



MAX TEGMARK UNSER MATHEMATISCHES UNIVERSUM

AUF DER SUCHE
NACH DEM
WESEN DER
WIRKLICHKEIT

ullstein 

Das Buch

Dass sich das Universum durch Mathematik beschreiben lässt, erkannte schon Galileo Galilei. Max Tegmark geht einen Schritt über diese Tatsache hinaus: Er stellt die These auf, das Universum selbst sei reine Mathematik – ein mathematischer Körper, in dem wir Menschen zwar leben, dessen physikalische Realität aber völlig unabhängig von uns ist.

Schritt für Schritt baut Tegmark ein vielschichtiges Modell von Paralleluniversen auf, in dem er die wichtigsten aktuellen Konzepte der Kosmologie und der Stringtheorie vereint. Das macht er klug, unterhaltsam und angereichert mit persönlichen Anekdoten. Mit Blick auf das kommende goldene Zeitalter der Technik, das von bahnbrechenden Experimenten am CERN-Beschleuniger und neuen Weltraumteleskopen geprägt sein wird, fügt Tegmark die Beziehungen zwischen Mathematik, Computern, Physik und Gehirnforschung zu einer großen Vision des mathematischen Universums zusammen

Der Autor

Max Tegmark wurde 1967 in Schweden geboren. Er studierte am Royal Institute of Technology in Stockholm sowie an der University of California, Berkeley, und ist Professor für Physik am MIT. Tegmark ist Mitglied der American Physical Society und der wissenschaftliche Leiter des Foundational Questions Institute. Er hat zwei Söhne.

Max Tegmark

Unser mathematisches Universum

Auf der Suche nach dem
Wesen der Wirklichkeit

Aus dem Amerikanischen
von Hubert Mania

Ullstein

Besuchen Sie uns im Internet:
www.ullstein-taschenbuch.de



Ungekürzte Ausgabe im Ullstein Taschenbuch

1. Auflage August 2016

© für die deutsche Ausgabe Ullstein Buchverlage GmbH,

Berlin 2015 / Ullstein Verlag

© 2014 by Max Tegmark; Titel der Originalausgabe:

Our Mathematical Universe, erschienen 2014 bei Alfred A. Knopf,

New York.

Umschlaggestaltung: ZERO Werbeagentur, München nach einer
Vorlage von Rudolf Linn, Köln, basierend auf dem Originalumschlag

von Andrew Gibbs/ sodavekt

Lektorat: Julia Kühn

Satz: L42 AG, Berlin

Druck und Bindearbeiten: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

ISBN 978-3-548-37-650-9

Für Meia,
die mich dazu inspirierte, dieses Buch zu schreiben.

Inhalt

VORWORT	15
-------------------	----

1	WAS IST WIRKLICHKEIT?	17
	Nicht das, was es zu sein scheint	17
	Wie lautet die wichtigste Frage?	23
	Die Reise beginnt	27

ERSTER TEIL

HINAUSGEZOOMT	35
-------------------------	----

2	UNSERE STELLUNG IM RAUM	37
	Kosmische Fragen	37
	Wie groß ist der Weltraum?	39
	Die Größe der Erde	42
	Entfernung zum Mond	44
	Entfernung zur Sonne und zu den Planeten	45
	Entfernung zu den Sternen	47
	Entfernung zu den Galaxien	52
	Was ist Raum?	55

3	UNSERE STELLUNG IN DER ZEIT	61
	Woher stammt unser Sonnensystem?	62
	Woher stammen die Galaxien?	71
	<i>Galaxienbildung</i>	71
	<i>Unser Universum könnte expandieren</i>	73
	<i>Unser Universum expandiert tatsächlich</i>	77
	<i>Das expandierende Universum begreifen</i>	79
	<i>Wohin expandiert unser Universum?</i>	81
	<i>Der kosmische Hörsaal</i>	82

Woher stammen die rätselhaften Mikrowellen?	84
<i>Der kosmische Plasmaschirm</i>	85
<i>Die aufgespürte Nachglut</i>	87
<i>Babyfotos unseres Universums</i>	88
<i>Der Golddrausch</i>	90
<i>Der kosmische Wasserball</i>	96
<i>Die Achse des Bösen</i>	97
<i>Die kosmische Hintergrundstrahlung wird erwachsen</i>	99
Woher stammen die Atome?	101
<i>Der kosmische Fusionsreaktor</i>	101
<i>Urknall in Gefahr</i>	103
<i>Was genau ist eigentlich ein Urknall?</i>	105
 4 UNSER UNIVERSUM IN ZAHLEN	 111
Gesucht: Präzisionskosmologie	112
Präzise Mikrowellenhintergrundfluktuationen	116
<i>Teleskope und Computer</i>	117
<i>Gold in den Hügeln</i>	120
<i>Dunkle Energie</i>	122
<i>Eine Trefferquote von 50 Prozent</i>	124
<i>Die Beule ist zurück</i>	126
Präzise Clusterbildung von Galaxien	127
<i>Rotverschiebungskataloge von Galaxien</i>	128
<i>Von verspotteter Kosmologie zur Präzisionskosmologie</i>	132
Die endgültige Karte unseres Universums	138
<i>Was zu erforschen bleibt</i>	138
<i>Wasserstoffvermessung</i>	141
<i>Was ist eigentlich ein Teleskop?</i>	142
<i>Das Omniskop</i>	144
Woher stammt unser Urknall?	147
 5 UNSER KOSMISCHER URSPRUNG	 151
Was ist mit unserem Urknall los?	152
<i>Das Horizontproblem</i>	154
<i>Das Flachheitsproblem</i>	156

Wie die Inflation funktioniert	158
<i>Die Kraft der Verdoppelung</i>	158
<i>Gelöste Probleme</i>	161
<i>Wer hat das ultimative kostenlose Mittagessen bezahlt?</i>	163
Das Geschenk, das sich ständig selbst erneuert	166
<i>Inflationszugabe</i>	166
<i>Die Dichteschwankungen im frühen Universum</i>	167
Ewige Inflation	172
<i>Nicht aufzuhalten</i>	173
<i>Wie man einen unendlichen Raum</i> <i>in einem endlichen Volumen erschafft</i>	176
 6 WILLKOMMEN IM MULTIVERSUM	 185
Das Ebene-I-Multiversum	185
<i>Was ist ein Universum?</i>	186
<i>Wie sehen Ebene-I-Paralleluniversen aus?</i>	189
<i>Sind Paralleluniversen unwissenschaftlich?</i>	191
<i>Beweise für Ebene-I-Paralleluniversen</i>	194
<i>Wo sind die Ebene-I-Paralleluniversen?</i>	200
Das Ebene-II-Multiversum	203
<i>Viele Universen in einem Raum</i>	204
<i>Vielfalt!</i>	206
<i>Feinabstimmung als Nachweis für das</i> <i>Ebene-II-Multiversum</i>	213
<i>Feinabgestimmte dunkle Energie</i>	214
<i>Feinabgestimmte Teilchen</i>	216
<i>Feinabgestimmte Kosmologie</i>	217
<i>Die Glücksfall-Erklärung</i>	218
<i>Das A-Wort</i>	219
<i>Mit welchen Vorhersagen können wir rechnen?</i>	222
<i>Nicht alles ist verloren</i>	225
Halbzeitzusammenfassung zum Thema Multiversum	228

