

Lee Smolin
Im Universum der Zeit

Lee Smolin

IM UNIVERSUM
DER ZEIT

Auf dem Weg
zu einem neuen Verständnis
des Kosmos

Aus dem Englischen von
Jürgen Schröder

Deutsche Verlags-Anstalt

Die Originalausgabe ist 2013 unter dem Titel
Time Reborn. From the Crisis in Physics to the Future of the Universe
bei Houghton Mifflin Harcourt, New York, erschienen.

Die Rechte für die Abbildungen im Innenteil liegen bei Henry Reich,
mit Ausnahme von: Alamy/World History Archive (S. 56), Carol Rovelli
(S. 246, mit freundlicher Genehmigung), R. Loll/J. Amjørn/K. N. Anagnosto-
polous (S. 260, mit freundlicher Genehmigung) und Lee Smolin (S. 244,
247, 250, 258).



Verlagsgruppe Random House FSC® No01967
Das für dieses Buch verwendete FSC®-zertifizierte Papier
Munken Premium Cream liefert Arctic Paper Munkedals AB, Schweden.

1. Auflage

Copyright © 2013 by Lee Smolin
Copyright © 2014 der deutschsprachigen Ausgabe
Deutsche Verlags-Anstalt, München,
in der Verlagsgruppe Random House GmbH
Alle Rechte vorbehalten
Redaktion: Manuela Knetsch, München
Typographie und Satz: Brigitte Müller/DVA
Gesetzt aus der Minion
Druck und Bindung: GGP Media GmbH, Pößneck
Printed in Germany
ISBN 978-3-421-04575-1

www.dva.de

Für meine Eltern Pauline und Michael

Ein großes Dankeschön
an Roberto Mangabeira Unger
für eine gemeinsame Reise

Inhaltsverzeichnis

<i>Prolog</i>	11
<i>Einleitung</i>	22

Teil I

GEWICHT: Die Austreibung der Zeit

1	Fallen	39
2	Das Verschwinden der Zeit	50
3	Ein Wurfspiel	65
4	Physik in künstlicher Isolation praktizieren	78
5	Die Austreibung von Neuheit und Überraschung	88
6	Relativitätstheorie und Zeitlosigkeit	97
7	Quantenkosmologie und das Ende der Zeit	123

Teil II

LICHT: Die Wiedergeburt der Zeit

Zwischenspiel: Einsteins Unbehagen 141

8	Der kosmologische Fehlschluss	147
9	Die kosmologische Herausforderung	157
10	Prinzipien für eine neue Kosmologie	171
11	Die Evolution von Gesetzen	181
12	Quantenmechanik und die Befreiung des Atoms	201
13	Die Schlacht zwischen Relativitäts- und Quantentheorie	218
14	Die Wiedergeburt der Zeit aus der Relativitätstheorie	230
15	Die Entstehung des Raumes	239
16	Leben und Tod des Universums	264
17	Die Wiedergeburt der Zeit aus Wärme und Licht	289
18	Unendlicher Raum oder unendliche Zeit?	307
19	Die Zukunft der Zeit	322

Epilog: Denken in der Zeit 337

Dank 363

Anmerkungen 368

Bibliographie 404

Register 407

Woraus aber das Werden ist den seienden Dingen,
in das hinein geschieht auch ihr Vergehen
nach der Schuldigkeit ...
nach der Zeit Anordnung.

ANAXIMANDER, Über die Natur

Prolog

Was ist Zeit? Diese täuschend einfache Frage ist das wichtigste Einzelproblem, das sich der Naturwissenschaft stellt, während wir immer tiefer in die Grundlagen des Universums eindringen. Alle Rätsel, mit denen Physiker und Kosmologen ringen – vom Urknall bis zur Zukunft des Universums, von den Rätseln der Quantenphysik bis zur Vereinheitlichung von Kräften und Teilchen –, laufen auf das Wesen der Zeit hinaus.

Der Fortschritt der Naturwissenschaft ist seit jeher durch das Abstreifen von Illusionen gekennzeichnet. Materie scheint kontinuierlich, also glatt zu sein, erweist sich aber als aus Atomen bestehend. Atome scheinen unteilbar zu sein; es stellt sich jedoch heraus, dass sie aus Protonen, Neutronen und Elektronen bestehen, wobei sich die ersten beiden aus noch elementareren Teilchen, den sogenannten Quarks, zusammensetzen. Die Sonne scheint sich um die Erde zu drehen, aber es ist umgekehrt – und wenn man es genau betrachtet, zeigt sich, dass alles sich relativ zu allem anderen bewegt.

Zeit ist der allgegenwärtigste Aspekt unserer Alltagserfahrung. Alles, was wir denken, empfinden oder tun, erinnert uns an ihre Existenz. Wir nehmen die Welt als einen Fluss von Augenblicken wahr, aus denen sich unser Leben zusammensetzt. Aber sowohl Physiker als auch Philosophen sagen uns schon seit Langem, dass die Zeit die ultimative Illusion ist (und viele andere Leute meinen das auch).

Wenn ich die Nicht-Wissenschaftler unter meinen Freunden nach ihrer Meinung über das Wesen der Zeit frage, antworten sie häufig, dass ihr Vergehen trügerisch ist und dass alles, was eigentlich wirklich ist – Wahrheit, Gerechtigkeit, das Göttliche, wissenschaftliche Gesetze –, außerhalb von ihr liegt. Die Vorstellung, dass Zeit eine Illusion ist, hat den Status eines philosophischen und religiösen Gemeinplatzes. Jahrtausendlang haben sich Men-

schen mit der Mühsal des Lebens und ihrer Sterblichkeit versöhnt, indem sie an die Möglichkeit eines letztendlichen Entrinnens in eine zeitlose und wirklichere Welt glaubten.

Einige unserer berühmtesten Denker behaupten die Unwirklichkeit der Zeit. Sowohl Platon, der größte Philosoph der antiken Welt, als auch Einstein, der größte Physiker der modernen Welt, lehrten uns eine Sicht der Natur, in der das Wirkliche zeitlos ist. Sie betrachteten unsere Zeiterfahrung als eine zufällige Eigenschaft unserer Verfasstheit als Menschen – eine zufällige Eigenschaft, die die Wahrheit vor uns verbirgt. Beide glaubten, dass die Illusion der Zeit überwunden werden muss, um das Wirkliche und Wahre wahrzunehmen.

Früher glaubte ich an die wesentliche Unwirklichkeit der Zeit. Tatsächlich kam ich zur Physik, weil ich mich als Jugendlicher danach sehnte, die an die Zeit gebundene menschliche Welt, die ich als hässlich und unwirtlich betrachtete, gegen eine Welt der reinen, zeitlosen Wahrheit einzutauschen. Später im Leben stellte ich fest, dass es ganz schön war, Mensch zu sein, und das Bedürfnis nach einem transzendenten Ausweg verblasste.

Genauer gesagt, ich glaube nicht mehr daran, dass die Zeit unwirklich ist. Tatsächlich habe ich mich der entgegengesetzten Ansicht angeschlossen: Die Zeit ist nicht nur wirklich, sondern nichts, was wir kennen oder erleben, kommt dem Herzen der Natur näher als die Wirklichkeit der Zeit.

Meine Gründe für diese Kehrtwende liegen in der Naturwissenschaft – insbesondere in den zeitgenössischen Entwicklungen in der Physik und der Kosmologie. Ich bin zu der Überzeugung gelangt, dass Zeit der Schlüssel zur Bedeutung der Quantentheorie und ihrer letzten Vereinheitlichung mit dem Raum, der Zeit, der Gravitation und der Kosmologie ist. Das Wichtigste ist, glaube ich, dass wir die Wirklichkeit der Zeit auf neue Weise annehmen müssen, um dem Bild des Universums, das uns von kosmologischen Beobachtungen nahegelegt wird, einen Sinn abzugewinnen. Das ist es, was ich unter der Wiedergeburt der Zeit verstehe.

Ein Großteil dieses Buches legt das naturwissenschaftliche Argument für den Glauben an die Wirklichkeit der Zeit dar. Wenn

Sie einer der vielen Menschen sind, die glauben, dass die Zeit eine Illusion ist, beabsichtige ich, Ihre Meinung zu ändern. Wenn Sie bereits glauben, dass die Zeit wirklich ist, hoffe ich, Ihnen triftige Gründe für Ihre Ansicht zu liefern.

