

MICHIO KAKU

DIE
GOTTES
FORMEL

Die Suche
nach der Theorie
von Allem

ROWOHLT



Michio Kaku

Die Gottes-Formel

Die Suche nach der Theorie von Allem

Aus dem Englischen von Monika Niehaus und Bernd Schuh

Über dieses Buch

Sie ist der Traum der theoretischen Physik und die Suche nach ihr hat uns hundert Jahre technischen Fortschritt beschert: die große einheitliche Theorie von Allem, die eine Formel für alle physikalischen Gesetze, die das Universum regieren. Die vergangenen dreißig Jahre seines Lebens widmete Albert Einstein diesem Traum. Es geht darum, eine Brücke zu schlagen zwischen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantentheorie. Beide sind Motoren der digitalen Revolution, aber sie sind unvereinbar.

Michio Kaku, einer der Väter der Stringtheorie, erzählt die Geschichte der abenteuerlichen Suche von Physikern nach dieser Formel, die einer Entschlüsselung von Gottes Plan gleich käme. «Das Universum», sagt Kaku, «ist eine Sinfonie.» Aber ist es auch einzigartig? Oder gab es eine Wahl bei seiner Entstehung? Wie viele Universen mit wie vielen Naturgesetzen müsste man durchprobieren, um zu unserem zu gelangen? Und warum eigentlich ist der Himmel nachts schwarz? Wie erwischt man ein Geister-Teilchen?

Es sind die wichtigen Fragen der Physik des 20. und 21. Jahrhunderts, die Michio Kaku in seinem Buch verhandelt.

Vita

Michio Kaku, geboren 1947, ist einer der Väter der Stringtheorie und zählt zu den berühmtesten Physikern der Welt. Er arbeitet und lehrt als Professor für theoretische Physik an der City University of New York. Wie Albert Einstein und Stephen Hawking ist er auf der Suche nach der einen Theorie von allem zur Erklärung der fundamentalen Kräfte der Natur.

Monika Niehaus, Diplom in Biologie, Promotion in Neuro- und Sinnesphysiologie, freiberuflich als Autorin (SF, Krimi, Sachbücher), Journalistin und naturwissenschaftliche Übersetzerin (englisch/französisch) tätig. Mag Katzen, kocht und isst gern in geselliger Runde.

Bernd Schuh, geboren 1948 ist Physiker, Dozent, Journalist, Autor und Übersetzer. Er studierte Mathematik, Physik und Chemie in Köln, wurde 1977 promoviert und habilitierte sich 1982 in Physik. Er ist Träger des Georg von Holtzbrinck Preises für Wissenschaftsjournalismus.

Inhaltsübersicht

Widmung

Einführung in die endgültige Theorie

Eine Armee von Kritikern

Kapitel 1 Vereinheitlichung – der uralte Traum

Wiedergeburt in der Renaissance

Newtons Theorie der Kräfte

Was ist Symmetrie?

Bestätigung der Newton'schen Gesetze

Das Geheimnis von Elektrizität und Magnetismus

Die Maxwell'schen Gleichungen

Das Ende der Wissenschaft?

Kapitel 2 Einsteins Suche nach der Vereinigungstheorie

Symmetrie und Schönheit

Gravitation als gekrümmter Raum

Sonnenfinsternis und Gravitation

Newton und Einstein: Extreme Gegensätze

Auf der Suche nach der vereinheitlichten Theorie

Kapitel 3 Der Aufstieg der Quantentheorie

Die Quantenrevolution

Elektronenwellen

Eine Erklärung für das Periodensystem

Diracs Theorie des Elektrons

Was schwingt denn da eigentlich?

Der Zusammenprall der Titanen

Schrödingers Katze

Energie von der Sonne

Die Quantenmechanik und der Krieg

Kapitel 4 Eine Theorie von fast Allem

QED

Anwendungen der Quantenrevolution

Was ist Leben?