ZWEITER TEIL

HINEINGEZOOMT	235
7 KOSMISCHE LEGOSTEINE	237
Atomare Legosteine	238
Nukleare Legosteine	240
Das Lego der Teilchenphysik	243
Mathematische Legosteine	246
Photonenlegosteine	250
Über dem Gesetz?	252
Quanten und Regenbögen	255
Wellen schlagen	257
Quantenmerkwürdigkeit	262
Der Zusammenbruch des Konsens.	264
Das Verrückte lässt sich nicht einschränken	268
Quantenkonfusion	270
8 DAS EBENE-III-MULTIVERSUM	273
Das Ebene-III-Multiversum	275
Die Illusion der Zufälligkeit	283
Quantenzensur	290
Die Freuden des Ausgestochenen	297
Warum Ihr Gehirn kein Quantencomputer ist	301
Subjekt, Objekt und Umgebung	306
Quantenselbstmord	312
Quantenunsterblichkeit	318
Vereinigte Multiversen	322
Wechselnde Ansichten: Viele Welten oder Viele Worte	329

DRITTER TEIL

ABSTAND GEWINNEN 337

9 INNERE WIRKLICHKEIT, ÄUSSERE WIRKLICHKEIT

UND KONSENSWIRKLICHKEIT 339

Äußere Wirklichkeit und innere Wirklichkeit 341

Die Wahrheit, die ganze Wahrheit

und nichts als die Wahrheit 343

Konsenswirklichkeit 345

Physik: Die äußere Wirklichkeit

mit der Konsenswirklichkeit verbinden 349

10 MATERIELLE WIRKLICHKEIT UND

MATHEMATISCHE WIRKLICHKEIT 355

Mathe, überall Mathe! 359

Formen, Muster und Gleichungen 361

Zahlen 363

Mehr Hinweise 368

Die Hypothese des Mathematischen Universums 370

Ballast abwerfen 371

Mathematische Strukturen 377

Was ist eine mathematische Struktur? 378

Ballast und gleichwertige Beschreibungen 379

Ballast und mathematische Strukturen 382

Symmetrie und andere mathematische Eigenschaften 384

11 IST ZEIT EINE ILLUSION? 395

Wie kann die materielle Wirklichkeit

mathematisch sein? 396

Zeitlose Wirklichkeit 396

Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft 398

Wie Raumzeit und »Stoff« mathematisch sein können . 401

Beschreibung kontra Äquivalenz 405

Was sind Sie? 407

Der Zopf des Lebens 408

Im Augenblick leben 412

<i>Bewusstseinsfähigkeit</i>	418
<i>Die Vorhersage Ihrer Zukunft</i>	420
Wo sind Sie (und was nehmen Sie wahr)?	421
<i>Die Vorhersage Ihrer Zukunft – erneut aufgegriffen.</i>	422
<i>Bewusstseinsfähigkeit finden</i>	423
<i>Berechnung der inneren Wirklichkeit:</i>	
<i>Was hat uns die Geschichte gelehrt?</i>	427
Wann sind Sie?	432
<i>Jenseits des zweifachen Ansatzes von Popper</i>	433
<i>Warum sind Sie keine Ameise?</i>	435
<i>Warum Sind Sie kein Boltzmann-Gehirn?</i>	440
<i>Das Weltuntergangsargument.</i>	444
<i>Warum ist die Erde so alt?</i>	446
<i>Warum sind wir nicht jünger?</i>	448
<i>Das Maßproblem: Die Physik in der Krise</i>	450
<i>Unendliche Probleme</i>	455
 12 DAS EBENE-IV-MULTIVERSUM	 461
Warum ich an das Multiversum der Ebene IV glaube	461
<i>Warum diese Gleichungen und keine anderen?</i>	461
<i>Mathematische Demokratie</i>	462
<i>Wie die Hypothese vom Mathematischen Universum</i> <i>(HMU) auf das Ebene-IV-Multiversum hinausläuft.</i>	464
Die Erkundung des Ebene-IV-Multiversums:	
Was gibt's da draußen?	467
<i>Unsere unmittelbare Nachbarschaft</i>	467
<i>Unsere Postleitzahl im Ebene-IV-Multiversum</i>	469
<i>Die Struktur des Ebene-IV-Multiversums</i>	473
<i>Grenzen des Ebene-IV-Multiversums: Unentscheidbar,</i> <i>unberechenbar und undefiniert</i>	475
<i>Die Hypothese des Berechenbaren Universums</i>	479
<i>Die transzendente Struktur von Ebene IV</i>	483
Auswirkungen des Ebene-IV-Multiversums	485
<i>Symmetrien und darüber hinaus</i>	485
<i>Die Illusion von Anfangsbedingungen</i>	488
<i>Die Täuschung der Zufälligkeit</i>	489

Die Täuschung der Komplexität	490
Anfangsbedingungen neu interpretiert	495
Zufälligkeit neu interpretiert	496
Wie die Komplexität auf ein Multiversum hinweist	497
Leben wir in einer Simulation?	499
Die falsche Vorstellung von der Zeit	500
Eine andere Berechnungsart	502
Muss eine Simulation wirklich ausgeführt werden?	503
Die Beziehungen zwischen der HMU, dem	
Ebene-IV-Multiversum und anderen Hypothesen	504
Die Überprüfung des Ebene-IV-Multiversums	506
Die Vorhersage von etwas Typischem	506
Die Vorhersage der mathematischen Gesetzmäßigkeit	510
 13 DAS LEBEN, UNSER UNIVERSUM UND DER GANZE REST	515
Wie groß ist unsere materielle Wirklichkeit?	515
Plädoyer für eine kleinere Wirklichkeit	517
Plädoyer für eine größere Wirklichkeit	522
Die Zukunft der Physik	525
Die Zukunft unseres Universums –	
Wie wird es enden?	527
Die Zukunft des Lebens	533
Existentielle Risiken	534
Unsere sterbende Sonne	536
Asteroiden, Supernovae und Supervulkane	538
Selbstverschuldete Probleme	541
Versehentlicher Atomkrieg	542
Eine feindselige Singularität	545
Menschliche Dummheit: Aus kosmischer Perspektive	554
Menschliche Gesellschaft: Aus wissenschaftlicher	
Perspektive	556
Ihre eigene Zukunft – Sind Sie unbedeutend?	563
Der Sinn des Lebens	563
Warum sollten wir uns um unser eigenes	
Universum kümmern?	565
Sind wir unbedeutend?	566

<i>Sind wir allein?</i>	567
<i>Sind wir wirklich unbedeutend?</i>	571
DANK.	574
ANMERKUNGEN	575
LITERATUREMPFEHLUNGEN	590
REGISTER	598

Vorwort

Ich bin allen Menschen aufrichtig dankbar, die mich ermutigt und mir geholfen haben, dieses Buch zu schreiben:

Meiner Familie, meinen Freunden, Lehrern, Kollegen und Mitarbeitern für die jahrelange Unterstützung und Anregung,

meiner Mutter, weil sie Neugier und Leidenschaft für die großen Fragen des Lebens mit mir teilt,

meinem Vater für seine Klugheit, und weil er seine Begeisterung für die Mathematik und ihre Bedeutung mit mir teilt,

meinen Söhnen Philip und Alexander, weil sie mir so großartige Fragen über die Welt stellen und dabei unabsichtlich Anekdoten für das Buch liefern,

allen Wissenschaftsenthusiasten der Welt, die im Lauf der Jahre Kontakt zu mir aufnahmen, mir Fragen stellten, Kommentare abgaben und mich ermutigten, meine Ideen weiterzuverfolgen,

meinen Agenten John und Max Brockman, die mich überredeten, dieses Buch zu schreiben, und die alles in Bewegung setzten,

jenen, die Teile des Manuskripts lasen und darauf reagierten, insbesondere meine Mutter, mein Bruder Per, Josh Dillon, Marty Asher, David Deutsch, Louis Helm, Andrei Linde, Jonathan Lindström, Roy Link, David Raub, Shevaun Mizrahi, Mary New, Sandra Simpson, Carl Shulman und Jaan Tallinn,

den Superhelden, die den Entwurf des gesamten Buchs lasen und kommentierten, und zwar Meia, Vater, Paul Almond, Julian Barbour, Adrian Liu, Howard Messing, Dan Roberts, Edward Witten und mein Lektor Dan Frank.