Dies ist ein Buch für jedermann, weil es niemanden gibt, dessen Vorstellung der Welt nicht dadurch geformt wird, wie er die Zeit versteht. Auch wenn Sie nie über ihre Bedeutung nachgedacht haben, ist doch Ihr Denken – allein schon die Sprache, mit der Sie Ihre Gedanken ausdrücken – von alten metaphysischen Vorstellungen der Zeit geprägt.

Wenn wir die revolutionäre Auffassung annehmen, dass die Zeit wirklich ist, werden sich unsere Vorstellungen von allem anderen ändern. Insbesondere werden wir tendenziell die Zukunft auf eine neue Weise verstehen, nämlich so, dass dadurch sowohl die Chancen als auch die Gefahren deutlich hervorgehoben werden, denen die menschliche Spezies gegenübersteht.

Ein kleiner Teil der Geschichte dieses Buches ist die persönliche Reise, die mich zur Wiederentdeckung der Zeit führte. Meine ursprüngliche Motivation lässt sich vielleicht am besten in der Sprache der Vaterschaft und nicht in der der Naturwissenschaft ausdrücken, nämlich durch die Gespräche, die ich mit meinem kleinen Sohn hatte – besonders wenn ich ihn abends zu Bett brachte. »Papi«, fragte er einmal, als ich ihm vorlas, »hattest du meinen Namen, als du so alt warst wie ich?« Da war ein Kind, dessen Verständnis erwachte, dass es eine Zeit vor ihm gab, und das die bisherige kurze Geschichte seines Lebens mit einem längeren Epos verknüpfen wollte.

Jede Reise hält eine bestimmte Lektion bereit, und meine war es zu begreifen, was für eine unglaublich radikale Vorstellung die einfache Aussage enthält, dass die Zeit wirklich ist. Nachdem ich mein Leben in der Naturwissenschaft damit begonnen habe, nach der Gleichung jenseits der Zeit zu suchen, glaube ich jetzt, dass das tiefste Geheimnis des Wesens des Universums darin besteht, wie es sich Augenblick um Augenblick in der Zeit entfaltet.



Unserem Denken über die Zeit wohnt etwas Paradoxes inne. Wir nehmen uns selbst als in der Zeit lebend wahr, doch wir stellen uns oft vor, dass die besseren Aspekte unserer Welt und unserer selbst über die Zeit hinausgehen. Was etwas wirklich wahr macht, so meinen wir, ist nicht, dass es jetzt wahr ist, sondern dass es immer wahr gewesen ist und immer wahr sein wird. Was ein moralisches Prinzip zu etwas Absolutem macht, ist, dass es zu jeder Zeit und unter allen Umständen gilt. Wir scheinen die tief verwurzelte Vorstellung zu haben, dass etwas, das Wert besitzt, außerhalb der Zeit existiert. Wir sehnen uns nach »ewiger Liebe«. Wir sprechen von »Wahrheit« und »Gerechtigkeit« als etwas Zeitlosen. Was wir am meisten bewundern und verehren – Gott, die Wahrheiten der Mathematik, die Naturgesetze –, ist mit einer Existenz ausgestattet, die die Zeit übersteigt. Wir handeln zwar in der Zeit, aber beurteilen unsere Handlungen nach zeitlosen Maßstäben.

Infolge dieser Paradoxie leben wir in einem Zustand der Entfremdung von dem, was wir am meisten schätzen. Diese Entfremdung betrifft jede unserer Bestrebungen. In der Naturwissenschaft sind Experimente und ihre Analyse zwar zeitgebunden wie alle unsere Naturbeobachtungen, doch wir stellen uns vor, dass wir Belege für zeitlose Naturgesetze aufdecken. Die Paradoxie betrifft auch unsere Handlungen als Individuen, Familienmitglieder und Staatsbürger, weil unsere Auffassung von der Zeit bestimmt, wie wir uns die Zukunft vorstellen.

In diesem Buch hoffe ich, die Paradoxie des Lebens in der Zeit und des Glaubens an das Zeitlose auf neue Weise aufzulösen. Ich werde vorschlagen, dass die Zeit und ihr Vergehen grundlegend und wirklich sind, und die Hoffnungen und Überzeugungen hinsichtlich zeitloser Wahrheiten und zeitloser Reiche in die Welt der Mythologie gehören.

Wenn man die Zeit annimmt, bedeutet das, dass die Wirklichkeit nur aus dem besteht, was zu jedem Zeitpunkt wirklich ist. Das ist eine radikale Vorstellung, denn dadurch wird jede Art von zeitloser Existenz oder Wahrheit geleugnet – sei es im Bereich der Wissenschaft, der Moral, der Mathematik oder der Politik.

All diese Dinge müssen begrifflich neu gefasst werden, um ihre Wahrheiten innerhalb der Zeit zu formulieren.

Wenn man die Zeit annimmt, bedeutet das auch, dass unsere Grundannahmen darüber, wie das Universum auf der fundamentalsten Ebene funktioniert, unvollständig sind. Wenn ich auf den folgenden Seiten behaupte, dass die Zeit wirklich ist, meine ich Folgendes:

- Alles, was in unserem Universum wirklich ist, ist zu einem bestimmten Zeitpunkt wirklich, der zu einer Abfolge von Zeitpunkten gehört.
- Die Vergangenheit war wirklich, ist es aber nicht mehr. Wir können die Vergangenheit jedoch interpretieren und analysieren, weil wir in der Gegenwart Belege von vergangenen Prozessen finden.
- Die Zukunft existiert noch nicht und ist deshalb offen. Manche Vorhersagen können wir zwar vernünftigerweise treffen, aber wir können die Zukunft nicht vollständig vorhersagen. Tatsächlich kann die Zukunft Phänomene generieren, die in dem Sinne genuin neu sind, dass kein Wissen über die Vergangenheit sie hätte vorhersehen können.
- Nichts geht über die Zeit hinaus, nicht einmal Naturgesetze. Gesetze sind nicht zeitlos. Wie alles andere sind sie Eigenschaften der Gegenwart und können sich über die Zeit hinweg entwickeln.

Im Laufe dieses Buches werden wir sehen, dass diese Hypothesen in eine neue Richtung in der Grundlagenphysik weisen – eine Richtung, von der ich behaupte, dass sie der einzige Ausweg aus den gegenwärtigen Rätseln der theoretischen Physik und der Kosmologie ist. Ebenso haben sie Auswirkungen darauf, wie wir unser eigenes Leben verstehen und mit den Herausforderungen umgehen sollten, vor denen die Menschheit steht.

Um zu erläutern, warum die Wirklichkeit der Zeit sowohl für die Naturwissenschaft als auch für Dinge, die über die Wissenschaft hinausgehen, so folgenreich ist, stelle ich gerne das Denken

in der Zeit dem Denken außerhalb der Zeit gegenüber. Die Vorstellung, dass die Wahrheit zeitlos ist und sich außerhalb des Universums befindet, ist so weit verbreitet, dass Roberto Mangabeira Unger sie als »*Philosophia perennis*« (»immerwährende Philosophie«) bezeichnet. Sie bildete den Kern von Platons Denken, das im *Menon* in der Parabel des Sklavenjungen und der Geometrie des Quadrats veranschaulicht wird. In dieser Parabel behauptet Sokrates, dass jede Entdeckung bloß eine Wiedererinnerung ist.

Wir denken außerhalb der Zeit, wenn wir uns vorstellen, dass die Antwort auf jede beliebige Frage, über die wir nachdenken, da draußen in einem ewigen Reich zeitloser Wahrheit liegt. Ob es darum geht, sich als Eltern, Ehepartner oder Bürger besser zu verhalten, oder darum, welche Organisation der Gesellschaft die optimale ist, wir glauben, dass da draußen etwas unveränderlich Wahres für uns zu entdecken sei.

Wir Wissenschaftler denken in der Zeit, wenn wir unsere Aufgabe in der Entwicklung neuer Ideen begreifen, um neu entdeckte Phänomene zu beschreiben, und in der Ausarbeitung neuer mathematischer Strukturen, um diese Phänomene auszudrücken. Wenn wir außerhalb der Zeit denken, glauben wir, dass diese Ideen bereits irgendwie existieren, bevor wir sie erdacht haben. Wenn wir in der Zeit denken, sehen wir keinen Grund zu dieser Annahme.