Die Kernkraft

Extreme Gegensätze II

Schwache Kraft und Geisterteilchen

Die Yang-Mills-Theorie

Higgs-Boson – das Gottesteilchen

Eine Theorie von fast Allem

LHC

Kapitel 5 Das dunkle Universum

Was ist ein Schwarzes Loch?

Reise durchs Wurmloch

Zeitreisen

Wie wurde das Universum erschaffen?

Warum ist der Nachthimmel schwarz?

Das Universum in der Allgemeinen Relativitätstheorie

Das Nachglühen des Urknalls

Inflation

Universum außer Kontrolle

Gesucht: das Graviton

Kapitel 6 Der Aufstieg der Stringtheorie: Versprechen und Probleme

Stringtheorie

10 Dimensionen

Das Graviton

Supersymmetrie

M-Theorie

Das holographische Universum

Die Theorie testen

Kritik an der Stringtheorie

Kann man sie überprüfen?

Die Suche nach der dunklen Materie

Jenseits des LHC

Der Urknall als Atomzertrümmerer

LISA

Der Test des inversen Quadratgesetzes

Das Problem der String-Landschaften

Wie ich selbst die Stringtheorie sehe

Eine Pyramide freilegen

Kapitel 7 Die Suche nach dem Sinn des Universums

Gottesbeweise

Mein eigener Standpunkt

Hatte das Universum einen Anfang oder nicht?

Sinn in einem endlichen Universum

Schlusswort

Danksagung

Weiterführende Literatur

Register

*Gewidmet meiner lieben Frau Shizue
und meinen Töchtern,
Dr. Michelle Kaku und Alyson Kaku*

Einführung in die endgültige Theorie

Es sollte die endgültige Theorie sein, eine einzige Partitur, die sämtliche Kräfte des Kosmos vereinen und alles von der Expansion des Universums bis zum Tanz winziger, subatomarer Partikel choreografieren würde. Die Herausforderung bestand darin, eine Formel zu entwickeln, deren mathematische Eleganz die Gesamtheit der Physik erfasst.

Einige der renommiertesten Physiker der Welt machten sich auf die Suche nach diesem Gral. Stephen Hawking hielt dazu sogar einen Vortrag mit dem vielversprechenden Titel «Ist das Ende der theoretischen Physik in Sicht?».

Falls eine solche Theorie erfolgreich sein sollte, wäre dies die Krönung der Naturwissenschaften. Es wäre der Heilige Gral der Physik, eine einzige Formel, aus der man im Prinzip sämtliche anderen Gleichungen ableiten könnte, vom Urknall bis zum Ende des Universums. Es wäre das Endergebnis von 2000 Jahren wissenschaftlichen Bemühens, seit die Menschen der Antike fragten: «Woraus besteht die Welt?»

Das ist eine atemberaubende Vision.

Einsteins Traum.

Als Achtjähriger stieß ich zum ersten Mal auf die Herausforderung, die dieser Traum darstellte. Eines Tages berichteten die Zeitungen, soeben sei ein großer Naturwissenschaftler gestorben. In der Zeitung war ein mir unvergessliches Bild.

Es zeigte seinen Schreibtisch mit einem aufgeschlagenen Notizbuch. Die Bildunterschrift besagte, dass der größte Naturwissenschaftler unserer Zeit das Werk, das er begann, nicht hatte zu Ende bringen können. Ich war fasziniert. Was war so schwierig, dass selbst der große Einstein keine Lösung finden konnte?

Dieses Notizbuch enthielt seine unvollendete Theorie von Allem, die Einstein als die vereinheitlichte oder einheitliche Feldtheorie bezeichnete. Er wollte eine Gleichung, vielleicht nicht mehr als einen Finger lang, die uns erlauben würde, «den Geist Gottes» zu erfassen, wie er es formulierte.

Ohne das ungeheure Ausmaß des Problems völlig zu verstehen, entschloss ich mich, in die Fußstapfen dieses großen Mannes zu treten, und hoffte, eine kleine Rolle bei der Vollendung seiner Suche zu spielen.

