

STEPHEN
HAWKING



KURZE
ANTWORTEN
AUF GROSSE
FRAGEN



Klett-Cotta

Stephen Hawking

Kurze Antworten auf große Fragen

Aus dem Englischen von Susanne Held und Hainer Kober

Klett-Cotta

Impressum

Hinweis zur Übersetzung: Das »Vorwort«, die »Einführung«, die Kapitel 7–10 sowie das »Nachwort« hat Susanne Held aus dem Englischen übertragen (S. 9–25 und S. 169–244). Hainer Kober hat die Einleitung von Stephen Hawking sowie die Kapitel 1–6 (S. 27–168) übersetzt.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Speicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Klett-Cotta

www.klett-cotta.de

Die Originalausgabe erschien unter dem Titel »Brief Answers to the Big Questions« im Verlag John Murray, London

© 2018 by The Estate of Stephen Hawking

Für die deutsche Ausgabe

© 2018 by J. G. Cotta'sche Buchhandlung

Nachfolger GmbH, gegr. 1659, Stuttgart

Alle deutschsprachigen Rechte vorbehalten

Cover: Rothfos & Gabler, Hamburg

Unter Verwendung eines Fotos von shutterstock

Datenkonvertierung: Dörlemann Satz, Lemförde

Printausgabe: ISBN 978-3-608-96376-2

E-Book: ISBN 978-3-608-11510-9

Dieses E-Book basiert auf der aktuellen Auflage der Printausgabe.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Inhalt

Hinweis des Verlags John Murray, London

Vorwort

Einführung

Warum wir die großen Fragen stellen müssen

1 Gibt es einen Gott?

2 Wie hat alles angefangen?

3 Gibt es anderes intelligentes Leben im Universum?

4 Können wir die Zukunft vorhersagen?

5 Was befindet sich in einem Schwarzen Loch?

6 Sind Zeitreisen möglich?

7 Werden wir auf der Erde überleben?

8 Sollten wir den Weltraum besiedeln?

9 Wird uns Künstliche Intelligenz überflügeln?

10 Wie gestalten wir unsere Zukunft?

Nachwort

Anhang

Danksagung

Bildnachweis

Register

Bücher von Stephen Hawking in deutscher Übersetzung

Stephen Hawking als Co-Autor

Hinweis des Verlags John Murray, London

Stephen Hawking wurde von Wissenschaftlern, Hightech-Unternehmern, hochrangigen Geschäftsleuten, Politikern und der Öffentlichkeit regelmäßig nach seinen Gedanken zu den »großen Fragen« des Tages gefragt. Stephen unterhielt ein umfangreiches persönliches Archiv mit seinen Antworten in Form von Reden, Interviews, Essays, Entgegnungen und Stellungnahmen zu diesen großen Fragen.

Dieses Buch ist aus diesem persönlichen Archiv hervorgegangen. Es entstand gerade, als Stephen Hawking starb. In Zusammenarbeit mit seinen akademischen Kollegen, seiner Familie und dem *Stephen Hawking Estate* wurde dieses Buch vorbereitet und fertiggestellt.

Ein Teil der Einnahmen für dieses Buch wird gespendet.

ViSiT WWW.iBOOKS.TO

EBOOKS

COMICS

MAGAZINE & ZEITSCHRIFTEN

ZEITUNGEN



iBOOKS.TO

EBOOKS - GRATIS - DOWNLOADEN

Vorwort

EDDIE REDMAYNE

Als ich Stephen Hawking zum ersten Mal begegnete, war ich von seiner außergewöhnlichen Vitalität und seiner Verletzlichkeit überwältigt. Die Entschlossenheit in seinem Blick, in Verbindung mit dem bewegungslosen Körper, kannte ich aus meinen Recherchen – ich war kurz zuvor engagiert worden, Stephen in dem Film *Die Entdeckung der Unendlichkeit* (*The Theory of Everything*) zu spielen, und hatte mehrere Monate damit zugebracht, sein Werk zu studieren sowie die Besonderheiten seiner Krankheit. Ich versuchte mir vorzustellen, wie ich meinen Körper einzusetzen hatte, um die Entwicklung der ALS-Erkrankung über die Jahre hinweg zum Ausdruck bringen zu können.

Als ich Stephen dann tatsächlich begegnete, der Ikone, diesem genial begabten Wissenschaftler, dessen Kommunikation fast ausschließlich mittels einer Computerstimme erfolgte, unterstützt durch ein Paar außergewöhnlich ausdrucksstarke Augenbrauen, war ich völlig überwältigt. Werden Pausen in einer Unterhaltung zu lang, neige ich zu Nervosität und rede dann viel zu viel, wohingegen Stephen die Macht des Schweigens bestens verstand wie auch die Macht des Gefühls, man werde eingehend geprüft. Nervös, wie ich war, beschloss ich, ihm mitzuteilen, dass unsere Geburtstage nur wenige Tage auseinanderlagen, wir also zum selben Tierkreiszeichen gehörten. Nach wenigen Minuten antwortete er: »Ich bin ein Astronom. Kein Astrologe.« Außerdem bestand er darauf, dass ich ihn Stephen nannte und nicht mit »Professor« anredete. Man hatte mich gewarnt ...

Stephen zu verkörpern, bedeutete für mich eine außergewöhnliche Herausforderung. Was mich an der Rolle faszinierte, war die Dualität von Stephens äußerem Triumph, der von seiner wissenschaftlichen Arbeit herrührte, und seinem inneren Kampf gegen ALS (Amyotrophe

Lateralsklerose), der begann, als er gerade 20 Jahre alt geworden war. Seine Geschichte war einzigartig komplex und reich, ein Zeugnis menschlichen Durchhaltevermögens, Familiensinns, enormer akademischer Leistungen und unerbittlichen Widerstands angesichts all der Hindernisse. Wir wollten die Inspiration darstellen, aber auch die Charakterstärke und den Mut in Stephens Leben, die er und diejenigen bewiesen haben, die für ihn sorgten.

Aber genauso wichtig war uns, Stephen als einen gewieften Showman zu zeigen. Für meinen Trailer dienten mir letztlich drei Bilder als Leitlinie. Eines zeigte Einstein, der seine Zunge herausstreckt – derselbe spielerische Witz kommt bei Hawking zum Ausdruck. Ein anderes war der Joker in einem Kartenspiel, dargestellt als Puppenspieler, denn ich bin überzeugt, es gab immer Menschen, die Stephen in der Hand hatte. Und der dritte ausschlaggebende Eindruck war James Dean. Von Deans funkelndem Blick und seinem Humor habe ich viel für meine Rolle profitiert.

Das bedrückendste Problem, wenn man eine lebende Person spielt, besteht darin, dass man für seine Darbietung vor ebendieser Person, die man verkörpert hat, geradestehen muss. In Stephens Fall bezog das auch seine Familie mit ein, die mir während der Vorbereitung auf den Film so großzügig geholfen hatte. Bevor Stephen sich den fertigen Film anschaute, sagte er mir: »Ich werde dir mitteilen, wie ich es finde. Gut. Oder anders.« Sollte sein Urteil »anders« lauten, erwiderte ich, würde es vielleicht genügen, wenn er nur »anders« sagte und mir die peinigenden Einzelheiten ersparte! Großzügig meinte Stephen anschließend, der Film hätte ihm gefallen. Er fand ihn bewegend, allerdings stellte er ebenfalls fest, mehr Physik und weniger Gefühle hätten dem Film gutgetan. Dagegen kann man nichts einwenden.

Seit der *Entdeckung der Unendlichkeit* habe ich Kontakt mit der Familie von Stephen Hawking. Es berührte mich, dass man mich bat, bei Stephens Beerdigung einen Text vorzutragen. Es war ein unglaublich trauriger Tag, bei strahlendem Wetter, voller Liebe und freudiger Erinnerungen und Betrachtungen über diesen Mutigsten der Menschen, der die Welt mit seiner Wissenschaft und mit seiner Neugier als Forscher auch dazu gebracht hatte, behinderte Menschen anzuerkennen und ihnen einen wirklichen Spielraum zu eröffnen, ihnen Chancen einzuräumen, sich zu entwickeln.

Wir haben einen der erstaunlichsten Wissenschaftler und einen der humorvollsten Menschen verloren, dem zu begegnen ich die Freude hatte. Seine Arbeit und sein Erbe leben jedoch weiter, sagte schon seine Familie bei

seinem Tod, und daher darf ich, obwohl ich noch immer traurig bin, mit großer Freude diese Textsammlung von Stephen über verschiedene faszinierende Themen einleiten.

Ich hoffe, Sie finden Gefallen an diesen Texten, und ich hoffe, um mit Barack Obama zu sprechen, Stephen hat jetzt Spaß

*da droben mitten unter den Sternen
up there among the stars.*

Herzlich

Eddie

Juli 2018

Einführung

KIP S. THORNE

Meine erste Begegnung mit Stephen Hawking fand im Juli 1965 in London statt, bei einer Konferenz über Allgemeine Relativitätstheorie und Gravitation. Stephen arbeitete in Cambridge an seiner Dissertation; ich hatte mein Promotionsstudium in Princeton gerade abgeschlossen. Gerüchte schwirrten in den Konferenzräumen umher, Stephen habe ein schlüssiges Argument für die These gefunden, unser Universum müsse irgendwann in der Vergangenheit einen Anfang gehabt haben. Das Universum könne nicht unendlich alt sein.

Mit gut 100 Leuten quetschte ich mich also in einen Raum, der eigentlich für 40 ausgelegt war, um Stephen zu hören. Er ging am Stock und seine Aussprache war nicht sehr deutlich, ansonsten zeigten sich nur wenige Anzeichen der Amyotrophen Lateralsklerose, die bei ihm zwei Jahre zuvor diagnostiziert worden war. Seinen Genius, das war offensichtlich, hatte die Krankheit nicht tangiert. Sein luzider Gedankengang stützte sich auf Einsteins Gleichungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie und auf die Beobachtungen von Astronomen, dass unser Universum sich ausdehnt, sowie auf einige wenige einfache Thesen, die sehr überzeugend wirkten. Außerdem wendete er gewisse neue mathematische Verfahren an, die Roger Penrose kurz zuvor entwickelt hatte. Stephen kombinierte all das klug, überzeugend und fesselnd; dann leitete er sein Ergebnis ab: Unser Universum muss in einer Art singulärem Zustand vor rund zehn Milliarden Jahren angefangen haben zu existieren. (In den darauf folgenden zehn Jahren bewiesen Stephen und Roger mit vereinten Kräften und zunehmend überzeugend diesen singulären Beginn der Zeit. Darüber hinaus bewiesen sie, ebenfalls zunehmend überzeugend, dass der Kern jedes Schwarzen Loches von einer Singularität besetzt ist, in der die Zeit endet.)

1965 war ich von Stephens Vortrag tief beeindruckt: nicht nur von seinem Beweis und seiner Schlussfolgerung, sondern mehr noch von seiner Klarheit und Kreativität. Ich wandte mich also an ihn und verbrachte eine Stunde mit ihm im Gespräch unter vier Augen. Das war der Beginn einer lebenslangen Freundschaft, einer Freundschaft, die nicht lediglich auf gemeinsamen Interessen beruhte, sondern auf großer gegenseitiger Sympathie, einer verblüffenden Möglichkeit gegenseitigen zwischenmenschlichen Verstehens. Bald verbrachten wir mehr Zeit damit, über unser Leben, unsere Lieben, ja sogar über den Tod als über Wissenschaft zu sprechen, obwohl unsere Wissenschaft der Kitt blieb, der uns verband.

Im September 1973 nahm ich Stephen und seine Frau Jane nach Moskau mit. Trotz des Kalten Krieges verbrachte ich seit 1968 jedes zweite Jahr rund einen Monat in Moskau und arbeitete mit Mitgliedern einer Forschungsgruppe unter Jakow Borissowitsch Seldowitsch zusammen. Seldowitsch war ein herausragender Astrophysiker und einer der Väter der sowjetischen Wasserstoffbombe. Aus Geheimhaltungsgründen war es ihm daher nicht gestattet, nach Westeuropa oder Amerika zu reisen. Er war äußerst interessiert an einem Austausch mit Stephen. Da er Stephen nicht aufsuchen konnte, kamen wir zu ihm.

Stephen begeisterte in Moskau Seldowitsch und Hunderte weitere Wissenschaftler mit seinen Erkenntnissen, und im Gegenzug lernte Stephen ein oder zwei Dinge von Seldowitsch. Am denkwürdigsten war ein Nachmittag, den Stephen und ich mit Seldowitsch und seinem Doktoranden Alexei Starobinski in Stephens Zimmer im Hotel Rossija verbrachten.

Seldowitsch erklärte sehr anschaulich eine bemerkenswerte Entdeckung, die er und Starobinski gemacht hatten, und Starobinski lieferte die mathematische Erklärung dazu. Für die Rotation eines Schwarzen Loches wird Energie benötigt. Das wussten wir schon. Sie erklärten, ein Schwarzes Loch könne seine Rotationsenergie nutzen, um Partikel zu schaffen, und diese Partikel würden weggeschleudert und nähmen die Rotationsenergie mit. Das war neu und überraschend – trotzdem nicht umwerfend überraschend. Denn wenn ein Objekt über Bewegungsenergie verfügt, findet die Natur normalerweise eine Möglichkeit, ihm diese Energie zu entziehen. Wir kannten bereits andere Möglichkeiten, die Rotationsenergie eines Schwarzen Loches zu befreien. Hier handelte es sich einfach um eine weitere neue, wenn auch unerwartete Möglichkeit.

Der große Wert solcher Gespräche liegt nun freilich darin, dass sie am Anfang neuer Denkwege stehen können. Und das war damals auch bei Stephen der Fall. Er dachte mehrere Monate über die Entdeckung von Seldowitsch und Starobinski nach, betrachtete sie erst von der einen, dann von einer anderen Seite, bis er schließlich eines Tages zu einer ganz grundlegenden Einsicht kam: Hört ein Schwarzes Loch auf zu rotieren, kann es trotzdem noch Partikel ausstoßen. Ein solches Schwarzes Loch kann strahlen – und es strahlt, als ob es heiß wäre wie die Sonne, wenn es auch nicht extrem heiß ist, eher mäßig warm.

Je schwerer das Loch ist, desto niedriger ist seine Temperatur. Ein Loch, das so viel wiegt wie die Sonne, hat eine Temperatur von 0,00000006 Kelvin: 0,06 Millionstel von einem Grad über dem absoluten Nullpunkt. Die Formel für die Berechnung dieser Temperatur ist jetzt auf Stephens Grabstein in der Westminster Abbey in London eingraviert, wo seine Asche zwischen Isaac Newton und Charles Darwin beigesetzt wurde.

Diese *Hawking-Temperatur* eines Schwarzen Loches und seine *Hawking-Strahlung* – so die späteren Bezeichnungen – waren extrem radikal. Womöglich sind *Hawking-Temperatur* und *Hawking-Strahlung* die fundamentalste Entdeckung der Theoretischen Physik in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Sie öffneten uns die Augen für tiefgreifende Beziehungen zwischen der Allgemeinen Relativität (Schwarze Löcher), der Thermodynamik (Wärme-Physik) und der Quantenphysik (der Entstehung von Partikeln, wo zuvor keine waren).

Vor diesem Hintergrund gelang es Stephen beispielsweise zu beweisen, dass ein Schwarzes Loch *Entropie* besitzt. Irgendwo im Inneren oder im Umkreis des Schwarzen Loches herrscht folglich eine außerordentlich hohe Zufälligkeit. Stephen folgerte daraus, das Ausmaß an Entropie (der Logarithmus des gesamten Ausmaßes an Zufälligkeit) verhalte sich proportional zur Oberfläche des Loches. Seine Entropie-Formel wird auf Stephens Gedenkstein im *Gonville & Caius College* in Cambridge, seiner Wirkungsstätte, eingraviert sein.

In den vergangenen 45 Jahren haben Stephen und Hunderte von Physikern sich damit beschäftigt, die genaue Natur der Zufälligkeit eines Schwarzen Loches zu verstehen. Die Frage bringt immer weitere neue Einsichten über die Verbindung der Quantentheorie mit der Allgemeinen Relativität hervor, also über die noch nicht hinreichend verstandenen Gesetze der

Quantengravitation.

Im Herbst 1974 kam Stephen für ein Jahr mit seinen Doktoranden und seiner Familie (seiner Frau Jane und ihren beiden Kindern Robert und Lucy) ins kalifornische Pasadena, damit er und seine Studenten am Geistesleben meiner Universität, des *California Institute of Technology*, teilhaben und sich zeitweise meiner Forschungsgruppe anschließen konnten. Es war ein *glanzvolles* Jahr, ein *annus mirabilis* auf dem Höhepunkt dessen, was dann später als »das Goldene Zeitalter der Erforschung Schwarzer Löcher« bezeichnet wurde.

Während dieses Jahres arbeiteten Stephen und seine Studenten sowie einige meiner Schüler unermüdlich daran, Schwarze Löcher besser zu verstehen, und auch ich selbst beteiligte mich in einem gewissen Ausmaß. Dass Stephen vor Ort war und unsere zusammengesetzte Forschungsgruppe leitete, verschaffte mir den Freiraum, eine neue Richtung zu verfolgen, über die ich schon seit einigen Jahren nachgedacht hatte: *Gravitationswellen*.

Lediglich zwei Arten von Wellen reisen durch das Universum und können uns Informationen über weit entfernte Dinge zutragen: *elektromagnetische Wellen* (dazu gehören Lichtstrahlen, Röntgenstrahlen, Gammastrahlen, Mikrowellen, Radiowellen ...) und *Gravitationswellen*.

Elektromagnetische Wellen bestehen aus oszillierenden elektrischen und magnetischen Kräften und bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit fort. Treffen sie auf geladene Partikel wie beispielsweise auf die Elektronen in einem Radio oder einer Fernsehantenne, lassen sie diese Partikel sich hin- und herbewegen und laden in ihnen die Welleninformation ab. Diese Information kann dann verstärkt und in einen Lautsprecher oder auf einen Fernsehbildschirm übertragen werden, sodass sie für Menschen verstehbar wird.

Gravitationswellen bestehen, so die Erkenntnis Einsteins, aus einer oszillierenden Raumverzerrung: einer oszillierenden Streckung und Stauchung des Raumes. 1972 erfand Rainer (Rai) Weiss vom MIT in Cambridge, Massachusetts, einen Gravitationswellendetektor: In einem solchen Detektor werden Spiegel, die in der Ecke und an den Enden einer L-förmigen Vakuumröhre hängen, entlang des einen L-Balkens durch die Streckung des Raumes auseinandergezogen und entlang des anderen L-Balkens durch Stauchung des Raumes zusammengeschoben.

Rai schlug vor, Laserstrahlen zu verwenden, um das oszillierende Muster

dieser Streckung und Stauchung zu messen. Das Laserlicht konnte eine Gravitationswellen-Information entnehmen, und das Signal konnte dann verstärkt und für menschliches Verstehen zugänglich in einen Computer eingelesen werden.

Die Erforschung des Universums mit elektromagnetischen Teleskopen – die sogenannte elektromagnetische Astronomie – geht auf Galileo Galilei zurück. Er baute ein kleines optisches Teleskop, richtete es auf den Jupiter und entdeckte seine vier größten Monde. In den 400 Jahren seit damals hat die elektromagnetische Astronomie unser Verständnis vom Universum revolutioniert.

1972 fingen meine Studenten und ich an, darüber nachzudenken, was wir über das Universum erfahren könnten, wenn wir mit Gravitationswellen arbeiteten: Wir begannen mit der Arbeit an einer Vision für *Gravitationswellen-Astronomie*. Gravitationswellen stellen eine Art Raumverzerrung dar. Daher werden sie am stärksten von Objekten produziert, die ihrerseits vollständig oder teilweise aus verzerrter Raumzeit bestehen – und das sind vor allem Schwarze Löcher. Gravitationswellen waren, so folgerten wir daraus, das ideale Instrument, um Stephens Erkenntnisse über Schwarze Löcher zu untersuchen und zu überprüfen.

Außerdem hatten wir den Eindruck, Gravitationswellen unterschieden sich von elektromagnetischen Wellen so grundlegend, dass sie fast mit Sicherheit wiederum eine neue, ganz eigene Revolution unseres Verständnisses vom Universum zur Folge haben müssten, die möglicherweise mit der gewaltigen elektromagnetischen Revolution vergleichbar wäre, die auf Galilei folgte – *wenn* diese schwer fassbaren Wellen entdeckt und beobachtet werden könnten. Das war nun allerdings ein eklatantes *Wenn*: Wir mussten davon ausgehen, dass die Gravitationswellen, die um die Erde strömen, so schwach sind, dass die Spiegel an den Enden der L-förmigen Vorrichtung von Rai Weiss relativ zueinander um nicht mehr als 1/100 vom Durchmesser eines Protons vor- und zurückbewegt würden (also 1/10000000 von der Größe eines Atoms), und das auch nur dann, wenn die Spiegel mehrere Kilometer voneinander entfernt waren. Die Herausforderung, solche winzigen Bewegungen zu messen, war immens.