Der Gegensatz zwischen dem Denken innerhalb und außerhalb der Zeit ist in vielen Bereichen menschlichen Denkens und Handelns augenfällig. Wir denken außerhalb der Zeit, wenn wir angesichts eines technologischen oder gesellschaftlichen Problems annehmen, dass die möglichen Ansätze als eine Menge von absoluten, präexistierenden Kategorien bereits determiniert sind. Jeder, der meint, dass die richtige Theorie der Ökonomie oder Politik im vorletzten Jahrhundert niedergeschrieben wurde, denkt außerhalb der Zeit. Wenn wir stattdessen das Ziel der Politik in der Erfindung neuer Lösungen für neue Probleme sehen, die mit der Entwicklung der Gesellschaft entstehen, denken wir in der Zeit. Wir denken auch in der Zeit, wenn wir verstehen, dass der Fortschritt in der Technik, Gesellschaft und Wissenschaft in der

Erfindung wirklich neuer Ideen, Strategien und Formen gesellschaftlicher Organisation besteht – und auf unsere Fähigkeit zu dieser Erfindung vertrauen.

Wenn wir die Einschränkungen, Gewohnheiten und Bürokratien unserer verschiedenen Gemeinschaften und Organisationen fraglos akzeptieren, als ob sie eine absolute Existenzberechtigung hätten, sitzen wir außerhalb der Zeit in der Falle. Wir kehren in die Zeit zurück, wenn wir uns darüber klar werden, dass jedes Merkmal einer menschlichen Organisation ein Resultat der Geschichte ist, sodass alle ihre Eigenschaften verhandelbar sind und durch die Erfindung neuer Möglichkeiten des Handelns verbessert werden können.

Wenn wir glauben, dass die Aufgabe der Physik die Entdeckung einer zeitlosen mathematischen Gleichung ist, die identisch ist mit der Geschichte der Welt, dann glauben wir, dass die Wahrheit über das Universum außerhalb des Universums liegt. Das ist eine so vertraute Denkgewohnheit, dass wir ihre Absurdität schon gar nicht mehr sehen: Wenn das Universum alles ist, was es gibt, wie kann dann etwas außerhalb davon existieren, mit dem es identisch sein könnte? Wenn wir jedoch die Wirklichkeit der Zeit für offensichtlich halten, dann kann es keine mathematische Gleichung geben, die jeden Aspekt der Welt vollkommen erfasst, weil eine Eigenschaft der wirklichen Welt, die keine mathematische Gleichung teilt, darin besteht, dass immer ein bestimmter Zeitpunkt herrscht.

Die Darwin'sche Evolutionsbiologie ist der Prototyp des Denkens in der Zeit, da in ihrem Zentrum die Erkenntnis steht, dass natürliche Prozesse, die sich in der Zeit entwickeln, zur Schaffung genuin neuer Strukturen führen können. Es können sogar neue Gesetze auftauchen, wenn die Strukturen, für die sie gelten, entstehen. Die Prinzipien der geschlechtlichen Auslese konnten beispielsweise nicht entstehen, solange es keine Geschlechter gab. Die Dynamik der Evolution braucht keine riesigen abstrakten Räume wie zum Beispiel alle möglichen lebensfähigen Tiere, DNS-Sequenzen, Mengen von Proteinen oder biologische Gesetze. Einem Vorschlag des theoretischen Biologen Stuart A. Kauffman

zufolge ist es besser, sich die Dynamik der Evolution so vorzustellen, dass von der Biosphäre das, was als Nächstes geschehen kann, in der Zeit erkundet wird: das »angrenzende Mögliche«. Dasselbe gilt für die Evolution von Technologien, Wirtschaften und Gesellschaften.

Das Denken in der Zeit ist kein Relativismus, sondern eine Form des »Relationalismus« – eine Philosophie, die behauptet, dass die angemessenste Beschreibung von etwas darin besteht, seine Beziehungen zu den anderen Teilen des Systems anzugeben, zu dem es gehört. Die Wahrheit kann sowohl zeitgebunden als auch objektiv sein, wenn sie sich auf Gegenstände bezieht, die existieren, nachdem sie einmal entweder von der Evolution oder vom menschlichen Denken erfunden wurden.

Auf der persönlichen Ebene bedeutet das Denken in der Zeit, die Ungewissheit des Lebens als den notwendigen Preis dafür zu betrachten, lebendig zu sein. Wenn man sich gegen die Unsicherheit des Lebens auflehnt, Ungewissheit ablehnt, keinerlei Risiken in Kauf nimmt und sich vorstellt, dass das Leben so eingerichtet werden kann, dass Gefahren völlig ausgeschlossen werden, dann denkt man außerhalb der Zeit. Menschsein bedeutet, ein Leben zu führen, das zwischen Gefahr und Chancen schwebt.

Wir versuchen unser Bestes, um in einer ungewissen Welt Erfolg zu haben, um uns um die Personen und Dinge zu kümmern, die wir lieben, und ab und zu haben wir dabei auch Spaß. Wir schmieden zwar Pläne, aber wir können niemals vollständig die vor uns liegenden Gefahren oder Chancen vorhersehen. Die Buddhisten sagen, dass wir in einem Haus leben und noch nicht gemerkt haben, dass es brennt. Gefahren können sich jederzeit einstellen. In Jäger-und-Sammler-Gesellschaften waren sie ständig gegenwärtig, aber im modernen Leben haben wir die Dinge so eingerichtet, dass Gefahr vergleichsweise selten droht. Die Herausforderung des Lebens besteht darin, aus der gewaltigen Zahl möglicher Gefahren eine kluge Auswahl im Hinblick darauf zu treffen, welche davon es wert sind, sich Sorgen zu machen. Außerdem geht es darum, aus allen Chancen, die jeder Augenblick mit sich bringt, das auszuwählen, was

man als Nächstes tun soll. Wir treffen eine Auswahl im Hinblick darauf, wofür wir unsere Energie und Aufmerksamkeit einsetzen – und zwar immer angesichts eines unvollständigen Wissens um die Folgen.

Könnten wir diese Situation nicht verbessern? Könnten wir die Unberechenbarkeit des Lebens nicht überwinden und einen Zustand erlangen, in dem wir, wenn schon nicht alles, so doch genug wissen, um alle Konsequenzen unserer Entscheidungen zu erkennen – die Gefahren ebenso wie die Chancen? Das heißt, könnten wir nicht ein wahrhaft rationales Leben ohne Überraschungen führen? Wenn die Zeit eine Illusion wäre, könnten wir uns das als Möglichkeit vorstellen, denn in einer Welt, in der die Zeit unwesentlich wäre, gäbe es keinen grundlegenden Unterschied zwischen dem Wissen um die Gegenwart und dem Wissen um die Zukunft. Man bräuchte nur ein paar Berechnungen mehr, um es auszubuchstabieren. Eine bestimmte Zahl, eine bestimmte Formel könnte berechnet und entschlüsselt werden, um uns alles zu sagen, was wir wissen müssten.

Wenn die Zeit jedoch wirklich ist, ist die Zukunft nicht anhand des Wissens von der Gegenwart her bestimmbar. Es gibt kein Entkommen aus unserer Lage, keine Erlösung von den Überraschungen, die sich daraus ergeben, dass wir in Unwissenheit über die meisten Folgen unserer Handlungen leben. Überraschungen sind ein wesentlicher Bestandteil der Struktur der Welt. Die Natur kann uns mit Überraschungen konfrontieren, auf die uns keine mögliche Menge von Wissen vorbereitet hätte. Das Neue ist wirklich. Mit unserer Einbildungskraft können wir Ergebnisse erzeugen, die anhand des Wissens von der Gegenwart nicht berechnet werden können. Daher ist es für jeden von uns von Bedeutung, ob die Zeit wirklich ist oder nicht: Die Antwort darauf kann das Verständnis unserer Situation als Suchende ändern, die in einem riesigen und weitgehend unbekanntem Universum nach Glück und Sinn streben. Ich werde auf diese Themen im Nachwort zurückkommen, wo ich darauf hinweise, dass die Wirklichkeit der Zeit uns dabei helfen kann, über Herausforderungen wie den Klimawandel und die Wirtschaftskrise nachzudenken.

Bevor wir uns dem Hauptargument des Buches zuwenden, möchte ich dem Leser ein paar Ratschläge geben.

