aus. Unter anderem folgt aus Einsteins Arbeit nämlich, daß sich kein Objekt – überhaupt kein Einfluß und keine Störung irgendeiner Art – schneller als das Licht fortbewegen kann. Doch wie wir in Kapitel drei sehen werden, gibt es in Newtons experimentell erfolgreicher und intuitiv ansprechender universeller Gravitationstheorie Einflüsse, die über große räumliche Entfernung *instantan* übertragen werden. Abermals gelang es Einstein, den Konflikt zu lösen. 1915 legte er mit der allgemeinen Relativitätstheorie ein neues Gravitationskonzept vor. Wie die spezielle Relativitätstheorie ersetzte auch die allgemeine Relativitätstheorie bis dahin gültige Vorstellungen von Raum und Zeit durch neue Konzepte. Nun werden Raum und Zeit nicht mehr nur durch den eigenen Bewegungszustand beeinflußt, sondern können sich in Gegenwart von Materie oder Energie verzerren und krümmen. Solche Verzerrungen in der Struktur von Raum und Zeit übertragen, wie wir sehen werden, die Kraft der Gravitation von Ort zu Ort. Folglich können wir uns Raum und Zeit nicht mehr als passiven Hintergrund vorstellen, vor dem sich die Ereignisse des Universums abspielen. Durch die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie sind Raum und Zeit zu aktiven Mitspielern geworden.

Und das Muster wiederholt sich: Die Entdeckung der allgemeinen Relativitätstheorie löste den einen Konflikt, führte aber zu einem neuen. In den ersten drei Jahrzehnten des zwanzigsten Jahrhunderts hatte man die Quantenmechanik entwickelt. Wie wir in Kapitel vier sehen werden, reagierte die Physik damit auf eine Reihe schwerwiegender Probleme, die auftraten, als man versuchte, die physikalischen Konzepte des neunzehnten Jahrhunderts auf die mikroskopische Welt anzuwenden. Und aus der Unverträglichkeit von Quantenmechanik und allgemeiner Relativitätstheorie resultierte, wie erwähnt, der dritte und größte Konflikt. Kapitel fünf wird zeigen, daß die sanft gekrümmte geometrische Form des Raums, wie sie sich aus der allgemeinen Relativitätstheorie ergibt, auf dem Kriegsfuß steht mit dem hektischen, brodelnden Verhalten, welches das mikroskopische Universum der Quantenmechanik an den Tag legt. Da erst Mitte der achtziger Jahre mit der Stringtheorie eine Lösung in Sicht kam, wird dieser Konflikt zu Recht als das zentrale Problem der modernen Phy-

sik bezeichnet. Darüber hinaus verlangt die Stringtheorie, obwohl sie auf der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie aufbaut, ein erneutes und grundlegendes Umdenken in bezug auf unsere Vorstellungen von Raum und Zeit. Beispielsweise halten die meisten Menschen es für selbstverständlich, daß unser Universum drei Dimensionen des Raums besitzt. Dagegen behauptet die Stringtheorie, unser Universum habe sehr viel mehr Dimensionen, als das Auge sieht – Dimensionen, die, eng aufgewickelt, die in sich gefaltete Mikrostruktur unseres Kosmos ausmachen. Diese bemerkenswerten Erkenntnisse über die Beschaffenheit von Zeit und Raum sind von so zentraler Bedeutung, daß sie bei allen folgenden Ausführungen als Leitmotiv dienen werden. In einem ganz konkreten Sinn ist die Stringtheorie die Geschichte von Zeit und Raum seit Einstein.

Um die Stringtheorie richtig würdigen zu können, müssen wir etwas ausholen und kurz beschreiben, was uns das letzte Jahrhundert an Erkenntnissen über die mikroskopische Struktur des Universums beschert hat.

Die Feinstruktur des Universums: Was wir über die Materie wissen

Die alten Griechen nahmen an, das Universum bestehe aus winzigen »unzerteilbaren« Bausteinen, die sie *Atome* nannten. Wie die ungeheure Zahl von Wörtern einer alphabetischen Sprache auf den vielfältigen Kombinationen einer kleinen Zahl von Buchstaben beruht, so ergab sich nach Annahme der Griechen die gewaltige Vielfalt der materiellen Objekte ebenfalls aus Kombinationen einer kleinen Anzahl verschiedener und elementarer Bestandteile. Das war eine außerordentlich weitsichtige Vermutung. Mehr als zweitausend Jahre später halten wir sie noch immer für wahr, wenn sich auch mehrfach unsere Auffassung davon geändert hat, was denn nun die fundamentalen Bausteine sein sollen. Im neunzehnten Jahrhundert wiesen Wissenschaftler nach, daß viele vertraute Stoffe wie Sauerstoff und Kohlenstoff einen kleinsten erkennbaren Bestandteil besitzen. In der Tradition der Griechen nannten sie diese Bausteine *Atome*. Der Name blieb haften, doch die weitere Wissenschaftsgeschichte zeigte, daß dies eine irreführende Bezeichnung war, denn Atome sind durchaus »zerteilbar«. Anfang der dreißiger Jahre begründeten die Arbeiten von J.J. Thomson, Ernest Rutherford, Niels Bohr und James Chadwick das sonnensystemähnliche Atommodell, mit dem

die meisten von uns vertraut sind. Danach sind Atome keineswegs die fundamentalsten Bausteine der Materie, sondern Gebilde mit einem Kern, der seinerseits aus Protonen und Neutronen besteht und von einem Schwarm kreisender Elektronen umgeben ist.

Eine Zeitlang glaubten viele Physiker, Protonen, Neutronen und Elektronen seien nun wirklich die »Atome« der Griechen. Doch Experimentalphysiker am Stanford Linear Accelerator Center, die sich modernste technische Möglichkeiten zunutze machten, um die Tiefenstruktur der Materie zu erkunden, stellten 1968 fest, daß auch Protonen und Neutronen nicht fundamental sind. Vielmehr besteht jeder dieser Bausteine aus drei noch kleineren Teilchen, den *Quarks* – eine launige Bezeichnung, die der theoretische Physiker Murray Gell-Mann, nachdem er zuvor ihre Existenz postuliert hatte, einem Abschnitt aus dem Roman *Finnegan's Wake* von James Joyce entnommen hatte. Weiter stellten die Physiker am Teilchenbeschleuniger fest, daß die Quarks in zwei Spielarten auftreten, die man, nicht ganz so phantasievoll, *up* und *down* nannte. Ein Proton besteht aus zwei up-Quarks und einem down-Quark, ein Neutron aus zwei down-Quarks und einem up-Quark.