Daher verbrachte ich in diesem großartigen Jahr, während die Forschungsgruppen von Stephen und mir am *Caltech* zusammenarbeiteten, einen Großteil meiner Zeit damit, die Aussichten für einen Erfolg der

Gravitationswellen-Forschung auszuloten. Stephen konnte dabei hilfreich sein, weil er und sein Schüler Gary Gibbons einige Jahre zuvor einen eigenen Gravitationswellendetektor entwickelt, aber nie gebaut hatten. Kurz nach Stephens Rückkehr nach Cambridge konnte ich in einer intensiven, sich über die ganze Nacht hinziehenden Diskussion mit Rai Weiss in seinem Hotelzimmer in Washington D. C. die Früchte meiner Suche ernten. Ich kam zu der Überzeugung, die Erfolgsaussichten seien immerhin so groß, dass ich einen Großteil meiner Karriere und die Energie meiner zukünftigen Studenten darauf verlegen konnte, Rai und anderen Vordenkern dabei zu helfen, unsere Gravitationswellen-Vision Wirklichkeit werden zu lassen.

Und der Rest ist, wie es so schön heißt, Geschichte: Am 14. September 2015 registrierten und beobachteten unsere *LIGO*-Gravitationswellen-Detektoren (die im Rahmen eines Projekts – an dem 1000 Personen beteiligt waren – gebaut worden waren, das Rai, ich und Ronald Drever gegründet hatten. Barry Barish organisierte und leitete das Projekt und führte alle Ergebnisse zusammen) ihre *ersten Gravitationswellen*. Wir verglichen die Wellenmuster mit den Vorhersagen aus Computersimulationen, und wir kamen zu dem Schluss, dass die Wellen entstanden waren, als zwei sehr schwere Schwarze Löcher, 1,3 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt, kollidierten.

Das war der Anfang der Gravitationswellen-Astronomie. Unserem Team war für das Feld der Gravitationswellen das gelungen, was Galilei für die elektromagnetischen Wellen vollbracht hatte.

Ich bin zuversichtlich, dass sich in den vor uns liegenden Jahrzehnten die nächste Generation von Gravitationswellen-Astronomen diese Wellen zunutze machen wird – nicht nur, um Stephens Gesetze der Physik Schwarzer Löcher zu überprüfen, sondern auch, um Gravitationswellen von der singulären Geburt unseres Universums ausfindig zu machen und zu beobachten und so die Ideen von Stephen und anderen zur Frage der Entstehung unseres Universums zu überprüfen.

Während unseres *annus mirabilis* 1974/1975, als ich mir über Gravitationswellen den Kopf zerbrach und Stephen unsere gemischte Studentengruppe zum Thema Schwarze Löcher leitete, gelangte er zu einer Erkenntnis, die von noch grundsätzlicherer Bedeutung ist als seine Entdeckung der Hawking-Strahlung. Er lieferte einen zwingenden, *fast* wasserdichten Nachweis dafür, dass, wenn sich ein Schwarzes Loch bildet

und sich später durch Strahlung vollständig auflöst, die Information, die in das Schwarze Loch Eingang fand, nicht wieder herauskommt, dass also die Information unwiderruflich verloren ist.

Das ist insofern radikal, als die Gesetze der Quantenphysik einstimmig aussagen, Information könne nie vollständig verloren gehen. Sollte Stephen recht haben, dann verletzen Schwarze Löcher ein fundamentales Gesetz der Quantenmechanik.

Wie war das möglich? Die Verdampfung eines Schwarzen Loches unterliegt den kombinierten Gesetzen der Quantenmechanik und der Allgemeinen Relativität – den kaum verstandenen Gesetzen der Quantengravitation. Also, so die Überlegung Stephens, muss die heißglühende Beziehung zwischen Gesetzen der Relativitätstheorie und der Quantenphysik die Zerstörung von Informationen zur Folge haben.

Die große Mehrheit der theoretischen Physiker findet diese Schlussfolgerung ganz schrecklich und ist extrem skeptisch. Seit beinahe 45 Jahren schlagen sie sich jetzt mit diesem sogenannten *Informationsverlust-Paradoxon* herum. Der Kampf ist jede Anstrengung und jede Panik wert, die er ausgelöst hat, denn das Paradox ist ein äußerst nützlicher Schlüssel zum Verständnis der Quantengravitations-Gesetze. Stephen entdeckte selbst im Jahr 2003 eine Möglichkeit, wie Informationen während der Verdampfung entweichen können, doch das konnte die Theoretiker und ihre Kontroversen nicht beruhigen. Stephen bewies nicht, dass Informationen entweichen, der Streit geht also weiter.

In meiner Grabrede für Stephen, bei der Beisetzung seiner Asche in der Westminster Abbey, erinnerte ich an diesen Streit mit den Worten:

»Newton gab uns Antworten. Hawking gab uns Fragen. Und Hawkings Fragen hören nicht auf, noch Jahrzehnte später zu Durchbrüchen zu führen. Wenn wir einst die Gesetze der Quantengravitation wirklich beherrschen werden und wenn wir die Geburt unseres Universums ganz und gar verstehen, dann wird das sehr wahrscheinlich daran liegen, dass wir auf den Schultern von Stephen Hawking stehen.«

So wie unser *annus mirabilis* 1974/1975 nur erst der Anfang für meine Gravitationswellen-Forschung war, so war es auch erst der Anfang für

Stephens Bemühungen, die Gesetze der Quantengravitation im Detail zu verstehen und herauszufinden, was diese Gesetze über die wahre Natur der Information und Zufälligkeit eines Schwarzen Loches aussagen. Was sagen diese Gesetze ferner über die wahre Natur der singulären Geburt unseres Universums und die wahre Natur der Singularitäten im Inneren von Schwarzen Löchern aus – über die wahre Natur der Geburt und des Todes der Zeit?

Das sind große Fragen. Sehr große Fragen.

Vor großen Fragen schrecke ich zurück. Ich habe nicht genug Kenntnisse, nicht genug Weisheit oder Selbstvertrauen, um es mit ihnen aufzunehmen. Stephen war da ganz anders: Er fühlte sich von großen Fragen immer angezogen, egal ob sie in seiner Wissenschaft tief verwurzelt waren oder nicht. Und er *hatte* die nötigen Kenntnisse, die Weisheit und das Selbstvertrauen.

Dieses Buch ist eine Auswahl und ein Abriss seiner Antworten auf die großen Fragen – Antworten, an denen er bis zu seinem Tod noch arbeitete.

Stephens Antworten auf die ersten fünf Fragen sowie auf die zehnte sind tief in seiner Wissenschaft verwurzelt:

- Gibt es einen Gott?
- Wie hat alles angefangen?
- Können wir die Zukunft vorhersagen?
- Was befindet sich in einem Schwarzen Loch?
- Sind Zeitreisen möglich?
- Wie gestalten wir unsere Zukunft?

In diesen Kapiteln stellt Stephen ausführlich die Themen dar, die ich in dieser Einführung kurz angerissen habe, und außerdem noch viel, viel mehr.

Seine Antworten auf die anderen vier großen Fragen können hingegen nicht fundiert in seiner Wissenschaft verankert werden:

- Werden wir auf der Erde überleben?
- Gibt es anderes intelligentes Leben im Universum?

- Sollten wir den Weltraum besiedeln?
- Wird uns Künstliche Intelligenz überflügeln?

Doch sind seine Antworten, wie nicht anders zu erwarten, voller Weisheit und Kreativität.

Ich hoffe, Sie werden seine Antworten so anregend und scharfsinnig finden wie ich. Viel Freude bei der Lektüre!

Kip S. Thorne
Juli 2018



Warum wir die großen Fragen stellen müssen

Schon immer wollten die Menschen die großen Fragen beantworten. Woher kommen wir? Was ist der Sinn und Plan hinter allem? Gibt es jemanden da draußen? Die Schöpfungsgeschichten der Vergangenheit erscheinen heute als wenig brauchbar und glaubhaft. Sie sind durch eine Vielzahl von Erklärungsversuchen ersetzt worden, die – von *New Age* bis *Star Trek* – ins Reich des Aberglaubens gehören. Allerdings kann echte Wissenschaft viel befremdlicher sein als Science-Fiction – und sehr viel befriedigender.

Ich bin Naturwissenschaftler und als solcher zutiefst von Physik, Kosmologie, dem Universum und der Zukunft der Menschheit fasziniert. Von meinen Eltern bin ich dazu erzogen worden, meiner grenzenlosen Neugier zu folgen und, wie mein Vater, zu forschen und nach Antworten auf die vielen Fragen zu suchen, die die Wissenschaft uns aufgibt. Mein Leben habe ich damit verbracht, in meinem Denken kreuz und quer durch das Universum zu reisen. Dabei habe ich versucht, mithilfe der Theoretischen Physik einige der fundamentalen Fragen zu beantworten. Einst dachte ich sogar, das Ende der Physik absehen und erkennen zu können – heute hingegen denke ich, dass das Wunder des Entdeckens noch lange nach meinem Tod fort dauern wird. Wir stehen zwar kurz vor einigen dieser Antworten, besitzen sie aber noch nicht.

Bedauerlicherweise glauben die meisten Menschen, echte Wissenschaft sei zu schwierig und zu kompliziert für sie. Das sehe ich ganz anders. Die fundamentalen Gesetze zu erforschen, die das Universum regieren, würde mehr Zeit erfordern, als die meisten Menschen haben. Unsere Welt käme rasch zum Stillstand, wenn wir alle versuchten, uns mit Theoretischer Physik zu beschäftigen. Aber die meisten Menschen können die grundlegenden Ideen verstehen und einordnen, wenn sie ihnen klar und ohne Gleichungen

dargelegt werden, was nach meiner Überzeugung möglich ist und was ich mein Leben lang mit großer Freude versucht habe.

Es war eine wunderbare Zeit, zu leben und in der Theoretischen Physik zu forschen. In den vergangenen 50 Jahren hat sich unser Bild vom Universum erheblich verändert, und *ich bin glücklich, wenn ich dazu einen Beitrag geleistet habe*. Eine der großen Offenbarungen des Weltraumzeitalters bestand darin, dass es der Menschheit die Sicht auf sich selbst ermöglichte. Betrachten wir die Erde vom All aus, sehen wir uns selbst als Ganzes. Wir nehmen die Einheit wahr und nicht das Trennende. Ein einfaches Bild mit einer unwiderlegbaren Botschaft: *ein Planet, eine Menschheit*.

Ich möchte mich all denen anschließen, die unmittelbares Handeln bei entscheidenden Herausforderungen unserer globalen Gemeinschaft einfordern. Ich hoffe, dass sich, wenn ich gegangen bin, Menschen mit Einfluss und Macht finden, die Kreativität, Mut und Führungsqualitäten besitzen. Mögen sie die Kraft haben, die Ziele der nachhaltigen Entwicklung zu erreichen, und nicht aus Eigennutz handeln, sondern im Interesse des Gemeinwohls. Ich weiß nur zu gut, wie kostbar die Zeit ist. Nutzt den Augenblick! Handelt jetzt!

Über mein Leben habe ich bereits geschrieben, und einige meiner früheren Erfahrungen sind es, so hoffe ich, wert, erneut aufgegriffen zu werden, besonders wie mich zeit meines Lebens die großen Fragen fasziniert haben.

Auf den Tag genau 300 Jahre nach Galileo Galileis Tod wurde ich geboren, und allzu gern würde ich mir einbilden, dieser Zufall sei nicht ohne Einfluss auf mein späteres wissenschaftliches Leben gewesen. Doch ich schätze, rund 200000 Kinder wurden am selben Tag geboren, und ich habe keine Ahnung, ob sich eines von ihnen später für Astronomie interessierte.

Aufgewachsen bin ich in einem hohen, schmalen Haus im Londoner Stadtteil Highgate, das meine Eltern während des Zweiten Weltkriegs günstig erstanden hatten, als alle glaubten, London würde unter dem Bombenhagel dem Erdboden gleichgemacht. Tatsächlich schlug eine V2-Rakete nur wenige Häuser entfernt ein. Zu diesem Zeitpunkt war ich mit meiner Mutter und meiner Schwester unterwegs; mein Vater blieb glücklicherweise unverletzt. Noch jahrelang gab es ein Stück weiter in unserer Straße einen großen

Bombenkrater, in dem ich oft mit meinem Freund Howard spielte. Wir untersuchten die Folgen der Explosion mit derselben Neugier, die mich mein ganzes Leben lang antrieb. 1950 wurde der Arbeitsplatz meines Vaters an den nördlichen Stadtrand von London verlegt, in das neu erbaute *National Institute for Medical Research* in Mill Hill, daher zog meine Familie in die nahegelegene Domstadt Saint Albans. Man schickte mich auf die *High School for Girls*, die ungeachtet ihres Namens Jungen bis zum Alter von zehn Jahren duldeten. Später ging ich auf die *St Albans School*. Ich bin über einen mittleren Platz in der Klasse nicht hinausgekommen – es war eine sehr intelligente Klasse –, meine Klassenkameraden aber gaben mir den Spitznamen »Einstein«, sahen also offenbar irgendwie Anlass zur Hoffnung. Als ich zwölf war, wettete einer meiner Freunde um eine Tüte Bonbons, dass aus mir nie etwas werden würde.

Ich hatte sechs oder sieben gute Freunde in St Albans. Ich weiß noch, dass wir lange Diskussionen und Streitgespräche über Gott und die Welt führten – von funkgesteuerten Modellen bis zur Religion. Unter anderem ging es dabei auch um den Ursprung des Universums und um die Frage, ob ein Gott notwendig gewesen sei, um das Universum zu erschaffen und in Gang zu setzen. Ich hatte gehört, dass das Licht ferner Galaxien zum roten Ende des Spektrums verschoben wird und dass man daraus schloss, das Universum expandiere. Aber ich war mir sicher, es müsse einen anderen Grund für die Rotverschiebung geben. Vielleicht wurde das Licht auf seinem Weg zu uns müde und röter. Ein Universum, das im Wesentlichen unveränderlich und von ewiger Dauer war, erschien mir als sehr viel wahrscheinlicher. (Erst Jahre später, nach der Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung – damals arbeitete ich schon seit zwei Jahren an meiner Promotion –, wurde mir klar, dass ich mich geirrt hatte.)

Stets hat mich außerordentlich fasziniert, wie Geräte funktionieren, deshalb nahm ich sie oft auseinander, hatte aber größte Schwierigkeiten, sie wieder zusammenzusetzen. Meine praktischen Fähigkeiten sind immer hinter meinen theoretischen Begabungen zurückgeblieben. Mein Vater bestärkte mich in meinen naturwissenschaftlichen Interessen und legte großen Wert darauf, dass ich in Oxford oder Cambridge studierte. Er selbst hatte am *University College* in Oxford studiert, wollte also gern, dass ich mich dort bewarb. Damals lehrte am University College niemand Mathematik, daher hatte ich kaum eine andere Möglichkeit, als mich um ein Stipendium in

Naturwissenschaften zu bewerben. Als ich es bekam, war ich völlig überrascht.

Zu meiner Zeit war es in Oxford verpönt, fleißig zu sein. Man war brillant, ohne zu arbeiten, oder man gab sich mit seinen Grenzen und einem mehr als bescheidenen Examen zufrieden. Für mich war das ein willkommener Vorwand, ganz wenig zu arbeiten. Ich bin nicht stolz darauf, sondern versuche nur, meine Einstellung zu beschreiben, die von den meisten meiner Kommilitonen geteilt wurde.

Eine Folge meiner Krankheit war, dass sich das alles änderte. Wenn Sie mit einem frühen Tod rechnen müssen, wird Ihnen klar, dass Sie noch viele Dinge tun möchten, bevor Ihr Leben vorbei ist.

Da ich nicht viel gearbeitet hatte, beabsichtigte ich, in meiner Abschlussprüfung nach Möglichkeit alle Fragen zu vermeiden, die Faktenwissen verlangten, und mich stattdessen auf Probleme der Theoretischen Physik zu konzentrieren. Aber in der Nacht vor dem Examen fand ich keinen Schlaf und schnitt daher nicht besonders gut ab. Da man sich nicht entscheiden konnte, ob es eine Eins oder eine Zwei war, musste ich mich einer mündlichen Prüfung unterziehen, die über meine Note entscheiden sollte. In der Prüfung wurde ich nach meinen Plänen gefragt. Ich erwiderte, ich beabsichtige, in der Forschung zu arbeiten. Wenn ich eine Eins erhielte, ginge ich nach Cambridge, bei einer Zwei bliebe ich in Oxford. Ich bekam eine Eins.

Nach dem Abschlussexamen konnte man sich am College um eine Reihe kleiner Reisestipendien bewerben. Da ich glaubte, umso bessere Chancen zu haben, je weiter das Reiseziel entfernt war, entschied ich mich für den Iran. Im Sommer 1962 fuhr ich mit dem Zug nach Istanbul, dann nach Erzurum in der Osttürkei, von dort nach Täbris, Teheran, Isfahan, Schiraz und Persepolis, die Hauptstadt der antiken persischen Könige. Auf der Rückreise wurden mein Reisegefährte Richard Chiin und ich in Buinzahra von einem Erdbeben der Stärke 7,1 überrascht, das 12000 Todesopfer forderte. Augenscheinlich war ich nicht weit vom Epizentrum entfernt, wusste das aber nicht, weil ich zu diesem Zeitpunkt krank in einem Bus saß, der über die iranischen Straßen holperte, und fürchterlich durchgerüttelt wurde.

Wir verbrachten mehrere Tage in Täbris, wo ich mich von einer schweren Ruhr und einer gebrochenen Rippe erholte, die ich mir zugezogen hatte, als ich im Bus gegen den Vordersitz geschleudert worden war. Noch immer

wussten wir nichts von der Katastrophe, weil wir kein Farsi sprachen. Erst in Istanbul erfuhren wir, was geschehen war. Ich schickte eine Postkarte an meine Eltern, die seit zehn Tagen ängstlich auf eine Nachricht warteten, denn zuletzt hatten sie gehört, dass ich Teheran am Tage des Erdbebens in Richtung des Katastrophengebiets verlassen hatte. Trotz des Erdbebens habe ich viele schöne Erinnerungen an meine Zeit im Iran. Es heißt, wer zu neugierig auf die Welt ist, kann sich in Gefahr bringen – auf mich traf es wahrscheinlich nur dieses eine Mal in meinem Leben zu.

Als ich im Oktober 1962 in Cambridge am Fachbereich für Angewandte Mathematik und Theoretische Physik meine Arbeit aufnahm, war ich 20. Ich wollte bei Fred Hoyle studieren, dem bekanntesten britischen Astronomen seiner Zeit. Ich sage Astronom, weil die Kosmologie damals noch kaum als eigene Disziplin anerkannt wurde. Doch Hoyle hatte bereits genügend Studenten, daher wurde ich zu meiner großen Enttäuschung Dennis Sciama zugewiesen, von dem ich noch nie gehört hatte. Doch es war gut so, denn als Student von Hoyle wäre ich gezwungen gewesen, seine Steady-State-Theorie zu verteidigen, eine Aufgabe, die schwerer gewesen wäre, als den Brexit zu verhandeln. So begann ich meine Arbeit mit der Lektüre alter Lehrbücher über die Allgemeine Relativitätstheorie – und sah mich, wie immer, mit den größten Fragen konfrontiert.

Wie einige von Ihnen vielleicht in dem Film gesehen haben, in dem Eddie Redmayne eine außerordentlich gutaussehende Version meiner selbst spielt, bemerkte ich in meinem dritten Jahr in Oxford, dass ich unbeholfener wurde. Ohne ersichtlichen Grund fiel ich zwei oder drei Mal zu Boden. Offensichtlich stimmte irgendetwas nicht. Ein mürrischer Arzt riet mir, die Finger vom Bier zu lassen.

Als ich im Winter nach Cambridge kam, war es sehr kalt. Während der Weihnachtsferien, die ich zu Hause verbrachte, konnte meine Mutter mich dazu überreden, auf dem See in Saint Albans Schlittschuh zu laufen, obwohl ich wusste, dass ich dem nicht gewachsen war. Ich stürzte und hatte große Mühe, wieder aufzustehen. Da erkannte meine Mutter, dass etwas nicht in Ordnung war, und ging mit mir zum Arzt.

