

BRIAN GREENE
Der Stoff, aus dem der Kosmos ist

Buch

Ist der Raum etwas, was es wirklich gibt? Warum hat die Zeit eine Richtung? Könnte das Universum ohne Raum und Zeit existieren? Wie ist unsere Wirklichkeit in ihrem Innersten beschaffen? Das Verständnis der modernen Naturwissenschaft vom Universum entwickelt sich mit atemberaubender Geschwindigkeit und stellt alles auf den Kopf, was unsere Alltagserfahrung von Raum und Zeit uns nahe legt.

Mit Witz, Wissen und einem untrüglichen Gespür für den anschaulichen Vergleich zeichnet Brian Greene den Gang der Forschung nach: von Newtons unwandelbarer Welt, über Einsteins Konzept einer flexiblen Raumzeit bis zur verwirrenden Welt der Quantenmechanik. Brian Greene verschafft uns einen faszinierenden Einblick in die neuesten Entwicklungen in der Superstring- und M-Theorie und zeigt, wie es mit Hilfe dieser Konzeptionen gelingen könnte, das Verhalten aller Dinge, von den kleinsten Teilchen bis zum großen Schwarzen Loch, einheitlich zu beschreiben.

Bildhaft, unterhaltsam und zugleich wissenschaftlich präzise eröffnet Greene auch dem naturwissenschaftlichen Laien die atemberaubende Welt der theoretischen Physik und was deren Erkenntnisse für unseren Wirklichkeitssinn bedeuten.

Autor

Brian Greene zählt zu den führenden Physikern auf dem Gebiet der Superstrings. Er studierte in Harvard und promovierte in Oxford. Seit 1990 lehrt er an verschiedenen Universitäten und ist heute Professor für Physik und Mathematik an der Columbia University in New York. Seine Bücher »Das elegante Universum« und »Der Stoff, aus dem der Kosmos ist« wurden international zu Bestsellern.

Im Goldmann Verlag ist von Brian Greene außerdem erschienen:

Das elegante Universum (15374)

Brian Greene

Der Stoff, aus
dem der Kosmos ist

Raum, Zeit und die Beschaffenheit
der Wirklichkeit

Aus dem
amerikanischen Englisch
von Hainer Kober

GOLDMANN

Die amerikanische Originalausgabe
erschien 2004 unter dem Titel »The Fabric of the Cosmos«
bei Alfred A. Knopf, New York.



Mix
Produktgruppe aus vorbildlich
bewirtschafteten Wäldern und
anderen kontrollierten Herkünften

Zert.-Nr. SGS-COC-1940
www.fsc.org
© 1996 Forest Stewardship Council

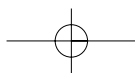
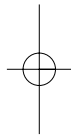
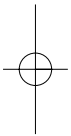
Verlagsgruppe Random House FSC-DEU-0100
Das FSC-zertifizierte Papier *München Super* für Taschenbücher
aus dem Goldmann Verlag liefert Mochenwangen Papier

1. Auflage
Taschenbuchausgabe April 2008
Wilhelm Goldmann Verlag, München,
in der Verlagsgruppe Random House GmbH
Copyright © der Originalausgabe 2004 by Brian Greene
Copyright © der deutschsprachigen Ausgabe 2004
by Siedler Verlag, München,
in der Verlagsgruppe Random House GmbH
Umschlaggestaltung: Design Team München
in Anlehnung an die Umschlaggestaltung der Hardcover-Ausgabe
(Rothfos & Gabler, Hamburg)
Umschlagabbildung: DB Image/ Brand X Pictures
KF · Herstellung: Str.
Druck und Bindung: GGP Media GmbH, Pößneck
Printed in Germany
ISBN: 978-3-442-15487-6

www.goldmann-verlag.de

Für Tracy





Inhalt

Vorwort	9
---------	---

I

SCHAUPLATZ DER WIRKLICHKEIT

1 Wege zur Wirklichkeit <i>Raum, Zeit und warum die Dinge sind, wie sie sind</i>	17
2 Das Universum und der Eimer <i>Ist Raum eine menschliche Abstraktion oder eine physikalische Gegebenheit?</i>	39
3 Relativitätstheorie und das Absolute <i>Ist Raumzeit eine Einsteinsche Abstraktion oder eine physikalische Gegebenheit?</i>	57
4 Verschränkter Raum <i>Was bedeutet räumliche Trennung in einem Quantenuniversum?</i>	99

II

ZEIT UND ERFAHRUNG

5 Der gefrorene Fluss <i>Fließende Zeit?</i>	153
6 Zufall und Pfeil <i>Hat Zeit eine Richtung?</i>	171
7 Zeit und Quant <i>Einsichten in das Wesen der Zeit aus der Quantenperspektive</i>	209