Alles, was wir in der irdischen Welt und im Himmel über uns erblicken, scheint aus Kombinationen von Elektronen, up-Quarks und down-Quarks zu bestehen. Es gibt keine experimentellen Ergebnisse, die darauf schließen lassen, daß irgendeines dieser Teilchen aus kleineren Bausteinen zusammengesetzt ist. Allerdings sprechen sehr viele Beweise dafür, daß das Universum selbst noch weitere Bestandteilchen aufzuweisen hat. Mitte der fünfziger Jahre fanden Frederick Reines und Clyde Cowan überzeugende experimentelle Hinweise auf eine vierte Art von fundamentalen Teilchen, das *Neutrino* – ein Teilchen, das bereits in den dreißiger Jahren von Wolfgang Pauli vorhergesagt worden war. Wie sich herausstellte, lassen sich Neutrinos sehr schwer nachweisen, weil sie geisterhafte Teilchen sind, die nur selten mit anderer Materie in Wechselwirkung treten: Ein Neutrino von durchschnittlicher Energie kann mühelos viele Billionen Kilometer Blei durchqueren, ohne in seiner Bewegung irgendwie beeinträchtigt zu werden. Das müßte Sie eigentlich sehr erleichtern, denn während Sie dies lesen, durchqueren Milliarden von Neutrinos, die von der Sonne ins All gesandt wurden, auf der einsamen Reise durch den Kosmos Ihren Körper und die Erde. Ende der dreißiger Jahre wurde von Physikern, die kosmische Strahlung (Teilchenschauer, die aus dem Weltall auf die Erde herabregnen) untersuchten, ein weiteres Teilchen entdeckt, das *Myon,* das mit dem

Elektron identisch ist, nur daß es rund 200mal so schwer ist. Da es nichts in der kosmischen Ordnung gab, kein ungelöstes Rätsel, keine maßgeschneiderte Nische, die die Existenz des Myons verlangt hätte, begrüßte der Teilchenphysiker und Nobelpreisträger Isidor Isaac Rabi die Entdeckung des Myons mit den wenig begeisterten Worten: »Wer hat denn das bestellt?« Indes, es war nun einmal da. Und weitere sollten folgen.

Mit immer leistungsfähigeren technischen Geräten ließen Experimentalphysiker Materieteilchen mit immer größeren Energien ineinanderkrachen, so daß vorübergehend Bedingungen entstanden, wie es sie seit dem Urknall nicht mehr gegeben hat. In den Trümmern dieser Kollisionen suchten sie nach neuen fundamentalen Bausteinen, die sie in die wachsende Liste der Teilchen eintragen konnten. Gefunden haben sie vier weitere Quarks – *charm, strange, bottom* und *top* –, außerdem einen noch schwereren Verwandten des Elektrons, das Tauon, und zwei weitere Teilchen mit ähnlichen Eigenschaften wie das Neutrino (das *Myon-Neutrino* und das *Tauon-Neutrino,* im Unterschied zum herkömmlichen Neutrino, das nun Elektron-Neutrino genannt wird). Diese Teilchen werden durch hochenergetische Kollisionen produziert, die meisten von ihnen haben nur eine sehr kurze Lebensdauer, und sie sind keine Bestandteile von Dingen, mit denen wir alltäglich zu tun haben. Doch selbst das ist noch nicht die ganze Geschichte. Jedes dieser Teilchen hat einen Antiteilchen-Partner – ein Teilchen, das die gleiche Masse hat, aber in anderer Hinsicht gegensätzliche Eigenschaften besitzt, zum Beispiel was die elektrische Ladung (aber auch die Ladungen in Hinblick auf andere noch zu erörternde Kräfte) angeht. So bezeichnet man das Antiteilchen eines Elektrons als *Positron:* Es hat haargenau die gleiche Masse wie ein Elektron, aber seine elektrische Ladung beträgt +1, während die des Elektrons –1 ist. Wenn sie zusammenkommen, können sich Materie und Antimaterie vernichten und dabei reine Energie erzeugen – das ist der Grund, warum es so außerordentlich wenig natürliche Antimaterie in der Welt um uns herum gibt.

Die Physiker haben erkannt, daß sich diese Teilchen zu einem bestimmten Muster anordnen; das zeigt die Tabelle 1.1. Die Materieteilchen gliedern sich säuberlich in drei Gruppen, die oft als *Familien* bezeichnet werden. Jede Familie enthält zwei Quarks, ein Elektron oder einen seiner Verwandten und eine Neutrinospielart. Die entsprechenden Teilchenarten haben in allen drei Familien gleiche Eigenschaften, ausgenommen die Masse, die von Familie zu Familie

größer wird. Das Fazit lautet, daß die Physiker die Struktur der Materie jetzt bei Größenverhältnissen von ungefähr einem milliardstel milliardstel Meter erforscht haben und nachweisen können, daß *alles,* worauf sie dabei bislang gestoßen sind – egal, ob es natürlich vorkommt oder künstlich in riesigen Teilchenbeschleunigern erzeugt wird –, einer Kombination von Teilchen aus diesen drei Familien und ihren Antimaterie-Teilchen entspricht.

Familie 1		Familie 2		Familie 3	
Teilchen	Masse	Teilchen	Masse	Teilchen	Masse
Elektron	0,00054	Myon	0,11	Tauon	1,9
Elektron-Neutrino	$<10^{-8}$	Myon-Neutrino	<0,0003	Tauon-Neutrino	<0,033
up-Quark*	0,0047	charm-Quark	1,6	top-Quark	189
down-Quark	0,0074	strange-Quark	0,16	bottom-Quark	5,2

* Die Quarkmassen sind im Gegensatz zu denen der anderen Teilchen nur indirekt (und modellabhängig) definiert, da Quarks in der Natur nicht als freie Teilchen auftreten.

Tabelle 1.1 *Die drei Familien von Elementarteilchen und ihre Massen (in Vielfachen der Protonenmasse). Die Werte der Neutrinomassen haben sich bisher jeder genaueren experimentellen Bestimmung entzogen.*

Wenn Sie einen Blick auf Tabelle 1.1 werfen, wird Ihre Verwirrung sicherlich noch größer sein als Rabis Befremden über die Entdekkung des Myons. Die Einteilung in Familien erweckt zumindest einen gewissen Anschein von Ordnung, ändert aber nichts daran, daß dem Betrachter zahllose »Warums« in den Sinn kommen. Warum gibt es so viele fundamentale Teilchen, obwohl die große Mehrheit der Dinge in der Welt um uns umher offenbar nur Elektronen, up-Quarks und down-Quarks braucht? Warum gibt es drei Familien? Warum nicht eine Familie oder vier oder irgendeine andere Zahl? Warum weisen die Teilchen eine scheinbar zufällige Streuung der Massen auf – warum wiegt beispielsweise das Tauon ungefähr 3520mal soviel wie ein Elektron? Und warum wiegt das top-Quark ungefähr 40 200mal soviel wie ein up-Quark? Das sind merkwürdige, scheinbar beliebige Zahlen. Sind sie dem Zufall zu verdanken, göttlichem Ratschluß, oder gibt es eine logische Erklärung für die fundamentalen Eigenschaften des Universums?

Die Kräfte oder Wo ist das Photon?

Noch komplizierter wird die Situation, wenn wir die Naturkräfte betrachten. In der Alltagswelt gibt es eine Fülle von Möglichkeiten, Einfluß auszuüben: Bälle können von Schlägern getroffen werden, Bungee-Fans können sich von hohen Standorten in die Tiefe stürzen, Magneten können superschnelle Züge knapp über den Metallschienen in der Schwebe halten, Geigerzähler können in Anwesenheit von radioaktivem Material ticken, Kernwaffen können explodieren. Wir können Objekte beeinflussen, indem wir kräftig an ihnen ziehen, sie stoßen oder schütteln, indem wir andere Objekte darauf werfen oder schießen, indem wir sie dehnen, verdrehen oder zermalmen, indem wir sie abkühlen, erwärmen oder verbrennen. In den letzten hundert Jahren haben Physiker eine Fülle von Forschungsergebnissen zusammengetragen, aus denen hervorgeht, daß sich alle diese Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Objekten und Stoffen und die unzähligen anderen Vorgänge, die sich ereignen, wenn Dinge sich begegnen, auf Kombinationen von vier fundamentalen Kräften zurückführen lassen. Eine von ihnen ist die *Gravitationskraft*. Die anderen drei sind die *elektromagnetische Kraft*, die *schwache Kraft* und die *starke Kraft*.