Wochenlang blieb ich im St Bartholomew's Krankenhaus und wurde einer Menge Tests unterzogen. 1962 waren diese Untersuchungen noch etwas primitiver als heute. Man entnahm meinem Arm eine Muskelprobe, befestigte Elektroden an meinem Körper und injizierte ein Kontrastmittel in mein

Rückgrat, das die Ärzte unter dem Röntgenapparat auf seinem Weg nach oben und nach unten beobachteten, während mein Bett gekippt wurde. Was mir tatsächlich fehlte, sagten sie mir nicht, aber ich erriet genug, um zu erkennen, dass es ziemlich schlecht um mich stand, daher verspürte ich auch nicht den Wunsch, genauer nachzufragen. Aus den Gesprächen der Ärzte entnahm ich nur so viel, dass »es«, was immer es war, nur schlimmer werden konnte und dass sich nichts dagegen tun ließ, außer mir Vitamine zu verabreichen. Der Arzt, der die Tests durchführte, ließ mich wie eine heiße Kartoffel fallen; ich sah ihn nie wieder. Seiner Meinung nach war ich ein hoffnungsloser Fall.

Irgendwann muss man mir die Diagnose Amyotrophe Lateralsklerose (ALS) mitgeteilt haben, eine Krankheit, bei der die Nervenzellen des Gehirns und des Rückenmarks zuerst verkümmern und dann vernarben oder sich verhärten. Außerdem erfuhr ich, dass Menschen mit dieser Erkrankung allmählich die Fähigkeit verlieren, ihre Bewegungen zu steuern, zu sprechen, zu essen und schließlich zu atmen.

Meine Krankheit schien rasch voranzuschreiten. Verständlicherweise deprimierte mich das. Ich sah keinen Sinn mehr darin, meine Promotionsforschung fortzusetzen, da ich nicht wusste, ob ich lange genug leben würde, um sie zu beenden. Doch dann verlangsamte sich der Krankheitsverlauf, und ich wandte mich wieder begeistert meiner Arbeit zu. Jetzt wurde jeder neue Tag zum Geschenk, nachdem meine Erwartungen auf null gesunken waren. Ich begann, mich über alles zu freuen, was ich hatte. *Wo Leben ist, da ist auch Hoffnung.*

Und natürlich gab es da noch diese junge Frau namens Jane, die ich auf einer Party kennengelernt hatte. Sie war fest davon überzeugt, dass wir gemeinsam gegen meine Krankheit kämpfen könnten. Ihre Zuversicht gab mir Hoffnung. Als wir uns verlobten, hob sich meine Stimmung, und mir wurde klar, dass ich mir eine Stellung besorgen und meine Promotion abschließen musste, wenn wir heiraten wollten. Wie immer blieben die großen Fragen mein Ansporn. Ich begann zielstrebig zu arbeiten und hatte Freude daran.

Um während des Studiums für meinen Lebensunterhalt zu sorgen, bewarb ich mich um ein Forschungsstipendium am Gonville & Caius College in Cambridge. Zu meiner großen Überraschung entschied man sich für mich, und seither bin ich ein Caius-Fellow. Dieses Stipendium wurde zu einem

Wendepunkt in meinem Leben: Ich konnte meine Forschung trotz meiner wachsenden Behinderung fortsetzen. Darüber hinaus ermöglichte das Stipendium Jane und mir im Juli 1965 zu heiraten. Unser erstes Kind, Robert, wurde geboren, als wir zwei Jahre verheiratet waren. Unser zweites Kind, Lucy, kam drei Jahre später zur Welt. 1979 bekamen wir unser drittes Kind, Timothy.

Als Vater versuchte ich immer, deutlich zu machen, wie wichtig es ist, alle Fragen zu äußern, die man hat. Mein Sohn Tim erzählte einst in einem Interview, er habe einmal eine Frage gestellt, die ihm damals wohl ein wenig dumm vorkam. Er wollte wissen, ob es viele winzige, weitverstreute Universen gebe. Ich hätte ihm geantwortet, er solle nie Angst haben, einen Gedanken oder eine Hypothese anderen mitzuteilen oder überhaupt zu äußern, ganz gleich, wie *beknackt* – Timothys Formulierung, nicht meine – sie erscheine.

Anfang der 1960er Jahre lautete die große Frage in der Kosmologie: *Hat das Universum einen Anfang?* Viele Wissenschaftler lehnten den Gedanken instinktiv ab, weil sie glaubten, ein Moment der Schöpfung sei ein Punkt, über den die Wissenschaft nichts mehr aussagen könne. Man müsse sich an die Religion und die Hand Gottes halten, um zu bestimmen, wie das Universum begonnen haben könnte. Zweifellos war das eine Frage von fundamentaler Bedeutung und damit genau das, was ich brauchte, um meine Dissertation zu beenden.

Roger Penrose hatte gezeigt, dass, sobald ein sterbender Stern sich bis zu einem bestimmten Radius zusammenziehe, er dann unvermeidlich zu einer Singularität kollabieren müsse, das heißt zu einem Punkt werde, an dem Raum und Zeit endeten. Wir wussten also: Nichts kann einen massereichen kalten Stern daran hindern, unter seiner eigenen Gravitation zusammenzustürzen, bis er eine Singularität von unendlicher Dichte erreicht. Mir wurde klar: Ähnliche Argumente müssten sich auf die Expansion des Universums anwenden lassen. In diesem Fall würde ich beweisen können, dass es Singularitäten gab, an denen die Raumzeit einen Anfang hatte.

Den entscheidenden Einfall hatte ich 1970, einige Tage nach der Geburt meiner Tochter Lucy. Als ich eines Abends zu Bett ging – ein Vorgang, der

infolge meiner Behinderung sehr langsam vonstattengeht –, erkannte ich, dass die Strukturtheorie, die ich für die Singularitätstheoreme entwickelt hatte, sich auf Schwarze Löcher anwenden ließ. Wenn die Allgemeine Relativitätstheorie richtig und die Energiedichte positiv ist, nimmt die Oberfläche des Ereignishorizonts – der Grenze eines Schwarzen Loches – stets zu, wenn zusätzliche Materie oder Strahlung hineinfällt. Wenn ferner zwei Schwarze Löcher zusammenstoßen und zu einem einzigen Schwarzen Loch verschmelzen, ist die Fläche des Ereignishorizonts um das resultierende Schwarze Loch größer als die Summe der Flächen der Ereignishorizonte um die ursprünglichen Schwarzen Löcher.

Es war ein Goldenes Zeitalter, in dem wir die meisten wichtigen Probleme in der Theorie Schwarzer Löcher lösten, bevor es noch irgendwelche empirischen Anhaltspunkte für Schwarze Löcher gab. Tatsächlich waren wir so erfolgreich mit der klassischen Allgemeinen Relativitätstheorie, dass ich mich 1973 nach der Veröffentlichung des Buchs *The Large Scale Structure of Space-Time*, das ich zusammen mit George Ellis verfasst hatte, beinahe beschäftigungslos fühlte.

Roger Penrose und ich hatten gezeigt, dass die Allgemeine Relativitätstheorie bei Singularitäten nicht mehr gilt. Daher lag es nahe, als Nächstes die Allgemeine Relativitätstheorie – die Theorie der sehr großen Dinge – mit der Quantentheorie – der Theorie der sehr kleinen Dinge – zu verbinden. Vor allem fragte ich mich, ob es Atome geben könnte, deren Kern ein Schwarzes Loch bildet, das im ganz frühen Universum entstanden ist.

Meine Untersuchungen offenbarten einen tiefen und unerwarteten Zusammenhang zwischen Gravitation und Thermodynamik, der Wärmelehre, und lösten damit ein Paradox, über das seit 30 Jahren ohne großen Erfolg gestritten worden war: Wie kann die Strahlung, die von einem schrumpfenden Schwarzen Loch übrigbleibt, alle Informationen über das enthalten, was das Schwarze Loch ausmacht? Ich entdeckte, dass die Informationen nicht verloren sind, aber auch nicht in nützlicher Form zurückgegeben werden – so, als würde man eine Enzyklopädie verbrennen und behielte als ›Information‹ nur den Rauch und die Asche.

Um dieses Problem zu lösen, untersuchte ich, wie Quantenfelder oder Teilchen von einem Schwarzen Loch gestreut werden. Ich erwartete, dass ein Teil einer Welle absorbiert und der Rest gestreut würde. Doch zu meiner großen Überraschung stellte ich fest, dass eine Emission vom Schwarzen

Loch selbst auszugehen schien. Zunächst vermutete ich, mir sei ein Berechnungsfehler unterlaufen. Schließlich überzeugte ich mich doch davon, dass das Ergebnis richtig sei, weil die Emission genau dem entsprach, was erforderlich war, um die Fläche des Horizonts mit der Entropie eines Schwarzen Loches gleichzusetzen. Diese Entropie, ein Maß für die Störung oder Unordnung eines Systems, ist in einer einfachen Formel

$$S = \frac{A k c^3}{4 G \hbar}$$

zusammengefasst, die die Entropie (S) durch die Fläche des Horizonts (A) und die drei fundamentalen Naturkonstanten ausdrückt:

S = Entropie des Schwarzen Loches
A = Oberfläche des Ereignishorizonts
c = Lichtgeschwindigkeit
k = Boltzmann-Konstante
G = Newtonsche Gravitationskonstante
 $\hbar$ = Plancksches Wirkungsquantum (dividiert durch 2π)

Die Emission dieser Wärmestrahlung aus einem Schwarzen Loch wird als *Hawking-Strahlung* bezeichnet, und ich bin stolz darauf, sie entdeckt zu haben. Doch davon später mehr.

1974 wurde ich zum Mitglied der Royal Society gewählt. Von dieser Wahl zeigten sich die Mitglieder meines Fachbereichs überrascht, weil ich jung und nur ein einfacher Forschungsassistent war. Drei Jahre später wurde ich bereits zum Professor berufen. Meine Arbeit über Schwarze Löcher hatte in mir die Hoffnung geweckt, wir könnten eine *Theorie von Allem* entdecken, und die Suche nach einer Antwort trieb mich an.

Im selben Jahr lud mein Freund Kip S. Thorne mich und meine junge Familie sowie einige Kollegen, die über die Allgemeine Relativitätstheorie arbeiteten, an das *California Institute of Technology (Caltech)* ein. In den vier Jahren zuvor hatte ich einen handbetriebenen Rollstuhl und ein blaues dreirädriges Elektroauto verwendet, das die Geschwindigkeit eines langsamen Radfahrers erreichte und in dem ich manchmal verbotenerweise

Beifahrer mitnahm. In Kalifornien wohnten wir unweit des Campus in einem Haus, das im Kolonialstil erbaut war, und dort nutzte ich zum ersten Mal einen elektrischen Rollstuhl. Er verschaffte mir ein beträchtliches Maß an Unabhängigkeit, besonders da in den Vereinigten Staaten Gebäude und Bürgersteige weit behindertengerechter angelegt sind als in Großbritannien.

Als wir 1975 vom Caltech zurückkehrten, fühlte ich mich zunächst ziemlich niedergeschlagen. Im Vergleich zu der Alles-ist-möglich-Haltung in Amerika schien mir hier alles entsetzlich eng und beschränkt zu sein. Die Landschaft draußen war damals infolge des Ulmensterbens mit toten Bäumen übersät, und überall wimmelte es von Liegedreirädern. Meine Stimmung besserte sich, als ich wahrnahm, dass meine Arbeit Erfolg hatte und ich 1979 auf den Lucasischen Lehrstuhl für Mathematik berufen wurde, jenen Lehrstuhl, den vor mir Sir Isaac Newton und Paul Dirac innegehabt hatten.

In den 1970er Jahren hatte ich vor allem über Schwarze Löcher gearbeitet, doch mein Interesse an der Kosmologie wurde erneut geweckt, als eine Theorie vorgeschlagen wurde, nach der das frühe Universum eine Periode rascher inflationärer Expansion durchlaufen hatte, in deren Verlauf seine Größe immer schneller zunahm, etwa so wie die Preise seit dem Brexit. Außerdem untersuchte ich mit Jim Hartle eine Zeit lang die Hypothese, dass das Universum vor dem Urknall gar »grenzenlos« gewesen sei.

Anfang der 1980er Jahre verschlechterte sich mein Gesundheitszustand. Ich litt unter längeren Hustenanfällen, mein Kehlkopf war geschwächt und ließ Nahrung in die Lungen gelangen, während ich aß. 1985, als ich das *CERN*, die *Europäische Organisation für Kernforschung*, in der Schweiz besuchte, bekam ich eine Lungenentzündung. Dieses Ereignis veränderte mein Leben von Grund auf.

Mit Blaulicht brachte man mich in das Kantonsspital in Luzern und schloss mich an ein Beatmungsgerät an. Die Ärzte teilten Jane mit, meine Krankheit sei nun so weit fortgeschritten, dass man nichts mehr für mich tun könne und es am besten sei, die Geräte abzuschalten und mein Leben zu beenden. Doch Jane weigerte sich und ließ mich mit einem Flugzeug ins Addenbrooke's Hospital in Cambridge transportieren.

Das war eine ungeheuer schwere Zeit für mich, wie Sie sich bestimmt vorstellen können, doch taten die Ärzte des Krankenhauses dankenswerterweise alles, um mir wieder in den Zustand vor meiner Reise in die Schweiz zu verhelfen. Da mein Kehlkopf noch immer Nahrung und

Speichel in meine Lungen gelangen ließ, mussten die Ärzte jedoch einen Luftröhrenschnitt (Tracheostomie) vornehmen. Wie sicherlich die meisten von Ihnen wissen, kann ein Patient nach einem Luftröhrenschnitt nicht mehr sprechen.

Die Stimme ist äußerst wichtig. Ist die Stimme stockend und schleppend, wie es meine war, hält man einen Menschen für geistig beeinträchtigt und behandelt ihn entsprechend.

Vor der Tracheostomie war meine Sprechweise so undeutlich, dass mich nur Menschen, die mich gut kannten, verstehen konnten. Sogar meine Kinder hatten Schwierigkeiten, mich zu verstehen, aber zumindest konnte ich mich verständigen. Nach der Tracheostomie bestand meine einzige Kommunikationsmöglichkeit darin, die Wörter zu buchstabieren, einen Buchstaben nach dem anderen, indem ich die Augenbrauen hochzog, wenn jemand auf den richtigen Buchstaben einer Buchstabierkarte zeigte.

Glücklicherweise hörte in Kalifornien ein Computerexperte namens Walt Woltosz von meinen Schwierigkeiten. Er ließ mir das Computerprogramm Equalizer zukommen, das er geschrieben hatte. Mithilfe dieses Programms konnte ich, indem ich einen Schalter in meiner Hand betätigte, ganze Wörter aus einer Reihe von Menüs auswählen, die auf dem Bildschirm eines Computers auftauchten, der auf meinem Rollstuhl montiert war. Dieses System wurde im Laufe der Jahre immer weiter entwickelt. Heute verwende ich das Programm Acat von Intel, das ich über einen kleinen Sensor in meiner Brille mittels meiner Wangenbewegungen steuere. Es verfügt über ein Handy, das mir den Zugriff aufs Internet ermöglicht. Ich darf wohl von mir behaupten, dass ich der bestvernetzte Mensch der Welt bin. Meinen ursprünglichen Sprachsynthesizer habe ich behalten, zum Teil, weil ich nie einen mit einer besseren Ausdrucksweise gehört habe, und zum Teil, weil ich mich heute mit dieser Stimme trotz ihres amerikanischen Akzents identifiziere.

Der Gedanke, ein populärwissenschaftliches Buch über das Universum zu schreiben, kam mir erstmals 1982, als ich an meiner *Keine-Grenzen-Theorie* arbeitete. Damit ließe sich, so hoffte ich, vielleicht eine bescheidene Summe verdienen, die zum Schulgeld meiner Kinder und zu den steigenden Kosten meiner Pflege beitragen könnte, aber der Hauptgrund war ein anderer: Ich wollte erklären, wie weit wir schon in unserem Verständnis des Universums gediehen waren, wie dicht wir möglicherweise vor einer vollständigen

Theorie standen, die das Universum und alles, was es enthielt, beschreiben würde. Ich fand es nämlich nicht nur wichtig, Fragen zu stellen und sie zu beantworten. Als Wissenschaftler fühlte ich mich auch verpflichtet, der Welt mitzuteilen, was wir in Erfahrung gebracht hatten.

Passenderweise wurde *Eine kurze Geschichte der Zeit* am 1. April 1988 veröffentlicht. Tatsächlich sollte der Titel ursprünglich lauten: *From the Big Bang to Black Holes, a Short History of Time* («Vom Urknall zu Schwarzen Löchern, eine kurze Geschichte der Zeit»). Der Titel wurde gestrafft und *short in brief* verwandelt. Der Rest ist Geschichte.

Niemals hatte ich damit gerechnet, dass *Eine kurze Geschichte der Zeit* so erfolgreich sein würde. Zweifellos hat der menschliche Teil der Geschichte, also die Tatsache, dass ich es trotz meiner Behinderung zum theoretischen Physiker und Bestsellerautor gebracht hatte, zum Erfolg beigetragen. Nicht alle Leser werden das Buch beendet oder alles verstanden haben, was sie gelesen haben, aber sie haben sich zumindest mit einer der größten Fragen unserer Existenz auseinandergesetzt und begriffen, dass wir in einem Universum leben, das von rationalen Gesetzen bestimmt wird – Gesetzen, die wir mithilfe der Naturwissenschaft entdecken und verstehen können.

Für meine Kollegen bin ich ein Physiker wie jeder andere, aber für das breite Publikum vermutlich der bekannteste Wissenschaftler der Welt. Teilweise liegt es daran, dass Naturwissenschaftler, von Einstein abgesehen, keine berühmten Rockstars sind, und teilweise daran, dass ich dem Klischee des behinderten Genies entspreche. Mit Perücke und Sonnenbrille kann ich mich nicht verkleiden – der Rollstuhl verrät mich. Bekannt und leicht erkennbar zu sein, hat seine Vor- und Nachteile – aber die Nachteile werden durch die Vorteile mehr als aufgewogen: Die Menschen scheinen sich aufrichtig zu freuen, mich zu sehen. Nie hatte ich so viele Zuhörer wie 2012 bei meiner Eröffnungsrede zu den Paralympics in London.

Ich habe auf diesem Planeten ein außerordentliches Leben geführt, während ich gleichzeitig mithilfe meines Verstandes und der physikalischen Gesetze durch das Universum gereist bin. Dabei durcheilte ich die fernsten Regionen unserer Galaxie, tauchte in Schwarze Löcher ein und ging zurück bis zum Anfang der Zeit. Auf der Erde habe ich Hochs und Tiefs, Unruhe und

Frieden, Erfolg und Leiden erlebt, war reich und arm, gesund an allen Gliedern und behindert, wurde gefeiert und kritisiert, aber niemals ignoriert. Durch meine Arbeit hatte ich das außerordentliche Privileg, zu unserem Verständnis des Universums beitragen zu können. Doch es wäre ein wahrhaft leeres Universum ohne die Menschen, die ich liebe und die mich lieben. Ohne sie würden mir die Wunder des Kosmos nicht das Geringste bedeuten.

Im Grunde sind wir Menschen selbst nur Ansammlungen fundamentaler Teilchen der Natur. Umso größer ist der Triumph, dass wir fähig waren, die Gesetze zu verstehen, die uns und das Universum bestimmen. Ich möchte mit allen Menschen meine Begeisterung für diese großen Fragen und meinen Enthusiasmus für dieses Streben nach den großen Fragen teilen.

Eines Tages werden wir, so hoffe ich, die Antworten auf alle diese Fragen finden. Aber es gibt auf dem Planeten noch andere Herausforderungen, andere große Probleme, die beantwortet werden müssen. Dafür brauchen wir eine junge Generation, die interessiert, engagiert und wissenschaftlich gebildet ist. Wie werden wir eine ständig wachsende Weltbevölkerung ernähren? Für sauberes Wasser sorgen, erneuerbare Energie erzeugen, Krankheiten verhindern und heilen sowie die globale Klimaerwärmung drosseln? Wissenschaft und Technik werden, so meine Hoffnung, Antworten auf diese Fragen liefern, aber es werden kenntnisreiche und verständnisvolle Menschen erforderlich sein, um diese Lösungen verwirklichen zu können.

Lasst uns darum kämpfen, dass jede Frau und jeder Mann die Chance bekommt, ein gesundes und sicheres Leben voller Chancen und Liebe zu führen. Wir alle sind Zeitreisende, die gemeinsam auf dem Weg in die Zukunft sind. Lasst uns also gemeinsam daran arbeiten, aus dieser Zukunft einen Ort zu machen, den wir gerne besuchen.

Seid tapfer, neugierig, entschlossen und überwindet alle Widrigkeiten! Wir können es schaffen!

***Was für einen Traum hatten Sie als Kind?
Ist er in Erfüllung gegangen?***

Ich wollte ein großer Wissenschaftler werden. Doch ich war kein besonders guter Schüler und kam kaum jemals über das Mittelfeld meiner Klasse hinaus. Meine Arbeiten waren unordentlich, meine Handschrift unlesbar. Aber ich hatte gute Freunde in der Schule. Wir diskutierten über alles Mögliche und besonders über den Ursprung des Universums. Da begann mein Traum, und ich bin sehr glücklich, dass er in Erfüllung gegangen ist.

Gibt es einen Gott?

