

Leseprobe aus:

Stephen Hawking

Eine kurze Geschichte der Zeit



Mehr Informationen zum Buch finden Sie auf rowohlt.de.

Stephen Hawking

**Eine kurze
Geschichte der Zeit**

*Aus dem Englischen
von Hainer Kober*

Rowohlt Taschenbuch Verlag

Neuausgabe Dezember 2011

Veröffentlicht im Rowohlt Taschenbuch Verlag,
Reinbek bei Hamburg, April 1991

Copyright © 1988, 1997, 2011 by Rowohlt Verlag GmbH,
Reinbek bei Hamburg

Die Originalausgabe erschien 1988 unter dem Titel
«A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes»
im Verlag Bantam Books, New York

«A Brief History of Time»

Copyright © 1988, 1996 by Stephen Hawking

Abbildungen Copyright © 1988 by Ron Miller

Umschlaggestaltung ZERO Werbeagentur, München,
nach einem Entwurf von any.way, Hamburg

Satz Sabon PostScript bei pagina GmbH, Tübingen

Druck und Bindung CPI – Clausen & Bosse, Leck

Printed in Germany

ISBN 978 3 499 62600 5



Das für dieses Buch verwendete FSC®-zertifizierte Papier
Classic liefert Stora Enso, Finnland.

INHALT

Vorwort	7
Kapitel 1 – <i>Unsere Vorstellung vom Universum</i>	11
Kapitel 2 – <i>Raum und Zeit</i>	27
Kapitel 3 – <i>Das expandierende Universum</i>	53
Kapitel 4 – <i>Die Unschärferelation</i>	75
Kapitel 5 – <i>Elementarteilchen und Naturkräfte</i>	87
Kapitel 6 – <i>Schwarze Löcher</i>	109
Kapitel 7 – <i>Schwarze Löcher sind gar nicht so schwarz</i>	133
Kapitel 8 – <i>Ursprung und Schicksal des Universums</i>	151
Kapitel 9 – <i>Der Zeitpfeil</i>	185
Kapitel 10 – <i>Wurmlöcher und Zeitreisen</i>	199
Kapitel 11 – <i>Die Vereinheitlichung der Physik</i>	213
Kapitel 12 – <i>Schluß</i>	233
<i>Albert Einstein</i>	239
<i>Galileo Galilei</i>	241
<i>Isaac Newton</i>	243
<i>Glossar</i>	245
<i>Dank</i>	252
<i>Register</i>	255

Vorwort

FÜR DIE ERSTE AUSGABE dieses Buches habe ich kein Vorwort geschrieben – das hat freundlicherweise damals Carl Sagan übernommen. Statt dessen verfaßte ich einen kurzen Abschnitt mit dem Titel «Dank», um dort, wie man mir riet, alle Leute und Institutionen aufzuführen, die mir geholfen hatten. Allerdings waren einige der Stiftungen, die mich unterstützt hatten, über diese Erwähnung nicht sehr erfreut, sahen sie sich doch in der Folgezeit mit einer Flut von Anträgen konfrontiert.

Ich glaube, niemand – weder mein Verleger noch mein Agent, noch ich selbst – hatte mit einem derartigen Erfolg des Buches gerechnet. Auf der Bestsellerliste der *Sunday Times* hielt es sich 237 Wochen, länger als irgendein anderes Buch (die Bibel und Shakespeare natürlich ausgenommen). Es ist in etwa vierzig Sprachen übersetzt und so oft verkauft worden, daß ungefähr ein Exemplar auf jeweils 750 Männer, Frauen und Kinder dieser Welt kommt. Nathan Myhrvold von Microsoft (ein ehemaliger Student von mir) hat wohl recht, wenn er sagt, von meinen Büchern über Physik seien mehr verkauft worden als von Madonnas Büchern über Sex.

Der Erfolg der «Kurzen Geschichte der Zeit» läßt darauf schließen, daß es ein weitverbreitetes Interesse an den Grundfragen unserer Existenz gibt: Woher kommen wir? Warum ist das Universum so, wie es ist?

Deshalb habe ich die Gelegenheit genutzt, um das Buch auf den neuesten Stand zu bringen. Zu diesem Zweck habe ich viele Erkenntnisse und Beobachtungsdaten aufgenommen, die seit der Erstveröffentlichung (1. April 1988) hinzugekommen sind. Ferner gibt es ein neues Kapitel über Wurmlöcher und Zeitrei-

sen. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie scheint uns die Möglichkeit zu eröffnen, Wurmlöcher zu schaffen und zu nutzen – kleine Röhren, die verschiedene Regionen der Raumzeit miteinander verbinden. Wenn dies so wäre, könnten wir eines Tages in der Lage sein, Blitzreisen durch die Milchstraße oder durch die Zeit zu unternehmen. Gewiß, wir haben noch niemanden aus der Zukunft erblickt (oder doch?), aber ich werde eine mögliche Erklärung dafür erörtern.

Außerdem beschäftige ich mich mit den Fortschritten, die in letzter Zeit bei der Suche nach «Dualitäten» oder Entsprechungen zwischen scheinbar verschiedenen physikalischen Theorien erzielt worden sind. Diese Entsprechungen sind ein starkes Indiz dafür, daß es eine vollständige vereinheitlichte Theorie der Physik gibt, sie lassen aber auch erkennen, daß es vielleicht nicht möglich ist, diese Theorie in einer einzigen fundamentalen Formulierung auszudrücken. Statt dessen müssen wir uns eventuell in unterschiedlichen Situationen an verschiedene Aspekte der grundlegenden Theorie halten – so als wären wir nicht in der Lage, die Erdoberfläche auf einer einzigen Karte abzubilden, und müßten für verschiedene Regionen verschiedene Karten benutzen. Das wäre zwar eine Revolution in unserer Einstellung zur Vereinheitlichung der wissenschaftlichen Gesetze, würde aber an dem wichtigsten Punkt nichts ändern: daß das Universum durch eine Reihe rationaler Gesetze bestimmt wird, die wir entdecken und verstehen können.