Doch viele andere haben es ebenfalls versucht und blieben ohne Erfolg. [1] Wie der Princeton-Physiker Freeman Dyson einst meinte, ist die Straße zur vereinheitlichten Feldtheorie übersät mit den Leichen fehlgeschlagener Versuche.

Der aussichtsreichste (und meiner Meinung nach einzige) Kandidat ist die Stringtheorie, die besagt, dass das Universum nicht aus punktförmigen Teilchen, sondern aus winzigen,

schwingenden Saiten (Strings) besteht, wobei jeder Ton einem subatomaren Teilchen entspricht.

Wenn wir ein genügend leistungsfähiges Mikroskop hätten, könnten wir sehen, dass Elektronen, Quarks, Neutrinos etc. nichts weiter als Schwingungen winziger Gummiringe sind. Wenn wir das Gummiband oft genug in unterschiedlicher Weise zupfen, schaffen wir schließlich sämtliche bekannten Teilchen im Universum. Das heißt, dass sich alle Gesetze der Physik auf die Harmonien dieser Strings reduzieren lassen. Die Chemie ist die Melodie, die man auf ihnen spielen kann. Das Universum ist eine Symphonie. Und der Geist Gottes, über den Einstein so eloquent schrieb, ist kosmische Musik, die durch die Raumzeit widerhallt.

Das ist nicht nur eine akademische Frage. Jedes Mal, wenn Wissenschaftler eine neue Kraft gefunden haben, hat dies den Lauf der Zivilisation und das Geschick der Menschheit verändert. So legte Newtons Entdeckung der Bewegungsgesetze und des Gravitationsgesetzes die Grundlage für das Maschinenzeitalter und die Industrielle Revolution. Michael Faradays und James Clerk Maxwells Erklärung von Elektrizität und Magnetismus bahnte den Weg für die Beleuchtung unserer Städte und schenkte uns leistungsfähige elektrische Motoren und Generatoren wie auch lichtschnelle Kommunikation via TV und Radio. Einsteins berühmte Gleichung $E = mc^2$ erklärte die Leuchtkraft der Sterne und trug zur Entschlüsselung der Kernkraft bei. Als Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg und andere die Geheimnisse der Quantentheorie enthüllten,

ermöglichten sie die moderne Hightech-Revolution mit Supercomputern, Lasern, dem Internet und all den fabelhaften Gadgets in unseren Wohnzimmern.

Letztlich verdanken wir all die Wunder moderner Technik den Wissenschaftlern, die nach und nach die fundamentalen Naturkräfte der Welt entschlüsselten. Nun könnten Wissenschaftler gemeinsam nach der Theorie suchen, die diese vier Kräfte der Natur – Schwerkraft, elektromagnetische Kraft sowie starke und schwache Kernkraft – in einer einzigen Theorie vereinigt. Letztlich könnte diese Theorie einige der tiefgründigsten naturwissenschaftlichen Geheimnisse und Fragen klären, zum Beispiel:

- Was geschah vor dem Urknall?
- Was liegt auf der anderen Seite eines Schwarzen Loches?
- Sind Zeitreisen möglich?
- Gibt es Wurmlöcher, die zu anderen Universen führen?
- Gibt es höhere Dimensionen?
- Gibt es ein Multiversum von Paralleluniversen?

In diesem Buch geht es um die Suche nach dieser ultimativen Theorie und um all das bizarre Hin und Her dessen, was zweifellos zu einem der seltsamsten Kapitel in der Geschichte der Physik gehört. Wir werden alle vorangegangenen Revolutionen Revue passieren lassen, denen wir unsere technologischen Wunder verdanken; dabei beginnen wir mit der Newton'schen Revolution und schreiten fort zur Beherrschung der elektromagnetischen Kraft, der Entwicklung

der Relativitäts- und der Quantentheorie und kommen schließlich zur modernen Stringtheorie. Und wir werden sehen, wie diese Theorie auch die größten Geheimnisse von Raum und Zeit lösen könnte.