Immer öfter beantwortet die Naturwissenschaft Fragen, die einst in die Zuständigkeit der Religion fielen. Die Religion war ein früher Versuch, Antworten auf die Fragen zu finden, die wir alle stellen: Warum sind wir hier, woher kommen wir? Vor langer Zeit lautete die fast immer gleiche Antwort: Die Götter haben alles geschaffen. Die Welt war ein furchteinflößender Ort, daher glaubten selbst so hartgesottene Kerle wie die Wikinger an übernatürliche Wesen, um sich Naturerscheinungen wie Gewitter, Stürme oder Sonnen- und Mondfinsternisse zu erklären. Heute liefert die Naturwissenschaft bessere und schlüssigere Antworten, aber es wird immer Menschen geben, die sich an die Religion klammern, weil sie Trost spendet und weil sie der Wissenschaft nicht trauen oder sie nicht verstehen.

Vor einigen Jahren titelte die *Times* auf ihrer ersten Seite: »Hawking: ›Gott hat das Universum nicht erschaffen.«« Der Artikel war illustriert und zeigte einen grollenden Gott auf einer Zeichnung von Michelangelo. Von mir druckten sie ein Foto ab, auf dem ich ziemlich selbstgefällig dreinsah. Die Bilder waren so angeordnet, dass es aussah, als würden Gott und ich ein Duell austragen. Dabei habe ich gar nichts gegen Gott. Auf keinen Fall möchte ich den Eindruck erwecken, in meiner Arbeit gehe es darum, die Existenz Gottes zu beweisen oder zu widerlegen. Meine Forschung hat zum Ziel, ein rationales Bezugssystem zu finden, um das Universum, das uns umgibt, zu verstehen.

Jahrhundertlang glaubte man, behinderten Menschen wie mir sei von Gott ein Fluch auferlegt worden. Nun, ich halte es durchaus für möglich, dass ich irgendjemanden dort oben erzürnt habe, aber ich ziehe es doch vor zu denken, dass alles auch ganz anders erklärt werden kann, nämlich durch die

Naturgesetze. Wenn Sie, wie ich, an die Wissenschaft glauben, gehen Sie auch davon aus, dass es bestimmte Gesetze gibt, die unter allen Umständen gelten. Wenn Sie möchten, können Sie sagen, die Gesetze seien ein Werk Gottes, aber dann handelt es sich eher um eine Definition Gottes als um einen Beweis für seine Existenz.

Ungefähr 300 v. Chr. faszinierten Finsternisse einen Philosophen namens Aristarch von Samos, vor allem Mondfinsternisse. Er besaß die Kühnheit zu fragen, ob sie wirklich von den Göttern verursacht würden. Aristarch war ein echter wissenschaftlicher Pionier. Nach einem sorgfältigen Studium des Himmels gelangte er zu einer mutigen Schlussfolgerung: Er hatte erkannt, dass die Finsternis in Wirklichkeit der Schatten der Erde war, der über den Mond wanderte, also kein göttliches Ereignis sich vollzog. Durch diese Entdeckung von überkommenen Vorstellungen befreit, fand er heraus, was sich wirklich über seinem Kopf abspielte. Mithilfe von Strichzeichnungen veranschaulichte er die tatsächliche Beziehung zwischen Sonne, Erde und Mond. Diese Erkenntnis führte ihn zu noch bemerkenswerteren Schlussfolgerungen. Denn er leitete daraus ab, nicht die Erde sei der Mittelpunkt des Universums, wie damals allgemein angenommen wurde, sondern die Erde umkreise die Sonne. Tatsächlich lassen sich durch diese Konstellation alle Finsternisse erklären: Wirft der Mond seinen Schatten auf die Erde, dann ist das eine Sonnenfinsternis. Verschattet die Erde den Mond, handelt es sich um eine Mondfinsternis.

Aristarch ging noch einen Schritt weiter. Er behauptete nämlich, Sterne seien keine Risse in der »Leinwand« des Himmels, wie seine Zeitgenossen glaubten, sondern andere Sonnen wie die unsere, nur sehr viel weiter entfernt. Wie erstaunlich muss diese Erkenntnis gewesen sein: Das Universum ist eine Maschine, die bestimmten Prinzipien oder Gesetzen gehorcht – Gesetzen, die vom menschlichen Verstand begriffen werden können.

Die Entdeckung dieser Gesetze, davon bin ich überzeugt, war die größte Leistung der Menschheit, denn diese Naturgesetze – wie wir sie heute nennen – zeigen uns, ob wir einen Gott brauchen, um das Universum zu erklären. Die Naturgesetze beschreiben, wie sich die Himmelskörper, Objekte, Gegenstände, kurzum alle Dinge in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft tatsächlich verhalten.

Im Tennis fliegt der Ball immer genau dorthin, wo er nach der Vorhersage der Gesetze landen muss. Hier wirken außerdem noch viele andere Gesetze

mit. Sie bestimmen alles, was vor sich geht – von der Energie des Schlages, die in den Muskeln der Spieler erzeugt wird, bis hin zu der Geschwindigkeit, mit der das Gras unter ihren Füßen wächst. Doch wirklich entscheidend ist die Tatsache, dass diese physikalischen Gesetze nicht nur unveränderlich, sondern auch universell sind. Neben ihrer Zuständigkeit für die Flugbahn eines Balls gelten sie auch für die Bewegung eines Planeten und jedes anderen Objekts im Universum. Im Gegensatz zu den Gesetzen, die von Menschen gemacht werden, können die Naturgesetze nicht gebrochen werden – daher sind sie so mächtig und, vom religiösen Standpunkt aus betrachtet, so brisant.

Wenn Sie mit mir davon ausgehen, dass die Naturgesetze unveränderlich sind, ist es nur ein kleiner Schritt zur Frage: Welche Rolle bleibt dann für Gott? Das ist ein entscheidender Aspekt des Gegensatzes zwischen Naturwissenschaft und Religion, und obwohl meine Ansichten häufig in den aktuellen Schlagzeilen waren, handelt es sich in Wirklichkeit um einen sehr alten Konflikt. Also könnte man Gott als die Verkörperung der Naturgesetze definieren. Allerdings entspräche das nicht der Vorstellung, die sich die meisten Menschen von Gott machen. Sie denken an ein menschenähnliches Wesen, zu dem sie eine persönliche Beziehung unterhalten können. Eine Annahme, die höchst unwahrscheinlich ist, wenn Sie sich die ungeheure Größe des Universums anschauen und bedenken, wie unbedeutend und zufällig menschliches Leben im Universum ist.

Ich verwende das Wort »Gott« wie Einstein in einem unpersönlichen Sinn für die Naturgesetze. Folglich kennt, wer die Naturgesetze kennt, die Gedanken Gottes. Meine Vorhersage lautet: Wir werden am Ende dieses Jahrhunderts wissen, was Gott denkt.

Der letzte verbleibende Bereich, den die Religion noch für sich beanspruchen kann, ist der Ursprung des Universums, aber selbst hier macht die Wissenschaft Fortschritte und dürfte schon bald mit Gewissheit beschreiben können, wie das Universum angefangen hat.

Ich habe ein Buch veröffentlicht, das ziemliches Aufsehen erregte, weil ich darin fragte, ob Gott das Universum geschaffen habe. Weil ein Wissenschaftler sich zu Fragen der Religion geäußert hatte, regten sich die Leute auf. Dabei habe ich gar nicht die Absicht, irgendjemandem zu sagen, was er glauben soll, aber ob es Gott gibt, ist für mich eine berechtigte Frage im Bereich der Wissenschaft. Schließlich lässt sich kaum etwas

Wichtigeres – oder Fundamentaleres – denken als das Rätsel, was oder wer das Universum geschaffen hat und kontrolliert.

Ich denke, das Universum ist spontan aus nichts entstanden, aber ganz in Übereinstimmung mit den Naturgesetzen. Dabei ist die physikalische Grundannahme der wissenschaftliche Determinismus. Ist zu einem gegebenen Zeitpunkt der Zustand des Universums bekannt, legen die wissenschaftlichen Gesetze fest, wie es sich weiterentwickelt. Diese Gesetze mögen von Gott erlassen worden sein oder nicht, aber er kann nicht eingreifen, um die Gesetze zu brechen, andernfalls wären es keine Gesetze. Das lässt Gott immer noch die Freiheit, den Ausgangszustand des Universums zu wählen, aber selbst zu diesem Zeitpunkt scheint es Gesetze geben zu können. Und damit hätte Gott überhaupt keine Freiheit mehr.

Trotz der Komplexität und Vielfalt des Universums stellt sich heraus, dass man nur drei Zutaten braucht. Stellen wir uns vor, wir könnten sie in einer Art kosmischem Kochbuch auflisten. Welche drei Zutaten brauchen wir also, um ein Universum zuzubereiten? Die erste ist *Materie* – Stoff, der Masse hat. Materie gibt es überall um uns herum, in dem Boden zu unseren Füßen und draußen im All. Staub, Stein, Eis, Flüssigkeiten. Riesige Gaswolken, massereiche Sternspiralen – jede enthält Milliarden von Sonnen und erstreckt sich über unvorstellbare Entfernungen.

Die zweite Zutat, die Sie brauchen, ist *Energie*. Auch ohne jemals darüber nachgedacht zu haben, wissen wir alle, was Energie ist. Etwas, dem wir jeden Tag begegnen. Schauen Sie zur Sonne empor, und Sie fühlen die Energie auf Ihrem Gesicht: Energie, die von einem Stern in einer Entfernung von 150 Millionen Kilometern erzeugt wird. Energie durchdringt das Universum und speist die Prozesse, die es zu einem dynamischen, in ewigem Wandel befindlichen Ort machen.

Damit haben wir *Materie* und *Energie*. Als Drittes brauchen wir zum Bau eines Universums noch *Raum*. Viel Raum. Für das Universum lassen sich viele Bezeichnungen finden – ehrfurchtgebietend, erhaben, gewaltig –, aber eines ist es nicht: beengt. Egal, wohin wir schauen, wir sehen Raum, mehr Raum und noch mehr Raum. Raum, der sich in alle Richtungen erstreckt. Raum, so unfassbar groß, dass einem schwindelig wird. Da stellt sich die Frage, wo so viel Materie, Energie und Raum herkommen. Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts hatten wir keine Ahnung.

Die Antwort ergab sich aus den Erkenntnissen des vermutlich

bemerkenswertesten Wissenschaftlers, der je gelebt hat. Sein Name: Albert Einstein. Leider bin ich ihm nie begegnet, denn ich war erst 13, als er starb. Einstein machte eine höchst erstaunliche Entdeckung: Die beiden wichtigsten Zutaten zur Herstellung eines Universums – Masse und Energie – sind im Grunde genommen dasselbe, zwei Seiten einer Medaille, wenn Sie so wollen. Seine berühmte Gleichung

$$E = mc^2$$

bedeutet einfach, dass wir uns Masse als eine Form von Energie vorstellen können und umgekehrt. Folglich lässt sich sagen, dass zur Herstellung eines Universums nicht drei, sondern nur zwei Zutaten gehören: *Energie* und *Raum*. Woher ist diese Menge an Energie und Raum gekommen? Nach jahrzehntelanger Forschung haben Kosmologen die Antwort gefunden: Raum und Energie wurden während eines Ereignisses spontan erzeugt, das wir heute Urknall nennen.

Im Augenblick des Urknalls entstand ein vollständiges Universum und mit ihm der Raum. Das Ganze blähte sich auf wie ein Luftballon, der aufgeblasen wird. Woher kam diese Menge an Energie und Raum? Wie kann ein ganzes Universum mit dieser Energie, mit der unvorstellbaren Ausdehnung des Raumes und mit all dem, was er enthält, so einfach aus dem Nichts auftauchen?

Für einige Menschen war das der Punkt, an dem Gott wieder ins Spiel kam. Sie sind überzeugt, Gott habe die Energie und den Weltraum geschaffen. Der Urknall ist für sie der Augenblick der Schöpfung. Die Wissenschaft hingegen erzählt eine ganz andere Geschichte. Auf die Gefahr hin, mich in Schwierigkeiten zu bringen, möchte ich behaupten, dass wir weit mehr von den Naturerscheinungen verstehen, die die Wikinger in Angst und Schrecken versetzten. Wir können sogar über die wunderschöne Symmetrie von Energie und Materie hinausgehen, die Einstein entdeckte. Mithilfe der Naturgesetze sind wir in der Lage, uns mit dem Ursprung des Universums zu befassen, um festzustellen, ob ein Gott die einzige Möglichkeit ist, ihn zu erklären.

Als ich nach dem Zweiten Weltkrieg in England aufwuchs, herrschte Mangel. Man sagte uns, man bekomme nie etwas umsonst – nie etwas für nichts. Aber heute, nach einem Leben in der Forschung, bin ich der Meinung,

dass man ein ganzes Universum ganz umsonst haben kann.

Das große Rätsel im Herzen des Urknalls ist die Frage, wie sich ein vollständiges, ungeheuer riesiges Universum voll Raum und Energie aus dem Nichts materialisieren kann. Das Geheimnis erklärt sich aus einem der seltsamsten Aspekte unseres Kosmos. Die Gesetze der Physik verlangen die Existenz eines Phänomens, das wir »negative Energie« nennen.

Erlauben Sie mir einen einfachen Vergleich, um Ihnen dieses seltsame, aber höchst entscheidende Konzept näherzubringen. Stellen Sie sich einen Mann vor, der auf einem flachen Stück Land einen Hügel erbauen möchte. Der Hügel soll das Universum darstellen. Um ihn herzustellen, gräbt der Mann ein Loch in den Boden und verwendet die Erde, um den Hügel aufzuwerfen. Natürlich stellt er dabei nicht nur einen Hügel her, sondern macht auch ein Loch – also eine negative Version des Hügels. Das Erdreich, das im Loch war, ist jetzt zum Hügel geworden und alles bleibt vollkommen im Gleichgewicht. Genau das ist das Prinzip, das dem Anfang des Universums zugrunde lag.

Als der Urknall eine gewaltige Menge an positiver Energie erzeugte, produzierte er gleichzeitig dieselbe Menge an negativer Energie. Auf diese Weise ergänzen sich das Positive und das Negative immer zu null. Das ist ein weiteres Naturgesetz.

Wo ist dann all diese negative Energie heute? Sie befindet sich in der dritten Zutat unseres kosmischen Kochbuchs – das heißt, sie ist im Weltraum. Das mag merkwürdig klingen, aber nach den Naturgesetzen, die Gravitation und Bewegung betreffen – Gesetze, die zu den ältesten in den Naturwissenschaften gehören –, ist der kosmische Raum selbst ein riesiger Speicher für negative Energie. Genug, um dafür zu sorgen, dass alles sich zu null addiert. Ich gebe zu, dass dies für jemanden, der mit der Mathematik nicht vertraut ist, schwer zu begreifen ist, aber es stimmt. Das unendliche Netz von Milliarden und Abermilliarden Galaxien, deren jede mit der Kraft der Gravitation auf alle anderen Galaxien einwirkt, wirkt wie eine riesige Speichervorrichtung. Das Universum ist wie ein enormer Akku, der die negative Energie speichert. Die positive Seite der Dinge – die Masse und die Energie, die wir heute sehen – gleicht dem Hügel. Das entsprechende Loch, oder die negative Seite der Dinge, ist über den ganzen Raum verteilt.

Was bedeutet das also für unser Bemühen herauszufinden, ob es einen Gott gibt? Ganz einfach: Wenn sich das Universum zu nichts addiert, braucht man

keinen Gott, um es zu erschaffen. Das Universum ist in der absoluten Bedeutung des Wortes *umsonst*.

Da wir wissen, dass sich das Positive und das Negative zu null addieren, müssen wir jetzt nur noch herausfinden, was – oder soll ich sagen, wer – den ganzen Prozess ursprünglich ausgelöst hat. Was könnte das spontane Auftauchen eines Universums verursacht haben? Auf den ersten Blick scheint das ein unlösbares Problem zu sein – schließlich materialisieren sich ja die Dinge in unserer alltäglichen Welt nicht aus heiterem Himmel. Wenn Ihnen danach ist, eine Tasse Kaffee zu trinken, können Sie diese nicht durch ein bloßes Fingerschnippen herbeizaubern. Sie müssen sie aus anderem Stoff herstellen – Kaffeebohnen, Wasser und vielleicht etwas Milch und Zucker. Aber reisen Sie in die Tiefen dieser Kaffeetasse – durch die Milchteilchen, durch die atomare Ebene hindurch bis hinab zur subatomaren Ebene – und Sie werden in eine Welt eindringen, in der es durchaus möglich ist, etwas aus dem Nichts heraufzubeschwören. Zumindest für einen kurzen Moment. Der Grund dafür ist, dass Teilchen wie Protonen sich auf dieser Größenskala nach Naturgesetzen verhalten, die wir als Quantenmechanik bezeichnen. Solche Objekte können in der Tat vollkommen zufällig erscheinen, eine Zeit lang bleiben, um wieder zu verschwinden und irgendwo anders aufzutauchen.

Da wir wissen, dass das Universum selbst einmal äußerst klein war – kleiner als ein Proton –, ergibt sich eine bemerkenswerte Konsequenz: In all seiner schwindelerregenden Ausdehnung und Komplexität könnte das Universum ganz einfach aus dem Nichts aufgetaucht sein, ohne die bekannten Naturgesetze zu verletzen. Von dem Augenblick an wären mit der Expansion des Raumes selbst ungeheure Mengen von Energie frei geworden. Ein Ort, um all die negative Energie zu speichern, die zum Ausgleich der Bilanz erforderlich ist.

Aber damit stellt sich natürlich die entscheidende Frage aufs Neue: Hat Gott die Quantengesetze geschaffen, die den Urknall ermöglichten? Kurz gesagt, brauchen wir einen Gott, der alles so arrangiert, dass der Urknall knallt? Es liegt mir völlig fern, irgendjemand in seinem religiösen Glauben zu verletzen, aber ich bin überzeugt, dass die Naturwissenschaften eine schlüssigere Erklärung liefern als einen göttlichen Schöpfer.

Aufgrund unserer täglichen Erfahrung meinen wir, alles, was geschieht, müsse durch etwas verursacht sein, das vorher geschehen ist, daher ist für uns die Annahme natürlich, dass etwas – möglicherweise Gott – die Ursache für

die Entstehung des Universums war. Doch wenn wir von dem Universum als einem Ganzen sprechen, muss das nicht unbedingt stimmen. Lassen Sie mich erklären. Stellen Sie sich einen Fluss vor, der einen Berghang hinabfließt. Was verursacht den Fluss? Vielleicht ein Regen, der vorher auf die Berge fiel. Aber was hat den Regen verursacht? Eine gute Antwort wäre: die Sonne, die auf den Ozean schien und den Wasserdampf in den Himmel hob und die Wolken bildete. Gut, also was bewirkte, dass die Sonne schien? Wenn wir in ihr Inneres blicken, sehen wir einen Prozess, der als Fusion bezeichnet wird: Wasserstoffatome verschmelzen zu Helium und setzen dabei ungeheure Energiemengen frei. So weit, so gut. Woher kommt der Wasserstoff? Antwort: vom Urknall. Doch hier liegt der entscheidende Haken. Die Naturgesetze sagen uns nämlich, dass das Universum wie ein Proton aufgetaucht sein kann, ohne Hilfe in Anspruch zu nehmen und ohne Energie zu beanspruchen, aber auch, dass möglicherweise nichts den Urknall verursacht hat. Nichts.

Die Erklärung geht auf Einsteins Theorien und auf seine Erkenntnis zurück, dass Raum und Zeit im Universum zutiefst miteinander verflochten sind. Im Augenblick des Urknalls geschah etwas Wunderbares mit der Zeit. Sie begann.

Um diese aberwitzige Idee zu verstehen, können Sie sich ein Schwarzes Loch vorstellen, das im Raum schwebt. Ein typisches Schwarzes Loch ist ein Stern, der infolge seiner Masse in sich zusammengestürzt ist. Diese Masse ist so groß, dass seiner Gravitation noch nicht einmal Licht entkommen kann, deshalb ist es fast vollkommen schwarz. Dabei ist seine Gravitationsanziehung stark genug, um nicht nur Licht zu krümmen und zu verformen, sondern auch die Zeit. Malen Sie sich aus, dass eine Uhr von dem Schwarzen Loch verschluckt wird. Während die Uhr dem Schwarzen Loch näher und näher kommt, beginnt sie immer langsamer zu gehen. Die Zeit selbst verlangsamt sich. Wenn die Uhr in das Schwarze Loch eintritt – wobei wir uns natürlich vorstellen, dass sie den extremen Gravitationskräften standhalten kann –, bleibt sie stehen, nicht weil sie kaputtgegangen wäre, sondern weil die Zeit in dem Schwarzen Loch nicht existiert. Und genau das geschah, als das Universum begann.