Die bei weitem wichtigsten Beobachtungsdaten sind die Messungen von Fluktuationen im kosmischen Mikrowellenhintergrund durch COBE (den Satelliten Cosmic Background Explorer) und andere Projekte. Diese Fluktuationen sind der Fingerabdruck der Schöpfung, winzige Unregelmäßigkeiten in dem sonst regelmäßigen und gleichförmigen frühen Universum – Unregelmäßigkeiten, die sich später zu Galaxien, Sternen und all den anderen Strukturen um uns her entwickelt haben. Ihre Form entspricht den Vorhersagen der Hypothese, das Universum weise keine Grenzen oder Ränder in imaginärer Zeitrich-

tung auf. Allerdings sind weitere Beobachtungen erforderlich, um diese Hypothese zu bestätigen und andere mögliche Erklärungen für die Fluktuationen im Mikrowellenhintergrund auszuschließen. Jedenfalls sollten wir in ein paar Jahren wissen, ob wir daran glauben können, daß wir in einem Universum leben, das vollkommen in sich geschlossen und ohne Anfang und Ende ist.

Cambridge, im Mai 1996 Stephen Hawking

1

Unsere Vorstellung vom Universum

EIN NAMHAFTER WISSENSCHAFTLER (man sagt, es sei Bertrand Russell gewesen) hielt einmal einen öffentlichen Vortrag über Astronomie. Er schilderte, wie die Erde um die Sonne und die Sonne ihrerseits um den Mittelpunkt einer riesigen Ansammlung von Sternen kreist, die wir unsere Galaxis nennen. Als der Vortrag beendet war, stand hinten im Saal eine kleine alte Dame auf und erklärte: «Was Sie uns da erzählt haben, stimmt alles nicht. In Wirklichkeit ist die Welt eine flache Scheibe, die von einer Riesenschildkröte auf dem Rücken getragen wird.» Mit einem überlegenen Lächeln hielt der Wissenschaftler ihr entgegen: «Und worauf steht die Schildkröte?» – «Sehr schlau, junger Mann», parierte die alte Dame. «Ich werd's Ihnen sagen: Da stehen lauter Schildkröten aufeinander.»

Die meisten Menschen werden über die Vorstellung, unser Universum sei ein unendlicher Schildkrötenturm, den Kopf schütteln. Doch woher nehmen wir die Überzeugung, es besser zu wissen? Was wissen wir vom Universum, und wieso wissen wir es? Woher kommt das Universum, und wohin entwickelt es sich? Hatte es wirklich einen Anfang? Und wenn, was geschah *davor*? Was ist die Zeit? Wird sie je ein Ende finden? Neuere Erkenntnisse in der Physik, die teilweise phantastischen neuen Technologien zu verdanken sind, legen einige Antworten auf diese alten Fragen nahe. Eines Tages werden uns diese Antworten vielleicht so selbstverständlich erscheinen wie die Tatsache,

daß die Erde um die Sonne kreist – oder so lächerlich wie der Schildkrötenturm. Nur die Zukunft (was auch immer das sein mag) kann uns eine Antwort darauf geben.

Schon 340 v. Chr. brachte der griechische Philosoph Aristoteles in seiner Schrift «Vom Himmel» zwei gute Argumente für seine Überzeugung vor, daß die Erde keine flache Scheibe, sondern kugelförmig sei. Erstens verwies er auf seine Erkenntnisse über die Mondfinsternis. Sie werde, schrieb er, dadurch verursacht, daß die Erde zwischen Sonne und Mond trete. Der Erdschatten auf dem Mond sei immer rund, also müsse die Erde eine Kugel sein. Wäre sie eine Scheibe, hätte der Schatten eine längliche, elliptische Form, es sei denn, die Mondfinsternis träte immer nur dann ein, wenn sich die Sonne direkt unter dem Mittelpunkt der Scheibe befände. Zweitens wußten die Griechen von ihren Reisen her, daß der Polarstern im Süden niedriger am Himmel erscheint als in nördlichen Regionen. (Aufgrund der Lage des Polarsterns über dem Nordpol scheint er sich dort direkt über einem Beobachter zu befinden, während er vom Äquator aus betrachtet knapp über dem Horizont zu stehen scheint.) Aus der unterschiedlichen Position des Polarsterns für Beobachter in Ägypten und Griechenland glaubte Aristoteles sogar den Erdumfang errechnen zu können. Er kam auf 400 000 Stadien. Die exakte Länge eines Stadions ist nicht bekannt, sie dürfte aber über 180 Meter betragen haben, wonach Aristoteles' Schätzung doppelt so hoch läge wie der heute angenommene Wert. Die Griechen hatten noch ein drittes Argument dafür, daß die Erde eine Kugel sein muß. Wie sollte man es sich sonst erklären, daß man von einem Schiff, das am Horizont erscheint, zuerst die Segel und erst dann den Rumpf sieht?