Eine Armee von Kritikern

Es bleiben jedoch noch einige Hürden zu überwinden. Bei aller Begeisterung für die Stringtheorie haben Kritiker lautstark auf Mängel hingewiesen. Und über all dem Rummel und Getöse haben sich echte Fortschritte verzögert.

Das offenkundigste Problem ist, dass wir trotz all der schmeichelhaften Presse, die die Schönheit und Komplexität der Theorie preist, keine soliden, testbaren Beweise vorlegen können. Einst hegten wir die Hoffnung, der Large Hadron Collider (LHC), der größte Teilchenbeschleuniger der Geschichte, der im schweizerischen Genf steht, würde uns konkrete Beweise für die endgültige Theorie liefern, doch diese Hoffnung hat sich bislang nicht erfüllt. Der LHC hat zwar das Higgs-Boson (oder Gottesteilchen) gefunden, doch dieses Teilchen war nur ein winziger Teil der endgültigen Theorie.

Auch wenn es ehrgeizige Vorschläge für einen noch leistungsfähigeren Nachfolger des LHC gibt, ist nicht garantiert, dass diese so teuren Maschinen überhaupt irgendetwas finden werden. Niemand kann mit Sicherheit sagen, bei welcher Energie wir auf neue subatomare Teilchen stoßen werden, die die Theorie bestätigen könnten.

Die wichtigste Kritik an der Stringtheorie ist jedoch vielleicht, dass sie ein Multiversum von Universen voraussagt. Einstein meinte einst, die Schlüsselfrage sei: Hatte Gott eine

Wahl, als er das Universum schuf? Ist das Universum einzigartig? Die Stringtheorie selbst ist einzigartig, doch sie hat wahrscheinlich eine unendliche Anzahl von Lösungen. Physiker nennen dies das Landschaftsproblem – die Tatsache, dass unser Universum vielleicht nur *eine* Lösung in einem Meer von anderen, ebenso gültigen Lösungen ist. Wenn unser Universum eines von vielen möglichen Universen ist, welches ist dann das unsere? Warum leben wir in diesem speziellen Universum und nicht in einem anderen? Was ist dann die Vorhersagekraft der Stringtheorie? Ist es eine Theorie von Allem oder eine Theorie von allem Möglichen?

Ich bekenne, dass ich einen Anteil an dieser Suche habe. Ich arbeite seit 1968 an der Stringtheorie, seitdem sie zufällig, unangekündigt und völlig unerwartet auftauchte. Ich habe die bemerkenswerte Evolution dieser Theorie erlebt, die sich von einer einzigen Formel zu einer Disziplin entwickelte, deren Forschungsartikel eine ganze Bibliothek füllen.

Heutzutage bildet die Stringtheorie die Basis für einen Großteil der physikalischen Forschung in den führenden Laboren der Welt. Dieses Buch wird Ihnen hoffentlich eine ausgewogene, objektive Analyse der Durchbrüche und Grenzen der Stringtheorie vermitteln.

Es wird auch erklären, warum diese Suche die Fantasie der weltweit führenden Physiker gefangen nimmt und warum diese Theorie so viele leidenschaftliche und kontroverse Diskussionen ausgelöst hat.

Kapitel 1

Vereinheitlichung – der uralte Traum

Wenn man den Nachthimmel in all seiner funkelnden Sternenpracht betrachtet, kann man leicht von seiner schieren, atemberaubenden Majestät überwältigt werden. Und dann stellen wir uns eine Frage, die an das größte Geheimnis überhaupt rührt.

Steckt hinter diesem Universum ein großer Entwurf?

Wie können wir einen Sinn in einem anscheinend sinnlosen Kosmos finden?

Hat unsere Existenz Sinn und Zweck, oder ist sie völlig ohne Ziel?

All das erinnert mich an ein Gedicht von Steven Crane:

A man said to the universe:

«Sir, I exist!»

«However,» replied the universe,

«The fact has not created in me a sense of obligation.»

(Ein Mann erklärte dem Universum:

«Mein Herr, ich existiere!»