Ich habe versucht, die Argumente dieses Buchs dem Durchschnittsleser ohne spezielles Hintergrundwissen in der Physik oder der Mathematik zugänglich zu machen. Es gibt keine Gleichungen, und alles, was er wissen muss, um meinen Argumenten zu folgen, wird erklärt. Die wesentlichen Fragen werden mit den allereinfachsten Beispielen illustriert. Wenn wir uns zu raffinierteren Themen hochschrauben, rate ich dem Leser, falls er verwirrt ist, das zu tun, was Naturwissenschaftler zu tun lernen, nämlich einfach zu einer Stelle weiter vorne zu springen, an der der Text für ihn wieder klarer wird. Der Leser, der an mehr Hintergrundinformationen interessiert ist, kann sich auch die verschiedenen Anhänge anschauen, die auf www.timereborn.com online verfügbar sind. Vielleicht ist es auch hilfreich, in den Anmerkungen nachzusehen, die Zitate, nützliche Bemerkungen – entweder für Laien oder für Experten – und weitere Ausführungen enthalten, die für einige Leser von Interesse sein könnten.

Meine eigene Reise zurück zur Zeit hat mehr als 20 Jahre gedauert, vom Aufkeimen der Idee, dass Gesetze durch ihre Evolution erklärt werden müssen, über Auseinandersetzungen mit der Relativitätstheorie, Quantengrundlagen und Quantengravitation, die mich schließlich zu der hier beschriebenen Sichtweise führten. Die Zusammenarbeit und die Gespräche mit mehreren Freunden und Kollegen waren entscheidend für meine Fortschritte auf diesem Weg; sie werden im Einzelnen in der Danksagung und in den Anmerkungen aufgeführt, wo ich auch auf die Ergebnisse und Ideen anderer hinweise, die nützlich für mich waren. Keine dieser Wechselwirkungen war wichtiger als die fruchtbare und provokative Zusammenarbeit mit Roberto Mangabeira Unger, in deren Verlauf wir das Hauptargument sowie viele der hier vorgestellten Schlüsselideen und Argumente formulierten.¹

Die Leser sollten sich darüber im Klaren sein, dass es viele Positionen zur Zeit, Quantentheorie, Kosmologie und zu ähnlichen Themen gibt, die hier nicht erörtert werden. Mit den Problemen, die ich berühre, beschäftigen sich sehr viele Veröffentlichungen

von Physikern, Kosmologen und Philosophen. Dieses Buch erhebt nicht den Anspruch darauf, akademisch zu sein. Ich habe mich dafür entschieden, Lesern, die diesem Sachgebiet zum ersten Mal begegnen, einen Pfad durch das komplexe Gelände zu bieten, indem ich besondere Argumente hervorhebe, die seinen Fokus bilden.² Es gibt (um nur ein Beispiel zu nennen) Bücherregale voller Schriften, die Kants Ansichten über Raum und Zeit analysieren, hier aber nicht erwähnt werden. Auf manche Ansichten zeitgenössischer Philosophen gehe ich ebenfalls nicht ein. Meine gelehrten Freunde bitte ich um Vergebung für diese Auslassungen und verweise den interessierten Leser auf die Bibliographie, die Vorschläge für eine weitere Lektüre zum Thema Zeit enthält.

Lee Smolin

Einleitung

Die naturwissenschaftliche Argumentation dafür, dass die Zeit eine Illusion ist, ist beeindruckend. Deshalb sind die Konsequenzen, die sich aus der Annahme ergeben, die Zeit sei real, so revolutionär.

Der Kern des Arguments der Physiker gegen die Zeit beruht auf unserem Verständnis dessen, was ein physikalisches Gesetz ist. Der herrschenden Ansicht zufolge ist alles, was im Universum geschieht, von einem Gesetz determiniert, das genau diktiert, wie sich die Zukunft aus der Gegenwart entwickelt. Das Gesetz ist absolut, und sobald die gegenwärtigen Bedingungen angegeben sind, gibt es keine Freiheit oder Ungewissheit darüber, wie sich die Zukunft entwickelt.

Thomasina, die frühreife Heldin aus Tom Stoppards Theaterstück *Arcadia*, erklärt es ihrem Lehrer folgendermaßen: »Wenn Sie jedes Atom an seinem Ort und in seinem Bewegungsimpuls anhalten könnten und wenn Ihr Gehirn alle Vorgänge, die somit in der Schwebel sind, erfassen könnte und wenn Sie dann auch noch wirklich *sehr* gut in Algebra wären, dann könnten Sie die Weltformel für alle Ewigkeit schreiben; und obwohl keiner klug genug dafür ist, muss trotzdem diese Formel so existieren, als ob man sie schreiben könnte.«

Früher glaubte ich, dass meine Aufgabe als theoretischer Physiker darin bestünde, diese Formel zu finden; jetzt betrachte ich meinen Glauben an ihre Existenz jedoch eher als Mystizismus denn als Wissenschaft.

Wenn er den Text für eine moderne Figur geschrieben hätte, hätte Stoppard Thomasina sagen lassen, dass das Universum einem Computer ähnelt. Die Gesetze der Physik sind das Programm. Wenn man ihn mit Input füttert – mit den gegenwärtigen Positionen aller Elementarteilchen des Universums –, läuft der

Computer eine entsprechende Zeit und liefert Ihnen den Output, nämlich alle Positionen der Elementarteilchen zu einem zukünftigen Zeitpunkt. Nach dieser Naturauffassung geschieht nichts außer der Neuordnung von Elementarteilchen nach zeitlosen Gesetzen. Diesen Gesetzen zufolge ist also die Zukunft schon genauso vollständig durch die Gegenwart determiniert, wie die Gegenwart durch die Vergangenheit determiniert ist.

Diese Ansicht setzt die Zeit in verschiedenen Hinsichten herab.¹ Es kann keine Überraschungen geben, keine wirklich neuen Phänomene, da alles, was geschieht, in der Neuordnung von Atomen besteht. Die Eigenschaften der Atome selbst sind zeitlos, ebenso wie die Gesetze, die sie steuern; nichts davon ändert sich je. Jede beliebige Eigenschaft der Welt zu einem zukünftigen Zeitpunkt kann anhand der gegenwärtigen Konfiguration berechnet werden. Das heißt, dass das Vergehen der Zeit durch eine Berechnung ersetzt werden kann, was wiederum bedeutet, dass die Zukunft eine logische Folge der Gegenwart ist.

Einsteins Relativitätstheorien beinhalten sogar noch stärkere Argumente dafür, dass die Zeit für eine fundamentale Beschreibung der Welt unwesentlich ist, wie ich in Kapitel 6 darlegen werde. Die Relativitätstheorie legt nachdrücklich nahe, dass die gesamte Geschichte der Welt eine zeitlose Einheit bildet; Gegenwart, Vergangenheit und Zukunft haben unabhängig von der menschlichen Subjektivität keine Bedeutung. Die Zeit ist einfach nur eine weitere Dimension des Raumes, und der Eindruck, den wir haben, wenn wir empfinden, wie Augenblicke vergehen, ist eine Illusion, hinter der sich eine zeitlose Wirklichkeit verbirgt.

Diese Behauptungen werden wahrscheinlich jedem entsetzlich erscheinen, dessen Weltanschauung auch Raum für Willensfreiheit oder menschliches Handeln umfasst. Auf dieses Argument werde ich hier nicht eingehen; mein Argument für die Wirklichkeit der Zeit beruht ausschließlich auf der Naturwissenschaft. Meine Aufgabe wird es sein, zu erklären, warum die üblichen Argumente für eine vorbestimmte Zukunft naturwissenschaftlich falsch sind.

In Teil I werde ich die Argumente aus der Naturwissenschaft für die Ansicht präsentieren, dass die Zeit eine Illusion ist. In

Teil II werde ich diese Argumente auseinandernehmen und zeigen, warum die Zeit als wirklich betrachtet werden muss, wenn die Grundlagenphysik und die Kosmologie die Krisen überwinden sollen, in denen sie gegenwärtig stecken.

Um der Argumentation des ersten Teils einen Rahmen zu geben, verfolge ich die Entwicklung der Zeitbegriffe, die in der Physik verwendet werden, von Aristoteles und Ptolemäus über Galilei, Newton und Einstein bis zu unseren zeitgenössischen Quanten-Kosmologen. Dabei zeige ich, wie unser Begriff von Zeit mit dem Fortschritt der Physik Schritt für Schritt herabgesetzt wurde. Eine solche Darstellung der Geschichte gestattet mir auch, behutsam das Material einzuführen, das der Laie für das Verständnis der Argumentation braucht. Wichtige Punkte können tatsächlich anhand von einfachen Beispielen wie fallenden Kugeln und Planeten auf Umlaufbahnen erläutert werden. Teil II erzählt eine zeitgemäßere Geschichte, da das Argument dafür, dass die Zeit wieder in den Kern der Naturwissenschaft eingeführt werden muss, als Resultat aus Entwicklungen in der jüngeren Vergangenheit hervorging.