III RAUMZEIT UND KOSMOLOGIE

8	Von Schneeflocken und Raumzeit <i>Symmetrie und die Entwicklung des Kosmos</i>	255
9	Das Vakuum verdampfen <i>Wärme, Nichts und Vereinheitlichung</i>	289
10	Dekonstruktion des Knalls <i>Was knallte?</i>	311
11	Quanten in the Sky with Diamonds <i>Inflation, Quantenfluktuationen und der Zeitpfeil</i>	345

IV URSPRUNG UND VEREINHEITLICHUNG

12	Die Welt auf einem String <i>Die Raumzeitstruktur nach der Stringtheorie</i>	369
13	Das Universum auf einer Bran <i>Spekulationen über Raum und Zeit in der M-Theorie</i>	423

V WIRKLICHKEIT UND FANTASIE

14	Im Himmel und auf Erden <i>Experimente mit Raum und Zeit</i>	465
15	Teleporter und Zeitmaschinen <i>Reise durch Raum und Zeit</i>	489
16	Zukunftsspekulationen <i>Aussichten für Raum und Zeit</i>	527
	Anmerkungen	555
	Glossar	607
	Literatur – eine Auswahl	614
	Register	617

Vorwort

Raum und Zeit nehmen unsere Fantasie gefangen wie kein anderer wissenschaftlicher Gegenstand. Aus gutem Grund. Sie bilden den Schauplatz der Wirklichkeit, die eigentliche Struktur des Kosmos. Unsere gesamte Existenz – alles, was wir tun, denken und erfahren – findet in irgendeiner Raumregion während irgendeines Zeitintervalls statt. Doch die Wissenschaft ringt noch immer um das Verständnis dessen, was Raum und Zeit tatsächlich sind. Sind sie wirklich physikalische Realitäten oder einfach nützliche Ideen? Wenn sie real sind, sind sie dann fundamental, oder bestehen sie aus irgendwelchen grundlegenden Bestandteilen? Was bedeutet es, dass Raum leer ist? Hat die Zeit einen Anfang? Besitzt sie einen Pfeil, das heißt, fließt sie unabänderlich aus der Vergangenheit in die Zukunft, wie unsere Alltagserfahrung nahe legt? Können wir Raum und Zeit manipulieren? Im vorliegenden Buch betrachten wir dreihundert Jahre leidenschaftlicher wissenschaftlicher Forschung, die sich um Antworten – oder zumindest Ansätze von Antworten – auf solche grundlegenden, aber vertrackten Fragen nach der Natur des Universums bemüht.

Unsere Reise führt uns wiederholt zu einer anderen, eng verwandten Frage, die so umfassend wie schwierig ist: Was *ist* Wirklichkeit? Wir Menschen haben nur Zugang zur inneren Erfahrung der Wahrnehmung und des Denkens, wie sollen wir uns also ein wahrheitsgemäßes Bild von der Außenwelt machen? Philosophen schlagen sich schon lange mit diesem Problem herum. Filmemacher haben es publikumswirksam mit der Beschwörung künstlicher Welten abgehandelt, die durch präzise Nervenreizungen hervorgerufen werden und nur in der Vorstellung ihrer Protagonisten existieren. Und Physiker wie ich sind sich sehr wohl bewusst, dass die Wirklichkeit, die wir beobachten – Materie, die sich auf der Bühne von Raum und Zeit entwickelt –, vielleicht wenig oder gar nichts mit der Wirklichkeit dort draußen zu tun hat. Trotzdem nehmen wir die Beobachtungen ernst, denn sie sind alles, was wir haben. Wir wählen empirische Daten und das Bezugssystem der Mathematik, nicht schrankenlose Fantasie oder

rigorose Skepsis, als unsere Richtschnur und suchen nach den einfachsten und dennoch möglichst weit reichenden Theorien, um die Ergebnisse heutiger und künftiger Experimente erklären beziehungsweise vorhersagen zu können. Diese Bedingungen schränken unsere Theorien erheblich ein. (Im vorliegenden Buch werden Sie beispielsweise nicht die Vermutung finden, ich könnte ein »Gehirn im Tank« sein, in einer Nährflüssigkeit schwimmen, an Tausende von Elektroden angeschlossen sein und auf Grund deren Reizwirkung lediglich *denken*, dass ich gerade an diesem Text schriebe.) Doch in den letzten hundert Jahren haben physikalische Entdeckungen den Schluss nahe gelegt, dass unsere Alltagsvorstellung von der Wirklichkeit grundlegend revidiert werden muss. Diese Forschungsergebnisse sind so spektakulär, verlangen unserem Verstand so viel ab und schütteln unsere Paradigmen so gründlich durch, dass sie es mit den abenteuerlichsten Science-Fiction-Fantasien aufnehmen können. Ihre revolutionären Konsequenzen werden uns auf den folgenden Seiten ständig begleiten.