In den vergangenen 100 Jahren haben wir spektakuläre Fortschritte in unserem Verständnis des Universums gemacht. Wir kennen die Gesetze, die bestimmen, was unter praktisch allen Bedingungen geschieht, abgesehen von

ganz extremen Situationen wie dem Ursprung des Universums oder den Schwarzen Löchern. Die Rolle, die die Zeit zu Beginn des Universums gespielt hat, ist meiner Meinung nach entscheidend, wenn es darum geht, die vermeintliche Notwendigkeit eines großen Weltenbauers zu überwinden und zu enthüllen, wie das Universum sich selbst erschaffen hat.

Reisen wir in der Zeit bis zum Augenblick des Urknalls rückwärts, wird das Universum immer kleiner und kleiner, bis es schließlich so winzig ist, dass es ein unvorstellbar kleines und unvorstellbar dichtes Schwarzes Loch ist. Wie bei den heute im All schwebenden Schwarzen Löchern ergeben sich aus den Naturgesetzen ganz außerordentliche Vorhersagen. Auch hier, so zeigen die Naturgesetze, muss die Zeit zum Stillstand kommen. Sie können auf unserer Reise keinen Zeitpunkt vor dem Urknall erreichen, da es vor dem Urknall keine Zeit gab. Damit haben wir endlich etwas gefunden, was keine Ursache hat, weil es keine Zeit gab, in der eine Ursache hätte existieren können. Nach meiner Ansicht folgt daraus, dass keine Möglichkeit für einen Schöpfer bleibt, weil es keine Zeit für die Existenz eines Schöpfers gibt.

Die Menschen suchen nach Antworten auf die großen Fragen, etwa warum wir hier sind. Sie erwarten nicht, dass die Antworten einfach sind, und geben sich daher ein wenig Mühe, die Antworten zu verstehen. Sollten Sie mich fragen, ob ein Gott das Universum geschaffen habe, antworte ich Ihnen, schon Ihre Frage sei sinnlos. Denn vor dem Urknall existierte keine Zeit, folglich gab es auch keine Zeit, in der Gott das Universum hätte erschaffen können. Es ist so, als fragte man, in welcher Richtung der Rand der Erde liege – die Erde ist eine Kugel, die keinen Rand hat, infolgedessen ist die Suche nach einem Rand vergebliche Liebesmüh.

Bin ich ein gläubiger Mensch? Es steht uns frei zu glauben, was wir wollen. Meiner Ansicht nach lautet die einfachste Erklärung, dass es keinen Gott gibt. Niemand hat das Universum geschaffen und niemand lenkt unsere Geschicke. Das führt zu einer weitreichenden Erkenntnis: Es gibt wahrscheinlich keinen Himmel und kein Leben nach dem Tod. Ich nehme an, der Glaube an ein Jenseits ist lediglich Wunschdenken. Es gibt keine verlässlichen Belege dafür, und die Annahme widerspricht allen wissenschaftlichen Erkenntnissen. Ich denke, dass wir wieder zu Staub werden, wenn wir sterben. Aber es gibt eine Form, in der wir weiterleben: in unserem Einfluss und in den Genen, die wir an unsere Kinder weitergeben. Wir haben nur dieses Leben, um den großen Plan des Universums zu

würdigen, und dafür bin ich außerordentlich dankbar.

***Wie passt die Existenz Gottes in Ihre Vorstellung vom Anfang und Ende des Universums?
Und wenn Gott existierte und Sie hätten die Möglichkeit, ihm zu begegnen, was würden Sie ihn fragen?***

Es stellt sich die Frage: Ist die Art und Weise, wie das Universum anfang, aus Gründen, die wir nicht verstehen können, von Gott gewählt oder durch ein wissenschaftliches Gesetz bestimmt worden? Ich glaube Letzteres. Wenn Sie wollen, können Sie die wissenschaftlichen Gesetze »Gott« nennen, aber das wäre dann kein persönlicher Gott, dem sie begegnen und Fragen stellen könnten.

Doch wenn es einen solchen Gott gäbe, würde ich ihn gerne fragen, ob er sich etwas so Kompliziertes wie die verallgemeinerte Stringtheorie oder die M-Theorie in elf Dimensionen ausgedacht hat.

Wie hat alles angefangen?

Hamlet sagt: »Ich könnte in eine Nussschale eingesperrt sein und mich für einen König von unermesslichem Gebiete halten, wenn nur meine bösen Träume nicht wären.« Vermutlich meint er damit, dass wir als Menschen zwar physisch sehr eingeschränkt sind – was in meinem Fall ganz besonders zutrifft –, dass unsere Gedanken aber das ganze Universum erforschen und sich kühn an Orte begeben können, an die sich noch nicht einmal *Star Trek* wagen würde. Ist das Universum tatsächlich unendlich oder nur sehr groß? Hatte es einen Anfang? Wird es ewig existieren oder nur sehr lange? Wie kann unser begrenzter Verstand ein unendliches Universum begreifen? Ist es nicht anmaßend von uns, auch nur den Versuch zu machen?

Auf die Gefahr hin, das Schicksal des Prometheus zu erleiden, der das Feuer von den antiken Göttern stahl, um es der Menschheit zu schenken, bin ich davon überzeugt, dass wir versuchen können und sollten, das Universum zu verstehen. Prometheus wurde zur Strafe auf ewig an einen Felsen gekettet, dann aber glücklicherweise von Herkules befreit. Inzwischen haben wir bereits bemerkenswerte Fortschritte beim Verständnis des Kosmos erzielt. Noch haben wir kein vollständiges Bild, aber ich glaube mehr und mehr daran, dass wir nicht mehr weit davon entfernt sind.

Das Volk der Boschongo in Zentralafrika glaubt, am Anfang seien nur Finsternis, Wasser und der große Gott Bumba gewesen. Eines Tages erbrach Bumba unter großen Schmerzen die Sonne. Diese trocknete das Wasser aus. Land kam zum Vorschein. Immer noch unter Schmerzen erbrach Bumba den Mond, die Sterne und einige Tiere. Die Leoparden, das Krokodil, die Schildkröte und schließlich den Menschen.

Wie viele Schöpfungsmythen versucht auch dieser Mythos, Fragen zu beantworten, die wir alle stellen: »Warum sind wir hier? Woher kommen

wir?« Im Allgemeinen antwortete man darauf, die Menschen seien vergleichsweise jungen Ursprungs, da doch offenkundig sei, dass die Menschheit fortwährend ihr Wissen und ihre Technologie verbessere. Daher könne sie noch nicht sehr lange existieren, sonst wäre sie schon sehr viel weiter fortgeschritten. Nach Bischof Ussher datiert die Genesis, das erste Buch Mose, den Anfang der Zeit auf den Abend des 22. Oktober 4004 v. Chr., 6 Uhr.

Allerdings verändert sich eine Umgebung oder Landschaft, etwa Berge und Flüsse, im Laufe eines Menschenlebens sehr wenig. Daher glaubte man, die Gegend sei entweder ein permanenter Hintergrund und müsse deshalb seit jeher als leere Landschaft vorhanden gewesen sein oder die Umgebung sei gleichzeitig mit den Menschen erschaffen worden.

Nicht jeder konnte sich mit der Vorstellung anfreunden, das Universum habe einen Anfang. Beispielsweise war Aristoteles, der bekannteste griechische Philosoph, der festen Überzeugung, das Universum gebe es seit aller Ewigkeit. Etwas, das ewig ist, ist vollkommener als etwas, das erschaffen wurde. Er vertrat die Ansicht, wir nähmen nur deshalb Fortschritte wahr, weil Überschwemmungen oder andere Naturkatastrophen die Zivilisation immer wieder auf null zurückgeworfen hätten. Der tiefere Beweggrund für den Glauben an ein ewiges Universum war der Wunsch, die göttliche Intervention zu vermeiden, die erforderlich gewesen wäre, um das Universum zu erschaffen und in Gang zu setzen. Umgekehrt nutzten diejenigen, die glaubten, das Universum habe einen Anfang, dies als Argument für die Existenz Gottes als erste Ursache – oder ersten Beweger – des Universums.

Wenn man glaubt, das Universum habe einen Anfang, liegt natürlich die Frage nahe: »Was geschah vor dem Anfang? Was tat Gott, bevor er die Welt erschuf? Bastelte er an der Hölle für Leute, die solche Fragen stellten?« Für Immanuel Kant war die Frage, ob das Universum einen Anfang habe oder nicht, von großer Bedeutung. Seiner Ansicht nach wohnten beiden Auffassungen logische Widersprüche oder Antinomien inne. Wenn das Universum einen Anfang hatte, warum wartete es dann eine unendliche Zeit, bevor es begann? Das nannte er die These. Hatte das Universum hingegen seit jeher existiert, warum brauchte es unendliche Zeit, um seinen gegenwärtigen Zustand zu erreichen? Das nannte er die Antithese. Sowohl die These wie die Antithese hingen von der Annahme ab, dass die Zeit

absolut sei – eine Annahme, die Kant mit fast allen Menschen teilte. Mit anderen Worten, sie reichte von der unendlichen Vergangenheit bis zur unendlichen Zukunft, unabhängig von irgendeinem Universum, das existieren mochte oder nicht.

Diese Vorstellung herrscht heute noch in den Köpfen vieler Wissenschaftler. Dabei hat Einstein seine revolutionäre Allgemeine Relativitätstheorie bereits 1915 veröffentlicht. Darin sind Raum und Zeit nicht mehr absolut, kein statischer Hintergrund der Ereignisse. Vielmehr sind sie dynamische Größen, die von der Materie und Energie des Universums geformt werden. Sie sind nur innerhalb des Universums definiert, daher wäre es sinnlos, von einer Zeit zu sprechen, die vor dem Universum begann. Das wäre genauso absurd wie die Frage nach einem Punkt südlich des Südpols. Er ist nicht definiert.

Obwohl Einsteins Theorie Zeit und Raum vereinigt, sagt sie wenig über den Raum selbst aus. Eine offenkundige Eigenschaft des Raumes scheint zu sein, dass er sich endlos ausdehnt. Wir erwarten nicht, dass das Universum an einer Ziegelmauer endet, obwohl es keinen logischen Grund gibt, der dagegenspricht. Uns ermöglichen jedoch moderne Geräte wie das Hubble-Weltraumteleskop, unsere Antennen tief ins All auszustrecken. Milliarden und Abermilliarden von Galaxien verschiedener Form und Größe sehen wir dort. Es gibt riesige elliptische Galaxien und Spiralgalaxien wie unsere Milchstraße. Jede Galaxie enthält Milliarden und Abermilliarden von Sternen und viele von ihnen lassen sich von Planeten umkreisen. Unsere eigene Galaxis verwehrt uns den Blick in bestimmte Richtungen, doch abgesehen davon sind die Galaxien weitgehend gleichförmig im Raum verteilt, wobei sie einige lokale Konzentrationen und Leerräume aufweisen. In sehr großer Entfernung scheint die Dichte der Galaxien nachzulassen, aber sie sind einfach so weit entfernt und lichtschwach, dass wir sie nicht mehr richtig erkennen können. Soweit wir es beurteilen können, setzt sich das Universum auf immer dieselbe Weise und in alle Richtungen unverändert fort und ist fast überall gleich.

Obwohl das Universum an jeder Position des Raumes weitgehend gleich zu sein scheint, hat es sich zweifellos mit der Zeit verändert. Forschern wurde dies erst zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts klar. Bis dahin waren sie überzeugt, das Universum wäre seit unendlicher Zeit weitgehend konstant geblieben. Möglicherweise existierte es schon immer, aber das schien zu

absurden Schlussfolgerungen zu führen. Denn hätten die Sterne seit Ewigkeiten gestrahlt, hätten sie das Universum auf ihre eigene Temperatur erwärmen müssen. Selbst bei Nacht wäre der ganze Himmel so hell wie die Sonne gewesen, weil jede Sichtlinie entweder auf einen Stern getroffen wäre oder auf eine Staubwolke, die auf die Temperatur der Sterne erhitzt gewesen wäre. Daher ist die Beobachtung, die Sie schon alle gemacht haben, dass nämlich der Nachthimmel dunkel ist, von gewaltiger Bedeutung. Aus ihr folgt, dass das Universum nicht seit jeher in dem Zustand existiert haben kann, in dem wir es heute sehen. Irgendetwas muss in der Vergangenheit geschehen sein, das die Sterne vor endlicher Zeit in Gang gesetzt hat. Nur dann hätte das Licht von sehr fernen Sternen noch nicht die Zeit gehabt, uns zu erreichen. Das würde erklären, warum der Nachthimmel nicht in alle Richtungen taghell erleuchtet ist.

Wenn es die Sterne schon immer gab, warum begannen sie dann erst vor einigen Milliarden Jahren zu leuchten? Welche Uhr zeigte ihnen an, dass es Zeit sei zu scheinen. Das verwirrte Philosophen wie Immanuel Kant, die glaubten, es gebe das Universum schon seit Ewigkeit. Doch die meisten Menschen fanden, es entspreche der Vorstellung, dass das Universum erst vor ein paar Tausend Jahren weitgehend in der Form, die es heute besitzt, erschaffen worden sei, ganz so, wie Bischof Ussher es errechnet hatte.

Erste Widersprüche zu dieser Idee zeigten sich bei den Beobachtungen, die in den 1920er Jahren mit dem 2,5-Meter-Teleskop des Wilson-Observatoriums vorgenommen wurden. Zunächst entdeckte Edwin Hubble, dass viele schwache Lichtflecken, sogenannte *Nebulae*, in Wahrheit weit entfernte Galaxien waren, Ansammlungen von Sternen wie unsere Sonne. Als derart klein und schwach konnten sie nur erscheinen, wenn die Entfernungen so groß waren, dass das Licht von ihnen Millionen oder sogar Milliarden Jahre brauchte, um uns zu erreichen. Der Anfang des Universums konnte also nicht nur einige Tausend Jahre zurückliegen.

Die zweite Entdeckung, die Hubble machte, war noch bemerkenswerter. Durch eine Analyse des Lichtes anderer Galaxien konnte er messen, ob diese Galaxien sich auf uns zu- oder von uns weg bewegten. Zu seiner riesengroßen Überraschung stellte er fest, dass sie sich fast alle von uns entfernten. Es stellte sich sogar heraus, dass sie umso rascher fortstrebten, je weiter sie von uns entfernt waren. Mit anderen Worten: Das Universum expandiert. Die Galaxien entfernen sich voneinander.

Die Entdeckung der Expansion des Universums war eine der großen geistigen Revolutionen des 20. Jahrhunderts. Sie kam völlig überraschend und veränderte die Debatte über den Ursprung des Universums von Grund auf. Wenn sich die Galaxien auseinanderbewegen, müssen sie in der Vergangenheit näher zusammen gewesen sein. Anhand der gegenwärtigen Expansionsrate können wir schätzen, dass sie vor zehn bis 15 Milliarden Jahren unvorstellbar eng zusammengestanden haben müssen. Es sieht also ganz so aus, als könnte das Universum damals – vollständig auf einen Punkt im Raum konzentriert – angefangen haben.

Doch viele Wissenschaftler konnten sich nicht mit der Idee anfreunden, dass das Universum einen Anfang hatte, weil daraus folgte, dass die Gesetze der Physik dort versagten. Man brauche einen außerhalb des Universums befindlichen Akteur – Gott, wenn Sie so wollen –, der bestimme, wie das Universum anfing. Daher entwickelten sie Theorien, die erklärten, warum das Universum in der Gegenwart expandiert, aber keinen Anfang hat. Eine von ihnen war die *Steady-State-Theorie*, die Hermann Bondi, Thomas Gold und Fred Hoyle 1948 vorschlugen.

Während sich die Galaxien voneinander entfernen, werden nach der Steady-State-Theorie ständig neue Galaxien aus der Materie gebildet, von der man annahm, sie entstehe beständig überall im Weltraum. Der Steady-State-Theorie zufolge gibt es das Universum seit aller Ewigkeit, und es hat zu jeder Zeit völlig gleich ausgesehen. Diese letzte Eigenschaft hatte den großen Vorteil, eine eindeutige Vorhersage zu sein, die sich durch Beobachtungen überprüfen ließ. Unter Leitung von Martin Ryle nahm die *Cambridge Radio Astronomy Group* Anfang der 1960er Jahre eine Durchmusterung nach schwachen Radioquellen vor. Sie waren ziemlich gleichförmig über den Himmel verteilt, was darauf schließen ließ, dass sich die meisten Quellen außerhalb unserer Galaxis befinden. In der Regel sind die schwächeren Quellen weiter entfernt.

Die Steady-State-Theorie sagte eine Beziehung zwischen der Zahl der Quellen und ihrer Stärke voraus. Doch die Beobachtungen zeigten mehr schwache, also weiter entfernte Quellen als vorhergesagt, woraus folgte, dass die Dichte früher größer gewesen sein musste. Das aber widersprach eklatant der Grundannahme der Steady-State-Theorie, dass alles in der Zeit gleich bleibe. Aus diesen und anderen Gründen wurde die Steady-State-Theorie ausgemustert.

Ein weiterer Versuch, einen Anfang des Universums zu umgehen, war der Vorschlag, es habe früher eine Kontraktionsphase zwar gegeben, die Materie sei aber infolge der Rotation und lokaler Unregelmäßigkeiten nicht in einem Punkt zusammengefallen. Stattdessen hätten sich viele Materieteile verfehlt, daraufhin expandierte das Universum erneut, so diese Theorie, wobei die Dichte die ganze Zeit über endlich blieb.

Tatsächlich behaupteten die beiden Russen Jewgeni Lifschitz und Isaak Chalatschnikow, sie hätten bewiesen, dass eine allgemeine Kontraktion ohne exakte Symmetrie immer zu einem Rückprall bei endlicher Dichte führe. Dieses Ergebnis passte dem Dialektischen Materialismus des Marxismus-Leninismus gut ins Konzept, weil es unbequeme Fragen nach der Schöpfung des Universums vermied. Diese Auffassung wurde daher zu einem Glaubensartikel für sowjetische Wissenschaftler.

Ziemlich genau zu diesem Zeitpunkt, als Lifschitz und Chalatschnikow ihre These veröffentlichten, dass das Universum keinen Anfang habe, begann ich meine kosmologischen Forschungen. Mir war klar, dass es eine wichtige Frage war, aber mich überzeugten die von Lifschitz und Chalatschnikow vorgebrachten Argumente nicht.

Wir sind an die Vorstellung gewöhnt, dass Ereignisse durch frühere Ereignisse und diese wiederum durch noch frühere Ereignisse verursacht werden. Daraus entsteht eine Kausalkette, die in die Vergangenheit zurückreicht. Doch nehmen wir an, diese Kette hätte einen Anfang, dann gehen wir von einem ersten Ereignis aus. Wodurch wurde es verursacht? Das war eine Frage, mit der sich viele Wissenschaftler nicht auseinandersetzen wollten. Sie versuchten ihr aus dem Wege zu gehen, indem sie entweder, wie die Russen und die Vertreter der Steady-State-Theorie, behaupteten, das Universum habe keinen Anfang, oder die Ansicht vertraten, der Ursprung des Universums falle nicht in die Zuständigkeit der Naturwissenschaft, sondern in die der Metaphysik oder Religion.

Einen solchen Standpunkt sollte meiner Auffassung nach ein glaubwürdiger Wissenschaftler nicht übernehmen. Wenn die wissenschaftlichen Gesetze am Anfang des Universums außer Kraft sind, könnten sie dann nicht auch zu anderen Zeiten versagen? Ein Gesetz ist kein Gesetz, wenn es nur manchmal gilt. Wir müssen versuchen, so meine Meinung, den Anfang des Universums auf der Grundlage unserer Wissenschaft zu verstehen. Mag sein, dass diese Aufgabe unsere Kräfte

übersteigt, aber zumindest sollten wir den Versuch wagen, ihr gerecht zu werden.

Roger Penrose und mir gelang es, geometrische Theoreme zu beweisen, die zeigen, dass das Universum einen Anfang gehabt haben muss, wenn Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie richtig ist und bestimmte vernünftige Bedingungen erfüllt sind. Es lässt sich schwer gegen ein mathematisches Theorem streiten, daher räumten Lifschitz und Chalatnikow schließlich ein, das Universum müsse einen Anfang gehabt haben. Obwohl die Idee von einem Anfang des Universums vermutlich zu kommunistischen Idealen nicht sonderlich gut passte, haben sie nie zugelassen, dass eine Ideologie die wissenschaftliche Entwicklung in der Physik blockierte. Die Physik brauchte man für die Atombombe, und es war wichtig, dass sie funktionierte. Den Fortschritt in der Biologie hingegen verhinderte die sowjetische Ideologie, indem sie die Erkenntnisse der Genetik leugnete.

Die von Roger Penrose und mir bewiesenen Theoreme zeigten zwar, dass das Universum einen Anfang gehabt haben muss, lieferten aber nicht viele Informationen über die Art dieses Anfangs. Diese spärlichen Informationen ließen erkennen, dass das Universum mit einem Urknall begann, in einem Punkt, in dem das ganze Universum und alles, was es enthielt, zu unendlicher Dichte zusammengequetscht war – eine *Raumzeitsingularität*. An diesem Punkt verlor Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie ihre Gültigkeit. Mit ihr kann man daher nicht vorhersagen, wie das Universum anfing. Der Ursprung des Universums ist offenbar dem Zugriff der Wissenschaft entzogen.