Meine Argumente beginnen mit einer einfachen Beobachtung: Der Erfolg naturwissenschaftlicher Theorien von Newton bis zum heutigen Tag basiert auf ihrer Verwendung eines bestimmten Begriffsrahmens für Erklärungen, der von Newton erfunden wurde. Dieser Begriffsrahmen betrachtet die Natur in dem Sinn, dass sie aus nichts als Teilchen mit zeitlosen Eigenschaften besteht, deren Bewegungen und Wechselwirkungen durch zeitlose Gesetze determiniert sind. Die Eigenschaften der Teilchen, wie zum Beispiel ihre Massen und elektrische Ladungen, ändern sich nie. Und dasselbe gilt für die Gesetze, die auf sie einwirken. Dieser Begriffsrahmen eignet sich ideal zur Beschreibung kleiner Ausschnitte des Universums, aber er bricht zusammen, wenn wir versuchen, ihn auf das Universum als Ganzes anzuwenden.

Alle bedeutenden Theorien der Physik beziehen sich auf Teile des Universums – ein Radio, ein fliegender Ball, eine biologische Zelle, die Erde, eine Galaxie. Wenn wir einen Teil des Universums beschreiben, lassen wir uns selbst und unsere Messwerkzeuge

außerhalb des Systems. Wir lassen unsere Rolle bei der Auswahl oder Präparation des Systems aus, das wir untersuchen. Wir lassen die Bezugspunkte aus, die dazu dienen, festzustellen, wo sich das System befindet. Am entscheidendsten für unser Anliegen im Hinblick auf das Wesen der Zeit ist jedoch die Tatsache, dass wir die Uhren auslassen, mit denen wir Veränderungen im System messen.

Der Versuch, die Physik auf die Kosmologie auszudehnen, bringt neue Herausforderungen mit sich, die ein unverbrauchtes Denken erfordern. Eine kosmologische Theorie kann nichts auslassen. Um vollständig zu sein, muss sie alles im Universum in Betracht ziehen, einschließlich unserer selbst als Beobachter. Sie muss unsere Messinstrumente und Uhren berücksichtigen. Wenn wir Kosmologie betreiben, haben wir es mit einem neuen Umstand zu tun: Es ist unmöglich, aus dem System herauszutreten, wenn das System das gesamte Universum ist.

Darüber hinaus muss eine kosmologische Theorie ohne zwei wichtige Aspekte der Methodologie der Wissenschaften auskommen. Eine Grundregel der Wissenschaft lautet, dass ein Experiment viele Male wiederholt werden muss, damit man sich des Ergebnisses sicher sein kann. Aber das können wir mit dem Universum als Ganzem nicht tun – das Universum gibt es nur einmal. Wir können das System auch nicht unterschiedlich präparieren und dann die Folgen davon untersuchen. Das sind sehr reale Hindernisse, die es viel schwieriger machen, Wissenschaft auf der Ebene des Universums als Ganzes zu betreiben.

Dennoch wollen wir die Physik zu einer Wissenschaft der Kosmologie erweitern. Unsere erste instinktive Reaktion besteht darin, Theorien zu nehmen, die sehr gut funktionierten, als sie auf kleine Ausschnitte des Universums angewendet wurden, und sie hochzufahren, um das Universum als Ganzes zu beschreiben. Wie ich in den Kapiteln 8 und 9 zeigen werde, kann das nicht funktionieren. Der Newton'sche Begriffsrahmen zeitloser Gesetze, die auf Teilchen mit zeitlosen Eigenschaften einwirken, ist für die Aufgabe der Beschreibung des gesamten Universums ungeeignet.

Wie ich im Einzelnen zeigen werde, führen genau dieselben Eigenschaften, aufgrund deren diese Theorien für kleine Aus-

schnitte des Universums korrekt sind, zu ihrem Zusammenbruch, wenn sie auf das Ganze angewendet werden.

Ich bin mir bewusst, dass diese Behauptung der Praxis und den Hoffnungen vieler Kollegen zuwiderläuft, aber ich bitte nur darum, dass der Leser das Argument aufmerksam betrachtet, das ich für diese Behauptung in Teil II entwickeln werde. Dort werde ich allgemein zeigen und durch besondere Beispiele verdeutlichen, dass wir bei dem Versuch, unsere Standardtheorien zu einer kosmologischen Theorie hochzufahren, mit Dilemmata, Paradoxien und unbeantwortbaren Fragen belohnt werden. Diese umfassen das Scheitern jeder Standardtheorie bei der Erklärung der Auswahl, die im frühen Universum getroffen wurde – die Auswahl der Anfangsbedingungen und die Auswahl der Naturgesetze selbst.

Ein Teil der Literatur der zeitgenössischen Kosmologie besteht in den Anstrengungen sehr intelligenter Leute, mit diesen Dilemmata, Paradoxien und unbeantwortbaren Fragen zu ringen. Es gibt die populäre Vorstellung, dass unser Universum Teil eines riesigen oder unendlichen Multiversums ist – und das ist auch ganz verständlich, weil diese Vorstellung auf einem methodologischen Fehler beruht, dem man leicht zum Opfer fallen kann. Unsere gegenwärtigen Theorien können auf der Ebene des Universums nur dann funktionieren, wenn unser Universum ein Subsystem eines größeren Systems ist. Also erfinden wir eine fiktive Umgebung und füllen sie mit anderen Universen. Das kann nicht zu wirklichem wissenschaftlichen Fortschritt führen, weil wir keinerlei Hypothese über Universen bestätigen oder falsifizieren können, die von unserem eigenen kausal entkoppelt sind.²

Der Zweck dieses Buches ist es, die Existenz einer anderen Möglichkeit nahezulegen. Wir müssen einen Schnitt machen und mit der Suche nach einer neuen Art von Theorie beginnen, die auf das gesamte Universum angewendet werden kann – einer Theorie, die die Verwirrungen und Paradoxien vermeidet, die unbeantwortbaren Fragen beantwortet und ernst gemeinte physikalische Vorhersagen für kosmologische Beobachtungen generiert.

Ich habe zwar keine solche Theorie, aber ich kann eine Menge von Prinzipien anbieten, die die Suche nach ihr anleiten sollen.

Diese Prinzipien werden in Kapitel 10 vorgestellt. In den darauffolgenden Kapiteln werde ich verdeutlichen, wie diese Prinzipien neue Hypothesen und Modelle des Universums anregen können, die den Weg zu einer wahren kosmologischen Theorie weisen. Das zentrale Prinzip ist, dass die Zeit wirklich sein muss und dass die physikalischen Gesetze sich in dieser wirklichen Zeit entwickeln müssen.

Die Idee von sich kontinuierlich entwickelnden, also evolvierenden Gesetzen ist nicht neu und ebenso wenig die Idee, dass eine Wissenschaft der Kosmologie solche Gesetze erfordern wird.³ Der amerikanische Philosoph Charles Sanders Peirce schrieb 1891:

Die Annahme universaler Naturgesetze, die zwar vom Geist erfasst werden können, aber keinen Grund für ihre besondere Form besitzen, sondern unerklärbar und irrational sind, ist kaum zu rechtfertigen. Gleichförmigkeiten sind genau die Art von Tatsachen, die erklärt werden müssen ... Ein Gesetz ist schlechthin das, was einen Grund benötigt.