Viele der Fragen, mit denen wir uns hier beschäftigen, bereiteten schon Aristoteles, Galilei, Newton, Einstein und zahllosen anderen Denkern und Forschern Kopfzerbrechen. Da dieses Buch bestrebt ist, dem Leser Wissenschaft in ihrer Entstehung zu vermitteln, werden wir nachverfolgen, wie die Fragen in einer Generation für endgültig beantwortet erklärt, in der nächsten wieder aufgegriffen und von den Wissenschaftlern der folgenden Jahrhunderte ständig neu gefasst und verfeinert wurden.

Bei der verblüffenden Frage beispielsweise, ob vollkommen leerer Raum einer weißen Leinwand gleicht, eine reale Gegebenheit oder nur eine abstrakte Idee ist, werden wir beobachten, wie das Pendel der wissenschaftlichen Meinung hin- und herschwingt zwischen Isaac Newtons Erklärung im siebzehnten Jahrhundert, der Raum sei real, Ernst Machs Schlussfolgerung im neunzehnten, er sei es nicht, und Einsteins spektakulärer Neuformulierung der Frage im zwanzigsten, als er Raum und Zeit miteinander verschmolz und Mach weitgehend widerlegte. Es folgen weitere Entdeckungen, die der Frage abermals eine andere Gestalt geben, indem sie die Bedeutung von »leer« neu definieren. Danach ist der Raum stets von so genannten Quantenfeldern besetzt und möglicherweise von einer diffusen Energie durchdrungen, der kosmologischen Konstanten – einem modernen Nachhall jener alten und in Misskredit geratenen Vorstellung vom Äther, der den Raum erfüllt. Mehr noch, wir betrachten anschließend, wie moderne Experimente im All bestimmte Eigenschaften der Machschen Schlussfolgerungen bestätigen könnten, die mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie übereinstimmen und anschaulich belegen, wie faszinierend und vielfach verflochten die wissenschaftliche Entwicklung ist.

In unserer eigenen Epoche stoßen wir auf die tröstlichen Erkenntnisse, die

uns die inflationäre Kosmologie bezüglich des Zeitpfeils vermittelt, das reichliche Angebot der Stringtheorie an zusätzlichen Raumdimensionen, die radikale These der M-Theorie, dass der Raum, in dem wir existieren, nur ein Splitter sei, der in einem größeren Kosmos schwebt, und der aktuellen Spekulation, nach der das Universum vielleicht lediglich ein kosmisches Hologramm ist. Wir wissen noch nicht, ob diese jüngeren theoretischen Vorschläge stimmen. Doch ganz gleich, wie ungeheuerlich sie klingen, wir nehmen sie ernst, weil sie an den Wegen liegen, auf die uns unsere hartnäckige Suche nach den fundamentalen Gesetzen des Universums geführt hat. Eine seltsame und unvertraute Wirklichkeit kann nicht nur aus der blühenden Fantasie von Science-Fiction-Autoren erwachsen, sondern auch aus den neuesten Forschungsergebnissen der modernen Physik.

Das vorliegende Buch ist in erster Linie für Leser bestimmt, die nur wenig oder keine formalen physikalischen Kenntnisse besitzen, deren Interesse an den großen Zusammenhängen des Universums aber so wach ist, dass sie bereit sind, sich mit einer Anzahl komplexer und schwieriger Konzepte auseinander zu setzen. Wie in meinem ersten Buch, *Das elegante Universum*, halte ich mich eng an die entscheidenden wissenschaftlichen Begriffe, während ich die mathematischen Einzelheiten durch Metaphern, Analogien, Geschichten und Abbildungen ersetze. In den schwierigsten Abschnitten des Buches warne ich die Leser vor und gebe denen, die beschließen, diese eingehenderen Erörterungen zu überspringen oder zu überfliegen, kurze Zusammenfassungen. Auf diese Weise sollte jeder Leser in der Lage sein, die Chronologie der Entdeckungen nachzuvollziehen und nicht nur einen Eindruck vom gegenwärtigen Weltbild der Physik zu gewinnen, sondern auch zu verstehen, wie und warum sich dieses Weltbild durchgesetzt hat.

Das Buch dürfte auch für Studenten, erfahrene Leser populärwissenschaftlicher Bücher, Lehrer und Leute vom Fach von einigem Interesse sein. Zwar behandeln die Anfangskapitel das notwendige, aber allgemein bekannte Hintergrundwissen der Relativitätstheorie und Quantenmechanik, doch die Ausrichtung auf die Körperlichkeit von Raum und Zeit ist ein etwas ungewöhnlicher Ansatz. Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit einem breiten Spektrum von Themen – dem Bellschen Theorem, Delayed-Choice-Experimenten, Quantenmessungen, beschleunigter Expansion, der Möglichkeit, in der nächsten Generation von Teilchenbeschleunigern Schwarze Löcher zu erzeugen, bizarren Wurmloch-Zeitmaschinen, um nur einige zu nennen –, und dort können sich auch fachlich vorbelastete Leser im Hinblick auf eine Reihe der faszinierendsten und meist diskutierten wissenschaftlichen Vorstöße auf den Stand der Forschung bringen.