Beobachtungen, die diese Annahme bestätigten, dass das Universum einen unermesslich dichten Anfang gehabt haben muss, gelangen im Oktober 1965, einige Monate nach meinem ersten Singularitätsergebnis. Man entdeckte die schwache kosmische Hintergrundstrahlung, oder genauer: Mikrowellenhintergrundstrahlung, im ganzen Weltraum. Diese Mikrowellen sind von der gleichen Art wie die in Ihrem Mikrowellengerät, nur dass sie viel weniger Energie besitzen. Ihre Pizza würden diese Mikrowellen nur auf minus 270,4 Grad Celsius erwärmen – nicht gerade geeignet, um die Pizza aufzutauen, geschweige denn zu backen.

Übrigens können Sie diese Mikrowellen selbst beobachten. Wer von Ihnen sich noch an die analogen Fernsehapparate erinnert, hat ziemlich sicher diese Mikrowellen beobachtet. Wenn Sie bei Ihrem Fernseher einen leeren Kanal eingestellt haben, wurden ein paar Prozent des Schnees, den sie auf dem

Bildschirm gesehen haben, von dieser kosmischen Hintergrundstrahlung hervorgerufen. Es gibt nur eine einzige schlüssige Erklärung für diese Strahlung: Sie ist die Nachwirkung eines frühen sehr heißen und dichten Zustands. Mit der Expansion des Universums kühlte sich die Strahlung ab, bis sie zu dem schwachen Überrest wurde, den wir heute beobachten.

Dass das Universum mit einer Singularität begann, mit dieser Idee waren weder ich noch andere Forscher besonders glücklich. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie versagt in der Nähe des Urknalls, weil sie eine sogenannte klassische Theorie ist. Das heißt, sie setzt stillschweigend etwas voraus, was aus Sicht des gesunden Menschenverstands als selbstverständlich erscheint: Sie geht davon aus, jedes Teilchen besitze eine genau definierte Position und eine genau definierte Geschwindigkeit. Wenn wir in einer solchen klassischen Theorie die Positionen und Geschwindigkeiten aller Teilchen des Universums zu einem bestimmten Zeitpunkt kennen würden, könnten wir berechnen, wo die Teilchen sich zu jedem beliebigen anderen Zeitpunkt in der Vergangenheit oder Zukunft befänden.

Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckte man aber, dass sich nicht genau berechnen ließ, was bei extrem kleinen Abständen geschieht. Es ging nicht darum, dass man bessere Theorien brauchte. Der Natur selbst scheint ein gewisses Maß an Zufälligkeit und Ungewissheit innezuwohnen, das sich nicht beseitigen lässt, egal wie gut die Theorien sind. Dieses Erkenntnis fasst die Unschärferelation zusammen, die Werner Heisenberg 1927 vorschlug: Wir sind nicht in der Lage, sowohl die Position wie auch die Geschwindigkeit eines Teilchens genau vorherzusagen. Je genauer wir die Position vorhersagen, desto ungenauer wird unsere Vorhersage der Geschwindigkeit sein, und umgekehrt.

Einstein hatte verschiedene Einwände gegen die Vorstellung, im Universum regiere der Zufall. Seine Auffassung brachte er in seinem Bonmot »Gott würfeln nicht« zum Ausdruck. Doch alle Anhaltspunkte sprechen dafür, dass Gott einen Hang zum Glücksspiel hat. Das Universum ist wie ein riesiges Kasino, in dem bei jeder Gelegenheit der Würfel geworfen oder das Roulette in Bewegung gesetzt wird. Ein Kasinobesitzer läuft Gefahr, jedes Mal, wenn die Würfel geworfen und die Rouletteräder gedreht werden, Geld zu verlieren. Doch wenn die Zahl der Würfe groß genug ist, gleichen sich die Chancen aus, und der Kasinobesitzer sorgt dafür, dass dieser Ausgleich zu seinen Gunsten ausfällt. Deshalb sind Kasinobesitzer so reich. Die einzige

Chance, gegen sie zu gewinnen, besteht darin, sein ganzes Geld auf einige wenige Würfe des Würfels oder Drehungen des Roulettes zu setzen.

Gleiches gilt für das Universum. Ist das Universum groß, wird so außergewöhnlich oft gewürfelt, dass sich die Ergebnisse zu einem Wert ausgleichen, der sich vorhersagen lässt. Ist das Universum aber winzig klein und befindet es sich in der Nähe des Urknalls, gibt es nur eine auffällig kleine Zahl von Würfeln, und die Unschärferelation gewinnt erhebliche Bedeutung. Um den Ursprung des Universums zu verstehen, muss man also die Unschärferelation in Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie einbinden. Das war während der vergangenen 30 Jahre die große Herausforderung in der Theoretischen Physik. Noch haben wir sie nicht bewältigt, aber wir haben enorme Fortschritte erzielt.

Stellen Sie sich nun vor, wir versuchten die Zukunft vorherzusagen. Da wir nur eine Kombination aus Position und Geschwindigkeit eines Teilchens kennen, können wir – gemäß der Unschärferelation – die zukünftigen Positionen und Geschwindigkeiten von Teilchen nicht exakt voraussagen. Wir können nur bestimmten Kombinationen aus Positionen und Geschwindigkeiten Wahrscheinlichkeiten zuschreiben. Folglich gibt es eine gewisse Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Zukunft des Universums.

Aber lassen Sie uns nun annehmen, wir versuchten die Vergangenheit auf die gleiche Weise zu verstehen. Angesichts der Art der Beobachtungen, die wir jetzt machen können, sind wir lediglich in der Lage, einer bestimmten Geschichte des Universums eine Wahrscheinlichkeit zuzuweisen. Das Universum muss daher viele mögliche Geschichten haben, jede mit ihrer eigenen Wahrscheinlichkeit. Beispielsweise gibt es eine Geschichte des Universums, in der England wieder Fußballweltmeister wird, so gering die Wahrscheinlichkeit auch sein mag. Der Gedanke, das Universum habe viele Geschichten, hört sich vielleicht nach Science-Fiction an, gilt heute aber als erwiesene wissenschaftliche Tatsache.

Diese Erkenntnis verdanken wir Richard Feynman, der in dem hochangesehenen *California Institute of Technology* arbeitete und ein paar Häuser weiter in einem Striplokal die Bongotrommeln schlug. Feynmans Ansatz zum Verständnis dieser Abläufe bestand darin, jeder möglichen Geschichte eine bestimmte Wahrscheinlichkeit zuzuschreiben und daraus seine Vorhersagen abzuleiten. Die Methode erweist sich bei Vorhersagen der Zukunft als spektakulär erfolgreich. Daher nehmen wir an, dass sie sich auch

für die »Zurücksage« der Vergangenheit verwenden lässt.

Gegenwärtig bemühen sich Wissenschaftler, Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie und Feynmans Konzept der vielen Geschichten zu einer vollständigen vereinheitlichten Theorie zusammenzufassen, die alles beschreibt, was im Universum geschieht. Dank dieser vereinheitlichten Theorie werden wir berechnen können, wie sich das Universum entwickeln wird, wenn wir seinen Zustand zu einem gegebenen Zeitpunkt kennen. Leider wird uns die vereinheitlichte Theorie allein nicht verraten, wie das Universum angefangen hat oder wie sein Anfangszustand war. Dazu brauchen wir noch zusätzliche Informationen. Wir müssen die sogenannten Randbedingungen kennen, das, was an den äußersten Grenzen des Universums geschieht, den Rändern von Zeit und Raum. Doch wenn der Rand des Universums einfach an einem normalen Punkt von Raum und Zeit lag, können wir über ihn hinausgehen und den Bereich jenseits des Punktes als Teil des Universums beanspruchen. Wenn dagegen die Grenze des Universums an einem zerklüfteten Rand lag, wo Raum und Zeit deformiert waren und unendliche Dichte herrschte, wäre es sehr schwierig, sinnvolle Randbedingungen zu definieren. Daher ist nicht klar, welche Randbedingungen erforderlich sind. Allem Anschein nach gibt es keine logische Grundlage, einen bestimmten Satz von Randbedingungen einem anderen vorzuziehen.

Eine dritte Möglichkeit erkannten Jim Hartle von der *University of California* in Santa Barbara und ich. Vielleicht hat das Universum ja gar keine Grenze in Raum und Zeit. Auf den ersten Blick scheint das in direktem Widerspruch zu den oben erwähnten geometrischen Theoremen zu stehen. Diese zeigen doch, dass das Universum einen Anfang gehabt haben muss, eine Grenze in der Zeit. Um Feynmans Techniken jedoch eine mathematisch wohldefinierte Form zu geben, entwickelten die Mathematiker das *Konzept der imaginären Zeit*. Es hat nichts mit unserer Erfahrung der realen Zeit zu tun. Vielmehr ist es ein mathematischer Kunstgriff, der Berechnungen ermöglicht und die echte Zeit unserer Erfahrung ersetzt. Uns ging es darum, dass es in der imaginären Zeit keine Grenze gibt. Damit konnten wir uns den Versuch ersparen, Randbedingungen zu erfinden. Wir nannten diesen Ansatz die *Keine-Grenzen-Hypothese*.

Wenn die Randbedingung des Universums besagt, dass es in der imaginären Zeit keine Grenze gibt, hat es auch nicht nur eine einzige

Geschichte. Es gibt viele Geschichten in der imaginären Zeit, und jede von ihnen bestimmt eine Geschichte der realen Zeit. Damit haben wir eine Überfülle von Geschichten für das Universum. Wie lässt sich die besondere Geschichte oder eine Menge von Geschichten, in denen wir leben, aus allen möglichen Geschichten des Universums herausfinden?

Ein Punkt, der rasch ins Auge fällt, ist der Umstand, dass viele dieser möglichen Geschichten des Universums nicht die Bildung von Galaxien und Sternen enthalten, die für unsere eigene Entwicklung von entscheidender Bedeutung war. Mag sein, dass sich intelligente Lebensformen auch ohne Galaxien und Sterne entwickeln können, aber dies dürfte unwahrscheinlich sein. Die bloße Tatsache, dass es uns als Lebewesen gibt, die fragen können: »Warum ist das Universum so und nicht anders?«, bedeutet folglich eine Einschränkung für die Geschichte, in der wir leben. Daraus folgt, dass diese Geschichte eine aus dem geringeren Teil der Geschichten ist, die Galaxien und Sterne einschließen. Dies ist ein Beispiel für das sogenannte *Anthropische Prinzip*. Es besagt, dass das Universum mehr oder minder so sein muss, wie wir es sehen, weil niemand da wäre, der es beobachten könnte, wenn es anders wäre.

Vielen Wissenschaftlern missfällt das Anthropische Prinzip, weil es den Eindruck erweckt, reichlich improvisiert zu sein und nicht viel Vorhersagekraft zu besitzen. Doch das Anthropische Prinzip lässt sich exakt formulieren und scheint von entscheidender Bedeutung zu sein, wenn es um den Ursprung des Universums geht. Die M-Theorie, die verallgemeinerte Stringtheorie, die unser aussichtsreichster Kandidat für eine vollständige vereinheitlichte Theorie ist, erlaubt eine äußerst große Zahl möglicher Geschichten für das Universum. Die meisten dieser Geschichten sind für die Entwicklung intelligenten Lebens vollkommen ungeeignet. Entweder sind sie leer, zu kurz, zu stark gekrümmt oder in irgendeiner anderen Hinsicht falsch. Doch nach Richard Feynmans Konzept der vielen Geschichten könnten diese unbewohnten Geschichten ziemlich wahrscheinlich sein.

Uns ist es jedoch gleichgültig, wie viele Geschichten es möglicherweise gibt, die keine intelligenten Lebensformen enthalten. Wir sind ausschließlich an der Teilmenge von Geschichten interessiert, in denen sich intelligentes Leben entwickelt. Dieses Leben muss Menschen nicht im Geringsten gleichen, kleine grüne Männer würden auch genügen. Tatsächlich könnten sie sogar besser geeignet sein, denn die Menschheit hat sich nicht gerade durch

sonderlich intelligentes Verhalten hervorgeraten.

Ein Beispiel für die Aussagekraft des Anthropischen Prinzips: Nehmen Sie die Zahl der Richtungen im Raum. Die alltägliche Erfahrung sagt uns, dass wir in einem dreidimensionalen Raum leben. Das heißt, wir können die Position eines Punktes im Raum durch drei Zahlen angeben. Beispielsweise durch Breite, Länge und Höhe über dem Meeresspiegel. Aber warum ist der Raum dreidimensional? Warum sind es nicht zwei, vier oder irgendeine andere Zahl von Dimensionen, wie in Science-Fiction-Erzählungen?

Tatsächlich hat der Raum in der Stringtheorie zunächst zehn Dimensionen (sowie eine Zeitdimension). Allerdings nimmt man an, dass sieben von ihnen sehr eng aufgerollt sind, sodass drei Dimensionen übrigbleiben, die groß und fast flach sind. Das erinnert an einen Strohhalm. Dessen Oberfläche ist zweidimensional, doch eine Dimension ist zu einem kleinen Kreis zusammengerollt, sodass der Strohhalm aus der Entfernung wie eine eindimensionale Linie aussieht.

Warum leben wir nicht in einer Geschichte, in der acht der Dimensionen aufgerollt sind, sodass nur zwei Dimensionen übrigbleiben, die wir bemerken? Weil dann ein zweidimensionales Tier Schwierigkeiten hätte, Nahrung zu verdauen. Besäße es wie wir einen Verdauungskanal, der es ganz durchquerte, würde dieser das Tier in zwei Teile zerlegen und das arme Geschöpf fiel auseinander. Folglich sind zwei flache Dimensionen für etwas so Kompliziertes wie intelligentes Leben zu wenig. Drei Dimensionen haben etwas Besonderes.

In drei Dimensionen können Planeten stabile Umlaufbahnen um Sterne aufweisen. Dies ist eine Folge der Gravitation, die dem umgekehrten quadratischen Gesetz gehorcht, wie es von Robert Hooke 1665 entdeckt und von Isaac Newton ausgearbeitet wurde. Denken Sie an die Anziehungskraft zweier Körper in einer bestimmten Entfernung: Verdoppelt man diesen Abstand, halbiert sich die Kraft zwischen den beiden Körpern. Wenn der Abstand verdreifacht wird, wird die Kraft durch neun geteilt, wird die Entfernung vervierfacht, wird die Kraft durch 16 geteilt und so weiter. Dies führt zu stabilen Planetenbahnen.

Denken wir nun an vier Raumdimensionen. Dort würde die Gravitation einem inversen kubischen Gesetz (also der dritten Potenz) gehorchen. Würde in vier Raumdimensionen der Abstand zwischen zwei Körpern verdoppelt, würde die Gravitationskraft durch acht geteilt. Bei dreifachem Abstand würde

sie bereits durch 27 geteilt und bei vierfacher Distanz durch 64. Diese Änderung zu einem inversen kubischen Gesetz verhindert, dass Planeten stabile Umlaufbahnen um ihre Sonnen haben. Sie würden entweder in die Sonne fallen oder in die Dunkelheit und Kälte des Weltalls abdriften.

In ähnlicher Weise wären auch die Elektronenbahnen in Atomen instabil. Materie in der uns bekannten Form würde daher nicht existieren. Obwohl also die Hypothese der vielen Geschichten jede beliebige Zahl von fast flachen Dimensionen erlaubt, können nur Geschichten mit drei flachen Dimensionen intelligente Lebensformen enthalten. Nur in solchen Geschichten kann die Frage gestellt werden: »Warum hat der Raum drei Dimensionen?«

Eine bemerkenswerte Eigenschaft des Universums, das wir beobachten, betrifft die kosmische Hintergrundstrahlung, die von Arno Penzias und Robert Wilson entdeckt wurde. Im Wesentlichen ist die Hintergrundstrahlung ein fossiler Beleg für den Zustand, in dem sich das Universum befand, als es sehr jung war. Diese Hintergrundstrahlung bleibt fast immer gleich, unabhängig von der Richtung, in die Sie in den Weltraum blicken. Die Unterschiede zwischen verschiedenen Richtungen betragen ungefähr ein Hunderttausendstel. Sie sind also unvorstellbar winzig und bedürfen einer Erklärung. Nach der allgemein akzeptierten Erklärung für diese Gleichmäßigkeit durchlief das Universum in seiner sehr frühen Geschichte eine Phase extrem rascher Expansion – um einen Faktor von mindestens einer Milliarde Milliarden Milliarden. Dieser Prozess wird als *Inflation* bezeichnet und wirkte sich im Gegensatz zu der Preisinflation, die uns allzu häufig heimsucht, positiv auf das Universum aus. Wäre das alles gewesen, wäre die kosmische Hintergrundstrahlung in alle Richtungen vollkommen gleich. Woher kommen dann die kleinen Abweichungen?

Anfang 1982 äußerte ich in einem Aufsatz die Ansicht, diese Unterschiede ergäben sich aus den *Quantenfluktuationen* während der Inflationsphase. Große Quantenfluktuationen treten infolge der Unschärferelation auf. Außerdem waren diese Fluktuationen die Keime für Strukturen in unserem Universum: für Galaxien, Sterne und uns. Diese Idee stützt sich im Prinzip auf den gleichen Mechanismus wie die sogenannte Hawking-Strahlung am Horizont eines Schwarzen Loches, die ich ein Jahrzehnt früher vorausgesagt hatte, nur dass sie jetzt von einem kosmologischen Horizont kommt, also der Fläche, die das Universum in zwei Regionen unterteilt – eine, die wir sehen

können, und eine andere, die wir nicht beobachten können.

Im Sommer 1982 veranstalteten wir einen Workshop in Cambridge, an dem alle wichtigen Vertreter des Forschungsfeldes teilnahmen. Bei dieser Veranstaltung bewiesen wir den größten Teil unserer gegenwärtigen Vorstellungen von der Inflation, einschließlich der alles entscheidenden Dichtefluktuationen, die die Voraussetzung für die Galaxiebildung und damit für unsere Existenz sind. Etliche Forscher trugen zu der endgültigen Antwort bei. Das war zehn Jahre, bevor der COBE-Satellit 1993 die Fluktuationen in der Mikrowellenstrahlung entdeckte. Die Theorie war also dem Experiment weit voraus.

Weitere zehn Jahre später, im Jahr 2003, wurde die Kosmologie durch die ersten Ergebnisse des WMAP-Satelliten zur exakten Wissenschaft. WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) lieferte eine wunderbare Temperaturkarte der kosmischen Hintergrundstrahlung, ein Schnappschuss des Universums, als es etwa ein Hundertstel seines heutigen Alters hatte. Die Unregelmäßigkeiten, die man erkennt, werden von der Inflation vorhergesagt und bedeuten, dass einige Regionen des Universums eine etwas höhere Dichte hatten als andere. Die Gravitationsanziehung der Extradichte verlangsamte die Expansion dieser Region und kann sie schließlich veranlassen, zusammenzustürzen und Galaxien und Sterne zu bilden. Schauen Sie sich die Karte der Hintergrundstrahlung also genau an. Sie ist ein Bauplan für alle Strukturen im Universum. Wir sind das Produkt von Quantenfluktuation im ganz frühen Universum. *Gott würfelt tatsächlich.*

Inzwischen ist WMAP vom Planck-Satelliten abgelöst worden, der eine Karte des Universums mit sehr viel höherer Auflösung anfertigt. Der Planck-Satellit unterzieht unsere Theorien einem strengen Test. Möglicherweise kann der Satellit auch die Spuren der von der Inflation vorhergesagten Gravitationswellen entdecken. Dann würde die Quantengravitation quer über den Himmel geschrieben.

Es mag andere Universen geben. Die Stringtheorien – beziehungsweise die M-Theorie – sagen voraus, dass eine große Zahl von Universen, entsprechend den vielen verschiedenen möglichen Geschichten, aus dem Nichts geschaffen worden ist. Jedes Universum hat viele mögliche Geschichten und viele mögliche Zustände, wenn sie bis in die Gegenwart und darüber hinaus in die Zukunft altern. Die meisten dieser Zustände werden ganz anders sein als das Universum, das wir beobachten.

Noch besteht die Hoffnung, dass wir die ersten Belege für die String- oder M-Theorie mit dem LHC-Teilchenbeschleuniger, dem *Großen Hadronen-Speicherring*, in Genf finden werden. Aus Sicht der M-Theorie untersucht der LHC (*Large Hadron Collider*) nur niedrige Energien, aber wir könnten Glück haben und ein schwächeres Signal der fundamentalen Theorie entdecken, etwa die *Supersymmetrie*. Ich denke, die Entdeckung supersymmetrischer Partner der bekannten Teilchen würde unser Verständnis des Universums revolutionieren.