Ein großer Dank geht an Phillip Helbig, der auch das Manuskript der deutschen Übersetzung hilfreich kommentierte.

Mein besonderer Dank gilt meiner geliebten Frau Meia, meiner Muse und Mitreisenden. Sie hat mich stärker ermutigt, unterstützt und inspiriert, als ich es mir jemals träumen ließ.

Was ist Wirklichkeit?

... Bäume bestehen hauptsächlich aus Luft. Verbrennt man sie, werden sie wieder zu Luft, und in der lodernden Glut wird die lodernde Glut der Sonne freigesetzt, die mitwirkte, um die Luft in den Baum zu verwandeln. Und in der Asche finden wir den kleinen Überrest des Anteils, der nicht aus der Luft, sondern aus der festen Erde kam.

RICHARD FEYNMAN

Es gibt mehr Ding' im Himmel und auf Erden, Horatio, als eure Schulweisheit sich träumt.

WILLIAM SHAKESPEARE,
HAMLET, 1. AUFZUG, 5. SZENE

Nicht das, was es zu sein scheint

Eine Sekunde später starb ich. Ich hörte auf, in die Pedale zu treten, und zog die Bremse, aber es war zu spät. Scheinwerfer. Kühlergrill. Vierzig Tonnen Stahl. Wildes Hupen. Wie ein neuzeitlicher Drache. Ich sah die in Panik aufgerissenen Augen des LKW-Fahrers, fühlte, wie die Zeit sich verlangsamte und mein Leben an mir vorüberglitt. Der allerletzte Satz meines Lebens lautete: »Hoffentlich ist das alles nur ein böser Traum.« Aber leider sagte mir mein Bauch, dass das hier wirklich geschah.

Aber wie konnte ich mir völlig sicher sein, nicht doch zu träumen? Was wäre denn, wenn ich kurz vor dem Zusammenprall etwas wahrgenommen hätte, was ausschließlich im Traumland geschieht? Sagen wir, meine tote Lehrerin Ingrid hätte, gesund und munter, hinter mir auf dem Gepäckträger gegessen. Oder

was wäre gewesen, wenn fünf Sekunden zuvor im oberen linken Bereich meines Gesichtsfelds ein Pop-up-Fenster mit der Warnung aufgetaucht wäre »Sind Sie sicher, dass es eine gute Idee ist, aus dieser Unterführung herauszuschießen, ohne nach rechts zu schauen?« und darüber die anklickbaren Schaltflächen »Weiter« und »Abbrechen«? Hätte ich genügend Filme wie *Matrix* und *The 13th Floor – Bist du, was du denkst?* gesehen, wäre ich wahrscheinlich ins Grübeln darüber geraten, ob mein ganzes Leben vielleicht nur eine Computersimulation gewesen sein könnte, womit ich einige meiner grundlegendsten Annahmen über die Beschaffenheit der Wirklichkeit in Frage gestellt hätte. Aber was kann letztlich stabiler und wirklicher sein als ein Vierzigtonner?

Allerdings ist nicht alles auch so, wie es zunächst erscheint. Und das gilt sowohl für Lastkraftwagen als auch für die Wirklichkeit selbst. Solche Vorschläge stammen nicht nur von Philosophen und Science-Fiction-Autoren, sondern sind auch Rückschlüsse aus physikalischen Experimenten. Seit hundert Jahren wissen Physiker, dass massiver Stahl in Wirklichkeit hauptsächlich leerer Raum ist, weil die Atomkerne, die 99,5 % der Masse ausmachen, winzige Kugeln sind, die lediglich 0,00000000000001 % des Volumens darstellen. Und dieses annähernde Vakuum fühlt sich nur deshalb fest an, weil die elektrischen Kräfte, die die Kerne an Ort und Stelle halten, sehr stark sind. Darüber hinaus haben sorgfältige Messungen subatomarer Teilchen ergeben, dass es ihnen offenbar gelingt, gleichzeitig an unterschiedlichen Orten zu sein, ein wohlbekanntes Rätsel im Zentrum der Quantenphysik (was wir in Kapitel 7 ergründen werden). Aber ich selbst bestehe doch auch aus solchen Teilchen. Wenn diese also an zwei Orten gleichzeitig sein können, kann ich selbst es dann auch sein? Tatsächlich entschied ich ungefähr drei Sekunden vor dem Unfall unbewusst, ob ich einfach nach links schauen sollte, wo ich auf meinem Weg zum Blackebergs-Gymnasium in meiner schwedischen Heimat stets abgebogen bin, da auf dieser Querstraße nie Verkehr herrschte, oder ob ich vorsichtshalber auch nach rechts schauen sollte. Mit meinem schicksalhaften, spontanen Entschluss entging ich an jenem Morgen im Jahr 1985 nur um Haa-

resbreite einem Unfall. Alles lief letztlich darauf hinaus, ob ein einzelnes Kalziumatom in einen bestimmten synaptischen Spalt meines präfrontalen Kortex eindringen und dabei ein bestimmtes Neuron dazu anregen würde, ein elektrisches Signal zu feuern. Das wiederum würde bei weiteren Neuronen in meinem Gehirn eine wahre Sturzflut von Aktivitäten auslösen, so dass sie gemeinsam die Botschaft »Mach dir keine Sorgen« verschlüsselten. Wäre daher dieses Kalziumatom von zwei geringfügig unterschiedlichen Positionen aus gleichzeitig gestartet, hätten meine Pupillen eine halbe Sekunde später in zwei entgegengesetzte Richtungen zugleich gezeigt, weitere zwei Sekunden später wäre mein Fahrrad an zwei unterschiedlichen Orten gleichzeitig gewesen, und kurze Zeit später wäre ich gleichzeitig tot und lebendig gewesen. Die führenden Quantenphysiker streiten sich leidenschaftlich darüber, ob so etwas tatsächlich geschieht, ob sich unsere Welt praktisch in Paralleluniversen mit unterschiedlichen Geschichten aufspaltet, oder ob die sogenannte Schrödingergleichung als oberstes Gesetz der Quantenbewegung in irgendeiner Weise revidiert werden muss. Bin ich also tatsächlich gestorben? In diesem Universum bin ich gerade noch einmal davongekommen, aber bin ich vielleicht in einem anderen, gleichermaßen realen Universum, in dem dieses Buch nie geschrieben wurde, gestorben? Falls ich sowohl tot als auch lebendig bin, könnten wir dann unsere Vorstellung von der Beschaffenheit der Wirklichkeit irgendwie so ergänzen, dass all dies einen Sinn ergibt?

Vielleicht haben Sie das Gefühl, dass meine gerade geäußerten Überlegungen absurd klingen und vom Standpunkt der Physik aus betrachtet die Sache noch komplizierter wird. Wenn wir uns jetzt aber anschauen, wie ich es wahrgenommen habe, könnte alles sogar noch schlimmer werden. Falls ich an diesen beiden unterschiedlichen Orten in zwei Paralleluniversen sein sollte, wird eine Version von mir überleben. Wendet man jetzt das gleiche Argument auf alle anderen Möglichkeiten an, in Zukunft zu Tode zu kommen, scheint es immer mindestens ein Paralleluniversum zu geben, in dem ich niemals sterbe. Da mein Bewusstsein nur dort existiert, wo ich lebe, heißt das, dass ich mich subjektiv un-

sterblich fühle? Und sollte dies der Fall sein, werden auch Sie sich subjektiv unsterblich fühlen und schließlich die älteste Person auf der Erde sein? Diese Fragen werden wir in Kapitel 8 beantworten.