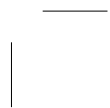
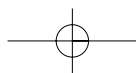
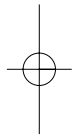
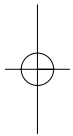
Einige der Ergebnisse, über die ich berichte, sind umstritten. Bei Problemen, die noch offen sind, habe ich die entscheidenden Aspekte im Haupttext erörtert. Bei strittigen Punkten, in denen meiner Meinung nach bereits ein größerer Konsens erzielt worden ist, habe ich die abweichenden Auffassungen in die Anmerkungen verbannt. Einige Forscher, vor allem solche, die Minderheitenstandpunkte vertreten, werden an manchen meiner Urteile vielleicht Anstoß nehmen, doch ich habe mich im Haupttext und in den Anmerkungen um eine ausgewogene Darstellung bemüht. In den Anmerkungen können besonders sorgfältige Leser auch vollständigere Erläuterungen, Klärungen und Einschränkungen zu Aspekten nachlesen, die ich im Text vereinfacht dargestellt habe. Außerdem finden sich dort mathematische Erläuterungen zu den Ausführungen des Haupttextes, der auf alle Gleichungen verzichtet. Im Glossar lassen sich einige der spezielleren wissenschaftlichen Begriffe rasch nachschlagen.

Selbst ein Buch von dieser Länge kann das riesige Gebiet von Raum und Zeit nicht erschöpfend behandeln. Ich habe mich daher auf die Aspekte konzentriert, die mich interessieren und die ich für notwendig halte, um ein vollständiges Bild von der Wirklichkeit zu entwerfen, das sich aus den Ergebnissen der modernen Naturwissenschaft ergibt. Natürlich kommt in vielen dieser Entscheidungen mein persönlicher Geschmack zum Ausdruck, daher möchte ich mich bei all denen entschuldigen, die der Meinung sind, ihre eigene Arbeit oder ihr bevorzugtes Forschungsfeld seien nicht hinreichend berücksichtigt worden.

Bei der Arbeit an dem vorliegenden Buch hatte ich das Glück, mich auf die Rückmeldungen vieler interessierter Leser stützen zu können. Raphael Kasper, Lubos Motl, David Steinhardt und Ken Vineberg lasen verschiedene Versionen des gesamten Manuskripts, manchmal mehrfach, und unterbreiteten viele, detaillierte und kluge Vorschläge, die erheblich zur Klarheit und Genauigkeit der Darstellung beitrugen. Ihnen möchte ich herzlich danken. David Albert, Ted Baltz, Nicholas Boles, Tracy Day, Peter Demchuk, Richard Easther, Anna Hall, Keith Goldsmith, Shelley Goldstein, Michael Gordin, Joshua Greene, Arthur Greenspoon, Gavin Guerra, Sandra Kauffman, Edward Kastenmeier, Robert Krulwich, Andrei Linde, Shani Offen, Maulik Parikh, Michael Popowits, Marlan Scully, John Stachel und Lars Straeter lasen das ganze Manuskript oder Teile davon, und ihre Kommentare waren für mich außerordentlich nützlich. Sehr hilfreich waren die Gespräche mit Andreas Albrecht, Michael Bassett, Sean Carroll, Andrea Cross, Rita Greene, Alan Guth, Mark Jackson, Daniel Kabat, Will Kinney, Justin Khoury, Hiranya Peiris, Saul Perlmutter, Koenraad Schalm, Paul Steinhardt, Leonard Susskind, Neil Turok, Henry Tye, William Warmus und Erick Weinberg. Besonderen Dank schulde ich Raphael Gunner,

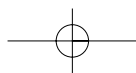
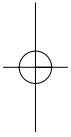
dessen unbestechlicher Sinn für eine überzeugende Argumentation und dessen Bereitschaft, meine verschiedenen Ansätze einer konstruktiven Kritik zu unterziehen, von unschätzbarem Wert für mich waren. Eric Martinez war ein kritischer und unermüdlicher Beistand in der Herstellungsphase des Buches, und Jason Severs hatte wunderbare Einfälle, als er die Abbildungen schuf. Ich danke meinen Agenten Katinka Matson und John Brockman. Zu großem Dank verpflichtet bin ich auch meinem Lektor Marty Asher, der mir immer wieder mit Ermutigung, Rat und klugen Einsichten zur Seite stand und so die Qualität der Darstellung erheblich verbessert hat. 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 amerikanischen Originals trifft als auch dem wissenschaftlichen Gehalt gerecht wird.

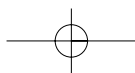
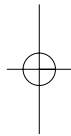
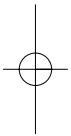
Während meiner beruflichen Laufbahn ist meine wissenschaftliche Forschung finanziell unterstützt worden vom US-Energieministerium, der National Science Foundation und der Alfred P. Sloan Foundation. Hiermit sei ihnen für ihre Hilfe gedankt.