Die einzige Möglichkeit, die Naturgesetze und Gleichförmigkeiten im Allgemeinen zu erklären, besteht darin, sie als Ergebnisse der Evolution aufzufassen.⁴

Der zeitgenössische brasilianische Philosoph Roberto Mangabeira Unger verkündete in jüngerer Vergangenheit:

Man kann die Eigenschaften des gegenwärtigen Universums auf Eigenschaften zurückführen, die es an seinem Beginn gehabt haben muss. Man kann aber nicht zeigen, dass das die einzigen Eigenschaften sind, die irgendein Universum gehabt haben könnte ... Frühere oder spätere Universen könnten völlig andere Gesetze gehabt haben ... Die Naturgesetze anzugeben bedeutet nicht, alle möglichen Geschichten aller möglichen Universen zu erklären. Es gibt nur eine relative Unterscheidung zwischen einer gesetzesartigen Erklärung und der Erzählung einer einmaligen historischen Abfolge.⁵

Paul Dirac, der neben Einstein und Bohr als einer der konsequentesten Physiker des 20. Jahrhunderts gilt, mutmaßte: »Zu Beginn der Zeit waren die Naturgesetze wahrscheinlich sehr verschieden von dem, was sie jetzt sind. Wir sollten daher in Betracht ziehen, dass die Naturgesetze sich mit der Zeit kontinuierlich ändern, statt dass sie gleichförmig über die ganze Raumzeit hinweg gelten.«⁶

John Archibald Wheeler, einer der großen amerikanischen Physiker, stellt sich ebenfalls vor, dass Gesetze evoluierten. Er schlug vor, dass der Urknall eines einer Reihe von Ereignissen war, bei denen die Gesetze der Physik wiederaufbereitet wurden. Außerdem schrieb er: »Es gibt kein Gesetz außer dem Gesetz, dass es kein Gesetz gibt.«⁷ Selbst Richard Feynman, ein anderer großer amerikanischer Physiker und Schüler von Wheeler, stellte einmal in einem Interview folgende Vermutung an: »Die einzige Wissenschaft, die keinerlei evolutionäre Frage zugelassen hat, ist die Physik. Hier sind die Gesetze, sagen wir [...], aber wie wurden sie zu dem, was sie sind, in der Zeit? [...] Es könnte sich also zeigen, dass sie nicht immer dieselben [Gesetze] sind und dass sich eine historische, evolutionäre Frage stellt.«⁸

In meinem Buch von 1997, *Warum gibt es die Welt?*, schlug ich einen Mechanismus für die Entwicklung von Gesetzen vor, den ich nach der biologischen Evolution modellierte.⁹ Ich stellte mir vor, dass Universen sich reproduzieren können, indem sie Baby-Universen in schwarzen Löchern bilden, und ich postulierte, dass sich immer dann, wenn das geschieht, die Gesetze der Physik leicht verändern. In dieser Theorie spielten die Gesetze die Rolle von Genen in der Biologie; ein Universum wurde als Ausdruck der Auswahl von Gesetzen angesehen, die bei seiner Bildung getroffen wurde, genauso wie ein Organismus ein Ausdruck seiner Gene ist. Wie die Gene könnten die Gesetze zufällig von einer Generation zur nächsten mutieren. Angeregt durch die damals noch ganz jungen Resultate der Stringtheorie, stellte ich mir vor, dass die Suche nach einer fundamentalen vereinheitlichten Theorie nicht zu einer einzigen Theorie von allem, sondern zu einem riesigen Raum möglicher Gesetze führen würde. Ich nannte ihn die »Landschaft der Theorien« und übernahm

dabei die Sprache der Populationsgenetik, deren Fachleute mit dem Begriff der »Fitnesslandschaften« arbeiten. An dieser Stelle werde ich nicht mehr verraten, da es das Thema von Kapitel 11 sein wird, außer dass diese Theorie, die kosmologische natürliche Auslese, verschiedene Vorhersagen macht, die sich trotz mehrerer Gelegenheiten zu ihrer Falsifikation in den darauffolgenden Jahren bewährt haben.

Während des letzten Jahrzehnts haben viele Stringtheoretiker den Begriff einer Theorienlandschaft übernommen. Infolgedessen wurde die Frage, wie das Universum auswählt, welchen Gesetzen es folgt, besonders dringlich. Das, so werde ich geltend machen, ist eine der Fragen, die nur innerhalb eines neuen kosmologischen Begriffsrahmens beantwortet werden können, in dem die Zeit wirklich ist und Gesetze sich entwickeln.

Gesetze werden dem Universum also nicht von außen auferlegt. Keine äußere Instanz, weder eine göttliche noch eine mathematische, legt im Voraus fest, was die Naturgesetze sein sollen. Auch warten die Naturgesetze nicht stumm außerhalb der Zeit auf den Anfang des Universums. Vielmehr entstehen die Naturgesetze aus dem Inneren des Universums heraus und entwickeln sich in der Zeit mit dem Universum, das sie beschreiben. Es ist sogar möglich, dass genauso wie in der Biologie neue Gesetze der Physik entstehen können – als Regularitäten neuer Phänomene, die während der Geschichte des Universums auftauchen.

Einige mögen die Verwerfung ewiger Gesetze als Rückzug von den Zielen der Wissenschaft auffassen. Aber ich verstehe sie als das Abwerfen von überflüssigem metaphysischem Gepäck, das auf unserer Suche nach der Wahrheit lastet. In den kommenden Kapiteln werde ich Beispiele liefern, die veranschaulichen, wie die Idee von Gesetzen, die sich in der Zeit entwickeln, zu einer wissenschaftlicheren Kosmologie führt – worunter ich eine solche verstehe, die mehr Vorhersagen generiert, die einer experimentellen Prüfung unterzogen werden können.



Meines Wissens war Gottfried Wilhelm Leibniz der erste Wissenschaftler seit dem Beginn der wissenschaftlichen Revolution, der wirklich angestrengt darüber nachdachte, wie eine Theorie des ganzen Universums zu entwerfen sei. Leibniz war unter anderem Newtons Rivale, bekanntlich im Hinblick auf die Frage, welcher von beiden als Erster die Infinitesimalrechnung erfunden hatte. Er nahm auch die moderne Logik vorweg, entwickelte ein System von Binärzahlen und vieles mehr. Er wurde als klügster Mensch bezeichnet, der je gelebt hatte. Leibniz formulierte ein Rahmenprinzip für kosmologische Theorien, das »Prinzip des zureichenden Grundes« genannt wird und besagt, dass es für jede scheinbare Wahl beim Aufbau des Universums einen rationalen Grund geben muss. Auf jede Frage der Art »Warum ist das Universum X anstatt Y?« muss es eine Antwort geben. Wenn also ein Gott die Welt erschuf, konnte er im Hinblick auf den Bauplan keinerlei Wahl gehabt haben. Leibniz' Prinzip wirkte sich tief greifend auf die Entwicklung der Physik aus und ist, wie wir sehen werden, auch weiterhin ein zuverlässiger Leitfaden für unsere Bemühungen, eine kosmologische Theorie zu entwerfen.

Leibniz hatte die Vision einer Welt, in der nichts im Raum existiert, sondern alles in ein Netzwerk von Beziehungen eingetaucht ist. Diese Beziehungen definieren den Raum, und nicht umgekehrt. Heute durchdringt die Idee eines Universums aus miteinander in einem Netzwerk verbundenen Entitäten sowohl die moderne Physik als auch die Biologie und die Informatik.

In einer relationalen Welt (so nennen wir eine Welt, in der Beziehungen dem Raum vorausgehen) gibt es keine Räume ohne Dinge. Newtons Begriff des Raumes war das Gegenteil, denn er verstand den Raum als absolut. Das bedeutet, dass Atome dadurch definiert sind, wo sie sich im Raum befinden, dass aber der Raum in keiner Weise von der Bewegung der Atome beeinflusst wird. In einer relationalen Welt gibt es keine solchen Asymmetrien. Die Dinge sind durch ihre Beziehungen definiert. Es gibt zwar Individuen und diese können auch zum Teil autonom sein, aber ihre Möglichkeiten werden durch das Netzwerk von Beziehungen bestimmt. Individuen begegnen einander und nehmen einander

durch die Verbindungen wahr, die sie innerhalb des Netzwerks miteinander verknüpfen; und die Netzwerke sind dynamisch und entwickeln sich ständig.

Wie ich in Kapitel 3 erklären werde, folgt aus Leibniz' großem Prinzip, dass es keine absolute Zeit geben kann, die blind weiter tickt, ungeachtet dessen, was auch immer in der Welt geschieht. Die Zeit muss eine Folge von Veränderung sein; ohne Veränderung in der Welt kann es keine Zeit geben. Philosophen sagen, dass die Zeit relational ist – sie ist ein Aspekt von Relationen wie etwa Kausalität, die Veränderungen steuern. Ebenso muss der Raum relational sein; tatsächlich muss jede Eigenschaft eines Gegenstands in der Natur eine Widerspiegelung dynamischer¹⁰ Beziehungen zwischen ihm und anderen Dingen in der Welt sein.

Leibniz' Prinzipien widersprachen den Grundideen der Newton'schen Physik, weshalb es einige Zeit dauerte, bis sie von praktizierenden Wissenschaftlern voll gewürdigt wurden. Es war Einstein, der Leibniz' Vermächtnis ernst nahm und seine Prinzipien als Hauptmotiv für seine Umwälzung der Newton'schen Physik und deren Ersetzung durch die allgemeine Relativitätstheorie nutzte – eine Theorie des Raums, der Zeit und der Gravitation, die Leibniz' relationale Auffassung von Raum und Zeit weitgehend realisierte. Leibniz' Prinzipien werden auch noch auf eine andere Weise in der parallel stattfindenden Quantenrevolution verwirklicht. Ich bezeichne die Revolution des 20. Jahrhunderts in der Physik als »relationale Revolution«.