Mit Hilfe der Physik hat sich herausgestellt, dass unsere Wirklichkeit viel seltsamer ist, als wir uns das jemals vorgestellt hatten. Überrascht Sie das? Eigentlich ist es ganz und gar kein Wunder, wenn wir die Darwin'sche Evolution ernst nehmen! Die Evolution stattete unsere entfernten Vorfahren lediglich mit einer Intuition für solche Aspekte der Physik aus, die einen Überlebensvorteil boten, wie etwa die parabelförmige Bahn fliegender Steine (was unsere Vorliebe für Baseball erklärt). Eine Höhlenfrau, die allzu hartnäckig über die kleinsten Bausteine der Materie nachdachte, hätte womöglich den sich anschleichenden Tiger nicht bemerkt und wäre gnadenlos aus dem Genpool gefegt worden. Darwins Theorie macht daher die überprüfbare Vorhersage, dass bei jeder Anwendung von Technik zur Erkennung von Wirklichkeit jenseits des menschlichen Maßstabs unsere von der Evolution geprägte Intuition versagt. Wir haben diese Vorhersage wiederholt auf die Probe gestellt, und die Ergebnisse fallen mit überwältigender Mehrheit zugunsten Darwins aus. Bei hohen Geschwindigkeiten, stellte Einstein fest, verlangsamt sich die Zeit. Das fanden die Miesepeter im schwedischen Nobelpreiskomitee so bestürzend, dass sie es ablehnten, ihm den Nobelpreis für seine Relativitätstheorie zuzuerkennen. Bei niedrigen Temperaturen kann flüssiges Helium aufwärts strömen. Bei hohen Temperaturen wechseln geladene Teilchen ihre Identität. Für meine Begriffe sind der Zusammenstoß eines Elektrons mit einem Positron und deren anschließende Verwandlung in ein Z-Boson ebenso wenig intuitiv nachvollziehbar wie die Umwandlung zweier zusammenstoßender Autos in ein Kreuzfahrtschiff. Auf mikroskopischer Ebene tauchen Teilchen schizophrenerweise an zwei Orten gleichzeitig auf, was zu den bereits erwähnten Quantenrätseln führt. Geht es um astronomisch riesige räumliche Strukturen, kommt – Überraschung! – ebenfalls Merkwürdiges zum Vorschein: Sollten Sie tatsächlich intuitiv alle Aspekte Schwarzer Löcher verstehen, dann sind Sie, so glaube ich, der einzige

Mensch auf der Welt, dem das so geht. Dann sollten Sie dieses Buch sofort beiseite legen und Ihre Ergebnisse veröffentlichen, bevor Ihnen jemand den Nobelpreis für Quantengravitation vor der Nase wegschnappt. Bei noch gewaltigeren Raumstrukturen wird es zunehmend verrückter. Eine Realität wird erkennbar, die erheblich grandioser ist als alles, was wir mit unseren besten Teleskopen auflösen können. Wie wir in Kapitel 5 untersuchen werden, wird die führende Theorie für die Ereignisse im frühen Universum *kosmologische Inflation* genannt. Sie geht davon aus, dass der Weltraum nicht nur sehr, sehr groß, sondern in Wirklichkeit unendlich ist und es darin unendlich viele exakte Kopien von Ihnen selbst gibt. Hinzu kommen noch viel mehr nahezu genaue Kopien, die jede vorstellbare Variante Ihres Lebens in zwei unterschiedlichen Arten von Paralleluniversen ausleben. Sollte sich diese Theorie bewahrheiten, dann heißt das Folgendes: Selbst wenn das quantentheoretische Argument nicht ganz stimmen sollte, das ich vorhin für die Kopie von mir, die es nicht bis zur Schule schaffte, ins Feld führte, wird es definitiv viele andere Max-Exemplare in Sonnensystemen weit draußen im Weltraum geben, deren Leben bis zu jenem schicksalhaften Augenblick identisch waren, und die sich dann entschieden, nicht nach rechts zu schauen.

Mit anderen Worten, die Entdeckungen von Physikern stellen einige unserer grundlegendsten Vorstellungen über die Wirklichkeit in Frage. Sowohl beim Eintauchen in den Mikrokosmos als auch beim Studium des Makrokosmos. Wie wir noch in Kapitel 11 erkunden werden, geraten selbst auf der Zwischenstufe des menschlichen Maßstabs viele Vorstellungen von der Wirklichkeit in Zweifel, wenn wir neurowissenschaftliche Erkenntnisse nutzen, um die Funktionsweise unseres Gehirns zu ergründen.

Zu guter Letzt wissen wir, dass mathematische Gleichungen uns einen Einblick in die Funktionsweise der Natur verschaffen, so wie es metaphorisch in Abbildung 1.1 dargestellt ist. Aber warum offenbart unsere materielle Welt eine derart extreme mathematische Regelmäßigkeit, dass Galileo Galilei, der Superheld der Astronomie, die Natur als »ein Buch, geschrieben in der Spra-

che der Mathematik« gepriesen hat, während Nobelpreisträger Eugene Wigner in der »rätselhaften Effektivität der Mathematik in den Naturwissenschaften« ein Geheimnis sah, das eine Erklärung verlangt? Die Beantwortung dieser Frage ist das Hauptziel dieses Buches, wie schon der Titel nahelegt. In den Kapiteln 10 bis 12 werden wir die faszinierenden Beziehungen zwischen Berechnung, Mathematik, Physik und menschlichem Geist erkunden sowie meine verrückt klingende Überzeugung kennenlernen, dass unsere materielle Welt von der Mathematik nicht nur *beschrieben* wird, sondern dass sie Mathematik *ist*, was uns zu bewussteinfähigen Elementen eines gigantischen mathematischen Objekts macht. Wir werden sehen, dass dies zu einer neuen und endgültigen Ansammlung von Paralleluniversen führt, die so umfassend und exotisch sind, dass alle bereits erwähnten Verrücktheiten im Vergleich dazu erblassen und wir gezwungen sein werden, viele unserer tiefverwurzelten Auffassungen über die Wirklichkeit aufzugeben.

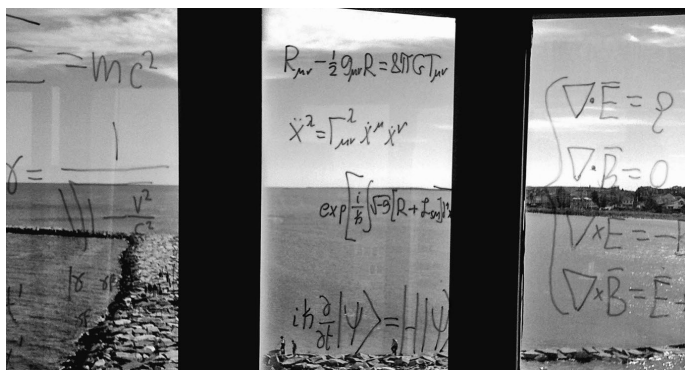


Abbildung 1.1: Wenn wir die Wirklichkeit anhand der physikalischen Gleichungen betrachten, stellen wir fest, dass sie Muster und Regelmäßigkeiten beschreiben. Aber für mich ist Mathematik mehr als nur ein Fenster zur Außenwelt: In diesem Buch werde ich behaupten, dass unsere materielle Welt nicht nur von der Mathematik *beschrieben* wird, sondern dass sie Mathematik *ist* – genau genommen, eine mathematische Struktur.

Wie lautet die wichtigste Frage?