Der Anfang des Universums im heißen Urknall ist das ultimative Hochenergielabor zur Überprüfung der verallgemeinerten String- oder M-Theorie und unserer Ideen über die Bausteine von Raumzeit und Materie. Verschiedene Theorien hinterlassen unterschiedliche Fingerabdrücke in der gegenwärtigen Struktur des Universums, daher könnten uns astrophysikalische Daten Hinweise auf die Vereinheitlichung aller Naturkräfte liefern. Es könnte also durchaus andere Universen geben, aber leider werden wir nie in der Lage sein, sie zu erkunden.

Wir haben einige Hinweise auf den Ursprung des Universums gesehen. Das führt uns weiter zu zwei großen Fragen. »Wird das Universum enden? Ist das Universum einzigartig?«

Wie werden sich also die wahrscheinlichsten Geschichten des Universums in Zukunft verhalten? Es scheint verschiedene Möglichkeiten zu geben, die mit der Entstehung intelligenter Lebensformen zu vereinbaren sind. Alles hängt von der Materiemenge im Universum ab. Gibt es mehr als eine bestimmte kritische Menge, wird sich die Expansion verlangsamen?

Irgendwann beginnt dann die Materie in sich zusammenzustürzen und in einem Big Crunch zu verschmelzen. Damit wird die Geschichte des Universums in der realen Zeit enden. Als ich den Fernen Osten bereiste, bat man mich, den Big Crunch wegen der möglichen Auswirkungen auf die Märkte nicht zu erwähnen. Trotzdem kam es zum Börsenkrach, also muss die Geschichte doch irgendwie durchgesickert sein. Bei uns in Großbritannien scheinen sich die Menschen um ein mögliches Ende in 20 Milliarden Jahren nicht sonderlich zu sorgen. Bis das eintritt, können Sie noch eine Menge essen, trinken und sich amüsieren.

Liegt die Dichte des Universums unter dem kritischen Wert, ist die Gravitation zu schwach, um die Galaxien daran zu hindern davonzufiegen. Alle Sterne werden ausbrennen, und das Universum wird leerer und leerer,

kälter und kälter werden. Also wird auch in diesem Fall alles enden, nur nicht so dramatisch. Abermals bleiben uns ein paar Milliarden Jahre.

In dieser Antwort habe ich versucht, Ursprung, Zukunft und Beschaffenheit unseres Universums ein wenig zu erklären. Das Universum war in der Vergangenheit klein und dicht und ähnelte infolgedessen der Nussschale, mit der ich begonnen habe. Doch diese Nuss enthält im Ansatz alles, was in der realen Zeit geschieht. Hamlet hat also vollkommen recht. Wir könnten in eine Nussschale eingesperrt sein und uns trotzdem für die Könige eines unermesslichen Raumes halten.

Was war vor dem Urknall?

Nach der Keine-Grenzen-Hypothese ist die Frage, was vor dem Urknall war, sinnlos – so sinnlos wie die Frage, was südlich des Südpols ist –, weil es keinen Zeitbegriff gibt, auf den man sich beziehen könnte. Das Konzept der Zeit existiert nur innerhalb unseres Universums.

Gibt es anderes intelligentes Leben im Universum?

In diesem Kapitel möchte ich ein wenig über die Entwicklung des Lebens im Universum spekulieren, insbesondere über die Entwicklung intelligenten Lebens. Ich werde die menschliche Spezies dazurechnen, obwohl sie sich im Laufe der Geschichte vielfach ziemlich dumm benommen hat und sich dabei kaum gefragt haben dürfte, ob sie zum Überleben ihrer Art beiträgt. Zwei Fragen möchte ich erörtern: »Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass es Leben anderswo im Universum gibt?« Und: »Wie kann sich Leben in Zukunft entwickeln?«

Es ist eine allgemeine Erfahrung, dass die Dinge im Laufe der Zeit ungeordneter und chaotischer werden. Für diese Beobachtung gibt es sogar ein eigenes Gesetz, den sogenannten *Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik*, der besagt, dass die Gesamtmenge an Unordnung oder Entropie im Universum mit der Zeit stets zunimmt. Doch das Gesetz bezieht sich nur auf die gesamte Unordnung. Die Ordnung in einem Körper kann anwachsen, vorausgesetzt, die Unordnung in der Umgebung nimmt in größerem Maße zu.

Das geschieht in einem Lebewesen. Wir können Leben als ein geordnetes System definieren, das sich gegen die Tendenz zur Unordnung behaupten und sich reproduzieren kann. Das heißt, es kann ähnliche, aber unabhängige geordnete Systeme hervorbringen. Dazu muss das System Energie in irgendeiner geordneten Form – etwa Nahrung, Sonnenlicht oder elektrische Energie – zu ungeordneter Energie in Gestalt von Wärme umwandeln. Auf diese Weise kann das System die Bedingung erfüllen, nach der die Gesamtmenge an Unordnung zunimmt, während die Ordnung gleichzeitig in ihm selbst und in seinen Nachkommen anwächst. Das klingt verdächtig nach

einem Haus, das mit jedem neuen Baby etwas tiefer im Chaos versinkt.

Ein Lebewesen wie Sie oder ich ist gewöhnlich auf zwei Voraussetzungen angewiesen: einen Satz Anweisungen, die dem System sagen, wie es weiterlebt und wie es sich reproduziert, und auf einen Mechanismus, der die Anweisung ausführt. In der Biologie heißen diese beiden Voraussetzungen *Gene* und *Stoffwechsel*. Aber es ist darauf hinzuweisen, dass sie keineswegs biologisch sein müssen. Beispielsweise ist ein Computervirus ein Programm, das Kopien seiner selbst im Speicher eines Computers herstellt, um sich dann selbst auf andere Computer zu übertragen. Damit entspricht es der von mir genannten Definition eines lebenden Systems. Wie ein biologisches Virus ist es eine ziemlich degenerierte Form eines solchen Systems, weil es nur Anweisungen oder Gene enthält, aber keinen eigenen Stoffwechsel. Stattdessen programmiert es den Stoffwechsel des Wirtscomputers oder der Wirtszelle um. Gelegentlich hat man infrage gestellt, dass Viren Lebewesen seien, weil sie Parasiten sind und nicht unabhängig von ihren Wirten existieren können. Doch dann sind die meisten Lebensformen – auch wir selbst – Parasiten, denn sie ernähren sich von anderen Lebewesen und sind von ihnen abhängig, um zu überleben. Daher denke ich, dass Computerviren durchaus als Lebewesen zu betrachten sind. Vielleicht ist es für die menschliche Natur kennzeichnend, dass diese einzige Lebensform, die wir bislang geschaffen haben, rein destruktiv ist. Haben wir das Leben nach unserem eigenen Bilde geschaffen? Ich komme später auf elektronische Lebensformen zurück.

Was wir uns normalerweise als »Leben« vorstellen, basiert auf Ketten von Kohlenstoffatomen, zu denen einige wenige andere Atome hinzutreten, etwa Stickstoff oder Phosphor. Man kann darüber spekulieren, dass es Leben auch mit einer anderen chemischen Basis geben könnte, etwa Silizium, aber Kohlenstoff scheint der günstigste Fall zu sein, weil er die vielfältigsten chemischen Eigenschaften hat. Damit Kohlenstoffatome überhaupt mit den Eigenschaften, die sie haben, existieren können, bedarf es einer Feinabstimmung der physikalischen Konstanten, etwa der Skala der Quantenchromodynamik, der elektrischen Ladung und sogar der Raumzeitdimensionen.

Hätten diese Konstanten kaum merkliche andere Werte, wäre entweder der Kern des Kohlenstoffatoms instabil oder die Elektronen stürzten in den Kern. Auf den ersten Blick erscheint es als bemerkenswert, dass das Universum so

fein abgestimmt ist. Es könnte ein Indiz dafür sein, dass es speziell für die Entwicklung der menschlichen Spezies entworfen wurde.

Doch bei solchen Argumenten ist Vorsicht geboten, weil wir das sogenannte *Anthropische Prinzip*, nämlich die Vorstellung, unsere Theorien über das Universum müssten mit unserer eigenen Existenz vereinbar sein, zu berücksichtigen haben. Dieses Prinzip beruht auf der offensichtlichen Tatsache, dass wir nicht fragen könnten, warum das Universum so fein abgestimmt ist, wenn es nicht für Leben geeignet wäre. Das Anthropische Prinzip lässt sich entweder in seiner starken oder seiner schwachen Version anwenden. Beim *Starken Anthropischen Prinzip* nehmen wir an, dass es viele verschiedene Universen gibt, jedes mit eigenen Werten für die physikalischen Konstanten. Bei einer kleinen Zahl werden die Werte die Existenz von Objekten wie Kohlenstoffatomen zulassen, die dann als Bausteine für lebende Systeme dienen können. Da wir in einem dieser Universen leben müssen, sollten wir von der Feinabstimmung nicht überrascht sein. Gäbe es sie nicht, wären wir nicht hier. Die starke Form des Anthropischen Prinzips ist nicht sehr befriedigend. Welche operationale Bedeutung kann man der Existenz all dieser anderen Universen zuweisen? Wie kann sich das, was in ihnen geschieht, auf unser Universum auswirken, wenn sie doch von diesem getrennt sind?

Stattdessen werde ich von dem sogenannten *Schwachen Anthropischen Prinzip* ausgehen. Das heißt, ich werde die Werte der physikalischen Konstanten als gegeben voraussetzen. Aber ich werde beobachten, welche Schlussfolgerungen sich aus der Tatsache ableiten lassen, dass auf diesem Planeten, in diesem Stadium der Geschichte des Universums, Leben existiert.

Als das Universum vor ungefähr 13,8 Milliarden Jahren begann, gab es noch keinen Kohlenstoff. Es war noch so heiß, dass alle Materie in Form von Teilchen – Protonen und Neutronen – vorlag. Ursprünglich gab es gleiche Zahlen von Protonen und Neutronen. Doch als das Universum expandierte, kühlte es ab. Ungefähr eine Minute nach dem Urknall waren die Temperaturen ungefähr auf eine Milliarde Grad Celsius gefallen, also auf etwa das Hundertfache der Sonnentemperaturen. Bei dieser Temperatur beginnen Neutronen in Protonen zu zerfallen.

Wäre es dabei geblieben, hätte sich die gesamte Materie des Universums am Ende in das einfachste Element, *Wasserstoff*, verwandelt, dessen Kern aus einem einzigen Proton besteht. Einige der Neutronen kollidierten jedoch mit

Protonen, blieben an ihnen haften und bildeten so das nächst einfache Element, *Helium*, dessen Kern aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Schwerere Elemente, wie *Kohlenstoff* oder *Sauerstoff*, wurden im gerade entstehenden Universum nicht gebildet. Es lässt sich kaum vorstellen, dass ein lebendes System nur aus Wasserstoff und Helium hergestellt werden kann – im Übrigen war das frühe Universum immer noch viel zu heiß, als dass sich Atome zu Molekülen hätten zusammenfügen können.

Das Universum expandierte weiter und kühlte ab. Einige Regionen wiesen eine etwas höhere Dichte auf als andere, und die Gravitationsanziehung der Extramaterie in diesen Regionen verringerte ihre Expansion und brachte sie schließlich zum Stillstand. Stattdessen fielen sie zu Galaxien und Sternen zusammen, eine Entwicklung, die ungefähr zwei Milliarden Jahre nach dem Urknall begann. Einige der frühen Sterne besaßen mehr Masse als unsere Sonne; sie waren heißer als die Sonne und verwandelten die ursprünglichen Elemente Wasserstoff und Helium in schwerere Elemente wie Kohlenstoff, Sauerstoff und Eisen. Das dürfte nicht länger als einige Hundert Millionen Jahre gedauert haben. Danach explodierten einige der Sterne als Supernovae und schleuderten ihre schweren Elemente zurück ins All, wo sie als Rohmaterial für spätere Stern generationen dienten.

Andere Sterne sind zu weit von uns entfernt, als dass wir unmittelbar erkennen könnten, ob sie Planeten mit sich führen. Zwei Techniken ermöglichen uns, Planeten, die um Sterne kreisen, zu entdecken. Bei der ersten Methode beobachtet man den Stern, um zu sehen, ob die Lichtmenge, die von ihm ausgeht, konstant bleibt. Bewegt sich ein Planet vor dem Stern, wird das Licht des Sternes leicht abgedunkelt.

Eine zweite Methode ist die genaue Messung der Sternposition. Umkreist ein Planet den Stern, verursacht er ein minimales Schwanken dieser Sternposition. Dies kann man beobachten. Handelt es sich um eine regelmäßige Schwankung, kann man sie auf einen Planeten zurückführen, der sich auf einer Umlaufbahn um den Stern befindet.

Diese Methoden wurden zum ersten Mal vor etwa 20 Jahren angewandt, und inzwischen sind einige Tausend Planeten im Orbit entfernter Sterne entdeckt worden. Jeder fünfte Stern, so schätzt man, hat einen erdähnlichen Planeten, der ihn in einer solchen Entfernung umkreist, dass er für Leben, wie wir es kennen, kompatibel ist.

Vor ungefähr viereinhalb Milliarden Jahren, oder neun Milliarden Jahre

nach dem Urknall, wurde unser eigenes Sonnensystem aus Gas gebildet, das mit den Überresten früherer Sterne durchsetzt war. Die Erde entstand größtenteils aus den schwereren Elementen, einschließlich Kohlenstoff und Sauerstoff. Irgendwie fanden diese Atome zu DNA-Molekülen zusammen.

Das war die berühmte Form der Doppelhelix, die am 28. Februar 1953 von Francis Crick und James Watson im Cavendish-Laboratorium in Cambridge entdeckt wurde. Für die Verbindung der beiden Ketten sorgen Paare von Basen. Es gibt vier Basen – *Adenin*, *Cytosin*, *Guanin* und *Thymin*. Einem Adenin auf einer Kette entspricht immer ein Thymin auf der anderen Kette und einem Guanin ein Cytosin auf der anderen Kette. Folglich legt die Sequenz der Basen auf einer Kette eine spezifische, komplementäre Sequenz auf der anderen Kette fest. Dann können sich die beiden Ketten trennen und jede als Vorlage für die Herstellung weiterer Ketten dienen. Auf diese Weise reproduzieren DNA-Moleküle die genetische Information, die in den Sequenzen der Basen verschlüsselt ist. Mithilfe der Sequenzen lassen sich auch Proteine und andere chemische Substanzen herstellen; sie führen die in der Sequenz kodierten Anweisungen aus und fügen das Rohmaterial zusammen, das die DNA braucht, um sich zu reproduzieren.

Wir wissen, wie gesagt, (noch) nicht, wann DNA-Moleküle zum ersten Mal auftraten. Da kaum damit zu rechnen ist, dass ein DNA-Molekül durch Zufallsfluktuationen entsteht, hat man gelegentlich behauptet, das Leben sei von außerhalb auf die Erde gelangt – etwa durch einen Gesteinsbrocken, der sich vom Mars gelöst habe, als die Planeten noch instabil waren –, und es schwebten noch viele Lebenskeime durch unsere Galaxis. Allerdings dürfte es der DNA kaum gelingen, die Strahlung im All lange zu überleben.

Wenn die Entstehung von Leben auf einem gegebenen Planeten sehr unwahrscheinlich ist, könnte man erwarten, dass es dazu sehr lange braucht. Genauer, man könnte davon ausgehen, dass das Leben gerade noch rechtzeitig für die nachfolgende Evolution erscheint, aus der intelligente Lebensformen wie die unsere hervorgehen – bevor die Sonne sich aufbläht und die Erde verschlingt. Das Zeitfenster, in dem dies geschehen könnte, entspricht der Lebensdauer der Sonne – also etwa zehn Milliarden Jahren. Eine intelligente Lebensform könnte bis dahin die Raumfahrt so weit beherrschen, dass sie die Möglichkeit hätte, auf einen anderen Stern zu fliehen. Andernfalls wäre das Leben auf der Erde zum Untergang verurteilt.

Fossile Belege lassen darauf schließen, dass vor rund dreieinhalb

Milliarden Jahren erste Lebensformen die Erde bevölkerten. Möglicherweise war das nur 500 Millionen Jahre, nachdem die Erde für die Entwicklung von Leben stabil und kühl genug war. Aber es hätte sieben Milliarden Jahre dauern können, bis sich Leben entwickelte. Und dann wäre noch genügend Zeit geblieben, um Lebewesen wie uns Menschen zu entwickeln, die nach dem Ursprung des Lebens fragen können. Wenn die Wahrscheinlichkeit für die Entwicklung von Leben auf einem gegebenen Planeten sehr gering ist, warum ist es dann auf der Erde in etwa einem Viertel der zur Verfügung stehenden Zeit geschehen?

Das frühe Auftreten von Leben auf der Erde lässt vermuten, dass es unter geeigneten Bedingungen gute Aussichten für die Spontanerzeugung von Leben auf der Erde gibt. Vielleicht gab es einige einfachere Organisationsformen, die die DNA entwickelten. Sobald die DNA vorhanden war, erwies sie sich wahrscheinlich als so erfolgreich, dass sie alle früheren Formen vollständig ersetzte. Wir wissen nicht, wie diese frühen Formen beschaffen waren, aber eine Möglichkeit wäre, dass es die RNA, die *Ribonukleinsäure*, war.

Die RNA ähnelt der DNA, ist aber einfacher und besitzt nicht die Form der Doppelhelix. Kurze RNA-Sequenzen könnten sich wie die DNA reproduziert und schließlich zu dieser entwickelt haben. Im Labor können wir aus nicht lebendem Material keine Nukleinsäuren herstellen, von der RNA ganz zu schweigen. Doch wenn 500 Millionen Jahre zur Verfügung stehen und Ozeane den größten Teil der Erde bedecken, könnte durchaus eine gewisse Wahrscheinlichkeit bestehen, dass die RNA durch einen Zufall hervorgebracht wurde.

Bei der Selbstreproduktion der DNA kam es zu zufälligen Fehlern, von denen viele schädlich waren und deshalb ausstarben. Manche blieben neutral – sie wirkten sich nicht auf die Funktion des Gens aus. Und einige wenige Fehler erwiesen sich als für das Überleben der Art vorteilhaft – diese wurden von Darwins natürlicher Selektion ausgewählt.

Der biologische Evolutionsprozess verlief zunächst sehr langsam. Er brauchte zweieinhalb Milliarden Jahre, um sich von den frühesten Zellen zu mehrzelligen Tieren zu entwickeln. Aber es dauerte weniger als eine weitere Milliarde Jahre, bis sich einige von ihnen zu Fischen und einige von Fischen zu Säugetieren entwickelten. Dann scheint sich die Evolution nochmals beschleunigt zu haben. Es dauerte nur etwa 100 Millionen Jahre, bis wir uns

aus den frühen Säugetieren entwickelten. Der Grund für diese Beschleunigung: Fische enthalten bereits die meisten wichtigen Organe des Menschen – und Säugetiere im Wesentlichen alle. Was es für die Evolution von frühen Säugetieren wie den Lemuren zum Menschen brauchte, war lediglich ein bisschen Feinabstimmung.

Doch mit der menschlichen Spezies erreichte die Evolution ein kritisches Stadium, in seiner Bedeutung mit der Entwicklung der DNA vergleichbar. Entscheidend war die Entstehung der *Sprache*, vor allem der Schriftsprache. Dank ihrer lassen sich Informationen von einer Generation auf die nächste übertragen, ohne dass es dazu des genetischen Weges mittels der DNA bedarf. In den 10000 Jahren dokumentierter Geschichte hat es einige nachweisbare Veränderungen in der menschlichen DNA gegeben, für die die biologische Evolution verantwortlich ist, aber das Wissen, das in diesem Zeitraum von Generation zu Generation weitergegeben wurde, ist beispiellos angewachsen. Ich habe Bücher geschrieben, um Ihnen mitzuteilen, was ich in einer langen Laufbahn als Wissenschaftler in Erfahrung gebracht habe, und dabei habe ich bestimmte Erkenntnisse aus meinem Gehirn auf die Seiten der Bücher übertragen, damit Sie sie lesen können.

Die DNA des Menschen enthält ungefähr drei Milliarden Basenpaare an Nukleinsäuren. Doch ein großer Teil der in dieser Sequenz codierten Informationen ist redundant oder inaktiv. Infolgedessen beträgt die Gesamtmenge der nützlichen Informationen in unseren Genen wahrscheinlich rund 100 Millionen Bits. Ein Bit Informationen ist die Antwort auf eine Ja-nein-Frage. Verglichen damit dürfte ein Paperback-Roman etwa zwei Millionen Informationsbits enthalten. So gerechnet, entspricht ein Mensch ungefähr 50 *Harry-Potter*-Büchern, während eine größere Nationalbibliothek rund fünf Millionen Bücher enthalten kann – oder rund zehn Billionen Bits. Die Informationsmenge, die in Büchern oder über das Internet verbreitet wird, ist 100000-mal so groß wie die in der DNA.