«Mag sein», entgegnete das Universum,
«Doch die Tatsache verpflichtet mich zu nichts.»)

Die alten Griechen gehörten zu den Ersten, die den ernsthaften Versuch unternahmen, das Chaos der Welt um uns herum zu ordnen. Philosophen wie Aristoteles glaubten, alles lasse sich auf eine Mischung von vier Grundelementen reduzieren: Erde, Luft, Feuer und Wasser. Aber wie erwächst aus diesen vier Elementen die reiche Komplexität der Welt?

Die Griechen schlugen mindestens zwei Antworten auf diese Frage vor. Die erste gab der Philosoph Demokrit noch vor Aristoteles. Er glaubte, alles lasse sich auf winzige, unsichtbare, unzerstörbare Teilchen zurückführen, die er Atome (griechisch für «unteilbar») nannte. Seine Kritiker wiesen jedoch darauf hin, dass sich ein direkter Beweis für Atome unmöglich erbringen ließ, weil sie zu klein für eine Beobachtung waren. Demokrit konnte jedoch auf überzeugende Indizien verweisen.

Stellen Sie sich zum Beispiel einen Goldring vor. Im Lauf der Zeit beginnt der Ring sich abzunutzen. Etwas davon verschwindet. Jeden Tag geht ein winziger Teil seiner Materie verloren. Obgleich Atome unsichtbar sind, lässt sich ihre Existenz indirekt ableiten.

Selbst heute geht ein großer Teil der modernen Wissenschaft indirekt vor. Wir kennen die Zusammensetzung der Sonne, die detaillierte Struktur der DNA, das Alter des Universums allein aufgrund von Messungen dieser Art. Wir wissen all dies, obwohl wir niemals die Sterne besucht haben, in ein DNA-

Molekül eingedrungen sind oder Zeuge des Urknalls waren. Der Unterschied zwischen direktem und indirektem Beweis ist von entscheidender Bedeutung, wenn wir Versuche diskutieren, die die vereinheitlichte Feldtheorie belegen.

Einen zweiten Ansatz lieferte der große Mathematiker Pythagoras.

Pythagoras hatte die Eingebung, irdische Phänomene wie Musik mathematisch zu beschreiben. Der Legende zufolge entdeckte er Ähnlichkeiten zwischen dem Klang, der beim Zupfen einer Saite der Leier entsteht, und den Resonanzen, die beim Hämmern eines Metallstabes auftreten. Er stellte fest, dass dabei musikalische Frequenzen entstehen, die in bestimmten Verhältnissen schwingen. Daher hat etwas ästhetisch so Schönes wie Musik seinen Ursprung in der Mathematik der Resonanzen. Dies sprach nach Pythagoras' Meinung dafür, dass die Vielfalt der Objekte, die wir sehen, denselben mathematischen Regeln gehorchen musste.

Daher lieferten uns die alten Griechen mindestens zwei großartige Theorien: die Vorstellung, dass alles aus unsichtbaren, unzerstörbaren Atomen besteht und dass sich die Vielfalt der Natur durch die Mathematik der Schwingungen beschreiben lässt.

Mit dem Zusammenbruch der klassischen Zivilisation ging diese Kultur philosophischer Diskussionen und Debatten jedoch leider verloren. Die Vorstellung, es könne ein Paradigma geben, das das Universum erklärt, geriet für fast tausend Jahre in Vergessenheit. Dunkelheit breitete sich über die westliche Welt

aus, und wissenschaftliche Fragestellungen wurden weithin durch abergläubische Überzeugungen und den Glauben an Magie und Hexerei ersetzt.

Wiedergeburt in der Renaissance

Im 17. Jahrhundert wagten einige wenige bedeutende Wissenschaftler, die etablierte Ordnung in Frage zu stellen und die Natur des Universums zu erforschen, doch sie stießen auf starke Widerstände und wurden heftig verfolgt. Johannes Kepler, der als einer der Ersten Mathematik auf die Bewegung der Planeten anwandte, war Hofmathematiker von Kaiser Rudolf II. und entging vielleicht deshalb der kirchlichen Verfolgung, weil er in seine wissenschaftlichen Arbeiten fromme religiöse Elemente einflocht.