Seit unsere menschlichen Vorfahren die Erde besiedelt haben, fragten sie sich auch zweifellos, was Wirklichkeit eigentlich sei. Sie dachten über die existentiellen Fragen *Woher kam alles? Wie wird es enden? Wie groß ist das alles?* nach. Diese Fragen sind so fesselnd, dass praktisch alle menschlichen Kulturen auf dem Globus sich damit auseinandergesetzt haben und ihre Antworten von einer Generation zur nächsten in Form ausgeschmückter Schöpfungsmythen, Legenden und religiöser Doktrinen weitergegeben haben. Wie in Abbildung 1.2 dargestellt, sind diese Fra-



Abbildung 1.2: Viele kosmologische Fragen, die wir in diesem Buch angehen werden, haben zu allen Zeiten die Denker fasziniert. Dabei ist jedoch kein globaler Konsens herausgekommen. Die oben gezeigte Aufgliederung basiert auf einem Vortrag des MIT-Doktoranden David Hernandez für meinen Kosmologiekurs. Da solche vereinfachenden Klassifizierungen, streng genommen, nicht möglich sind, sollte man sie mit Vorsicht genießen: Viele Religionen sind weit verzweigt und lassen sich unterschiedlich auslegen. Manche spalten sich in mehrere Gruppierungen auf. So enthält beispielsweise der Hinduismus Aspekte aller drei aufgeführten Schöpfungsvarianten: Einer Legende zufolge entstanden sowohl der Schöpfergott Brahma als auch unser Universum aus einem Ei, das seinerseits wiederum aus dem Wasser hervorgegangen sein könnte.

gen so schwierig, dass die Antworten weltweit zu keiner Übereinstimmung geführt haben. Statt einer Annäherung der Kulturen an ein eindeutiges Weltbild, das potentiell die letzte Wahrheit sein könnte, wichen ihre Antworten zu stark voneinander ab, und mindestens einige dieser Kontraste scheinen auch ihre unterschiedlichen Lebensweisen widerzuspiegeln. So stieg beispielsweise in Schöpfungsmythen aus dem alten Ägypten, wo der Nil für die Fruchtbarkeit des Landes sorgte, unsere Welt aus dem Wasser auf. Andererseits behauptet die nordische Mythologie in meiner schwedischen Heimat, wo Feuer und Eis das Überleben stark beeinflussten, das Leben sei – Überraschung! – aus Feuer und Eis hervorgegangen.

Andere, von alten Kulturen in Angriff genommene existentielle Fragen sind mindestens genauso radikal. *Was ist wirklich? Gehört zur Wirklichkeit mehr, als das Auge zu sehen vermag?* Platons Antwort lautete vor mehr als zweitausend Jahren: *Ja!* In seinem berühmten Höhlengleichnis vergleicht er uns mit Menschen, die ihr ganzes Leben in einer Höhle gefangen sind, auf eine leere Wand starren und die Schatten beobachten, die von den Dingen hinter ihnen geworfen werden. Schließlich kommen sie zu der falschen Schlussfolgerung, diese Schatten seien die ganze Wirklichkeit. Platon behauptete, was wir Menschen unsere Alltagswirklichkeit nennen, sei lediglich eine begrenzte und verfälschte Darstellung der wahren Wirklichkeit. Daher müssten wir uns von unseren geistigen Fesseln lösen und anfangen, dies zu begreifen.

Wenn ich irgendetwas in meinem Leben als Physiker gelernt haben sollte, dann ist es die Erkenntnis, dass Platon recht hatte. Die moderne Physik hat häufig genug klargestellt, dass die endgültige Beschaffenheit der Wirklichkeit nicht das ist, was sie zu sein scheint. Wenn aber die Wirklichkeit nicht unserem Denken entspricht, was ist sie dann? Wie verhält sich die innere Realität unseres Intellekts zur äußeren Realität? Woraus besteht letzten Endes alle Materie? Wie funktioniert das alles? Und warum? Hat das alles irgendetwas zu bedeuten, und falls ja, was? Douglas Adams bringt es in seiner Scifi-Parodie *Per Anhalter durch die*

Galaxis auf den Punkt: »Wie lautet die endgültige Antwort auf die Frage nach dem Leben, dem Universum und dem ganzen Rest?«

Durch die Jahrhunderte haben Denker ein faszinierendes Spektrum von Antworten auf die Frage »Was ist Wirklichkeit?« gegeben, von sinnvollen Erklärungen bis hin zu dem Beweis, dass sie nicht existiert bzw. nicht von uns erkannt werden kann. Hier sind ein paar Beispiele (diese Liste hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit, und nicht alle Alternativen schließen sich gegenseitig aus).

Antworten auf die Frage »Was ist Wirklichkeit?«	
Es gibt eine sinnvolle Antwort auf die Frage.	Elementarteilchen in Bewegung Erde, Wind, Feuer, Luft und Quintessenz Atome in Bewegung Strings in Bewegung Quantenfelder in gekrümmter Raumzeit M-Theorie (setzen Sie Ihren bevorzugten großen Anfangsbuchstaben ein ...) Eine göttliche Schöpfung Ein gesellschaftliches Konstrukt Ein Traum Information Eine Simulation (à la <i>Matrix</i>) Eine mathematische Struktur Das Ebene-IV-Multiversum
Es gibt keine sinnvolle Antwort auf die Frage.	Es gibt zwar eine Wirklichkeit, aber wir Menschen können sie nicht vollständig erkennen: Wir haben keinen Zugang zum »Ding an sich«, wie Immanuel Kant es nannte. Die Wirklichkeit ist grundsätzlich unerkennbar. Wir wissen es nicht nur nicht, sondern wir könnten es auch nicht zum Ausdruck bringen, wenn wir es wüssten. Die Wissenschaft ist nichts weiter als eine Geschichte (postmoderne Antwort von Jacques Derrida und anderen). Die Wirklichkeit ist in unseren Köpfen (konstruktivistische Antwort). Die Wirklichkeit existiert nicht (Solipsismus).

Dieses Buch (und in der Tat auch meine wissenschaftliche Karriere) ist mein ganz persönlicher Versuch, diese Frage in Angriff zu nehmen. Einer der Gründe, weshalb Denker ein derart breites Antwortspektrum angeboten haben, liegt an ihrem Vorrecht, die Frage auf unterschiedliche Weise zu interpretieren. Deshalb schulde ich Ihnen eine Erklärung, wie ich sie interpretiere und wie ich an das Problem herangehe. Das Wort *Wirklichkeit* kann viele verschiedene Bedeutungen haben. Ich benutze es, wenn es um die endgültige Beschaffenheit der äußeren materiellen Welt geht, der wir angehören, und ich bin fasziniert von der Suche nach einem besseren Verständnis unserer Wirklichkeit. Was ist also mein Ansatz?

Als Gymnasiast begann ich eines Abends Agatha Christies Kriminalroman *Der Tod auf dem Nil* zu lesen. Obwohl mir schmerzhaft bewusst war, dass mein Wecker um sieben Uhr morgens klingeln würde, konnte ich um nichts auf der Welt mit dem Lesen aufhören, bis das Rätsel – so gegen vier Uhr morgens – gelöst war. Seit meiner Kindheit habe ich mich unwiderstehlich zu Krimis hingezogen gefühlt. Als ich zwölf Jahre alt war, gründete ich mit meinen Klassenkameraden Andreas Bette, Matthias Bothner und Ola Hansson einen Detektivclub. Wir haben zwar nie einen Verbrecher gefangen, aber die Vorstellung, Rätsel zu lösen, regte meine Phantasie an. Für mich ist die Frage »Was ist Wirklichkeit?« die ultimative Detektivgeschichte, und ich betrachte es als einen unglaublichen Glücksfall, dass ich in der Lage bin, mich ausgiebig mit Antworten auf diese Frage beschäftigen zu können. In den folgenden Kapiteln werde ich von anderen Gelegenheiten erzählen, bei denen mich meine Neugier in den frühen Morgenstunden wach hielt und ich nicht mit dem Lesen aufhören konnte, bis das Rätsel gelöst war. Mit dem Unterschied, dass es nicht mehr um ein Buch ging, sondern um mein eigenes Schreiben. Und da war ich auf der Spur einer mathematischen Gleichung, die mich schließlich, das war mir klar, zu einer Antwort führen sollte.