Die Gravitation, die Schwerkraft, ist uns am vertrautesten, denn sie ist dafür verantwortlich, daß wir die Sonne umkreisen und mit beiden Beinen auf der Erde bleiben. Von der Masse eines Objektes hängt es ab, wie groß die Gravitationskraft ist, die es ausübt und der es unterworfen ist. Vertraut ist uns auch die elektromagnetische Kraft. Sie ist die Kraft, mit der die Annehmlichkeiten des modernen Lebens betrieben werden – Licht, Computer, Fernseher, Telefon –, und sie liegt der fürchterlichen Gewalt des Blitzes ebenso zugrunde wie der sanften Berührung einer menschlichen Hand. Auf mikroskopischer Ebene spielt die elektrische Ladung eines Teilchens die gleiche Rolle für die elektromagnetische Kraft wie die Masse für die Gravitation: Sie bestimmt, wie stark das Teilchen elektromagnetisch wirken und reagieren kann.

Die starke und die schwache Kraft sind weniger geläufig, weil ihre Stärke rasch nachläßt, sobald die Entfernungen subatomare Abstände überschreiten; sie sind die Kernkräfte. Aus diesem Grund wurden die beiden Kräfte auch erst sehr viel später entdeckt. Die starke Kraft hat die Aufgabe, die Quarks im Inneren von Protonen und Neutronen zu »verleimen« und die Protonen und Neutronen in Atomkernen fest zusammenzuhalten. Die schwache Kraft ist vor

allem bekannt, weil sie den radioaktiven Zerfall von Substanzen wie Uran und Kobalt bewirkt.

In den letzten hundert Jahren wurden zwei Eigenschaften entdeckt, die allen diesen Kräften gemeinsam sind. Erstens ist ihnen allen, wie wir in Kapitel fünf erörtern werden, auf mikroskopischer Ebene ein Teilchen zugeordnet, das Sie sich als kleinstes Bündel oder Paket der betreffenden Kraft vorstellen können. Wenn Sie einen Laserstrahl abfeuern – eine »elektromagnetische Strahlenkanone« – dann schicken Sie einen Strom von *Photonen* los, Minimalpakete der elektromagnetischen Kraft. Die kleinsten Bestandteile von Feldern der schwachen und der starken Kraft heißen *schwache Eichbosonen* und *Gluonen*. (Der Name *Gluon* ist besonders anschaulich, steckt in ihm doch das englische Wort *glue* – Leim; Gluonen können Sie sich also als die mikroskopischen Bestandteile des starken Leims vorstellen, der die Atomkerne zusammenhält.) Bis 1984 hatte man in entsprechenden Experimenten endgültig die Existenz und alle Eigenschaften dieser drei Arten von Kraftteilchen nachgewiesen (vgl. Tabelle 1.2). Man nimmt an, auch der Gravitationskraft sei ein Teilchen zugeordnet – das Graviton –, aber seine Existenz konnte experimentell noch nicht bestätigt werden.

Kraft	Kraftteilchen	Masse
stark	Gluon	0
elektromagnetisch	Photon	0
schwach	schwache Eichbosonen	86 bzw. 97
Gravitation	Graviton	0

Tabelle 1.2 *Die vier Naturkräfte mit ihren zugeordneten Kraftteilchen und deren Massen als Vielfache der Protonenmasse. (Bei den schwachen Kraftteilchen gibt es zwei Spielarten mit verschiedenen Massen, wie die Tabelle zeigt. Aus theoretischen Studien geht hervor, daß das Graviton masselos sein müßte.*

Betrachten wir die zweite gemeinsame Eigenschaft der Kräfte: Wir haben gesehen, daß die Masse bestimmt, wie die Gravitation sich auf ein Teilchen auswirkt, und die elektrische Ladung festlegt, wie es die elektromagnetische Kraft erfährt; genauso sind Teilchen mit bestimmten Mengen »starker Ladung« und »schwacher Ladung« ausgestattet, die entscheiden, wie die starke und die schwache Kraft auf

sie wirken. (Die Tabelle in den Anmerkungen zu diesem Kapitel führt diese Eigenschaften genauer auf.[1]) Doch wie für die Teilchenmassen gilt auch hier, daß die Experimentalphysiker die Eigenschaften zwar sorgfältig gemessen haben, aber niemand weiß, *warum* unser Universum aus diesen besonderen Teilchen mit diesen besonderen Massen und Kraftladungen besteht.

Ungeachtet ihrer gemeinsamen Merkmale führt eine genauere Untersuchung der fundamentalen Kräfte nur dazu, daß die Probleme noch komplizierter werden. Warum sind es beispielsweise vier fundamentale Kräfte? Warum nicht fünf oder drei oder vielleicht auch nur eine? Warum haben die Kräfte so verschiedene Eigenschaften? Warum wirken die starke und die schwache Kraft nur auf mikroskopischer Ebene, während Gravitation und elektromagnetische Kraft ihren Einfluß unbeschränkt entfalten können? Und warum ist die Stärke dieser Kräfte so außerordentlich unterschiedlich?

Stellen Sie sich zur Verdeutlichung der letzten Frage vor, Sie hielten ein Elektron in der linken und ein anderes Elektron in der rechten Hand und brächten diese beiden elektrisch geladenen Teilchen nun dicht zusammen. Ihre gegenseitige Gravitations- oder Massenanziehung würde den Versuch unterstützen, sie einander anzunähern, während die elektromagnetische Abstoßung sie auseinandertreiben würde. Welche Wirkung ist stärker? Daran gibt es keinen Zweifel: Die elektromagnetische Abstoßung ist ungefähr eine Million Milliarde Milliarde Milliarde Milliarde (10^{42}) mal so stark! Wenn Ihr rechter Bizeps für die Stärke der Gravitationskraft stünde, dann müßte sich Ihr linker Bizeps über die Grenzen des bekannten Universums ausdehnen, um der Stärke der elektromagnetischen Kraft zu entsprechen. Daß die elektromagnetische Kraft die Gravitation in der Welt um uns herum nicht zur völligen Bedeutungslosigkeit verurteilt, hat nur einen einzigen Grund – die meisten Dinge sind zu gleichen Anteilen aus positiven und negativen Ladungen zusammengesetzt, deren Kräfte sich gegenseitig aufheben. Da die Gravitation andererseits immer als Anziehungskraft wirkt, kennt sie eine solche Aufhebung nicht – mehr Materie bedeutet einfach größere Gravitationskraft. Doch grundsätzlich betrachtet, ist die Gravitation eine außerordentlich schwache Kraft. (Daher ist es auch so schwierig, die Existenz des Gravitons experimentell nachzuweisen. Die Suche nach dem kleinsten Paket der schwächsten Kraft ist eine ziemliche Herausforderung.) Aus Experimenten wissen wir ferner, daß die starke Kraft ungefähr hundertmal so stark wie die elektromagnetische und etwa hunderttausendmal so stark wie die schwache Kraft

ist. Aber was für einen Sinn – was für eine Existenzberechtigung – haben diese Eigenschaften für unser Universum?