Aristoteles glaubte, die Sonne, der Mond, die Planeten und die Sterne bewegten sich in kreisförmigen Umlaufbahnen um die Erde, während diese in einem unbewegten Zustand verharre – eine Auffassung, der seine mystische Überzeugung zugrunde lag, die Erde sei der Mittelpunkt des Universums und die kreisförmige Bewegung die vollkommenste. Diese Vorstellung ge-

staltete Ptolemäus im 2. Jahrhundert n. Chr. zu einem vollständigen kosmologischen Modell aus. In ihm bildet die Erde den Mittelpunkt, umgeben von acht Sphären, die den Mond, die Sonne, die Sterne und die fünf Planeten tragen, die damals bekannt waren – Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn (Abb. 1). Die Planeten selbst bewegen sich in kleineren Kreisen, die mit ihren jeweiligen Sphären verbunden sind. Diese Annahme war nötig, um die ziemlich komplizierten Bahnen zu erklären, die man am Himmel beobachtete. Die äußerste Sphäre trägt in diesem Modell die sogenannten Fixsterne, die immer in der gleichen Position zueinander bleiben, aber gemeinsam am Himmel kreisen. Was jenseits der letzten Sphäre lag, wurde nie deutlich erklärt; mit Sicherheit aber gehörte es nicht zu dem Teil des Universums, der menschlicher Beobachtung zugänglich war.

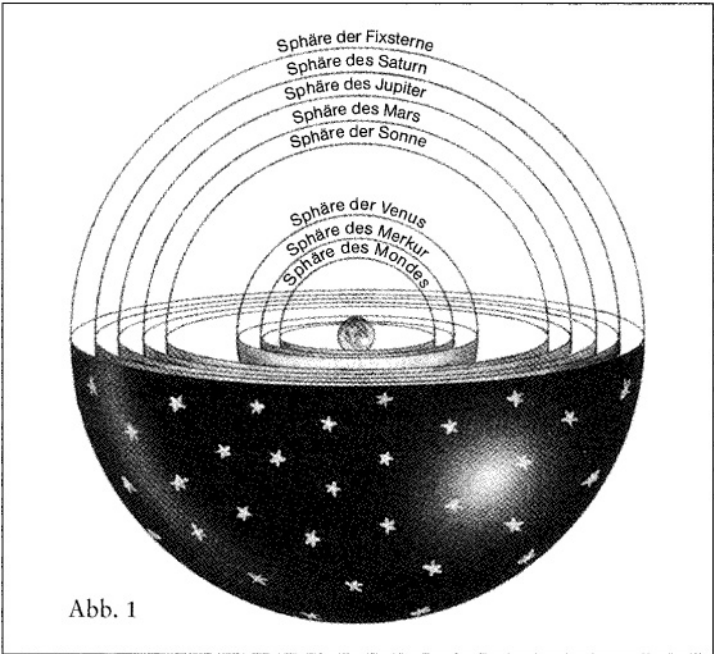


Abb. 1

Der Ptolemäische Kosmos lieferte ein Modell, das hinreichend genau war, um die Positionen der Himmelskörper vorherzusagen. Doch zur präzisen Vorherbestimmung dieser Positionen mußte Ptolemäus von der Voraussetzung ausgehen, der Mond folge einer Bahn, die ihn manchmal doppelt so nahe an die Erde heranzuführen wie zu den anderen Zeiten. Das wiederum bedeutete, der Mond müßte manchmal doppelt so groß erscheinen wie sonst! Ptolemäus war sich dieser Schwäche seines Systems bewußt. Dennoch wurde es allgemein, wenn auch nicht ausnahmslos, akzeptiert. Die christliche Kirche übernahm es als Bild des Universums, da es sich in Einklang mit der Heiligen Schrift bringen ließ, denn es hatte den großen Vorteil, daß es jenseits der Sphäre der Fixsterne noch genügend Platz für Himmel und Hölle ließ.

Ein einfacheres Modell schlug 1514 Nikolaus Kopernikus, Domherr zu Frauenburg (Polen), vor. (Vielleicht aus Angst, von seiner Kirche als Ketzer gebrandmarkt zu werden, brachte er seine Thesen zunächst anonym in Umlauf.) Er vertrat die Auffassung, die Sonne ruhe im Mittelpunkt, um den sich die Erde und die Planeten in kreisförmigen Umlaufbahnen bewegten. Fast ein Jahrhundert verging, bis man sein (heliozentrisches) Modell ernst zu nehmen begann. Den Anstoß gaben zwei Astronomen, Johannes Kepler in Deutschland und Galileo Galilei in Italien, die für die Kopernikanische Theorie öffentlich eintraten, und das, obwohl die von ihr vorhergesagten Umlaufbahnen mit den tatsächlich beobachteten nicht ganz übereinstimmten. Zur endgültigen Widerlegung des Aristotelisch-Ptolemäischen (geozentrischen) Modells kam es 1609. In diesem Jahr begann Galilei, den Nachthimmel mit einem Fernrohr zu beobachten, das gerade erfunden worden war. Als er den Planeten Jupiter betrachtete, entdeckte er, daß dieser von einigen kleinen Satelliten oder Monden begleitet wird, die ihn umkreisen. Galileis Schlußfolgerung: Nicht alles muß direkt um die Erde kreisen, wie Aristoteles und Ptolemäus gemeint hatten. (Natürlich konnte man auch jetzt noch glauben, daß die Erde

im Mittelpunkt des Universums ruhe und daß die Jupitermonde sich auf äußerst komplizierten Bahnen um die Erde bewegten, wobei sie lediglich den *Eindruck* erweckten, sie kreisten um den Jupiter. Doch die Kopernikanische Theorie hatte einen entscheidenden Vorteil: Sie war weitaus einfacher.) Zur gleichen Zeit hatte Johannes Kepler an einer Abwandlung der Kopernikanischen Theorie gearbeitet und schlug vor, daß sich die Planeten nicht in Kreisen, sondern in Ellipsen bewegten (eine Ellipse ist ein länglicher Kreis). Jetzt deckten sich die Vorhersagen endlich mit den Beobachtungen.