Ich bin Physiker, und mein Ansatz, das Rätsel der Wirklichkeit zu lösen, wird von der Physik bestimmt. Daher beginnt für

mich alles mit großen Fragen wie zum Beispiel »Wie groß ist unser Universum?« oder »Woraus besteht die Welt?«. Diese Fragen behandle ich dann wie Kriminalrätsel: Ich kombiniere kluge Beobachtungen mit Schlussfolgerungen und verfolge jeden Hinweis beharrlich, ganz gleich, wohin es führen mag.

Die Reise beginnt

Ein physikalischer Ansatz? Ist das nicht die sicherste Methode, um etwas Aufregendes in etwas Langweiliges zu verwandeln? Wenn mein Sitznachbar im Flugzeug mich nach meinem Beruf fragt, bieten sich mir zwei Möglichkeiten. Wenn ich Lust auf ein Gespräch habe, sage ich »Astronomie«, was hundertprozentig zu einer interessanten Unterhaltung führt.¹ Wenn ich nicht reden möchte, sage ich »Physik«, worauf er mit Sicherheit so etwas sagt wie »Oh, das war mein schlechtestes Fach in der Schule« und mich dann für den Rest des Flugs in Ruhe lässt.

Tatsächlich war auf dem Gymnasium Physik auch für *mich* das Fach, das ich am wenigsten mochte. Ich erinnere mich noch an meine erste Physikstunde. Mit monotoner, einschläfernder Stimme kündigte unser Lehrer an, uns etwas über Dichte beizubringen. Dichte sei Masse geteilt durch Volumen. Wenn also die Masse so und so und das Volumen so und so groß war, würden wir ausrechnen können, dass die Dichte so und so groß war. Ich kann mich nur noch an einen Nebelschleier erinnern. Immer wenn seine Experimente scheiterten, machte er die Feuchtigkeit dafür verantwortlich und sagte: »Heute Morgen hat es noch funktioniert.« Auch einige meiner Freunde kapierten nicht, warum ihr Experiment nicht funktionierte, bis sie entdeckten, dass ich boshafterweise einen Magneten unter ihrem Oszilloskop befestigt hatte ...

Als es an der Zeit war, sich an der Hochschule anzumelden, entschied ich mich gegen die Physik und andere technische Fächer und landete auf der Stockholmer Wirtschaftsschule, wo ich

mich auf Umweltthemen konzentrierte. Ich wollte meinen bescheidenen Beitrag leisten, um aus dem Planeten einen besseren Ort zu machen, und hatte das Gefühl, dass es uns dafür nicht an technischen Lösungen mangelte, sondern wir die uns zur Verfügung stehenden Technologien einfach nicht gut genug nutzten. Ich stellte fest, dass man das Verhalten der Menschen am besten beeinflussen konnte, wenn man ihnen an die Brieftasche ging. Und so begeisterte ich mich für die Idee, ökonomische Anreize zu schaffen, um den Egoismus des Individuums mit dem Gemeinwohl in Einklang zu bringen. Leider war ich ziemlich schnell desillusioniert und kam zu dem Schluss, dass die Wirtschaftswissenschaft zum größten Teil eine Art intellektueller Prostitution war. Man wurde dafür belohnt, das zu sagen, was die politischen Kräfte hören wollten. Wenn ein Politiker irgendetwas vorhatte, fand er auch einen Wirtschaftswissenschaftler als Berater, der sich genau dafür eingesetzt hatte. Franklin D. Roosevelt wollte die Staatsausgaben erhöhen, deshalb hörte er auf John Maynard Keynes, während Ronald Reagan sich auf Milton Friedman berief, um die Staatsausgaben zu kürzen.

Da gab mir mein Klassenkamerad Johan Oldhoff ein Buch, mit dem sich alles veränderte: *Sie beliebten wohl zu scherzen, Mr. Feynman!* Ich bin Richard Feynman nie begegnet, aber seinetwegen habe ich zur Physik gewechselt. Obwohl es in dem Buch nicht wirklich um Physik ging, sondern vielmehr darum, wie man Tresorschlösser knackt und Frauen abschleppt, konnte ich zwischen den Zeilen lesen, dass dieser Kerl die Physik liebte. Was ich wirklich faszinierend fand. Wenn man sieht, wie ein mittelmäßig aussehender Typ Arm in Arm mit einer hinreißenden Frau spazieren geht, fragt man sich wahrscheinlich, ob man irgendetwas verpasst hat. Wahrscheinlich hat sie eine verborgene Qualität in ihm entdeckt. Plötzlich ging es mir genauso mit der Physik: Was hat Feynman gesehen, das ich auf dem Gymnasium nicht mitgekriegt habe?

Ich musste dieses Rätsel lösen, und so setzte ich mich hin und begann den ersten Band der *Feynman-Vorlesungen über Physik*, den ich in Vaters Bücherregal gefunden hatte, zu lesen: »Wenn

in einer Sintflut alle wissenschaftlichen Kenntnisse zerstört würden und nur ein Satz an die nächste Generation von Lebewesen weitergereicht werden könnte, welche Aussage würde die größte Information in den wenigsten Worten enthalten?«

Wow – dieser Typ war überhaupt nicht mit meinem Physiklehrer auf dem Gymnasium zu vergleichen! Feynman fuhr fort: »Ich bin davon überzeugt, dass [...] alle Dinge aus Atomen aufgebaut sind – aus kleinen Teilchen, die in permanenter Bewegung sind, einander anziehen, wenn sie ein klein wenig voneinander entfernt sind, sich aber gegenseitig abstoßen, wenn sie aneinandergepresst werden.«

Mir ging ein Licht auf. Ich las immer weiter und war hingerissen. Ich glaubte, eine religiöse Erfahrung zu machen. Schließlich begriff ich es! Ich hatte eine Offenbarung, die erklärte, was ich die ganze Zeit vermisst hatte und was Feynman erkannt hatte: Die Physik ist das größte intellektuelle Abenteuer, die Suche nach dem Verständnis der tiefsten Geheimnisse, die unser Universum bereithält. Es ist nicht so, dass die Physik etwas Faszinierendes untersucht und etwas Langweiliges dabei herauskommt. Vielmehr öffnet sie unsere Augen für das Schöne und Wunderbare in der Welt, die uns umgibt. Wenn ich im Herbst zur Arbeit radle, sehe ich die Schönheit in den rot, orange und golden gesprenkelten Bäumen. Schaut man sich die Bäume durch die Linse der Physik an, erkennt man noch mehr Schönheit, eingefangen in dem Feynman-Zitat, mit dem dieses Kapitel beginnt. Und je tiefer ich schaue, umso mehr Eleganz nehme ich wahr: In Kapitel 3 werden wir sehen, dass die Bäume letztlich von den Sternen stammen, während mit dem Studium ihrer Bausteine in Kapitel 8 ihre Existenz in Paralleluniversen nahegelegt wird.