Das ist kein müßiges Philosophieren über die Frage, warum irgendwelche Einzelheiten zufällig so und nicht anders sind. Das Universum böte ein völlig anderes Bild, hätten die Materie und die Kraftteilchen auch nur geringfügig andere Eigenschaften. Zum Beispiel hängt die Existenz der rund hundert Elemente des Periodensystems von dem exakten Verhältnis zwischen der Stärke der starken und der der elektromagnetischen Kraft ab. Alle Protonen, die im Atomkern zusammengepreßt sind, stoßen sich elektromagnetisch ab. Zum Glück überwindet die starke Kraft, die zwischen den konstituierenden Quarks wirkt, diese Abstoßung und hält die Protonen fest zusammen. Doch schon eine kleine Veränderung in der relativen Stärke der beiden Kräfte würde das Gleichgewicht zwischen ihnen stören und einen Zerfall der meisten Atomkerne bewirken. Wäre ferner die Masse des Elektrons nur einige Male so groß, wie sie tatsächlich ist, würden sich Elektronen und Protonen vielfach zu Neutronen verbinden, dabei alle Wasserstoffkerne verbrauchen (Wasserstoff ist das einfachste Element im Kosmos, sein Kern enthält nur ein einziges Proton) und damit wiederum die Entstehung komplexerer Elemente verhindern. Sterne sind auf die Fusion stabiler Kerne angewiesen und könnten sich angesichts solcher Veränderungen der fundamentalen Physik nicht bilden. Auch die Stärke der Gravitationskraft ist von grundsätzlicher Bedeutung. Die alles zermalmende Materiedichte im Zentralkern eines Sterns sorgt für die Energie seines Kernbrennofens und ist für die blendende Helligkeit des Sternenlichts verantwortlich. Vergrößert man die Stärke der Gravitationskraft, würde der Sternklumpen noch dichter werden, wodurch sich die Geschwindigkeit der Kernreaktionen beträchtlich erhöhen würde. Doch wie ein leuchtender Lichtblitz seine Energie rascher verbraucht als eine langsam brennende Kerze, würde eine Zunahme der nuklearen Reaktionsrate Sterne wie die Sonne sehr viel rascher ausbrennen lassen, was für das Leben in der uns bekannten Form verheerende Auswirkungen hätte. Verringerte man auf der anderen Seite die Stärke der Gravitationskraft erheblich, dann würde Materie überhaupt nicht mehr zusammenklumpen und dadurch die Bildung von Sternen und Galaxien verhindern.

Wir könnten die Reihe der Beispiele fortsetzen, doch der Gedanke dürfte hinreichend klar geworden sein: Das Universum ist so, wie es ist, weil die Materie und die Kraftteilchen genau die Eigenschaften haben, die sie haben. Doch gibt es eine wissenschaftliche Erklärung dafür, *warum* sie diese Eigenschaften haben?

Stringtheorie: Die Grundidee

Die Stringtheorie liefert einen schlüssigen Rahmen, innerhalb dessen sich zum ersten Mal die Möglichkeit zur Beantwortung dieser Frage ergibt. Betrachten wir zunächst die Grundidee.

Die Teilchen in Tabelle 1.1 sind die »Buchstaben« der gesamten Materie. Wie ihre sprachlichen Pendants weisen sie scheinbar keine weitere innere Unterteilung auf. Das sieht die Stringtheorie anders. Wenn wir, so sagt sie, diese Teilchen genauer untersuchen könnten – mit einer Genauigkeit, die viele Größenordnungen über unseren gegenwärtigen Möglichkeiten liegt –, dann würden wir feststellen, daß sie nicht punktartig sind, sondern jeweils aus einer winzigen eindimensionalen *Schleife* bestehen. Jedes Teilchen wird durch einen schwingenden, oszillierenden, tanzenden Faden konstituiert, der einem unendlich dünnen Gummiband gleicht und von den Physikern, in Ermangelung von Gell-Manns Belesenheit, *String* – »Faden« oder »Saite« – genannt wurde. Diesen zentralen Gedanken der Stringtheorie soll Abbildung 1.1 zum Ausdruck bringen. Sie beginnt mit etwas so Alltäglichem wie einem Apfel und zeigt dessen Struktur

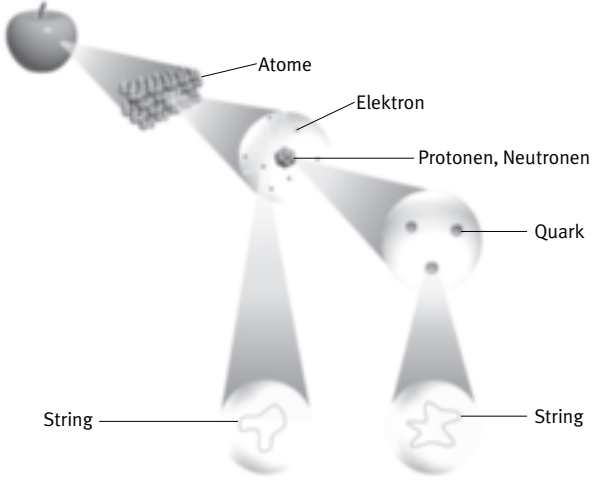

Abbildung 1.1 *Materie besteht aus Atomen, die ihrerseits aus Quarks und Elektronen zusammengesetzt sind. Nach der Stringtheorie sind alle diese Teilchen in Wirklichkeit winzige schwingende Stringschleifen.*

in immer weiter vergrößerten Ausschnitten, so daß sich seine Bestandteile auf immer fundamentaleren Ebenen offenbaren. Die bisher bekannte Abfolge von Atomen über Protonen, Neutronen und Elektronen bis hin zu Quarks ergänzt die Stringtheorie durch die neue mikroskopische Ebene einer schwingenden Schleife.[2]

Was hier natürlich noch nicht ersichtlich ist, wird Kapitel sechs zeigen: daß nämlich diese einfache Auswechslung der punktartigen Materiebausteine durch Strings der Unvereinbarkeit von Quantenmechanik und allgemeiner Relativitätstheorie ein Ende setzt. Damit durchtrennt die Stringtheorie den Gordischen Knoten der zeitgenössischen theoretischen Physik. Das ist eine gewaltige Leistung, trotzdem aber nur einer der Gründe für den Enthusiasmus, den die Stringtheorie in der Fachwelt ausgelöst hat.

Die Stringtheorie als Weltformel

Zu Einsteins Zeiten waren die starke und die schwache Kraft noch nicht einmal entdeckt, trotzdem fand er schon die Existenz von zwei verschiedenen Grundkräften – Gravitation und Elektromagnetismus – äußerst befremdend. Einstein wollte sich nicht damit abfinden, daß sich die Natur auf einen so extravaganten Entwurf gründet. Deshalb begann er seine dreißigjährige Suche nach einer sogenannten *einheitlichen Feldtheorie,* die, wie er hoffte, zeigen würde, daß diese beiden Kräfte in Wirklichkeit Manifestationen eines einzigen grundlegenden Prinzips sind. Diese Donquichotterie isolierte Einstein von der Hauptströmung der Physik, die verständlicherweise ein weit größeres Interesse daran hatte, sich in die neue Theorie der Quantenmechanik zu vertiefen. Anfang der vierziger Jahre schrieb er an einen Freund: »Ich bin ein einsamer alter Bursche, den man vor allem kennt, weil er keine Strümpfe trägt, und den man bei besonderen Gelegenheiten als Kuriosität zur Schau stellt.«[3]

Einstein war seiner Zeit einfach voraus. Mehr als fünfzig Jahre später ist sein Traum von einer einheitlichen Theorie zum Heiligen Gral der modernen Physik geworden. In großen Teilen der physikalischen und mathematischen Gemeinschaft wächst die Überzeugung, daß von der Stringtheorie die Lösung zu erwarten ist. Von einem Prinzip ausgehend – daß alles auf der fundamentalsten Ebene aus Kombinationen schwingender Fäden besteht –, liefert die Stringtheorie ein einziges Erklärungsmodell, das alle Materie und alle Kräfte einschließt.