Für Kepler waren die elliptischen Umlaufbahnen lediglich eine Ad-hoc-Hypothese und eine ziemlich abstoßende dazu, weil Ellipsen weit weniger vollkommen sind als Kreise. Nachdem er fast zufällig entdeckt hatte, daß elliptische Umlaufbahnen den Beobachtungen recht genau entsprachen, konnte er sie jedoch nicht mit seiner Vorstellung in Einklang bringen, daß magnetische Kräfte die Planeten um die Sonne bewegten. Eine Erklärung wurde erst viel später geliefert, im Jahre 1687, als Sir Isaac Newton die «*Philosophiae naturalis principia mathematica*» veröffentlichte, wahrscheinlich das wichtigste von einem einzelnen verfaßte physikalische Werk, das jemals erschienen ist. Dort entwarf Newton nicht nur eine Theorie der Bewegung von Körpern in Raum und Zeit, sondern entwickelte auch das komplizierte mathematische Instrumentarium, das zur Analyse dieser Bewegungen erforderlich war. Darüber hinaus postulierte er ein allgemeines Gravitationsgesetz, nach dem jeder Körper im Universum von jedem anderen Körper durch eine Kraft angezogen wird, die um so größer ist, je mehr Masse die Körper haben und je näher sie einander sind. Dieselbe Kraft bewirkt auch, daß Gegenstände zu Boden fallen. (Die Geschichte, ein Apfel, der Newton auf den Kopf gefallen sei, habe ihm zu dieser Eingebung verholfen, gehört wohl ins Reich der Legende. Newton selbst hat lediglich erklärt, der Gedanke an die Schwerkraft sei durch den Fall eines Apfels ausgelöst worden, als er «sinnend» dagesessen habe.) Daraus leitete Newton dann

ab, daß nach seinem Gesetz die Schwerkraft den Mond zu einer elliptischen Bewegung um die Erde und diese sowie die anderen Planeten zu elliptischen Bahnen um die Sonne veranlaßt.

Das Kopernikanische Modell löste sich von den Ptolemäischen Himmelssphären und damit von der Vorstellung, das Universum habe eine natürliche Grenze. Da die «Fixsterne» ihre Positionen nicht zu verändern schienen – von einer Rotation am Himmel abgesehen, die durch die Drehung der Erde um ihre eigene Achse verursacht wird –, lag die Annahme nahe, sie seien Himmelskörper wie die Sonne, nur sehr viel weiter entfernt.

Newton bemerkte, daß sich die Sterne seiner Gravitationstheorie zufolge gegenseitig anziehen mußten; also konnten sie doch nicht in weitgehender Bewegungslosigkeit verharren. Mußten sie nicht alle in irgendeinem Punkt zusammenstürzen? In einem Brief an Richard Bentley, einen anderen bedeutenden Gelehrten jener Zeit, meinte Newton 1691, dies müßte in der Tat geschehen, wenn es nur eine endliche Zahl von Sternen gäbe, die über ein endliches Gebiet des Raums verteilt wären. Wenn hingegen, so fuhr er fort, die Anzahl der Sterne unendlich sei und sie sich mehr oder minder gleichmäßig über den unendlichen Raum verteilten, käme es nicht dazu, weil kein Mittelpunkt vorhanden wäre, in den sie stürzen könnten.

Dieses Argument ist ein typisches Beispiel für die Fallen, die auf uns lauern, wenn wir über das Unendliche reden. In einem unendlichen Universum kann jeder Punkt als Zentrum betrachtet werden, weil sich von jedem Punkt aus eine unendliche Zahl von Sternen nach jeder Seite hin erstreckt. Erst sehr viel später erkannte man, daß der richtige Ansatz darin besteht, vom ersten Fall auszugehen, einem endlichen Raum, in dem alle Sterne ineinanderstürzen, um dann zu fragen, was sich verändert, wenn man mehr Sterne hinzufügt, die sich in etwa gleichmäßig außerhalb dieser Region verteilen. Nach Newtons Gesetz würden die äußeren Sterne im Mittel ohne Einfluß auf das Verhalten der inneren bleiben, die also genauso rasch ineinanderstür-

zen würden wie in der zuvor beschriebenen Situation. Wir können so viele Sterne hinzufügen, wie wir wollen, stets würden sie kollabieren. Heute wissen wir, daß kein unendliches, statisches Modell des Universums denkbar ist, in dem die Gravitation durchgehend anziehend wirkt.

Die Tatsache, daß bis dahin niemand den Gedanken vorgebracht hatte, das Universum könnte sich ausdehnen oder zusammenziehen, spiegelt das allgemeine geistige Klima vor Beginn des 20. Jahrhunderts in einer interessanten Facette wider. Man ging allgemein davon aus, das Weltall habe entweder seit jeher in unveränderter Form bestanden oder es sei zu einem bestimmten Zeitpunkt mehr oder weniger in dem Zustand erschaffen worden, den wir heute beobachten können. Zum Teil mag dies an der Neigung der Menschen gelegen haben, an ewige Wahrheiten zu glauben, und vielleicht ist es auch dem Trost zuzuschreiben, den sie in dem Gedanken fanden, daß sie selbst zwar alterten und starben, das Universum aber ewig und unveränderlich sei.