Zu diesem Zeitpunkt hatte ich eine Freundin, die an der königlichen technischen Hochschule Physik studierte, und ihre Lehrbücher schienen mir so viel interessanter als meine zu sein. Unsere Beziehung war nicht von Dauer, aber meine Liebe zur Physik schon. Da das Universitätsstudium in Schweden kostenlos ist, schrieb ich mich an ihrer Universität ein, ohne die Verwaltung der Wirtschaftshochschule Stockholm über mein heim-

liches Doppelleben in Kenntnis zu setzen. Meine detektivischen Untersuchungen hatten offiziell begonnen, und hier ist, ein Vierteljahrhundert später, mein Bericht in Form dieses Buches.

Was also ist die Wirklichkeit? Mit dieser kühnen Kapitelüberschrift verfolge ich nicht das Ziel, Ihnen auf überhebliche Weise eine letztgültige Antwort zu verkaufen (wenngleich wir im letzten Teil des Buches faszinierende Möglichkeiten erkunden werden). Vielmehr möchte ich Sie einladen, mich auf meiner persönlichen Forschungsreise zu begleiten. Ich möchte meine Begeisterung mit Ihnen teilen und Sie an meinen Betrachtungen über diese bewusstseinsweiternden Rätsel teilhaben lassen. Ich glaube, Sie werden, wie ich, zu dem Schluss kommen, dass sich die Wirklichkeit, was immer sie sein mag, enorm von unseren früheren Annahmen unterscheidet und obendrein ein faszinierendes Rätsel mitten im Alltag darstellt. Ich hoffe, Sie werden wie ich die Erfahrung machen, dass die Beschäftigung mit diesen Themen Alltagsprobleme wie Strafzettel für falsches Parken oder Liebeskummer in eine angemessene Perspektive rückt. So fällt es einem leichter, damit fertig zu werden und das Leben mit seinen Geheimnissen zu genießen.

Als ich zum ersten Mal meine Ideen zu dem Buch mit John Brockman diskutierte, der inzwischen mein Agent ist, gab er mir eine eindeutige Marschrichtung vor: »Ich will kein Lehrbuch von Ihnen – ich will Ihr Buch.« Und so ist dieses Buch so etwas wie eine wissenschaftliche Autobiographie geworden. Obwohl es darin mehr um die Physik als um mich geht, ist es mit Sicherheit nicht das übliche, populär geschriebene Wissenschaftsbuch, das versucht, die Physik auf objektive Weise zu erkunden, den Konsens der Physikergemeinde widerzuspiegeln und allen gegensätzlichen Standpunkten die gleiche Aufmerksamkeit zukommen zu lassen. Eher reflektiert es meine persönliche Suche nach der endgültigen Beschaffenheit der Wirklichkeit, und ich hoffe, Sie werden Ihre Freude daran haben, sie durch meine Augen zu sehen. Gemeinsam werden wir die Spuren untersuchen, die mich persönlich am meisten faszinieren, und uns bemühen herauszufinden, was das alles bedeutet.

Wir beginnen unsere Reise mit der Überprüfung, wie das gesamte Umfeld der Frage »Was ist Wirklichkeit?« durch jüngste wissenschaftliche Durchbrüche verändert worden ist. Wobei die Physik von den größten (Kapitel 2-6) bis zu den kleinsten (Kapitel 7-8) Maßstäben ein neues Licht auf unsere äußere Wirklichkeit wirft. In Teil I dieses Buches gehen wir der Frage »Wie groß ist unser Universum?« nach und suchen die endgültige Schlussfolgerung, indem wir uns in immer größeren kosmischen Größenordnungen fortbewegen. Dabei erforschen wir sowohl unsere kosmischen Ursprünge als auch zwei Arten von Paralleluniversen, wobei wir Hinweise darauf finden, dass der Raum in gewisser Weise mathematisch ist. Teil II ist der Frage »Woraus besteht alles?« gewidmet. Dabei reisen wir in den subatomaren Mikrokosmos, untersuchen eine dritte Form von Paralleluniversum und erkunden Phänomene, die darauf hindeuten, dass die endgültigen Bausteine der Materie ebenfalls in gewisser Weise mathematisch sind. In Teil III treten wir einen Schritt zurück und denken darüber nach, was all dies für die wahre Beschaffenheit der Wirklichkeit bedeutet. Am Anfang steht die Behauptung, unser Scheitern bei dem Versuch, das Bewusstsein zu verstehen, stehe dem vollständigen Verständnis der äußeren physikalischen Realität nicht im Weg. Dann versenken wir uns in die radikalste und umstrittenste Vorstellung: Die ultimative Wirklichkeit ist rein mathematisch, was vertraute Auffassungen wie Zufälligkeit, Komplexität und sogar Veränderung auf den Stellenwert von Illusionen zurückstuft. Das bedeutet, es gibt eine vierte und endgültige Ebene von Paralleluniversen. In Kapitel 13 beenden wir unsere Reise und erkunden die Bedeutung all dieser Erkenntnisse für die Zukunft des Lebens in unserem Universum, für die Menschheit und für Sie persönlich. In Abbildung 1.3 finden Sie unseren Reiseführer mit meinen Lesetipps. Uns erwartet eine faszinierende Reise. Auf geht's!

Mit populärer Wissenschaft vertrauter Leser

Neugieriger Leser Physiker

Lesehinweis:				Kapitelname	Schwerpunkt	Status
	1	1	1	Was ist Wirklichkeit?	Einführung	
Hinauszoomen (Was ist die Wirklichkeit im größten Maßstab?)	2	über- springen	über- springen	Unsere Stellung im Raum	Wie groß ist der Raum?	Mainstream
	3			Unsere Stellung in der Zeit	Geschichte unseres Universums	
	4			Unser Universum in Zahlen	Präzisionskosmologie	
	5			Unser kosmischer Ursprung	Kosmologische Inflation	
	6	über- springen	über- springen	Willkommen im Multiversum	Paralleluniversen der Ebenen I und II	Umstritten
Hineinzoomen (Was ist die Wirklichkeit im kleinsten Maßstab?)	7	über- springen	über- springen	Kosmische Legosteine	Quantenmechanik	Mainstream
	8			Das Ebene-III-Multiversum	Quantenparalleluniversen	Umstritten
	9			Innere und äußere Wirklichkeit	Die Rolle des Bewusstseins	
Einen Schritt zurücktreten (Ist die Wirklichkeit Mathematik?)	10			Materielle und mathematische Wirklichkeit	Das Konzept „Wirklichkeit ist Mathematik“	Extrem umstritten
	11			Ist Zeit eine Illusion?	Ergibt das einen Sinn?	
	12			Das Ebene-IV-Multiversum	Das letztgültige Multiversum	
	13			Das Leben, unser Universum und der ganze Rest	Zukunft des Universums und Menschheit	Umstritten

Abbildung 1.3 Lesehinweis: Falls Sie schon sehr viele moderne, populärwissenschaftliche Bücher gelesen haben und glauben, dass Sie mit dem gekrümmten Raum, dem Urknall, der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung, der dunklen Energie, der Quantenmechanik etc. vertraut sind, könnten Sie in Erwägung ziehen, die Kapitel 2, 3, 4 und 7 auszulassen, nachdem Sie die Kästen mit der Überschrift »Fazit« am Ende dieser Kapitel konsultiert haben. Sollten Sie Physiker sein, können Sie eventuell auch Kapitel 5 auslassen. Allerdings sind viele vertraut klingende Konzepte erstaunlich subtil, und falls Sie nicht alle der unter 1-16 aufgelisteten Fragen in Kapitel 2 beantworten können, können Sie sich das noch aus den frühen Kapiteln aneignen. Dann erkennen Sie, wie die späteren Kapitel logisch auf ihnen aufbauen.