So behauptet die Stringtheorie beispielsweise, daß sich in den beobachteten Teilcheneigenschaften, den Daten, die in Tabelle 1.1 und Tabelle 1.2 aufgeführt sind, die Arten und Weisen manifestieren, in denen ein String schwingen kann. Wie die Saiten einer Geige oder eines Klaviers Resonanzfrequenzen besitzen, bei denen sie bevorzugt schwingen – mit Mustern, die unsere Ohren als Töne und deren höhere Harmonien wahrnehmen –, haben auch die Schleifen der Stringtheorie bevorzugte Schwingungsfrequenzen. Doch wie wir sehen werden, erzeugt in der Stringtheorie das bevorzugte Schwingungsmuster eines Strings keinen Ton, sondern es tritt als Teilchen mit einer bestimmten Masse und Kraftladung in Erscheinung. Das Elektron ist ein String, der in bestimmter Weise schwingt, das up-Quark ein String, der auf andere Weise schwingt und so fort. In der Stringtheorie sind die Teilcheneigenschaften alles andere als eine Sammlung chaotischer Experimentaldaten, sondern die Erscheinungsformen eines einzigen physikalischen Merkmals: der charakteristischen Schwingungen – gewissermaßen der Musik – von fundamentalen Stringschleifen. Die gleiche Idee gilt auch für die Naturkräfte. Wir werden sehen, daß Kraftteilchen ebenfalls mit bestimmten Stringschwingungsmustern verknüpft sind und daß daher alles, alle Materie und alle Kräfte, in der gleichen Rubrik der mikroskopischen Stringschwingungen vereinigt ist – in den »Tönen«, die diese mikroskopischen Saiten erzeugen können.

Zum erstenmal in der Geschichte der Physik haben wir damit ein System, mit dessen Hilfe sich jede fundamentale Eigenschaft des Universums erklären läßt. Aus diesem Grund wird die Stringtheorie auch manchmal als *theory of everything* (TOE), als »allumfassende«, »endgültige« Theorie oder schlicht als »Weltformel« bezeichnet. Diese großartigen Bezeichnungen sollen zum Ausdruck bringen, daß es sich um die wirklich fundamentale Theorie der Physik handelt – eine Theorie, die allen anderen zugrunde liegt, eine Theorie, die auf keine tiefere Erklärungsebene mehr zurückgeführt werden kann. In der Praxis gehen viele Stringtheoretiker sehr viel nüchterner an die Sache heran und erwarten von der TOE lediglich, daß sie eine Erklärung liefert für die Eigenschaften der Elementarteilchen und die Eigenschaften der Grundkräfte, mittels deren die Teilchen wechselwirken und einander beeinflussen. Ein hartgesottener Reduktionist würde behaupten, das sei überhaupt keine Einschränkung. Im Prinzip lasse sich alles, vom Urknall bis zu Tagträumen, durch die grundlegenden physikalischen Prozesse der fundamentalen Materiebau-

steine erklären. Wenn man die Teile verstehe, so der Reduktionist, verstehe man auch das Ganze.

An der reduktionistischen Vorstellung scheiden sich die Geister. Viele finden es töricht und geradezu empörend, wenn jemand behauptet, die Wunder des Lebens und des Universums seien lediglich Ausdruck des sinnlosen Tanzes mikroskopischer Teilchen, die sich nach den Gesetzen der Physik richten. Ist es wirklich so, daß Gefühle wie Freude, Trauer oder Langeweile nichts als chemische Reaktionen im Gehirn sind – Reaktionen zwischen Molekülen und Atomen, die, auf noch fundamentaleren Ebenen, Reaktionen zwischen den Teilchen der Tabelle 1.1 oder gar zwischen schwingenden Strings sind? Zu dieser Art von Kritik meint der Nobelpreisträger Steven Weinberg in seinem Buch Der *Traum von der Einheit des Universums:*

> Am anderen Ende des Spektrums stehen die Gegner des Reduktionismus, die über die Trostlosigkeit der modernen Wissenschaft entsetzt sind. Gleichgültig, in welchem Ausmaß sie und ihre Welt sich auf Teilchen oder auf Felder und deren Wechselwirkung reduzieren lassen, sie fühlen sich durch dieses Wissen herabgesetzt … Diesen Kritikern möchte ich nicht mit aufmunternden Worten über die Schönheit der modernen Wissenschaft antworten. Das reduktionistische Weltbild ist tatsächlich kalt und unpersönlich. Man muß es akzeptieren, wie es ist, nicht weil wir es mögen, sondern weil die Welt eben so beschaffen ist.[4]

Diese sehr entschiedene Auffassung hat ihre Anhänger und ihre Gegner.

Andere haben vorgebracht, mit Entwicklungen wie der Chaostheorie seien Gesetze neuer Art entdeckt worden, die Anwendung fänden, wenn die Komplexität eines Systems zunimmt. Das Verhalten eines Elektrons oder Quarks zu verstehen, sei eine Sache, anhand dieses Wissens das Verhalten eines Tornados zu verstehen, eine ganz andere. Darin sind sich die meisten Naturwissenschaftler einig. Auseinander gehen die Meinungen allerdings über die Frage, ob die verantwortlichen Prinzipien sich, wenn auch auf ungeheuer komplizierte Weise, aus den physikalischen Prinzipien herleiten, die das Verhalten der außerordentlich großen Zahl von Elementarteilchen bestimmen. Nach meiner Auffassung handelt es sich nicht um neue und unabhängige Naturgesetze. Zwar dürfte es schwierig sein, die Eigenschaften eines Tornados mit der Physik von Elektronen und Quarks zu erklären, doch halte ich das für ein rein rechnerisches Problem, nicht für ein Phänomen, das neue physikalische Gesetze verlangt. Aber diese Meinung, das sei noch einmal gesagt, ist nicht unumstritten.

Doch selbst wenn man die strittige Auffassung der hartgesottenen Reduktionisten teilt, so ist das Prinzip eine Sache und die Praxis eine ganz andere; das steht außer Zweifel und ist von großer Bedeutung für die Reise, auf die wir uns mit diesem Buch begeben wollen. Kaum einer glaubt, daß die Entdeckung der TOE alle Fragen der Psychologie, Biologie, Geologie, Chemie oder auch Physik beantworten könnte. Das Universum ist von so wunderbarer Vielfalt und Komplexität, daß die Entdeckung der endgültigen Theorie, wie wir sie hier beschreiben, nicht das Ende der Naturwissenschaft bedeuten würde. Ganz im Gegenteil: Die Entdeckung der Weltformel – der letztgültigen Erklärung des Universums auf fundamentalster Ebene, einer Theorie, die auf keine tiefere Erklärungsebene zurückgriffe – wäre das stabilste Fundament, auf dem unser Verständnis der Welt *aufbauen* könnte. Ihre Entdeckung wäre ein Anfang und kein Ende. Die endgültige Theorie wäre ein unmißverständliches Zeichen der Schlüssigkeit, ein Beweis dafür, daß wir das Universum im Prinzip tatsächlich verstehen können.

Der Stand der Dinge

In diesem Buch soll versucht werden, anhand der Stringtheorie die Gesetzmäßigkeiten des Universums zu erklären und dabei vor allem zu zeigen, welche Bedeutung diese Ergebnisse für unser Verständnis von Raum und Zeit haben. Im Unterschied zu vielen anderen Berichten über wissenschaftliche Entwicklungen behandelt dieses Buch keine Theorie, die vollständig ausgearbeitet, durch überzeugende Experimente bestätigt und von der wissenschaftlichen Gemeinschaft rückhaltlos akzeptiert worden ist. Das hat seine Gründe: Wie wir in späteren Kapiteln sehen werden, ist die Stringtheorie so kompliziert und raffiniert, daß wir trotz der eindrucksvollen Fortschritte, die wir in den letzten zwanzig Jahren erzielt haben, noch weit davon entfernt sind, sie wirklich zu beherrschen.