Selbst diejenigen, die wissen mußten, daß nach Newtons Gravitationstheorie das Universum nicht statisch sein kann, kamen nicht auf die Idee, es könnte sich ausdehnen. Statt dessen versuchten sie, die Theorie zu modifizieren, indem sie die Anziehungskraft bei sehr großen Entfernungen zur Abstoßungskraft erklärten. Das hatte keine nennenswerten Auswirkungen auf ihre Vorhersagen über die Planetenbewegungen, gestattete es aber einer unendlichen Verteilung von Sternen, im Gleichgewicht zu verharren. Die Erklärung nach dieser Theorie: Die Abstoßungskräfte von den weiter entfernten Sternen heben die Anziehungskräfte zwischen nahe zusammenliegenden auf. Heute hat sich indessen die Auffassung durchgesetzt, daß ein solches Gleichgewicht instabil wäre: Wenn die Sterne in irgendeiner Region nur ein wenig näher rückten, würden sich die Anziehungskräfte zwischen ihnen verstärken und die Oberhand über die Abstoßungskräfte gewinnen, so daß das Ineinanderfallen der Sterne nicht aufzuhalten wäre. Wenn sich die Sterne ande-

rerseits ein bißchen weiter voneinander entfernten, würden die Abstoßungskräfte überwiegen und die Sterne unaufhaltsam auseinandertreiben.

Ein anderer Einwand gegen ein unendliches, statisches Universum wird meist dem deutschen Arzt und Hobbyastronom Heinrich Olbers zugeschrieben, der sich 1823 zu dieser Theorie äußerte. Tatsächlich aber haben schon verschiedene Zeitgenossen Newtons dazu Stellung genommen, und Olbers' Abhandlung war keineswegs die erste Zusammenstellung begründeter Gegenargumente. Doch fand er mit ihnen als erster allgemeine Beachtung. Die Schwierigkeit liegt darin, daß in einem unendlichen, statischen Universum nahezu jeder Blick auf die Oberfläche eines Sterns treffen müßte. Deshalb müßte der Himmel selbst nachts so hell wie die Sonne sein. Olbers wandte dagegen ein, das Licht ferner Sterne würde infolge der Absorption durch dazwischenliegende Materie matt werden. Träfe dies jedoch zu, würde sich diese Materie erhitzen, so daß sie schließlich ebenso hell glühte wie die Sterne. Die Schlußfolgerung, daß der gesamte Nachthimmel hell wie die Sonnenoberfläche sein müßte, ist nur durch die Annahme zu vermeiden, die Sterne leuchteten nicht seit jeher, sondern hätten zu irgendeinem Zeitpunkt in der Vergangenheit mit der Emission begonnen. Diese Annahme ließe die Erklärung zu, daß sich die absorbierende Materie noch nicht erhitzt oder daß das Licht ferner Sterne uns noch nicht erreicht habe. Und dies führt uns zu der Frage, was die Sterne ursprünglich zum Leuchten gebracht haben könnte.

Über den Beginn des Universums hatte man sich natürlich schon lange zuvor den Kopf zerbrochen. Einer Reihe früher Kosmologien und der jüdisch-christlich-islamischen Überlieferung zufolge entstand das Universum zu einem bestimmten und nicht sehr fernen Zeitpunkt in der Vergangenheit. Ein Grund für einen solchen Anfang war die Überzeugung, daß man eine «erste Ursache» brauche, um das Vorhandensein des Universums zu erklären. (Innerhalb des Universums erklärt man ein Ereignis immer als ursächliche Folge irgendeines früheren Er-

eignisses, doch das Vorhandensein des Universums ließe sich auf diese Weise nur erklären, wenn es einen Anfang hätte.) Ein anderes Argument trug Augustinus in seiner Schrift «Der Gottesstaat» vor. Unsere Kultur, schrieb er, entwickle sich ständig weiter, und wir erinnerten uns daran, wer diese Tat vollbracht und jene Technik entwickelt habe. Deshalb könne es den Menschen und vielleicht auch das Universum noch nicht allzu lange geben. Ausgehend von der Genesis, kam Augustinus zu dem Ergebnis, Gott habe die Welt ungefähr 5000 v. Chr. erschaffen.

Aristoteles und die meisten anderen griechischen Philosophen dagegen fanden keinen Gefallen an der Vorstellung einer Schöpfung, weil sie zu sehr nach göttlicher Intervention aussah. Der Mensch und die Welt um ihn her hätten schon immer existiert, behaupteten sie, und daran werde sich auch nichts ändern. Sie hatten sich bereits mit dem oben beschriebenen Fortschrittsargument auseinandergesetzt und es entkräftet, indem sie erklärten, es sei immer wieder zu großen Überschwemmungen und anderen Katastrophen gekommen, die die Menschen stets gezwungen hätten, wieder am Punkt Null zu beginnen.