Das Problem der Vereinheitlichung der Physik und insbesondere die Zusammenführung von Quantentheorie und allgemeiner Relativitätstheorie in einem begrifflichen Rahmen ist die Hauptaufgabe bei der Vervollständigung der relationalen Revolution in der Physik. Die Hauptbotschaft dieses Buchs ist, dass diese Vereinheitlichung die Annahme erfordert, dass die Zeit wirklich ist und Gesetze sich entwickeln.

Die relationale Revolution ist in den übrigen Wissenschaften bereits in vollem Gang. Darwins Revolution in der Biologie ist eine Front, die sich sowohl in der Vorstellung manifestiert, dass

eine biologische Art durch ihre Beziehung zu allen anderen Organismen in ihrer Umgebung definiert ist, als auch in dem Gedanken, dass die Wirkung eines Gens nur im Kontext des Netzwerks von Genen definiert ist, die seine Wirkung regulieren. Uns wird rasch klar, dass es in der Biologie um Information geht und dass es keinen relationaleren Begriff als den der Information gibt, da sie auf einer Beziehung zwischen Sender und Empfänger an jedem Ende eines Kommunikationskanals beruht.

In der Sphäre der Gesellschaft wird die liberale Vorstellung einer Welt autonomer Individuen (die von dem Philosophen John Locke in Analogie zur Physik seines Freundes Isaac Newton entworfen wurde) von einer Sichtweise der Gesellschaft infrage gestellt, der zufolge sie aus wechselseitig voneinander abhängigen Individuen besteht, die nur zum Teil autonom sind und deren Leben nur in einer Schar von Beziehungen sinnvoll ist. Das neue Umfeld aus Informationen, in das wir in jüngster Zeit verstrickt sind, bringt die relationale Idee durch die Metapher des Netzwerks zum Ausdruck. Als soziale Wesen verstehen wir uns selbst als Knoten in einem Netzwerk, dessen Verbindungen uns bestimmen. Heute erscheint die Idee eines sozialen Systems, das aus miteinander verbundenen, vernetzten Entitäten besteht, zunehmend in Gesellschaftstheorien, die von allen möglichen Leuten, von feministischen politischen Philosophen bis zu Management-Gurus, formuliert werden. Wie viele Facebook-Benutzer sind sich dessen bewusst, dass ihr Sozialleben jetzt von einer mächtigen wissenschaftlichen Idee organisiert wird?

Die relationale Revolution ist schon weit fortgeschritten. Gleichzeitig befindet sie sich eindeutig in einer Krise. An einigen Fronten ist sie stecken geblieben. Wo immer sie sich in einer Krise befindet, begegnen wir drei Arten von Fragen, die heiß debattiert werden. Was ist ein Individuum? Wie entstehen neue Arten von Systemen und Entitäten? Wie können wir das Universum als Ganzes am besten verstehen?

Der Schlüssel zu diesem Rätsel liegt darin, dass weder Individuen noch Systeme oder das Universum als Ganzes sich als Dinge vorstellen lassen, die einfach existieren. Sie alle sind aus Prozes-

sen zusammengesetzt, die in der Zeit stattfinden. Das fehlende Element, ohne das wir diese Fragen nicht beantworten können, besteht darin, sie als Prozesse zu verstehen, die sich in der Zeit entwickeln. Ich werde argumentieren, dass die relationale Revolution, um erfolgreich zu sein, die Vorstellung der Zeit und des gegenwärtigen Augenblicks als fundamentalen Aspekt der Wirklichkeit ernst nehmen muss.

Der alten Denkweise zufolge waren Individuen einfach nur die kleinsten Einheiten in einem System, und wenn man verstehen wollte, wie ein System funktioniert, nahm man es auseinander und untersuchte, wie sich seine Teile verhielten. Aber wie sollen wir die Eigenschaften der fundamentalsten Entitäten verstehen? Sie haben keine Teile, weshalb uns der Reduktionismus nicht weiterbringt. Die atomare Perspektive findet hier keine Entfaltungsmöglichkeit; auch mit ihr kommen wir nicht weiter. Dies ist eine große Chance für das im Entstehen begriffene relationale Programm, denn es kann – und muss in der Tat auch – die Erklärung der Eigenschaften von Elementarteilchen im Netzwerk ihrer Relationen finden.

Das geschieht bereits in den vereinheitlichten Theorien, die uns zur Verfügung stehen. Im Standardmodell der Elementarteilchenphysik – die beste Theorie, die wir bislang für Elementarteilchen haben – sind die Eigenschaften eines Elektrons, wie etwa seine Masse, dynamisch durch die Wechselwirkungen bestimmt, an denen es teilhat. Die elementarste Eigenschaft, die ein Teilchen haben kann, ist seine Masse; sie bestimmt, wie viel Kraft benötigt wird, um seinen Bewegungszustand zu ändern. Im Standardmodell entstehen alle Teilchenmassen aus ihren Wechselwirkungen mit anderen Teilchen und werden in erster Linie von einem bestimmt – dem Higgs-Teilchen. Es gibt keine absolut »elementaren« Teilchen mehr; alles, was sich wie ein Teilchen verhält, ist bis zu einem gewissen Grad eine emergente Konsequenz eines Netzwerks von Wechselwirkungen.

Emergenz ist in einer relationalen Welt ein wichtiger Begriff. Eine Eigenschaft von etwas, das aus Teilen besteht, ist emergent, wenn es keinen Sinn machen würde, sie einem der Teile zuzu-

schreiben. Steine sind hart und Wasser fließt, aber die Atome, aus denen sie bestehen, sind weder fest noch nass. Eine emergente Eigenschaft wird häufig nur annähernd gelten, weil sie eine durchschnittliche oder höherstufige Beschreibung bezeichnet, die viele Einzelheiten auslässt.

Mit dem Fortschritt der Wissenschaft erweisen sich Aspekte der Natur, die einst als fundamental galten, als emergent und angenähert. Wir glaubten einmal, dass Festkörper, Flüssigkeiten und Gase fundamentale Zustände seien; jetzt wissen wir aber, dass es emergente Eigenschaften sind, die als verschiedene Möglichkeiten der Anordnung von Atomen verstanden werden können, aus denen alles besteht. Die meisten Naturgesetze, die einst als fundamental galten, werden jetzt als emergent und angenähert verstanden. Die Temperatur ist einfach nur die mittlere Energie von Atomen, die sich in chaotischer Bewegung befinden. Deshalb sind die Gesetze der Thermodynamik, die sich auf die Temperatur beziehen, emergent und angenähert.

Ich neige dazu, zu glauben, dass sich so gut wie alles, was wir im Moment für fundamental halten, am Ende als angenähert und emergent erweisen wird: die Gravitation und die Gesetze von Newton und Einstein, die sie regieren, die Gesetze der Quantenmechanik, sogar der Raum selbst.

Die fundamentale physikalische Theorie, nach der wir suchen, wird sich nicht auf Dinge beziehen, die sich im Raum bewegen. Sie wird nicht die Gravitation oder Elektrizität als Grundkräfte ausweisen. Es wird auch nicht die Quantenmechanik sein. Alle diese Theorien werden sich als angenäherte Vorstellungen erweisen, wenn unser Universum groß genug wird.

Wenn der Raum emergent ist, bedeutet das, dass auch die Zeit emergent ist? Wenn wir tief genug in die Grundlagen der Natur eindringen, verschwindet dann die Zeit? Im letzten Jahrhundert sind wir bis zu dem Punkt fortgeschritten, an dem viele meiner Kollegen die Zeit für emergent relativ zu einer fundamentaleren Beschreibung der Natur halten, in der keine Zeit erscheint.

Ich glaube – so stark wie man nur irgendetwas in der Wissenschaft glauben kann –, dass sie sich irren. Die Zeit wird sich als

der einzige Aspekt unserer Alltagserfahrung erweisen, der wirklich fundamental *ist*. Die Tatsache, dass in unserer Wahrnehmung immer ein bestimmter Zeitpunkt herrscht und dass wir diesen Zeitpunkt als zu einem Fluss von Zeitpunkten zugehörig erleben, ist keine Illusion. Sie ist der beste Anhaltspunkt, den wir für die fundamentale Wirklichkeit haben.