Daher ist diese Darstellung der Stringtheorie als Bericht über ein *laufendes Projekt* zu betrachten, dessen partielle Fertigstellung bereits erstaunliche Erkenntnisse über die Beschaffenheit von Raum, Zeit und Materie hervorgebracht hat. Die harmonische Vereinigung von allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenmechanik ist ein großer Erfolg. Außerdem ist die Stringtheorie im Gegensatz zu allen vorhergehenden Theorien in der Lage, Antworten auf Urfragen zu geben, die die fundamentalen Bausteine und Kräfte der Natur betref-

fen. Von gleicher Bedeutung, wenn auch schwerer zu vermitteln, ist die bemerkenswerte Eleganz sowohl der Antworten als auch ihres theoretischen Rahmens. Beispielsweise lassen sich in der Stringtheorie viele Aspekte der Natur, die sonst als willkürlich erscheinen – etwa die Zahl der verschiedenen fundamentalen Teilchen und ihre Eigenschaften –, aus wesentlichen und greifbaren Eigenschaften der Geometrie des Universums ableiten. Wenn die Stringtheorie stimmt, ist die mikroskopische Struktur unseres Universums ein vielfältig verflochtenes, mehrdimensionales Labyrinth, in dem sich die Strings des Universums endlos drehen und schwingen und rhythmisch die Gesetze des Kosmos trommeln. So erweist sich, daß die Eigenschaften der fundamentalen Bausteine keineswegs zufällig sind, sondern in innigem Zusammenhang mit der Struktur von Raum und Zeit stehen.

Letztlich sind allerdings eindeutige, überprüfbare Vorhersagen durch nichts zu ersetzen, wenn wir feststellen wollen, ob die Stringtheorie tatsächlich den Schleier des Geheimnisses gelüftet hat, der die tiefsten Wahrheiten unseres Universums verbirgt. Es wird vielleicht noch einige Zeit vergehen, bis wir zu dieser Verständnisebene vordringen, obwohl, wie wir in Kapitel neun erörtern werden, schon in den nächsten zehn Jahren indirekte experimentelle Bestätigungen für die Stringtheorie zu erwarten sein könnten. Ferner werden wir in Kapitel dreizehn sehen, daß es vor kurzem gelungen ist, mit Hilfe der Stringtheorie ein höchst bedeutsames Rätsel Schwarzer Löcher zu lösen, das die sogenannte Bekenstein-Hawking-Entropie betrifft, ein Problem, das sich seit mehr als fünfundzwanzig Jahren hartnäckig jeder Lösung mit herkömmlichen Mitteln entzieht. Dieser Erfolg hat viele Physiker davon überzeugt, daß die Stringtheorie in der Lage ist, uns die elementarsten Gesetzmäßigkeiten des Universums zu enthüllen.

Edward Witten, der zu den Pionieren und führenden Fachleuten auf dem Gebiet der Stringtheorie gehört, faßt die Situation treffend zusammen, wenn er sagt: »Die Stringtheorie ist ein Teil der Physik des 21. Jahrhunderts, den es zufällig ins zwanzigste Jahrhundert verschlagen hat«, eine Auffassung, die als erster der namhafte italienische Physiker Daniele Amati geäußert hat.[5] Das ist so, als wären unsere Vorfahren im neunzehnten Jahrhundert auf einen modernen Supercomputer ohne Betriebsanleitung gestoßen. Durch Versuch und Irrtum wäre es ihnen zwar gelungen, Anhaltspunkte für die Möglichkeiten des Geräts zu gewinnen, doch um ihn wirklich zu beherrschen, hätte es energischer und ausdauernder Anstrengungen

bedurft. Allerdings hätten die Hinweise auf die Leistungsfähigkeit des Rechners, wie unsere Indizien für das Erklärungsvermögen der Stringtheorie, überaus starke Beweggründe geliefert, den richtigen Umgang mit der Maschine herauszufinden. Ähnliche Beweggründe veranlassen heute eine Generation von theoretischen Physikern, sich um ein vollständiges und genaues Verständnis der Stringtheorie zu bemühen.

Die Äußerungen von Witten und anderen Fachleuten lassen darauf schließen, daß es noch Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte dauern könnte, bis wir die Stringtheorie vollständig entwickelt und verstanden haben. Das könnte durchaus stimmen. Tatsächlich ist die Mathematik der Stringtheorie so kompliziert, daß bis heute niemand die exakten Gleichungen der Theorie kennt. Nur Näherungen liegen den Physikern vor, und selbst die Näherungsgleichungen sind so kompliziert, daß sie bis jetzt nur teilweise gelöst sind. Trotzdem könnte eine Reihe von verheißungsvollen Durchbrüchen aus der zweiten Hälfte der neunziger Jahre – Durchbrüchen, die theoretische Fragen von bislang unvorstellbarer Schwierigkeit beantwortet haben – durchaus bedeuten, daß wir dem vollständigen quantitativen Verständnis der Stringtheorie viel näher sind als ursprünglich angenommen. In aller Welt sind Physiker damit beschäftigt, leistungsfähige neue Techniken zu entwickeln, mit denen sich die Beschränkungen der zahlreichen bislang verwendeten Näherungsmethoden überwinden lassen. So fügen sie in kollektiver Arbeit die verstreuten Teile des Stringpuzzles in verheißungsvollem Tempo zusammen.

Aus diesen Entwicklungen ergaben sich überraschende Perspektiven zur Neuinterpretation einiger Grundannahmen der Theorie, die lange gültig waren. So ist Ihnen vielleicht bei einem Blick auf die Abbildung 1.1. die Frage in den Sinn gekommen: Warum Strings? Warum nicht kleine Frisbeescheiben? Oder mikroskopische tropfenförmige Klümpchen? Oder eine Kombination all dieser Möglichkeiten? Wie wir in Kapitel zwölf sehen werden, zeigen die jüngsten Erkenntnisse, daß solche Aspekte tatsächlich eine wichtige Rolle in der Stringtheorie spielen. Es hat sich herausgestellt, daß die Stringtheorie Teil einer noch größeren Synthese ist, die gegenwärtig den (mysteriösen) Namen M-Theorie trägt. Mit diesen allerneuesten Entwicklungen werden wir uns in den Schlußkapiteln dieses Buches beschäftigen.

Wissenschaftliche Fortschritte vollziehen sich sprunghaft. In einigen Perioden häufen sich die bahnbrechenden Fortschritte, dann wieder sind lange Durststrecken zu überwinden. Forscher legen

theoretische und experimentelle Ergebnisse vor, und die wissenschaftliche Gemeinschaft diskutiert sie. Manchmal werden sie verworfen und manchmal modifiziert. Unter Umständen erweisen sie sich als inspirierende Ausgangspunkte für ein neues und besseres Verständnis des physikalischen Universums. Mit anderen Worten: Im Zickzackkurs nähert sich die Wissenschaft dem, was sich, wie wir hoffen, als endgültige Wahrheit herausstellen wird – ein Weg, der mit den frühesten Versuchen der Menschheit begann, das Geheimnis des Universums zu ergründen, und dessen Ende wir noch nicht voraussagen können. Ob die Stringtheorie nur eine unbedeutende Zwischenstation, ein entscheidender Wendepunkt oder das Ziel ist, wissen wir nicht. Doch die Forschungsarbeiten, die Hunderte von engagierten Wissenschaftlern in vielen Ländern der Erde seit zwanzig Jahren vorantreiben, wecken die begründete Hoffnung, daß wir auf dem richtigen und möglicherweise endgültigen Weg sind.