Die Fragen, ob das Universum einen Anfang in der Zeit habe und ob es räumlich begrenzt sei, behandelte später Immanuel Kant ausführlich in seinem monumentalen (und schwer verständlichen) Werk «Kritik der reinen Vernunft», das 1781 erschien. Er bezeichnete diese Fragen als Antinomien (das heißt Widersprüche) der reinen Vernunft, weil nach seiner Meinung ebenso überzeugende Gründe für die These sprachen, das Universum habe einen Anfang, wie für die Antithese, daß es seit jeher existiere. Sein Argument für die These: Wenn das Universum keinen Anfang hätte, läge ein unendlicher Zeitraum vor jedem Ereignis. Das hielt er für absurd. Das Argument für die Antithese: Wenn das Universum einen Anfang hätte, läge ein unendlicher Zeitraum vor diesem Anfang. Warum aber sollte das Universum dann zu irgendeinem bestimmten Zeitpunkt begonnen haben? Kant bedient sich also des gleichen Argumentes, um These und Antithese zu begründen. Beide beruhen sie

auf der stillschweigenden Voraussetzung, die Zeit reiche unendlich weit zurück, ganz gleich, ob das Universum einen Anfang habe oder nicht. Wie wir noch sehen werden, ist ein Begriff von Zeit vor Beginn des Universums sinnlos. Darauf hat schon Augustinus hingewiesen. Als er gefragt wurde: Was hat Gott getan, bevor er das Universum erschuf?, erwiderte er nicht: Er hat die Hölle gemacht, um einen Platz für Leute zu haben, die solche Fragen stellen. Seine Antwort lautete: Die Zeit sei eine Eigenschaft des von Gott geschaffenen Universums und habe vor dessen Beginn nicht existiert.

Solange die meisten Menschen das Universum für weitgehend statisch und unveränderlich hielten, gehörte die Frage, ob es einen Anfang habe oder nicht, in den Bereich der Metaphysik und Theologie. Was man beobachtete, ließ sich mittels der Vorstellung von einem seit jeher existierenden Universum erklären wie anhand der Theorie, es sei zu einem bestimmten Zeitpunkt auf eine Weise in Bewegung gesetzt worden, daß es den Anschein ewigen Bestehens erwecke. Doch im Jahre 1929 machte Edwin Hubble die bahnbrechende Entdeckung, daß sich die fernen Galaxien, ganz gleich, wohin man blickt, rasch von uns fortbewegen. Mit anderen Worten: Das Universum dehnt sich aus. Dies bedeutet, daß in früheren Zeiten die Objekte näher beieinander waren. Es hat sogar den Anschein, als hätten sie sich vor ungefähr zehn bis zwanzig Milliarden Jahren alle an ein und demselben Ort befunden und als sei infolgedessen einst die Dichte des Universums unendlich gewesen. Mit dieser Entdeckung rückte die Frage nach dem Anfang des Universums in den Bereich der Wissenschaft.

Hubbles Beobachtungen legten die Vermutung nahe, das Universum sei zu einem bestimmten Zeitpunkt, Urknall genannt, unendlich klein und unendlich dicht gewesen. Unter solchen Bedingungen würden alle Naturgesetze ihre Geltung verlieren, und damit wäre auch keine Voraussage über die Zukunft mehr möglich. Wenn es Ereignisse gegeben hat, die vor diesem Zeitpunkt lagen, so können sie doch nicht beeinflussen, was ge-

genwärtig geschieht. Man kann sie außer acht lassen, weil sie sich nicht auf unsere Beobachtungen auswirken. Man kann sagen, die Zeit beginnt mit dem Urknall – in dem Sinne, daß frühere Zeiten einfach nicht definiert sind. Es sei betont, daß sich dieser Zeitbeginn grundlegend von jenen Vorstellungen unterscheidet, mit deren Hilfe man ihn sich früher ausgemalt hat. In einem unveränderlichen Universum muß ein Anfang in der Zeit von einem Wesen außerhalb dieser Welt veranlaßt werden – es gibt keine physikalische Notwendigkeit für einen Anfang. Die Erschaffung des Universums durch Gott ist buchstäblich zu jedem Zeitpunkt in der Vergangenheit vorstellbar. Wenn sich das Universum hingegen ausdehnt, könnte es physikalische Gründe für einen Anfang geben. Man könnte sich noch immer vorstellen, Gott habe die Welt im Augenblick des Urknalls erschaffen oder auch danach, indem er ihr den Anschein verlieh, es habe einen Urknall gegeben. Aber es wäre sinnlos anzunehmen, sie sei *vor* dem Urknall geschaffen worden. Das Modell eines expandierenden Universums schließt einen Schöpfer nicht aus, grenzt aber den Zeitpunkt ein, da er sein Werk verrichtet haben könnte!

Wenn wir uns mit der Beschaffenheit des Universums befassen und Fragen erörtern wollen wie die nach seinem Anfang oder seinem Ende, müssen wir eine klare Vorstellung davon haben, was eine wissenschaftliche Theorie ist. Ich werde hier von der einfachen Auffassung ausgehen, daß eine Theorie aus einem Modell des Universums oder eines seiner Teile sowie aus einer Reihe von Regeln besteht, die Größen innerhalb des Modells in Beziehung zu unseren Beobachtungen setzen. Eine Theorie existiert nur in unserer Vorstellung und besitzt keine andere Wirklichkeit (was auch immer das bedeuten mag). Gut ist eine Theorie, wenn sie zwei Voraussetzungen erfüllt: Sie muß eine große Klasse von Beobachtungen auf der Grundlage eines Modells beschreiben, das nur einige wenige beliebige Elemente enthält, und sie muß bestimmte Voraussagen über die Ergebnisse künftiger Beobachtungen ermöglichen. So war bei-

spielsweise die Aristotelische Theorie, alles bestehe aus den vier Elementen Erde, Luft, Feuer und Wasser, einfach genug, um den genannten Bedingungen zu genügen, führte aber zu keinen deutlichen Vorhersagen. Newtons Gravitationstheorie dagegen, die auf einem noch einfacheren Modell beruht – Körper ziehen sich mit einer Kraft an, die ihrer Masse proportional und dem Quadrat der Entfernung zwischen ihnen umgekehrt proportional ist –, sagt die Bewegungen der Sonne, des Mondes und der Planeten mit großer Präzision voraus.