Der ehemalige Mönch Giordano Bruno hatte nicht so viel Glück. Im Jahr 1600 wurde er wegen Häresie vor Gericht gestellt und zum Tode verurteilt. Er wurde geknebelt, nackt durch die Straßen von Rom geführt und schließlich auf dem Scheiterhaufen verbrannt. Sein Hauptverbrechen? Die Vermutung, es könne auf Planeten, die andere Sterne umkreisen, Leben geben.

Dem großen Galilei, dem Vater der experimentellen Wissenschaft, drohte dasselbe Schicksal. Doch anders als Bruno widerrief Galilei angesichts der drohenden Todesstrafe seine Thesen. Nichtsdestotrotz hinterließ er mit seinem Teleskop, der vielleicht revolutionärsten und aufrührerischsten Erfindung in der Wissenschaft, ein bleibendes Vermächtnis. Mit einem Teleskop konnte jedermann mit eigenen Augen sehen, dass der

Mond pockennarbig war und Krater aufwies, dass die Venus Phasen zeigte, die zu einer Umlaufbahn um die Sonne passten, und dass der Jupiter Monde hatte, was allesamt ketzerische Ideen waren.

Galilei wurde unter Hausarrest gestellt, durfte keine Besucher empfangen und erblindete schließlich. (Angeblich, weil er einst mit seinem Teleskop direkt in die Sonne geblickt hatte.) Der Wissenschaftler starb als gebrochener Mann. Doch im Jahr darauf wurde in England ein Knabe geboren, der seine und Keplers unvollendete Theorie vollenden und uns eine vereinheitlichte Theorie des Himmels schenken sollte.

Newton's Theorie der Kräfte

Isaac Newton ist vielleicht der größte Naturwissenschaftler, der jemals gelebt hat. In einer von Aberglauben und Hexerei besessenen Welt wagte er es, die universellen Gesetze des Himmels niederzuschreiben und zum Studium von Kräften eine neue, von ihm erfundene Mathematik, die sogenannte Infinitesimalrechnung, anzuwenden. Wie der Physiker Steven Weinberg schrieb: «Erst mit Isaac Newton beginnt der moderne Traum von einer endgültigen Theorie wirklich.» [1] Damals verstand man darunter die Theorie von Allem, das heißt die Theorie, die alle Bewegung beschrieb.

Alles begann, als Newton 23 Jahre alt war. Die Cambridge University wurde aufgrund des Schwarzen Todes, der Pest, geschlossen. Eines Tages im Jahr 1666, als er auf seinem Landsitz umherschlenderte, sah er einen Apfel fallen. Daraufhin stellte er sich eine Frage, die den Lauf der Menschheitsgeschichte verändern sollte:

Wenn ein Apfel fällt, fällt dann auch der Mond?

Vor Newton lehrte die Kirche, es gebe zwei Arten von Gesetzen. Da waren zum einen die Gesetze, die auf Erden galten und die durch die Sünden der Sterblichen unvollkommen waren. Und dann gab es zum anderen die reinen, perfekten und harmonischen Gesetze des Himmels.

Die Essenz von Newtons Theorie bestand darin, eine einheitliche Theorie vorzuschlagen, die Himmel und Erde umfasste.

In seinem Notizbuch zeichnete er ein schicksalhaftes Bild (Abbildung 1).

Wenn eine Kanonenkugel von der Spitze eines Berges abgefeuert wird, legt sie eine gewisse Strecke zurück, bevor sie auf dem Boden landet. Wenn man die Kugel jedoch mit immer höherer Geschwindigkeit abschießt, bewegt sie sich weiter und weiter, bevor sie zurück auf die Erde fällt, bis sie die Erde schließlich vollständig umrundet und zur Bergspitze zurückkehrt. Newton zog den Schluss, dass das Gesetz der Schwerkraft, das Äpfel und Kanonenkugeln lenkt, auch den Mond auf seiner Umlaufbahn um die Erde hält. Für die irdische und die himmlische Physik galten dieselben Regeln.