Ein beredtes Zeugnis für die vielschichtige und umfassende Natur der Stringtheorie ist, daß sie uns sogar auf unserer gegenwärtigen Verständnisebene verblüffende neue Einsichten in die Gesetzmäßigkeit des Universums eröffnet hat. Einen roten Faden der folgenden Ausführungen werden die Entdeckungen bilden, die unser Verständnis von Raum und Zeit immer wieder revolutioniert haben. Einstein hat mit der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie den Anfang dazu gemacht. Aber wenn die Stringtheorie stimmt, besitzt die Struktur unseres Universums, wie wir sehen werden, Eigenschaften, die wahrscheinlich sogar Einstein verblüfft hätten.

Teil II

Das Dilemma von Raum, Zeit und Quanten

Kapitel 2

Raum, Zeit und das Auge des Betrachters

Im Juni 1905 reichte der sechsundzwanzigjährige Albert Einstein bei der Zeitschrift *Annalen der Physik* einen wissenschaftlichen Artikel ein, in dem er eine scheinbar paradoxe Eigenschaft der Lichtausbreitung erklärte, die ihn erstmals als Halbwüchsigen, zehn Jahre zuvor, beschäftigt hatte. Nachdem Max Planck, der Herausgeber der Zeitschrift, die letzte Seite von Einsteins Manuskript gelesen hatte, war ihm klar, daß die bis dahin gültige wissenschaftliche Ordnung umgestürzt worden war. In aller Stille hatte ein Angestellter des Patentamts in Bern die traditionellen Begriffe von Raum und Zeit vom Sockel gestoßen und sie durch eine neue Vorstellung ersetzt, die allen Erfahrungen unserer alltäglichen Welt zuwiderläuft.

Es ging um folgendes Paradoxon: Nachdem der schottische Physiker James Clerk Maxwell bestimmte Experimentalergebnisse des englischen Physikers Michael Faraday einer genauen Analyse unterzogen hatte, gelang es ihm Mitte des neunzehnten Jahrhunderts, Elektrizität und Magnetismus im Rahmen des *elektromagnetischen Feldes* zu vereinigen. Wenn Sie schon einmal vor einem heftigen Gewitter auf einem Berggipfel gestanden oder sich dicht neben einem Bandgenerator befunden haben, dann haben Sie ein instinktives Gefühl für elektromagnetische Felder, denn Sie haben schon einmal eines am eigenen Leibe gespürt. Falls nicht, denken Sie sich ein Auf und Ab von elektrischen und magnetischen Kraftlinien, die eine Raumregion durchdringen. Verstreuen Sie beispielsweise in der Nähe eines Magneten Eisenspäne, dann fügen sich diese zu einem geordneten Muster, das einige der unsichtbaren magnetischen Kraftlinien nachzeichnet. Wenn Sie an einem besonders trockenen Tag einen Wollpullover ausziehen und ein knisterndes Geräusch hören, vielleicht auch ein oder zwei leichte elektrische Schläge verspüren, so sind das Indizien für die Kraftlinien der elektrischen Ladungen, die durch die Fasern Ihres Pullovers erzeugt werden. Abgesehen davon, daß Maxwells Theorie diese und alle anderen elektrischen und magnetischen Phänomene in einem einzigen mathematischen System

vereinigte, zeigte sie auch – völlig unerwartet –, daß sich elektromagnetische Störungen mit einer bestimmten und unveränderlichen Geschwindigkeit ausbreiten, einer Geschwindigkeit, die, wie sich herausstellte, der des Lichts entspricht. Daraus schloß Maxwell, daß das sichtbare Licht selbst lediglich eine elektromagnetische Welle von bestimmter Art ist. Heute wissen wir, daß diese Welle mit chemischen Stoffen in der Netzhaut wechselwirkt und dergestalt die Sinneserfahrungen des Sehens hervorruft. Außerdem (und das ist von entscheidender Bedeutung) ging aus Maxwells Theorie ebenfalls hervor, daß alle elektromagnetischen Wellen – unter ihnen auch das sichtbare Licht – höchst ruhelose Geschöpfe sind. Sie halten niemals an. Sie werden nie langsamer. Licht bewegt sich *immer* mit Lichtgeschwindigkeit fort.

Das ist alles gut und schön, bis wir, wie der sechzehnjährige Einstein, fragen: Was geschieht, wenn wir einen Lichtstrahl mit Lichtgeschwindigkeit verfolgen? Die intuitive Überlegung, an Newtons Bewegungsgesetzen ausgerichtet, sagt uns, daß wir uns parallel zu den Lichtwellen bewegen und sie uns daher ruhend erscheinen. Das Licht würde stillstehen. Doch nach Maxwells Theorie und allen zuverlässigen Beobachtungen gibt es kein ruhendes Licht: Niemand hat bisher einen ruhenden Lichtklumpen in seiner Handfläche gehalten. Darin liegt das Problem. Zum Glück wußte Einstein nicht, daß sich viele der bekanntesten Physiker mit dieser Frage herumschlugen (und dabei auf manchen Holzweg gerieten). So setzte er sich mit dem Paradoxon, das sich durch Maxwells und Newtons Theorie ergab, in der – weitgehenden – Unberührtheit seiner privaten Gedankenwelt auseinander.

In diesem Kapitel wollen wir erörtern, wie Einstein den Konflikt durch seine spezielle Relativitätstheorie gelöst und damit unsere Vorstellung von Raum und Zeit unwiderruflich verändert hat. Vielleicht überrascht es den einen oder anderen Leser, daß es in der speziellen Relativitätstheorie vor allem darum geht, wie die Welt Individuen, oft »Beobachter« genannt, erscheint, die sich relativ zueinander bewegen. Das mag einem zunächst wie eine geistige Übung ohne Bedeutung vorkommen. Doch das Gegenteil ist der Fall: Im Bannkreis von Einsteins Überlegungen und seinen Vorstellungen von Beobachtern, die hinter Lichtstrahlen herjagen, wird klar, daß ein vollständiges Verständnis der Art und Weise, wie gegeneinander bewegte Beobachter sogar sehr einfache Situationen unterschiedlich wahrnehmen, bedeutende Konsequenzen nach sich zieht.

Die Intuition und ihre Schwächen

Sogar die Alltagserfahrung zeigt, wie sich die Beobachtungen solcher Individuen unterscheiden. Beispielsweise scheinen sich die Bäume, die an einer Autostraße stehen, aus der Sicht eines Autofahrers zu bewegen, während sie für einen Tramper, der auf der Leitplanke sitzt, ruhen. Entsprechend das Armaturenbrett des Autos: Aus der Perspektive des Fahrers bewegt es sich (hoffentlich!) nicht, aus Sicht des Trampers aber doch. Das sind so grundlegende und intuitive Eigenschaften der Welt, daß wir von ihnen kaum Notiz nehmen.

Die spezielle Relativitätstheorie postuliert jedoch, daß die Beobachtungen unserer beiden Protagonisten Unterschiede aufweisen, die weit subtiler und grundlegender sind als unsere Alltagserfahrung. Sie stellt die seltsame Behauptung auf, daß Beobachter in Relativbewegung Entfernung und Zeit unterschiedlich wahrnehmen. Wie wir sehen werden, folgt daraus, daß identische Armbanduhren, die von zwei Menschen in relativer Bewegung getragen werden, mit *unterschiedlicher Geschwindigkeit* ticken und daher in Hinblick auf die Zeit, die zwischen gegebenen Ereignissen verstreicht, nicht übereinstimmen. Nach der speziellen Relativitätstheorie ist das kein Einwand gegen die Genauigkeit der Armbanduhren, sondern eine wahre Aussage über die Zeit selbst.