SCHAUPLATZ
DER
WIRKLICHKEIT





1

WEGE ZUR WIRKLICHKEIT

Raum, Zeit und warum die Dinge sind wie sie sind

Keines der Bücher im alten, staubigen Bücherschrank meines Vaters war verboten. Doch während ich heranwuchs, sah ich nie, dass jemand eines herausnahm. Die meisten waren voluminös: eine umfangreiche Kulturgeschichte, die Werke der abendländischen Literatur, nicht weniger imposant, und viele andere, an die ich mich nicht erinnere. Fast schienen sie verwachsen mit den Regalbrettern, die sich unter der jahrzehntelangen Last ein wenig bogen. Doch ganz oben im höchsten Fach stand ein schmales Bändchen, das hin und wieder meine Blicke auf sich zog, weil es so fehl am Platze zu sein schien wie Gulliver bei den Riesen in Brobdingnag. Heute weiß ich nicht mehr so recht, warum ich so lange gewartet habe, bevor ich einen Blick hineinwarf. Vielleicht, weil die Jahre dafür sorgten, dass ich die Bücher weniger als Lesestoff betrachtete denn als Familienerbstücke, die man aus der Ferne bewundert. Doch schließlich wich die Ehrfurcht jugendlicher Unbekümmertheit. Ich holte mir das schmale Bändchen herunter, wischte den Staub ab und schlug es auf der Seite eins auf. Schon die ersten Zeilen waren, um es vorsichtig auszudrücken, verblüffend.

»Es gibt nur ein wirklich ernstes philosophisches Problem: den Selbstmord«, so begann das Buch. Ich zuckte zusammen. Und weiter hieß es: »... ob die Welt drei Dimensionen und der Geist neun oder zwölf Kategorien habe – kommt erst später.« Fragen dieser Art, so erläuterte das Buch, seien Teil eines Spiels, mit dem sich die Menschheit beschäftige, würden aber erst Aufmerksamkeit verdienen, wenn das eine, entscheidende Problem gelöst sei. Bei dem Buch handelte es sich um den *Mythos von Sisyphos* von Albert Camus, dem aus Algerien stammenden französischen Philosophen und Nobelpreisträger. Nach einigen Augenblicken schmolz der eisige Klang der Worte im Licht des Verständnisses. Ja, natürlich, dachte ich. Endlos kann man dieses bedenken und jenes analysieren, doch die wirkliche Frage lautet, ob all das Denken und Analysieren einen davon überzeugen kann, dass das Leben es wert ist, gelebt zu werden. Darauf läuft alles hinaus. Alles andere sind zweitrangige Einzelheiten.

Meine Zufallsbegegnung mit Camus' Buch muss in einer sehr empfänglichen Phase stattgefunden haben, denn mir sind diese Worte eindringlicher im Gedächtnis geblieben als alles, was ich sonst gelesen habe. Immer wieder habe ich mir vorgestellt, wie verschiedene Menschen, die ich traf, von denen ich hörte oder die ich im Fernsehen sah, diese Frage aller Fragen wohl beantworten würden. In der Rückschau erwies sich für mich jedoch die zweite Behauptung – über die Rolle des wissenschaftlichen Fortschritts – als besonders interessant. Zwar bejahte Camus das Bemühen an sich, die Struktur des Universums zu verstehen, verwarf jedoch, soweit ich es beurteilen konnte, die Möglichkeit, dass ein solches Verständnis irgendetwas an unserem Urteil über den Wert des Lebens ändern könnte. Nun war meine Jugendlektüre des Existenzialismus vermutlich so kenntnisreich wie die Beschäftigung mit romantischer Poesie, die man Bart Simpson, dem ungehobelten Sohn der berühmten Comic-Familie »Die Simpsons«, zutrauen würde – trotzdem hatte ich den Eindruck, Camus' Schlussfolgerung gehe an der Sache vorbei. Dem angehenden Physiker kam es so vor, dass sich das Leben nur angemessen würdigen ließ, wenn man zuvor den Schauplatz des Lebens verstanden hatte: das Universum. Ich weiß noch, dass ich dachte, wenn die Menschheit in Höhlen tief unter der Erde lebte und ihr die Entdeckung all dessen, was uns vertraut ist, noch bevorstünde – die Erdoberfläche, das strahlende Sonnenlicht, eine Meeresbrise und die Sterne, die sich dahinter erstrecken –, oder wenn die Evolution einen anderen Verlauf genommen hätte und uns bislang nur der Tastsinn zur Verfügung stünde, so dass all unsere Erkenntnis aus den taktilen Eindrücken von unserer unmittelbaren Umgebung erwüchse, oder wenn die geistige Entwicklung des Menschen in der frühen Kindheit abbräche, so dass unsere emotionalen und analytischen Fertigkeiten nie über die eines Fünfjährigen hinausgingen – kurzum, wenn unsere Erfahrungen uns nur ein armseliges Bild der Wirklichkeit vermittelten, wäre unsere Würdigung des Lebens erheblich eingeschränkt. Wenn wir schließlich unseren Weg an die Erdoberfläche fänden, wenn wir irgendwann doch die Fähigkeit erwerben würden, zu sehen, zu hören, zu riechen und zu schmecken, oder wenn unser Geist sich endlich seiner Fesseln entledigte und sich normal entwickelte, dann würde sich unsere kollektive Auffassung vom Leben und vom Kosmos zwangsläufig von Grund auf ändern. Unser zuvor beeinträchtigtes Bild von der Wirklichkeit hätte uns diese fundamentalsten aller philosophischen Fragen in einem ganz anderen Licht gezeigt.