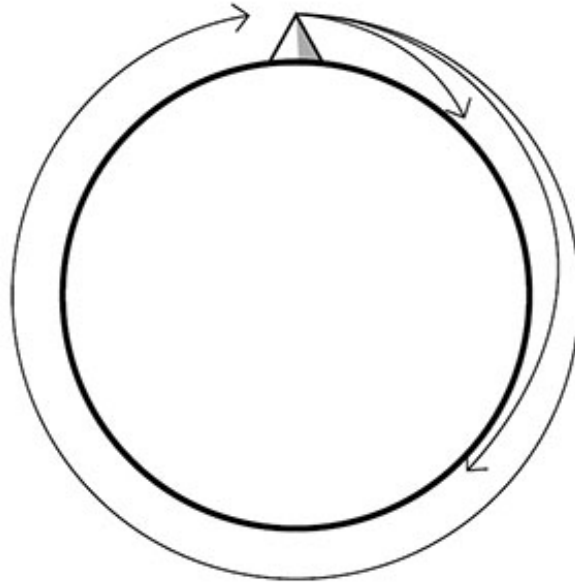


Abbildung 1. Man kann eine Kanonenkugel mit immer größerer Energie abfeuern, sodass sie schließlich die Erde umkreist und zu ihrem Startpunkt zurückkehrt. Newton erläuterte dann, dass dies die Umlaufbahn des Mondes erkläre, und vereinte damit die physikalischen Gesetze, die auf der Erde galten, mit den Gesetzen himmlischer Körper.

Zu diesem Schluss kam er, indem er das Konzept der Kräfte einführte. Objekte bewegten sich, weil sie von Kräften angezogen oder abgestoßen wurden, die universell waren und sich präzise messen und mathematisch bestimmen ließen. (Zuvor hatten einige Theologen angenommen, Objekte bewegten sich aufgrund eines inneren Bedürfnisses – wenn sie also fielen, dann aufgrund des Wunsches, sich mit der Erde zu vereinen.)

Daher führte Newton das Konzept der Vereinheitlichung ein.

Newton war jedoch ein notorisch verschlossener Mann und hielt einen Großteil seiner Arbeit geheim. Er hatte kaum

Freunde, war unfähig zu leichterer Konversation, verstrickte sich oft in bittere Prioritätsstreitigkeiten mit anderen Wissenschaftlern über seine Entdeckungen.

Im Jahr 1682 begab sich ein sensationelles Ereignis, das den Lauf der Geschichte verändern sollte. Ein feuriger Komet zog über London. Jedermann, vom König bis zum Bettler, diskutierte die Neuigkeit. Woher kam er? Wohin ging er? Worauf deutete er hin?

Ein Mann, der sich für diesen Kometen interessierte, war der Astronom Edmond Halley. Er reiste nach Cambridge, um den berühmten Isaac Newton zu treffen, der bereits für seine Theorie des Lichts wohlbekannt war. (Durch Zerlegen des Sonnenlichts mittels eines Glasprismas hatte Newton gezeigt, dass sich weißes Licht in alle Farben des Regenbogens aufspalten lässt, und bewies damit, dass weißes Licht tatsächlich aus Farben zusammengesetzt ist. Zudem erfand er einen neuen Typ von Teleskop, der statt Linsen reflektierende Spiegel verwendete.) Als Halley Newton nach dem Kometen fragte, der in aller Munde war, erfuhr er zu seiner Verwunderung, dass sich Kometen, wie Newton anhand seiner eigenen Gravitationstheorie zeigen konnte, in Ellipsen um die Sonne bewegten und ihre Bahn sich vorhersagen ließ. Tatsächlich verfolgte Newton ihren Lauf mit Hilfe des von ihm erfundenen Teleskops, und sie bewegten sich genau so, wie er es vorhersagte.

Halley war wie vor den Kopf geschlagen.