Jede physikalische Theorie ist insofern vorläufig, als sie nur eine Hypothese darstellt: Man kann sie nie beweisen. Wie häufig auch immer die Ergebnisse von Experimenten mit einer Theorie übereinstimmen, man kann nie sicher sein, daß das Ergebnis nicht beim nächstenmal der Theorie widersprechen wird. Dagegen ist eine Theorie widerlegt, wenn man nur eine einzige Beobachtung findet, die nicht mit den aus ihr abgeleiteten Voraussagen übereinstimmt. In seiner «Logik der Forschung» nennt Karl Popper als Merkmal einer guten Theorie, daß sie eine Reihe von Vorhersagen macht, die sich im Prinzip auch jederzeit durch Beobachtungsergebnisse widerlegen, falsifizieren, lassen müssen. Immer wenn die Beobachtungen aus neuen Experimenten mit den Vorhersagen übereinstimmen, überlebt die Theorie, und man faßt ein bißchen mehr Vertrauen zu ihr; doch sobald man auch nur auf eine Beobachtung stößt, die von den Vorhersagen abweicht, muß man die Theorie aufgeben oder modifizieren. Zumindest sollte das der Fall sein, doch es sind natürlich stets Zweifel erlaubt an der Fähigkeit derer, die die Experimente durchführen.

In der Praxis sieht dies oft so aus, daß man eine neue Theorie entwickelt, die in Wahrheit nur eine Erweiterung der vorigen ist. Beispielsweise ergaben sehr genaue Beobachtungen des Planeten Merkur, daß seine Bewegung geringfügig von den Vorhersagen der Newtonschen Gravitationstheorie abweicht. Genau diese Abweichung hatte Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie vorausgesagt. Die Übereinstimmung der Einsteinschen

Vorhersagen mit dem, was man sah, und die Unstimmigkeit der Newtonschen Vorhersagen gehörten zu den entscheidenden Bestätigungen der neuen Theorie. Für alle praktischen Zwecke verwenden wir jedoch nach wie vor Newtons Theorie, weil der Unterschied zwischen ihren Vorhersagen und denen der allgemeinen Relativität in den Situationen, mit denen wir normalerweise zu tun haben, verschwindend klein ist. (Newtons Theorie hat überdies den großen Vorteil, daß es sich mit ihr sehr viel einfacher arbeiten läßt als mit der Einsteinschen!)

Letztlich ist es das Ziel der Wissenschaft, eine einzige Theorie zu finden, die das gesamte Universum beschreibt. In der Praxis aber zerlegen die meisten Wissenschaftler das Problem in zwei Teile: Erstens gibt es die Gesetze, die uns mitteilen, wie sich das Universum im Laufe der Zeit verändert. (Wenn wir wissen, wie das Universum zu einem gegebenen Zeitpunkt aussieht, so teilen uns diese physikalischen Gesetze mit, wie es zu irgendeinem späteren Zeitpunkt aussehen wird.) Zweitens gibt es die Frage nach dem Anfangszustand des Universums. Manche Menschen finden, daß sich die Wissenschaft nur mit dem ersten Teil des Problems befassen sollte – sie halten die Frage nach der Anfangssituation für eine Angelegenheit der Metaphysik oder Religion. Sie würden vorbringen, Gott in seiner Allmacht hätte die Welt in jeder von ihm gewünschten Weise beginnen lassen können. Das mag zutreffen, doch dann hätte er auch ihre Entwicklung in völlig beliebiger Weise gestalten können. Aber anscheinend hat er sich für eine sehr regelmäßige Entwicklung des Universums, für eine Entwicklung in Übereinstimmung mit bestimmten Gesetzen entschieden. Deshalb scheint es genauso vernünftig, Gesetze anzunehmen, die den Anfangszustand bestimmt haben.

Es hat sich als eine sehr schwierige Aufgabe erwiesen, eine Theorie aufzustellen, die in einem einzigen Entwurf das ganze Universum beschreibt. Statt dessen zerlegen wir das Problem in einzelne Segmente und arbeiten Teiltheorien aus. Jede dieser Teiltheorien beschreibt eine eingeschränkte Klasse von Beob-

achtungen und trifft jeweils nur über sie Vorhersagen, wobei die Einflüsse anderer Größen außer acht gelassen oder durch einfache Zahlengruppen repräsentiert werden. Vielleicht ist dieser Ansatz völlig falsch. Wenn im Universum grundsätzlich alles von allem abhängt, könnte es unmöglich sein, einer Gesamtlösung näherzukommen, indem man Teile des Problems isoliert untersucht. Trotzdem haben wir in der Vergangenheit auf diesem Weg zweifellos Fortschritte erzielt. Das klassische Beispiel ist abermals die Newtonsche Gravitationstheorie, nach der die Schwerkraft zwischen zwei Körpern außer vom Abstand nur von einem mit jedem Körper verknüpften Zahlenwert abhängt, ihrer Masse, sonst aber unabhängig von deren Beschaffenheit ist. So braucht man keine Theorie über den Aufbau und Zustand der Sonne und der Planeten, um ihre Umlaufbahnen zu berechnen.