Aber Sie könnten natürlich vorbringen: Na und? Sicher, jeder nüchtern Urteilende käme zu dem Schluss, dass wir vielleicht nicht alles vom Universum wissen, dass uns nicht jede Einzelheit über das Verhalten der Materie und die Funktionen des Lebens bekannt ist, dass wir aber doch mit den groben Pinsel-

strichen auf der Leinwand der Natur vertraut sind. Natürlich hat Camus Recht, so könnten Sie fortfahren, wenn er meint, dass der physikalische Fortschritt, etwa die Erkenntnis, wie viele Dimensionen der Raum hat, oder der neuropsychologische, beispielsweise die genaue Erforschung der Gehirnstrukturen und ihrer Funktionen, überhaupt jeder Fortschritt auf den vielen wissenschaftlichen Feldern wichtige Einzelheiten liefert, jedoch keinen nennenswerten Beitrag zu unserer Bewertung des Lebens und der Wirklichkeit beisteuert. Die Wirklichkeit ist einfach das, wofür wir sie halten; die Wirklichkeit wird uns durch unsere Erfahrung offenbart.

Mehr oder weniger ist das ein Wirklichkeitsverständnis, das viele von uns haben, wenn auch nur unausgesprochen. Für mich jedenfalls ist diese Vorstellung im Alltag maßgeblich. Wir sind durch das Bild, das die Natur unseren Sinnen unmittelbar präsentiert, leicht zu verführen. Doch in den Jahrzehnten, die seit meiner ersten Bekanntschaft mit Camus' Text verstrichen sind, habe ich erfahren, dass die moderne Wissenschaft eine andere Geschichte erzählt. Die zentrale Botschaft, die uns die naturwissenschaftliche Forschung der letzten hundert Jahre vermittelt hat, lautet, dass die menschliche Erfahrung häufig ein unzuverlässiger Leitfaden ist, wenn wir die wahre Natur der Wirklichkeit suchen. Unmittelbar unter der Oberfläche des Alltäglichen liegt eine Welt, die wir kaum erkennen. Anhänger des Okkulten, Jünger der Astrologie und Menschen mit religiösen Überzeugungen, die von einer Erfahrung jenseits der Erfahrung berichten, sind aus ganz unterschiedlichen Blickwinkeln zu ähnlichen Schlüssen gelangt. Doch mir geht es um etwas anderes. Ich habe die Arbeit einflussreicher Neuerer und unermüdlicher Forscher im Sinn – jener Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, die Schicht um Schicht von der kosmischen Zwiebel abgeschält, Rätsel um Rätsel gelöst und ein Universum offen gelegt haben, das zugleich überraschend, unvertraut, aufregend, elegant und ganz anders ist, als irgendjemand erwartet hatte.

Diese Erkenntnisse sind alles andere als bloße Einzelheiten. Bahnbrechende physikalische Entdeckungen haben uns zu grundlegenden Korrekturen an unserer Vorstellung vom Kosmos gezwungen und tun es auch weiterhin. Ich bin heute ebenso wie vor Jahrzehnten davon überzeugt, dass Camus die Frage nach dem Wert des Lebens zu Recht als die wichtigste und letzte bestimmt hat; doch die Einsichten der modernen Physik haben mich auch davon überzeugt, dass der Versuch, das Leben aus der Perspektive der Alltagserfahrung zu beurteilen, der Betrachtung eines van Gogh durch eine leere Colaflasche gleicht. Die moderne Naturwissenschaft hat einen Angriff nach dem anderen gegen das Augenscheinliche geführt, das wir aus unseren rudimentären Wahrnehmungen ableiten, und gezeigt, dass diese häufig nur eine verschwommene Vorstellung

von der Welt vermitteln, die wir bewohnen. Während Camus also die physikalischen Fragen ausklammerte und als sekundär abtat, bin ich mittlerweile der Meinung, dass sie von vorrangiger Bedeutung sind. Für mich sorgt die physikalische Realität sowohl für den Schauplatz als auch für die Beleuchtung, damit wir uns überhaupt mit Camus' Frage auseinander setzen können. Den Wert der Existenz zu beurteilen, ohne die Einsichten der modernen Physik zu berücksichtigen, das wäre so, als ränge man im Dunkeln mit einem unbekanntem Gegner. Indem wir unser Verständnis für die wahre Natur der physikalischen Realität vertiefen, überarbeiten wir das Bild, das wir von uns und unserer Erfahrung des Universums haben.