Er erkannte sofort, dass er Zeuge einer umwälzenden wissenschaftlichen Entdeckung war, und erklärte sich bereit, die Druckkosten eines Werkes zu übernehmen, das schließlich zu einem der größten Meisterwerke in der Geschichte der Wissenschaft werden sollte, Newtons *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* oder kurz *Principia*.

Wie Halley darüber hinaus erkannte, sagte Newton voraus, dass Kometen unter Umständen in regelmäßigen Abständen zurückkehren konnten, und so berechnete der Astronom, dass der Londoner Komet von 1682 im Jahr 1758 wiederkehren würde. (Der Halley'sche Komet überquerte Europa, wie vorausgesagt, am Weihnachtsabend 1758 – was Newtons und Halleys Ruhm posthum bestätigte.)

Newton's Theorie der Bewegung und der Gravitation gehört zu den größten Errungenschaften des menschlichen Geistes, ein einziges Prinzip, das die bekannten Gesetze der Bewegung vereinigt. Der englische Dichter Alexander Pope schrieb dazu:

Natur und der Natur Gesetze lagen in dunkler Nacht,
Gott sprach: Newton sei! Und sie strahlten voll Pracht.

Selbst heute noch sind es diese Gesetze, die NASA-Ingenieuren erlauben, Raumsonden durch das Sonnensystem zu schicken.

Was ist Symmetrie?

Newtons Gravitationsgesetz ist auch deshalb bemerkenswert, weil es eine Symmetrie besitzt, sodass die Gleichung unverändert bleibt, wenn wir eine Rotation durchführen. Stellen Sie sich eine Kugelschale vor, die die Erde umgibt. Die Schwerkraft ist auf jedem Punkt der Sphäre identisch. Genau aus diesem Grund ist die Erde rund statt anders geformt, denn die Gravitation drückt die Erde gleichmäßig zusammen. Aus diesem Grund gibt es auch keine würfelförmigen Sterne oder pyramidenförmigen Planeten. (Kleine Asteroiden sind oft unregelmäßig geformt, denn ihre eigene Schwerkraft ist zu gering, um sie gleichmäßig zu komprimieren.)

Das Konzept der Symmetrie ist einfach, elegant und intuitiv verständlich. Überdies werden wir im ganzen Buch feststellen, dass Symmetrie nicht nur zum Aufhübschen einer Theorie dient, sondern dass es sich dabei tatsächlich um ein wesentliches Merkmal handelt, das auf ein grundlegendes physikalisches Prinzip im Universum hinweist.

Aber was ist gemeint, wenn man sagt, eine Gleichung sei symmetrisch?

Ein Objekt ist dann symmetrisch, wenn es nach einer Neuordnung seiner Teile dasselbe – oder invariant – bleibt. So ist eine Kugel beispielsweise symmetrisch, weil sie nach einer

Rotation dieselbe bleibt. Doch wie lässt sich diese Tatsache mathematisch ausdrücken?

Denken Sie an die Erde, die sich um die Sonne dreht (siehe Abbildung 2). Der Radius der Erdumlaufbahn ist gegeben durch R und er bleibt derselbe, während die Erde um die Sonne läuft. (Tatsächlich ist der Erdorbit elliptisch, sodass R ein wenig variiert, doch das spielt für dieses Beispiel keine Rolle.) Die Koordinaten der Erdumlaufbahn sind gegeben durch X und Y . Während sich die Erde auf ihrem Orbit bewegt, verändern sich X und Y ständig, doch R ist invariant und bleibt unverändert.

Ebenso behalten Newtons Gleichungen ihre Symmetrie, das heißt, die Gravitation zwischen Erde und Sonne bleibt dieselbe, während sich die Erde um die Sonne bewegt [1] – während sich unser Bezugssystem verändert, bleiben die Gesetze unverändert. Ganz gleich, welche Orientierung wir wählen, um das Problem zu betrachten: Die Regeln verändern sich nicht und die Ergebnisse bleiben dieselben.