FAZIT

- Ich glaube, die wichtigste Lektion, die uns die Physik über die letztgültige Beschaffenheit der Wirklichkeit gelehrt hat, besteht in der Erkenntnis, dass sie, was immer sie sein mag, sich stark von dem unterscheidet, was sie zu sein scheint.
- In Teil I dieses Buches zoomen wir hinaus ins All und erkunden die physikalische Wirklichkeit in den größten räumlichen Strukturen: Planeten, Sterne, Galaxien, Superhaufen, unser Universum und zwei mögliche Ebenen von Paralleluniversen.
- In Teil II des Buches zoomen wir in den Mikrokosmos hinein und erforschen die physikalische Wirklichkeit in den kleinsten räumlichen Strukturen: den Atomen und ihren grundlegenden Bausteinen, wobei wir auf eine dritte Ebene von Paralleluniversen treffen.
- In Teil III treten wir einen Schritt zurück und untersuchen die ultimative Beschaffenheit dieser seltsamen physikalischen Wirklichkeit. Wir erforschen die Möglichkeit, dass sie letztlich rein mathematisch ist, genauer gesagt, eine mathematische Struktur, die Teil einer vierten und endgültigen Ebene von Paralleluniversen ist.
- *Wirklichkeit* hat für viele Menschen unterschiedliche Bedeutungen. Ich benutze das Wort, um die endgültige Beschaffenheit der äußeren physikalischen Welt zu benennen, von der wir ein Teil sind. Seit meiner Kindheit hat mich die Suche nach einem besseren Verständnis der Wirklichkeit inspiriert und fasziniert.
- Dieses Buch handelt von meinem persönlichen Weg zur Erforschung der Wirklichkeit – kommen Sie mit!

ERSTER TEIL
HINAUSGEZOOMT

Unsere Stellung im Raum

Der Weltraum ... ist groß. Verdammt groß. Du kannst dir gar nicht vorstellen, wie groß, gigantisch, wahnsinnig riesenhaft der Weltraum ist.

DOUGLAS ADAMS IN
PER ANHALTER DURCH DIE GALAXIS

Kosmische Fragen

Er hebt seine Hand, und ich gebe ihm mit einer Geste zu verstehen, dass er seine Frage jetzt stellen kann. »Wird der Weltraum ewig da sein?«, fragt er.

Meine Kinnlade klappt herunter. Wow. Gerade habe ich eine kleine Astronomiepräsentation im Kids' Corner beendet, dem Nachmittagshort für meine Kinder in Winchester. Da sitzen nun diese ausgesprochen niedlichen Vorschulkinder auf dem Fußboden, schauen mich mit großen Augen an und warten auf eine Antwort. Dabei hat dieser fünfjährige Junge mir gerade eine Frage gestellt, die ich nicht beantworten kann! Ehrlich gesagt, kann sie niemand auf der Welt beantworten. Dennoch ist es keine hoffnungslos metaphysische, sondern eine ernsthafte wissenschaftliche Frage, für die Theorien, von denen ich Ihnen gleich erzählen werde, eindeutige Vorhersagen machen. Zur Zeit werden Experimente durchgeführt, die weiteren Aufschluss geben sollen. Im Grunde ist es eine wirklich großartige Frage über die grundlegende Beschaffenheit unserer physikalischen Wirklichkeit. Wie wir im fünften Kapitel noch sehen werden, führt uns diese Frage zu zwei unterschiedlichen Arten von Paralleluniversen.

Im Lauf der Jahre bin ich beim Verfolgen der Nachrichten über die Weltlage zunehmend menschenfeindlicher geworden, aber innerhalb weniger Sekunden gab dieser kleine Junge meinem Glauben an das Potential der Menschheit neuen Auftrieb. Wenn ein Fünfjähriger derart tiefgründige Dinge sagen kann, lässt sich erahnen, welches Potential wir Erwachsenen haben, unter günstigen Umständen etwas zu erreichen! Er erinnerte mich auch an die Bedeutung guten Unterrichts. Wir werden alle mit der Gabe der Neugier geboren, doch an einem bestimmten Punkt gelingt es der Schule, sie uns zu vermiesen. Ich glaube, meine Hauptverantwortlichkeit als Lehrer besteht nicht darin, Tatsachen zu vermitteln, sondern diesen verlorengegangenen Enthusiasmus für das Fragestellen neu zu entfachen.

Ich liebe Fragen. Vor allem bedeutende Fragen. Ich schätze mich überaus glücklich, einen großen Teil meiner Zeit der Lösung interessanter Fragen widmen zu können. Dass ich diese Aktivität Arbeit nennen darf und damit meinen Lebensunterhalt verdiene, übertrifft meine verrücktesten Vorstellungen vom Glück. Hier ist eine Liste der sechzehn Fragen, die mir am häufigsten gestellt werden:

1. *Wie könnte der Weltraum nicht unendlich sein?*
2. *Wie konnte ein unendlicher Weltraum in einer endlichen Zeit erschaffen werden?*
3. *Wohin expandiert unser Universum?*
4. *Wo im Weltraum geschah unsere Urknallexplosion?*
5. *Geschah der Urknall an einem einzigen Punkt?*
6. *Wenn das Universum nur 14 Milliarden Jahre alt ist, wie können wir dann Objekte sehen, die 30 Milliarden Lichtjahre entfernt sind?*
7. *Verstoßen Galaxien, die sich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit entfernen, nicht gegen die Relativitätstheorie?*
8. *Entfernen sich Galaxien tatsächlich von uns, oder expandiert lediglich der Weltraum?*
9. *Dehnt sich die Milchstraße aus?*
10. *Gibt es Beweise für eine Urknallsingularität?*

11. *Verstößt die durch Inflation erzeugte Materie in unserer Umgebung aus nahezu nichts nicht gegen das Gesetz der Energieerhaltung?*
12. *Was verursachte unseren Urknall?*
13. *Was war vor unserem Urknall?*
14. *Was ist das endgültige Schicksal unseres Universums?*
15. *Was sind dunkle Materie und dunkle Energie?*
16. *Sind wir unbedeutend?*

Wir wollen diese Fragen gemeinsam angehen. In den nächsten vier Kapiteln werden wir elf von ihnen beantworten und interessante Wendungen finden, die mit den restlichen fünf Fragen zu tun haben. Doch kehren wir zunächst zurück zu der Frage des Vorschuljungen, die im gesamten ersten Teil dieses Buches eine zentrale Stellung einnehmen wird: *Wird der Weltraum ewig da sein?*

Wie groß ist der Weltraum?

Mein Vater gab mir einmal folgenden Rat: »Wenn du eine schwierige Frage hast, die du nicht beantworten kannst, fang mit einer einfacheren Frage an, die du beantworten kannst.« Beginnen wir also in diesem Sinn und fragen uns, wie groß der Weltraum mindestens sein muss, ohne unseren Beobachtungen zu widersprechen. Abbildung 2.1 veranschaulicht, dass die Antwort auf diese Frage sich im Lauf der Jahrhunderte dramatisch verändert hat: Heute wissen wir, dass unser Weltraum mindestens eine Milliarde Billionen (10^{21}) Mal größer sein muss als die weiteste Entfernung, die unseren Jäger-Sammler-Vorfahren bekannt gewesen ist – was im Wesentlichen auf die Strecke hinausläuft, die sie in ihrem Leben zurücklegten. Darüber hinaus zeigt die Abbildung, dass diese Erweiterung unseres Horizonts keineswegs ein einmaliges Ereignis war, sondern wiederholt stattfand. Immer wenn es uns Menschen gelang, uns hinauszuzoomen und unser Universum in größeren Maßstäben zu kartieren, entdeckten wir, dass alles,