Das zentrale Anliegen dieses Buches besteht darin, einige der bekanntesten und wichtigsten Korrekturen an unserem Bild von der Wirklichkeit zu erklären, mit besonderem Augenmerk auf jene Erkenntnisse, die mit dem uralten Bemühen der Menschheit zu tun haben, Raum und Zeit zu verstehen. Von Aristoteles bis Einstein, vom Astrolabium bis zum Hubble-Weltraumteleskop, von den Pyramiden bis zu den modernen Observatorien auf hohen Bergen – Raum und Zeit haben das Denken geprägt, seit das Denken begann. Mit dem Beginn des modernen wissenschaftlichen Zeitalters ist die Bedeutung von Raum und Zeit immens gewachsen. Während der letzten dreihundert Jahre haben die Fortschritte in der Physik Raum und Zeit als höchst verblüffende und faszinierende Konzepte offenbart, als Konzepte, die von einzigartiger Bedeutung für die Analyse des Universums sind. Ferner haben diese Fortschritte gezeigt, dass Raum und Zeit ganz oben auf der Liste der jahrhundertalten Konstrukte stehen, die von der modernen Forschung einer so unglaublichen Revision unterzogen wurden.

Für Isaac Newton waren Raum und Zeit einfach Gegebenheiten: Sie bildeten eine passive und universelle kosmische Bühne, auf der sich die Ereignisse des Universums abspielten. Für Gottfried Wilhelm von Leibniz waren »Raum« und »Zeit« schlichte Vokabeln, die Beziehungen bezeichneten – wo sich Objekte befanden und wann Ereignisse stattfanden. Nicht mehr. Bei Albert Einstein dagegen wurden Raum und Zeit zum Rohmaterial, das der Wirklichkeit zugrunde liegt. Durch seine Relativitätstheorien brachte Einstein unsere Vorstellungen von Raum und Zeit in Bewegung und führte uns vor Augen, welche entscheidende Rolle sie in der Entwicklung des Universums spielen. Seither sind Raum und Zeit die glitzernden Juwelen der Physik. Sie sind zugleich vertraut und geheimnisvoll. Die vollständige Erklärung von Raum und Zeit ist zur größten Herausforderung der Physik, zu ihrer begehrtesten Trophäe geworden.

Die Entwicklungen, mit denen wir uns in diesem Buch befassen, sind mit der Struktur, dem Gewebe von Raum und Zeit auf vielfältige Weise verflochten.

ten. Einige Ideen stellen Merkmale von Raum und Zeit in Frage, die jahrhundert- oder gar jahrtausendlang als so grundlegend galten, dass sie jedem Zweifel enthoben schienen. Andere versuchen eine Verbindung zwischen unserer theoretischen Auffassung von Raum und Zeit und den Eigenschaften herzustellen, die sich unserer Alltagserfahrung erschließen. Wieder andere werfen Fragen auf, die in den engen Grenzen unserer alltäglichen Wahrnehmung nicht zu beantworten sind.

Es wird wenig von der Philosophie (und gar nicht vom Selbstmord und dem Sinn des Lebens) die Rede sein. Doch in unserem wissenschaftlichen Bemühen, die Geheimnisse von Raum und Zeit zu lösen, werden wir uns von nichts und niemandem einschränken lassen. Von den kleinsten Flecken und frühesten Augenblicken des Universums bis zu seinen größten Ausdehnungen und seiner fernsten Zukunft werden wir Raum und Zeit in Umgebungen untersuchen, die uns teils vertraut und teils völlig fern sind, und dabei mit unbestechlichem Auge nach seiner wahren Natur forschen. Da die Geschichte von Raum und Zeit noch auf ihre vollkommene Beschreibung wartet, werden wir zu keinen endgültigen Urteilen gelangen. Aber wir werden eine Reihe von Ideen kennen lernen – teils äußerst fremdartig, teils zutiefst befriedigend, teils experimentell bestätigt, teils vollkommen spekulativ –, die uns zeigen werden, wie weit unser Verstand in seinem Bemühen gelangt ist, die Struktur des Kosmos zu erfassen und mit der Textur der Wirklichkeit in Kontakt zu kommen.