Heute beschreibt die Physik das Universum anhand zweier grundlegender Teiltheorien: der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik. Sie sind die großen geistigen Errungenschaften aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Schwerkraft und den Aufbau des Universums im großen, das heißt in der Größenordnung von ein paar Kilometern bis hin zu einer Million Million Million (einer 1 mit 24 Nullen) Kilometern, der Größe des beobachtbaren Universums. Die Quantenmechanik dagegen beschäftigt sich mit Erscheinungen in Bereichen von außerordentlich geringer Ausdehnung wie etwa einem millionstel millionstel Zentimeter. Leider sind diese beiden Theorien nicht miteinander in Einklang zu bringen – sie können nicht beide richtig sein. Eine der Hauptanstrengungen in der heutigen Physik gilt der Suche nach einer neuen Theorie, die beide Teiltheorien enthält – nach einer Quantentheorie der Gravitation. Über eine solche Theorie verfügen wir bislang nicht, und möglicherweise sind wir noch weit von ihr entfernt, aber wir kennen bereits viele der Eigenschaften, die sie aufweisen muß. Und wir werden in späteren Kapiteln sehen, daß wir schon

recht genau die Voraussagen bestimmen können, die eine Quantentheorie der Gravitation liefern muß. Die Suche nach ihr ist das Hauptthema dieses Buches.

Wenn man der Meinung ist, das Universum werde nicht vom Zufall, sondern von bestimmten Gesetzen regiert, muß man die Teiltheorien zu einer vollständigen vereinheitlichten Theorie zusammenfassen, die alles im Universum beschreibt. Es gibt jedoch ein grundlegendes Paradoxon bei der Suche nach einer vollständigen vereinheitlichten Theorie. Die Vorstellungen über wissenschaftliche Theorie, wie sie oben dargelegt wurden, setzen voraus, daß wir vernunftbegabte Wesen sind, die das Universum beobachten und aus dem, was sie sehen, logische Schlüsse ziehen können. Diese Vorstellung erlaubt es uns, davon auszugehen, daß wir die Gesetze, die unser Universum regieren, immer umfassender verstehen. Doch wenn es tatsächlich eine vollständige vereinheitlichte Theorie gibt, würde sie wahrscheinlich auch unser Handeln bestimmen. Deshalb würde die Theorie selbst die Suche nach ihr determinieren! Und warum sollte sie bestimmen, daß wir aus den Beobachtungsdaten die richtigen Folgerungen ableiten? Könnte sie nicht ebensogut festlegen, daß wir die falschen oder überhaupt keine Schlüsse ziehen?

Die einzige Antwort, die ich auf dieses Problem weiß, beruht auf Darwins Prinzip der natürlichen Selektion. Danach wird es in jeder Population sich selbst fortpflanzender Organismen bei den verschiedenen Individuen Unterschiede in der Erbanlage und in der Aufzucht geben. Diese Unterschiede bewirken, daß einige Individuen besser als andere in der Lage sind, die richtigen Schlußfolgerungen über die Welt um sie her zu ziehen und entsprechend zu handeln. Für diese Individuen ist die Wahrscheinlichkeit größer, daß sie überleben und sich fortpflanzen, und deshalb werden sich ihr Verhalten und Denken durchsetzen. Auf die Vergangenheit trifft sicherlich zu, daß Intelligenz und wissenschaftliche Entdeckungen von Vorteil für unser Überleben waren. Weniger sicher ist, ob dies noch immer der

Fall ist: Unsere wissenschaftlichen Entdeckungen könnten uns vernichten, und selbst wenn sie es nicht tun, so wird eine vollständige vereinheitlichte Theorie unsere Überlebenschancen nicht wesentlich verbessern. Doch von der Voraussetzung ausgehend, das Universum habe sich in regelmäßiger Weise entwickelt, können wir erwarten, daß sich die Denk- und Urteilsfähigkeit, mit der uns die natürliche Selektion ausgestattet hat, auch bei der Suche nach einer vollständigen vereinheitlichten Theorie bewähren und uns nicht zu falschen Schlüssen führen wird.

Da die Teiltheorien, die wir bereits haben, von ganz außergewöhnlichen Situationen abgesehen, ausreichen, um genaue Vorhersagen zu liefern, scheint sich die Suche nach der endgültigen Theorie des Universums aus praktischer Sicht nur schwer rechtfertigen zu lassen. (Hier läßt sich allerdings anmerken, daß man ähnliche Einwände auch gegen die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik hätte vorbringen können, und dann haben uns diese beiden Theorien die Kernenergie und die mikroelektronische Revolution gebracht!) Möglicherweise wird also die Entdeckung einer vollständigen vereinheitlichten Theorie keinen Beitrag zum Überleben der Menschheit liefern, ja sie wird sich noch nicht einmal auf unsere Lebensweise auswirken. Doch seit den ersten Anfängen ihrer Kultur haben die Menschen es nie ertragen können, das unverbundene und unerklärliche Nebeneinander von Ereignissen hinzunehmen. Stets waren sie bemüht, die der Welt zugrundeliegende Ordnung zu verstehen. Nach wie vor haben wir ein unstillbares Bedürfnis zu wissen, warum wir hier sind und woher wir kommen. Das tiefverwurzelte Verlangen der Menschheit nach Erkenntnis ist Rechtfertigung genug für unsere fortwährende Suche. Und wir haben dabei kein geringeres Ziel vor Augen als die vollständige Beschreibung des Universums, in dem wir leben.