TEIL I **GEWICHT**
Die Austreibung der Zeit

1 Fallen

Bevor wir uns auf diese oder irgendeine andere Entdeckungsreise begeben, sollten wir den Rat Heraklits befolgen, der, obwohl er kaum ein paar Schritte in der heroischen Geschichte namens Wissenschaft gemacht hatte, so weise war, uns zu warnen, dass die »Natur sich zu verbergen liebt«. Das tut sie in der Tat, wenn man bedenkt, dass die meisten der Kräfte und Teilchen, die die Naturwissenschaft mittlerweile für fundamental hält, bis zum letzten Jahrhundert im Atom verborgen lagen. Einige von Heraklits Zeitgenossen sprachen zwar von Atomen, aber ohne wirklich zu wissen, ob sie existierten oder nicht. Und ihre Vorstellung von ihnen war verkehrt, da sie sich die Atome als unteilbar dachten. Es dauerte bis zu Einsteins Aufsätzen von 1905, dass die Naturwissenschaft aufholte und darin übereinkam, dass Materie aus Atomen besteht. Aber sechs Jahre später wurde das Atom in Stücke auseinandergebrochen. So begann die Enträtselung des Atominneren und die Entdeckung der Welten, die darin verborgen sind.

Die größte Ausnahme von der Bescheidenheit der Natur ist die Gravitation. Sie ist die einzige der Grundkräfte, deren Wirkungen jeder beobachtet, ohne dafür spezielle Instrumente zu benötigen. Unsere allerersten Erfahrungen von Versuch und Irrtum machen wir mit der Gravitation. Folglich musste die Gravitation auch eines der ersten Naturphänomene gewesen sein, das von unserer Spezies benannt werden sollte.

Dennoch blieben Schlüsselaspekte der alltäglichen Erfahrung des Fallens trotz ihrer Offensichtlichkeit bis zur Morgenröte der Wissenschaft verborgen, und vieles liegt immer noch im Verborgenen. Wie wir in späteren Kapiteln sehen werden, ist einer dieser weiterhin verborgenen Aspekte der Gravitation ihre Beziehung zur Zeit. Deshalb beginnen wir unsere Reise zur Entdeckung der Zeit mit dem Fallen.



»Warum kann ich nicht fliegen, Papa?«

Wir waren auf der Dachterrasse und schauten drei Stockwerke hinunter in den Garten hinterm Haus.

»Ich springe einfach und fliege zu Mami in den Garten hinunter, wie die Vögel da.«

»Vogel« war sein erstes Wort gewesen. Er hatte es beim Anblick der Spatzen gesagt, die im Baum vor seinem Kinderzimmerfenster flatterten. Hier haben wir den elementaren Konflikt der Elternschaft: Wir wollen, dass unsere Kinder die Möglichkeit haben, über uns hinauszuwachsen, aber wir fürchten auch um ihre Sicherheit in einer unsicheren Welt.

Ich sagte ihm ernst, dass Menschen nicht fliegen können und dass er es unter keinen Umständen jemals versuchen dürfe, und er brach in Tränen aus. Um ihn abzulenken, nutzte ich die Gelegenheit, um ihm von der Gravitation zu erzählen. Die Gravitation hält uns unten auf der Erde. Ihretwegen fallen wir und alles andere auch.

Das nächste Wort, das aus seinem Mund kam, war erwartungsgemäß: »Warum?« Sogar ein Dreijähriger weiß, dass man mit der Benennung eines Phänomens das Phänomen selbst noch nicht erklärt hat.

Aber wir konnten ein Spiel spielen, um zu sehen, *wie* Dinge fallen. Bald ließen wir alle möglichen Spielsachen in den Garten hinunterfallen und machten »Sperimente«, um zu sehen, ob sie alle auf die gleiche Weise fielen oder nicht. Ich dachte jedoch bald über eine Frage nach, die die Kraft eines dreijährigen Geistes übersteigt. Wenn wir einen Gegenstand werfen und er fällt, während er sich von uns wegbewegt, dann beschreibt er eine Kurve im Raum. Welche Art von Kurve ist das?

Es überrascht nicht, dass einem Dreijährigen diese Frage nicht einfällt. Sie scheint Tausende von Jahren, auch nachdem wir uns bereits als hoch zivilisiert einschätzten, überhaupt niemandem eingefallen zu sein. Es sieht so aus, dass Platon, Aristoteles und die anderen großen Philosophen der antiken Welt damit zufrieden waren, die Dinge um sich herum fallen zu sehen, ohne sich die Frage zu stellen, ob fallende Körper sich auf einer besonderen Art von Kurve fortbewegen.

Der erste Mensch, der die Pfade untersuchte, die von fallenden Körpern beschrieben werden, war der Italiener Galileo Galilei im frühen 17. Jahrhundert. Er präsentierte seine Ergebnisse im *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme*, den er in seinem achten Lebensjahrzehnt schrieb, als er von der Inquisition unter Hausarrest gestellt worden war. In diesem Buch berichtete er, dass fallende Körper sich immer auf derselben Art von Kurve entlangbewegen, nämlich auf einer Parabel.

Galilei entdeckte nicht nur, wie Körper fallen, sondern erklärte seine Entdeckung auch. Die Tatsache, dass fallende Körper Parabeln beschreiben, ist die direkte Konsequenz einer anderen Tatsache, die er als Erster beobachtete: der Tatsache, dass alle Objekte, egal ob sie geworfen oder fallen gelassen werden, mit einer konstanten Beschleunigung fallen.

Galileis Beobachtung, dass alle fallenden Gegenstände eine Parabel beschreiben, ist eine der wunderbarsten Entdeckungen in der gesamten Naturwissenschaft. Fallen ist etwas Universales und daher auch die Art von Kurve, die fallende Körper beschreiben. Es kommt nicht darauf an, woraus der Gegenstand besteht, wie er zusammengesetzt ist oder welche Funktion er hat. Es kommt auch nicht darauf an, wie oft, von welcher Höhe oder mit welcher vorwärts gerichteten Geschwindigkeit wir den Gegenstand fallen lassen oder werfen. Wir können das Experiment immer wiederholen, und jedes Mal ist es eine Parabel. Die Parabel ist eine der einfachsten Kurven, die man beschreiben kann. Sie ist die Menge von Punkten, die gleich weit von einem Punkt und einer Linie entfernt sind. Daher ist eines der universalsten Phänomene auch eines der einfachsten.

Eine Parabel ist ein Begriff aus der Mathematik – ein Beispiel für das, was wir einen mathematischen Gegenstand nennen –, den die Mathematiker schon lange vor Galileis Zeit kannten. Galileis Beobachtung, dass Körper entlang von Parabeln fallen, ist eines der ersten Beispiele für ein Naturgesetz – das heißt eine Regularität im Verhalten eines kleinen Subsystems des Universums. In diesem Fall ist das Subsystem ein Gegenstand, der in der Nähe der Oberfläche eines Planeten fällt. Das ist seit Beginn des Universums



Lee Smolin

Im Universum der Zeit

Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis des Kosmos

Gebundenes Buch mit Schutzumschlag, 416 Seiten, 13,5 x 21,5 cm
ISBN: 978-3-421-04575-1

DVA Sachbuch

Erscheinungstermin: Mai 2014

Wie wirklich ist Zeit?

Zeit ist etwas völlig Selbstverständliches für uns, wir erleben, wie sie vergeht, wenn wir auf die Uhr schauen, Kindern beim Älterwerden zusehen oder Wettrennen beobachten. Und doch haben Physiker von Newton über Einstein bis zu den heutigen Quantenphysikern eine andere Auffassung der Zeit. Für sie ist sie nicht real, sondern eine Illusion. Für sie wird das Universum von Gesetzen beherrscht, die außerhalb der Zeit stehen, zeitlos sind, von Newtons Gravitationsgesetz bis zur Formel $e=mc^2$.

Lee Smolin hingegen sieht Zeit als die einzige fundamentale Größe des Universums. Alles andere, auch die vermeintlich unabänderlichen Gesetze, unterliegen seiner Auffassung nach der Veränderung in der Zeit. Newtons Gesetze werden vielleicht nicht immer so grundlegend bleiben, wie wir sie heute verstehen. Mit dieser revolutionären Auffassung stellt er die Zeit in den Mittelpunkt unseres Denkens über die Welt und erklärt, welche Auswirkungen das auf uns, auf die Welt, auf das Universum hat.



[Der Titel im Katalog](#)