Klassische Wirklichkeit

Die Historiker sind sich nicht einig, wann genau das moderne wissenschaftliche Zeitalter begonnen hat, aber als Galileo Galilei, René Descartes und Isaac Newton ihre Ansichten äußerten, war es bereits in vollem Gange. Damals wurde die neue wissenschaftliche Auffassung ständig erweitert, als man in den irdischen und astronomischen Daten Muster entdeckte, die den Menschen immer deutlicher vor Augen führten, dass all dem Kommen und Gehen des Kosmos eine Ordnung zugrunde liegt, die sich logischem Denken und mathematischer Analyse erschließt. Diese Pioniere des modernen wissenschaftlichen Denkens vertraten die Auffassung, dass die Geschehnisse im Universum, richtig betrachtet, nicht nur erklärbar, sondern auch vorhersagbar sind. Damit war das Vermögen der Wissenschaft, Aspekte der Zukunft schlüssig und quantitativ vorherzusagen, zu Tage getreten.

Die ersten wissenschaftlichen Studien konzentrierten sich auf Dinge jener Art, die man im Alltag sehen oder erfahren kann. Galilei ließ Gewichte von einem schiefen Turm fallen (so will es jedenfalls die Legende) und beobachtete

Kugeln, die eine schräge Ebene hinabrollten. Newton beschäftigte sich mit fallenden Äpfeln (so heißt es zumindest) und der Umlaufbahn des Mondes. Alle diese Untersuchungen hatten das Ziel, das erwachende wissenschaftliche Ohr auf die Harmonien der Natur einzustimmen. Gewiss, die physikalische Realität lieferte den Stoff für die Erfahrung, doch die Herausforderung lag darin, sich einen Reim auf den Rhythmus und die Regelmäßigkeit zu machen. Viele besungene und unbesungene Helden trugen zu den raschen und eindrucksvollen Fortschritten bei, aber Newton stahl ihnen allen die Schau. Mit einer Hand voll mathematischer Gleichungen fasste er alles zusammen, was über die Bewegungen auf der Erde und im Himmel bekannt war, und steckte damit die Grenzen dessen ab, was später als *klassische Physik* bezeichnet werden sollte.

In den Jahrzehnten nach Newton wurden seine Gleichungen zu einem komplizierten mathematischen System ausgebaut, das ihren Geltungsbereich und praktischen Nutzen erheblich erweiterte. Nach und nach wurde die klassische Physik zu einer hoch entwickelten und ausgereiften wissenschaftlichen Disziplin. Doch hinter all diesen Fortschritten strahlten hell und klar wie ein Leuchtzeichen Newtons ursprüngliche Einsichten. Selbst heute noch, mehr als dreihundert Jahre später, findet man Newtons Gleichungen weltweit an den Wandtafeln bei physikalischen Einführungskursen, auf den Flugplänen, mit denen die NASA die Bahnen von Raumfahrzeugen berechnet, und eingebettet in die komplizierten Berechnungen modernster Forschungsvorhaben. Newton fasste eine Vielzahl physikalischer Phänomene in einem einzigen theoretischen Rahmen zusammen.

Allerdings stieß Newton, während er seine Bewegungsgesetze aufstellte, auf ein schwieriges Hindernis, das für unsere Geschichte von besonderer Bedeutung ist (Kapitel 2). Jeder weiß, dass sich Dinge bewegen können, doch wie verhält es sich mit dem Schauplatz, auf dem die Bewegung stattfindet? Was soll damit schon sein, wird jeder von uns antworten, das ist der Raum. Worauf Newton entgegenwürde: Und was ist der Raum? Ist Raum eine reale physikalische Gegebenheit oder eine abstrakte Idee, die aus dem menschlichen Bestreben erwächst, den Kosmos zu verstehen? Newton war klar, dass diese Schlüsselfrage beantwortet werden musste, weil sich die Gleichungen zur Beschreibung der Bewegung als bedeutungslos erweisen mussten, wenn er nicht einen klaren Standpunkt zur Bedeutung von Raum und Zeit bezog. Verstehen braucht Kontext, Einsicht muss verankert werden.

Und so formulierte Newton in seinen *Principia Mathematica* mit ein paar kurzen Sätzen eine Vorstellung von Raum und Zeit, in der er diese zu absoluten und unwandelbaren Größen erklärte und das Universum dergestalt mit einem unbeweglichen und unwandelbaren Schauplatz versah. Laut Newton bilden



Brian Greene

Der Stoff, aus dem der Kosmos ist

Raum, Zeit und die Beschaffenheit der Wirklichkeit

Taschenbuch, Broschur, 640 Seiten, 12,5 x 18,3 cm

130 s/w Abbildungen

ISBN: 978-3-442-15487-6

Goldmann

Erscheinungstermin: März 2008

Populäre Naturwissenschaft – mit erstaunlicher Leichtigkeit geschrieben

Raum und Zeit bilden die Grundstruktur des Kosmos. Doch sie gehören zu den rätselhaftesten Begriffen überhaupt. Brian Greene, einer der bedeutendsten Physiker unserer Zeit, nimmt uns mit auf eine Reise in die atemberaubende Welt der theoretischen Physik. Er gibt uns einen faszinierenden Einblick in die neuesten Entwicklungen der Superstring-Theorie und zeigt, wie die moderne Kosmologie unser Weltbild verändert.