In ähnlicher Weise werden sich Beobachter in relativer Bewegung, die völlig gleiche Bandmaße mit sich führen, nicht über die Länge gemessener Entfernungen einigen können. Wiederum liegt das nicht an der Ungenauigkeit der Meßgeräte oder falscher Bedienung. Die genauesten Meßinstrumente der Welt bestätigen, daß Raum und Zeit – als Entfernung beziehungsweise Dauer gemessen – nicht von allen Beobachtern gleich erlebt werden. Genauso, wie Einstein es beschrieben hat, löst die spezielle Relativitätstheorie den Konflikt zwischen unserem intuitiven Bewegungsverständnis und den Eigenschaften des Lichts. Nur einen Haken hat die Sache: Menschen, die sich relativ zueinander bewegen, erzielen keine Übereinstimmung in Hinblick auf ihre Beobachtungen von Raum und Zeit.

Fast hundert Jahre sind vergangen, seit Einstein seine spektakuläre Entdeckung vorgelegt hat, trotzdem haben die meisten von uns noch eine absolute Vorstellung von Raum und Zeit. Wir haben die spezielle Relativitätstheorie nicht wirklich verinnerlicht – wir haben sie nicht im Gefühl. Ihre Folgen sind kein selbstverständlicher Bestandteil unserer Intuition. Das hat einen ganz einfachen Grund: Die Auswirkungen der speziellen Relativität hängen davon ab, wie

schnell man sich bewegt. Bei den Geschwindigkeiten von Autos, Flugzeugen und selbst Spaceshuttles sind diese Effekte äußerst geringfügig. Doch bei einer Reise mit einem Raumfahrzeug der Zukunft, das einen erheblichen Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit erreicht, würden sich die relativistischen Effekte sehr deutlich zeigen. Natürlich gehört das heute noch ins Reich der Science-fiction. Trotzdem werden wir in späteren Abschnitten sehen, daß kluge Experimente es uns ermöglichen, die von Einstein vorhergesagten relativen Eigenschaften von Raum und Zeit klar und eindeutig zu beobachten.

Um einen Eindruck von den Größenverhältnissen zu bekommen, um die es hier geht, können Sie sich vorstellen, wir würden das Jahr 1970 schreiben und große, schnelle Autos seien angesagt. Hans hat alle seine Ersparnisse in einen neuen Sportwagen investiert und geht mit seinem Bruder Franz auf die örtliche Dragster-Strecke, um die Art von Testfahrt durchzuführen, die der Händler eigentlich verboten hat. Nachdem Hans das Auto auf Touren gebracht hat, rast er die 1,5 Kilometer lange Strecke mit 180 Kilometern pro Stunde entlang, während Franz an der Seitenlinie steht und die Zeit nimmt. Hans möchte das überprüfen und stoppt mit einer eigenen Uhr, wie lange das neue Auto braucht, um die Strecke zu fahren. Vor Einstein hätte niemand daran gezweifelt, daß Hans und Franz mit einwandfrei gehenden Stoppuhren exakt die gleiche Zeit messen. Doch nach der speziellen Relativitätstheorie ermittelt Franz, daß exakt 30 Sekunden vergangen sind, Hans dagegen, daß es nur 29,99999999999958 Sekunden waren, also *eine Winzigkeit weniger*. Natürlich ist dieser Unterschied so geringfügig, daß er nur durch eine Messung entdeckt werden könnte, deren Genauigkeit die Möglichkeiten von normalen Stoppuhren, olympischen Zeitnahmesystemen und selbst ausgefeilten Atomuhren weit übertrifft. Wie sollte da unsere alltägliche Erfahrung offenbaren, daß das Verstreichen der Zeit von unserem Bewegungszustand abhängt?

Auch in der Längenmessung werden die beiden keine Einigung erzielen. Beispielsweise bedient sich Franz eines schlauen Tricks, um die Länge von Hans' neuem Auto zu messen: Er setzt seine Stoppuhr genau in dem Augenblick in Gang, als ihn die Spitze des Wagens erreicht, und hält sie an, als ihn das Ende passiert. Da Franz weiß, daß Hans mit 180 Kilometern pro Stunde vorbeirast, kann er die Länge des Wagens ausrechnen, indem er diese Geschwindigkeit mit der Zeit multipliziert, die auf seiner Stoppuhr verstrichen ist. Auch in diesem Fall hätte vor Einstein niemand bezweifelt, daß die Länge, die Franz auf diese indirekte Weise gemessen hat, *exakt* mit der

Länge übereinstimmen würde, die Hans sorgfältig ermittelt hat, als das Auto noch bewegungslos in der Ausstellungshalle des Händlers stand. Ganz anders sieht es die spezielle Relativitätstheorie: Wenn Hans und Franz genaue Messungen vornehmen, jeder auf seine Weise, und Hans feststellt, daß das Auto, sagen wir, genau 5 Meter lang ist, dann ergibt Franz' Messung eine Länge von 4,99999999999993 Metern – also *eine Winzigkeit weniger*. Wie bei der Zeitmessung handelt es sich auch hier um einen so minimalen Unterschied, daß normale Instrumente einfach nicht genau genug sind, um ihn benennen zu können.

Obwohl die Differenzen außerordentlich gering sind, offenbaren sie doch eine entscheidende Schwäche in der allgemeinen Auffassung, nach der Raum und Zeit universell und unveränderlich sind. Wenn die relative Geschwindigkeit zunimmt, tritt diese Schwäche deutlicher zutage. Um merkliche Unterschiede zu erreichen, müssen die Geschwindigkeiten einen beträchtlichen Bruchteil der größtmöglichen Geschwindigkeit – der des Lichts – erreichen, die nach Maxwells Theorie und experimentellen Messungen bei rund 300 000 Kilometern pro Sekunde oder 1080 Millionen Kilometern pro Stunde liegt. Das bedeutet, die Erde mehr als siebenmal pro Sekunde zu umkreisen. Würde sich Hans beispielsweise nicht mit 200 Kilometern pro Stunde, sondern mit 940 Millionen Kilometern pro Stunde (rund 87 Prozent der Lichtgeschwindigkeit) bewegen, dann sagt die Mathematik der speziellen Relativitätstheorie vorher, daß Franz nur noch eine Autolänge von ungefähr 2,5 Metern messen würde, womit sich ein beträchtlicher Unterschied zu Hans' Messung (und zu den Angaben im Handbuch) ergibt. Entsprechend wäre die Zeit, die das Auto nach Franz' Uhr braucht, um die Dragster-Strecke entlangzurasen, etwas mehr als *doppelt* so lang wie die von Hans gemessene Zeit.

Da solche enormen Geschwindigkeiten weit jenseits aller unserer heutigen Möglichkeiten liegen, sind die Effekte der »Zeitdilatation« und der »Lorentz-Kontraktion«, wie diese Phänomene von Physikern genannt werden, im Alltag außerordentlich geringfügig. Lebten wir in einer Welt, in der sich die Dinge üblicherweise mit Geschwindigkeiten nahe der des Lichts fortbewegten, wären uns diese Eigenschaften von Raum und Zeit so selbstverständlich – denn wir würden sie ständig erleben –, daß wir ihnen genausowenig Aufmerksamkeit schenken würden wie der scheinbaren Bewegung der Bäume am Straßenrand, von der am Anfang dieses Kapitels die Rede war. Doch da wir nicht in einer solchen Welt leben, sind uns diese Eigenschaf-