Noch wichtiger ist, dass die Informationen in Büchern viel rascher verändert und aktualisiert werden können. Wir Menschen haben mehrere Millionen Jahre gebraucht, um uns aus den Affen zu entwickeln. Während dieser Zeit haben sich die nützlichen Informationen unserer DNA nur um einige Millionen Bits verändert, woraus folgt, dass die biologische Evolutionsrate im Menschen ungefähr ein Bit pro Jahr beträgt. Im Gegensatz dazu werden jedes Jahr etwa 50000 neue Bücher in englischer Sprache

veröffentlicht, die an die 100 Milliarden Informationsbits enthalten dürften. Natürlich ist die große Mehrheit dieser Informationen Müll und von keinerlei Nutzen für irgendeine Lebensform. Doch selbst unter diesen Umständen ist die Rate, mit der nützliche Informationen hinzugefügt werden können, millionen-, wenn nicht sogar milliardenfach höher als im Fall der DNA.

Daraus folgt, dass wir in eine neue Evolutionsphase eingetreten sind. Zunächst vollzog sich die Evolution mittels der natürlichen Selektion – durch *Zufallsmutationen*. Diese darwinistische Phase dauerte rund dreieinhalb Milliarden Jahre und brachte uns hervor, Lebewesen, die die Sprache entwickelten, um Informationen auszutauschen. Doch seit etwa 10000 Jahren befinden wir uns in einem Abschnitt unserer menschlichen Evolution, den man als *externe Übertragungsphase* bezeichnen könnte. In dieser Phase haben sich die *internen* Informationsaufzeichnungen, die mittels DNA an nachfolgende Generationen übermittelt werden, ein wenig verändert. Die *externen* Aufzeichnungen hingegen – in Büchern und anderen dauerhaften Speicherformen – haben sich in riesigem Umfang vermehrt.

Manche Wissenschaftler verwenden den Begriff »Evolution« nur für intern übermitteltes genetisches Material und wenden sich entschieden dagegen, dass er auch auf extern weitergegebene Informationen ausgedehnt wird. Meiner Ansicht nach ist dies eine zu begrenzte Sichtweise. Wir sind mehr als nur unsere Gene. Möglicherweise verfügen wir nicht über größere Körperkraft oder mehr angeborene Intelligenz als unsere Vorfahren, die in Höhlen wohnten. Doch was uns von ihnen unterscheidet, ist das Wissen, das wir während der vergangenen 10000 – und insbesondere der letzten 300 – Jahre zusammengetragen haben. Ich halte es für legitim, unsere Perspektive etwas auszuweiten und neben den Informationen, die durch die DNA weitergegeben werden, auch die extern übermittelten Informationen zur Evolution des Menschen zu rechnen.

Die Zeitskala für die Evolution, bezogen auf die Periode der externen Informationsübermittlung, ist die Zeitskala für die Akkumulation von Informationen. Während es früher gewöhnlich um Hunderte oder sogar Tausende von Jahren ging, ist diese Zeitskala heute auf rund 50 Jahre oder weniger zurückgegangen. Andererseits hat sich die evolutionäre Entwicklung der Gehirne, mit denen wir diese Informationen verarbeiten, nur auf der darwinistischen Skala vollzogen. Dieser Umstand verursacht allmählich Probleme. Im 18. Jahrhundert soll es einen Mann gegeben haben, der jedes

bis dahin geschriebene Buch gelesen hatte. Doch wenn Sie heute Tag für Tag ein Buch läsen, brauchten Sie etliche Zehntausend Jahre, um alle Bücher in einer Nationalbibliothek zu lesen. Bis zu diesem Zeitpunkt wären schon wieder sehr viel mehr Bücher geschrieben worden.

Daraus folgt, dass niemand mehr als einen winzigen Ausschnitt des menschlichen Wissens bewältigen kann. Die Menschen müssen sich auf immer schmalere Bereiche spezialisieren. Wahrscheinlich wird es in Zukunft eine unserer Haupteinschränkungen sein. Wir werden sicherlich nicht mehr lange mit dieser exponentiellen Wachstumsrate des Wissens fortfahren können, die wir in den vergangenen 300 Jahren erlebt haben. Eine noch größere Einschränkung und Gefahr für künftige Generationen ist die Tatsache, dass wir immer noch Instinkte – insbesondere aggressive Triebe – haben, die wir als Höhlenmenschen entwickelten. Aggressionen, bei denen Männer unterworfen oder getötet und ihnen ihre Frauen und Nahrungsmittel geraubt werden, führten zweifellos bis in die Gegenwart zu Überlebensvorteilen. Doch heute können solche Aggressionen die ganze Menschheit und große Teile des sonstigen Lebens auf der Erde vernichten. Ein Atomkrieg ist immer noch die größte unmittelbare Gefahr. Aber es gibt auch andere Bedrohungen, etwa die Freisetzung eines gentechnisch erzeugten Virus. Oder den Treibhauseffekt, der außer Kontrolle gerät.

Uns bleibt keine Zeit, darauf zu warten, dass die darwinistische Evolution aus uns intelligenter und gutartiger Wesen macht. Wir treten jetzt aber in eine neue Phase ein, die man die *selbst-designte Evolution* nennen könnte: Wir werden in der Lage sein, unsere DNA selbst zu verändern und zu verbessern.

Die DNA haben wir nun kartiert, was bedeutet, dass wir das »Buch des Lebens« gelesen haben, sodass wir jetzt damit beginnen können, unsere Korrekturen einzufügen. Zunächst werden sich diese Korrekturen darauf beschränken, genetische Defekte zu reparieren – etwa Mukoviszidose und Muskelschwund, Erkrankungen, die durch einzelne Gene verursacht werden und daher relativ leicht zu identifizieren und zu korrigieren sind.

Für andere Eigenschaften ist wahrscheinlich eine Vielzahl von Genen verantwortlich, daher wird es viel schwieriger sein, sie zu bestimmen und die Beziehungen zwischen ihnen zu ermitteln. Trotzdem bin ich sicher, dass die Menschen während des nächsten Jahrhunderts entdecken werden, wie man Intelligenz und Instinkte – etwa den Aggressionstrieb – modifizieren kann.

Wie ich an anderer Stelle gesagt habe, wird man wahrscheinlich Gesetze gegen die gentechnische Veränderung von Menschen erlassen. Aber einige Forscher werden der Versuchung nicht widerstehen können, die menschlichen Fähigkeiten zu verbessern, etwa das Gedächtnis, die Krankheitsresistenz und die Lebenserwartung. Sobald die ersten Musterexemplare dieser »Übermenschen« auftauchen, wird es erhebliche politische Probleme mit den Menschen geben, die nicht verändert und nicht verbessert sind und folglich nicht mehr konkurrenzfähig sein werden. Sie werden vermutlich aussterben oder zur Bedeutungslosigkeit verurteilt sein. Ein Geschlecht von Lebewesen wird den Ton angeben, das sich selbst designt und sich in immer rascherem Tempo optimiert.

Wenn es der menschlichen Spezies gelingt, sich ein völlig neues Gen-Design zuzulegen, um das Risiko der Selbstvernichtung zu verringern oder zu beseitigen, wird diese Spezies sich wahrscheinlich ausbreiten und andere Planeten und Sterne besiedeln. Doch Raumfahrten über große Entfernungen werden für chemisch basierte Lebensformen, die, wie wir, von der DNA abhängig sind, sehr schwierig sein. Die natürliche Lebenserwartung solcher Geschöpfe ist im Vergleich zur Reisezeit kurz. Nach der Relativitätstheorie kann nichts schneller sein als das Licht, daher würde die Hin- und Rückreise zum nächsten Stern mindestens acht Jahre dauern und die Fahrt zum Zentrum der Milchstraße rund 50000 Jahre.

In der Science-Fiction überwinden die Protagonisten diese Schwierigkeit durch Raumkrümmungen oder indem sie Abkürzungen durch Extradimensionen nehmen. Aber das wird meiner Meinung nach nie möglich sein, egal wie intelligent das Leben noch werden wird. Nach der Relativitätstheorie kann man auch in der Zeit zurückreisen, wenn man schneller als das Licht ist. Das würde zu Problemen führen, weil die Menschen, die in der Zeit zurückreisen, die Vergangenheit verändern könnten. In diesem Fall hätten wir wohl schon viele Touristen aus der Zukunft gesehen, die gekommen wären, um unsere kuriose altmodische Welt neugierig in Augenschein zu nehmen.

Es könnte möglich sein, mithilfe der Gentechnik DNA-basiertem Leben eine unendliche oder zumindest 100000-jährige Lebensdauer zu verschaffen. Leichter wäre es allerdings – und für uns durchaus schon machbar –, Maschinen zu schicken. Diese ließen sich so konstruieren, dass ihre Betriebsdauer auch interstellare Reisen überstünde. Wenn sie einen neuen

Stern erreichten, könnten sie auf einem geeigneten Planeten landen und die Bodenschätze abbauen, die sie brauchten, um weitere Maschinen zu bauen, die dann ihrerseits zu neuen Sternen aufbrechen könnten. Diese Maschinen wären eine neue Lebensform, die aus mechanischen und elektronischen Komponenten bestünde statt aus Makromolekülen. Sie könnten schließlich das DNA-basierte Leben ersetzen, so wie die DNA einst frühere Lebensformen ersetzt hat.

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass wir außerirdischen Lebensformen begegnen, wenn wir die Milchstraße erkunden? Falls richtig ist, was wir über die Zeitskala für die Entwicklung des Lebens auf der Erde gesagt haben, müsste es viele andere Sterne geben, deren Planeten Leben hervorgebracht haben. Einige dieser Sternsysteme könnten sich fünf Milliarden Jahre vor der Erde gebildet haben. Warum wimmelt es also in unserer Galaxis nicht von Lebensformen, die sich selbst mechanisch oder biologisch designen? Warum ist die Erde noch nicht besucht oder gar kolonisiert worden? Nebenbei gesagt, ich lasse alle Behauptungen außer Acht, nach denen Ufos Wesen aus dem All enthalten könnten, da ich denke, dass Besuche von Außerirdischen sehr viel auffälliger – und wahrscheinlich sehr viel unangenehmer – wären.

Warum also haben wir noch keinen Besuch gehabt? Möglicherweise ist die Wahrscheinlichkeit der spontanen Entstehung von Leben so gering, dass die Erde der einzige Planet in der Milchstraße – oder im beobachtbaren Universum – ist, auf dem dieses Ereignis stattgefunden hat. Eine andere Möglichkeit wäre, dass es eine realistische Wahrscheinlichkeit für die Bildung sich selbst reproduzierender Systeme, wie etwa Zellen, gibt, aber dass die meisten dieser Lebensformen keine Intelligenz entwickeln.

Wir halten intelligentes Leben für eine unausweichliche Folge der Evolution, aber was wäre, wenn es sich anders verhielte? Das Anthropische Prinzip zeigt, dass wir uns vor solchen Argumenten hüten sollten. Es ist eher wahrscheinlich, dass die Evolution ein Zufallsprozess ist, in dem die Intelligenz nur eines von einer großen Zahl möglicher Resultate darstellt.

Es steht noch nicht einmal fest, dass die Intelligenz irgendeinen langfristigen Überlebenswert hat. Bakterien und andere einzellige Organismen könnten noch leben, wenn längst alles andere Leben auf der

Erde durch menschliches Handeln ausgelöscht wäre. Vielleicht war die Intelligenz ein höchst unwahrscheinliches Ereignis in der Entwicklung des Lebens auf der Erde, geht man von der Chronologie der Evolution aus, die sehr viel Zeit brauchte – zweieinhalb Milliarden Jahre –, um von den einzelligen zu den mehrzelligen Lebewesen zu gelangen, die eine notwendige Vorstufe der Intelligenz sind. Das ist ein beträchtlicher Bruchteil der Zeitspanne, die zur Verfügung steht, bis die Sonne sich aufbläht. Es entspräche der Hypothese, nach der die Wahrscheinlichkeit, dass das Leben Intelligenz entwickelt, gering ist. In diesem Fall dürften wir erwarten, viele andere Lebensformen in der Milchstraße zu finden, hätten aber kaum eine Chance, auf intelligentes Leben zu stoßen.

Eine weitere Möglichkeit wäre, dass das Leben in der Entwicklung zu einem intelligenten Stadium durch die Kollision eines Asteroiden oder Kometen mit dem betreffenden Planeten gehindert würde. Im Juli 1994 haben wir die Kollision des Kometen Shoemaker-Levy mit Jupiter beobachtet. Der Zusammenprall erzeugte eine Reihe enormer Feuerkugeln. Nach allgemeiner Überzeugung war vor rund 66 Millionen Jahren der Einschlag eines erheblich kleineren Himmelskörpers auf der Erde für das Aussterben der Dinosaurier verantwortlich. Einige kleinere Frühformen der Säugetiere überlebten, doch alles, was die Körpergröße eines Menschen hatte oder noch größer war, wurde mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgelöscht. Es lässt sich nur schwer sagen, wie oft solche Kollisionen vorkommen, aber realistisch geschätzt kann man im Durchschnitt alle 20 Millionen Jahre mit einem solchen Ereignis rechnen. Wenn dies zutrifft, hätte sich intelligentes Leben auf der Erde nur dank des glücklichen Umstands ausgebildet, dass es in den vergangenen 66 Millionen Jahren keinen Einschlag mehr gegeben hat. Andere Planeten in der Milchstraße, auf denen sich Leben entwickelte, hatten möglicherweise keine kollisionsfreien Perioden, die so lang waren, dass sich intelligente Lebewesen entwickeln konnten.

Eine dritte Möglichkeit wäre, dass sich Leben zwar mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit bildet und zu intelligenten Formen entwickelt, dass aber das System instabil wird und das intelligente Leben sich selbst zerstört. Das wäre eine äußerst pessimistische Schlussfolgerung, deshalb hoffe ich sehr, dass sie nicht zutrifft.

Die vierte Möglichkeit ist mir die liebste: Es gibt da draußen andere intelligente Lebensformen, aber sie haben uns bislang übersehen. Im Jahr

2015 war ich daran beteiligt, die *Breakthrough Initiatives* anzubahnen, ein Programm zur wissenschaftlichen und technologischen Erforschung, das mindestens zehn Jahre dauern wird. *Breakthrough Listen* nutzt den Empfang von Radiowellen, um nach intelligentem außerirdischen Leben zu suchen. Und mit modernsten Einrichtungen, 100 Millionen Dollar an Finanzmitteln und Tausenden von Stunden Teleskopzeit ist *Breakthrough Listen* das größte wissenschaftliche Forschungsvorhaben, das jemals durchgeführt wurde, um Beweise für Zivilisationen jenseits der Erde zu finden. *Breakthrough Message* ist ein internationaler Wettbewerb, um Botschaften abzufassen, die von einer Hochkultur gelesen werden können. Doch sollten wir erst antworten, wenn wir uns ein wenig weiterentwickelt haben. Wenn wir in unserem gegenwärtigen Stadium mit einer höher entwickelten Zivilisation zusammentreffen, könnte es uns ergehen wie den amerikanischen Ureinwohnern bei der Begegnung mit Kolumbus – und ich glaube nicht, dass die Indianer darüber besonders glücklich waren.

ViSiT WWW.iBOOKS.TO

EBOOKS

COMICS

MAGAZINE & ZEITSCHRIFTEN

ZEITUNGEN



iBOOKS.TO

EBOOKS - GRATIS - DOWNLOADEN

Wenn es außerhalb der Erde intelligentes Leben gäbe, wäre es dann den Formen, die wir kennen, ähnlich oder anders?

Gibt es intelligentes Leben auf der Erde? Aber im Ernst, wenn anderswo intelligentes Leben wäre, müsste es in großer Entfernung von uns existieren, weil es sonst die Erde schon längst besucht hätte. Und ich denke, wir hätten es bemerkt, wenn wir Besuch bekommen hätten; es wäre wie im Film *Independence Day*.

Können wir die Zukunft vorhersagen?

Früher muss die Welt den Menschen ziemlich willkürlich erschienen sein. Katastrophen wie Überschwemmungen, Seuchen, Erdbeben oder Vulkanausbrüche sind, so schien es ihnen, ohne Vorwarnung oder erkennbaren Grund über sie hereingebrochen. Lange Zeit schrieb man solche Naturerscheinungen einem Pantheon von Göttern und Göttinnen zu, die sich launisch und unberechenbar verhielten. Beim besten Willen ließ sich nicht vorhersagen, was sie tun würden. Die einzige Hoffnung der Menschen lag darin, die Gunst der Götter durch Opfergaben oder -handlungen zu gewinnen. In gewisser Weise praktizieren viele Menschen diesen Glauben heute noch, indem sie versuchen, einen Pakt mit dem Glück zu schließen. Sie geloben, sich besser zu benehmen oder lebenswürdiger zu sein, wenn sie in einem Kurs eine Eins bekommen oder ihre Fahrprüfung bestehen.

Allmählich müssen die Menschen aber gewisse Regelmäßigkeiten im Verhalten der Natur bemerkt haben, die sich am deutlichsten in den Bewegungen der Himmelskörper zeigten. So kam es, dass sich die Astronomie als erste Wissenschaft entwickelte. Vor mehr als 300 Jahren wurde sie von Newton auf eine so verlässliche mathematische Grundlage gestellt, dass wir noch heute die Bewegung fast aller Himmelskörper mithilfe seiner Gravitationstheorie vorhersagen. Dem Beispiel der Astronomie folgend, fand man heraus, dass auch andere Naturerscheinungen exakten wissenschaftlichen Gesetzen gehorchen. Das führte zur Idee des wissenschaftlichen Determinismus, die der französische Wissenschaftler Pierre-Simon Laplace offenbar zum ersten Mal öffentlich formulierte.

Laplace würde ich Ihnen gerne wörtlich zitieren, aber leider hat er eine gewisse Ähnlichkeit mit Proust: Seine Sätze sind extrem lang und kompliziert. Daher habe ich beschlossen, sie mit eigenen Worten

wiederzugeben: Wenn wir zu einem gegebenen Zeitpunkt die Positionen und Geschwindigkeiten aller Teilchen im Universum kennen würden, schrieb Laplace, wären wir in der Lage, ihr Verhalten zu jedem Zeitpunkt in der Vergangenheit oder Zukunft zu berechnen.

Nach einer nicht belegten Anekdote fragte Napoleon den Wissenschaftler, wie Gott in sein System passe, woraufhin Laplace erwiderte: »Sire, diese Hypothese habe ich nicht benötigt.« Sicherlich wollte Laplace damit nicht behaupten, Gott existiere nicht, sondern nur, dass er nicht eingreife, um die wissenschaftlichen Gesetze zu brechen. Diese Ansicht müsste eigentlich jeder Wissenschaftler vertreten. Ein wissenschaftliches Gesetz ist kein wissenschaftliches Gesetz, wenn es nur gilt, solange ein übernatürliches Wesen beschließt, die Dinge laufen zu lassen und nicht zu intervenieren.

Seit Laplace ist die Ansicht, der Zustand des Universums zu einem bestimmten Zeitpunkt bestimme die Zustände zu allen anderen Zeiten, einer der zentralen Grundsätze der Naturwissenschaften. Daraus folgt, dass wir, zumindest im Prinzip, die Zukunft vorhersagen können. In der Praxis ist diese Fähigkeit jedoch erheblich eingeschränkt, zum einen, weil die Gleichungen sehr komplex werden, und zum anderen, weil sie oft eine Eigenschaft haben, die wir Chaos nennen. Wie jeder weiß, der den Film *Jurassic Park* gesehen hat, ist damit gemeint, dass eine winzige Störung an einem Ort weitreichende Veränderungen an einem anderen hervorrufen kann. Der Flügelschlag eines Schmetterlings in Australien kann einen Regenguss im New Yorker Central Park auslösen. Dieser Vorgang, darin liegt die Schwierigkeit, ist nicht wiederholbar. Wenn der Schmetterling das nächste Mal mit den Flügeln schlägt, werden eine Vielzahl anderer Bedingungen herrschen, was das Wetter ebenfalls beeinflussen wird, aber diesmal anders. Wegen dieses Chaosfaktors sind Wettervorhersagen so unzuverlässig.

Trotz dieser praktischen Schwierigkeiten blieb der wissenschaftliche Determinismus das offizielle Dogma des 19. Jahrhunderts. Im 20. Jahrhundert gab es zwei Entwicklungen, die zeigten, dass Laplaces Vorstellung von einer vollständigen Vorhersage der Zukunft nicht haltbar ist. Die erste Theorie war die sogenannte Quantenmechanik. Im Jahr 1900 stellte sie der deutsche Physiker Max Planck als Ad-hoc-Hypothese auf, um ein auffälliges Paradox zu lösen. Nach den bis zu Laplace zurückreichenden klassischen Theorien des 19. Jahrhunderts gibt ein heißer Körper, etwa ein Stück rotglühendes Metall, Strahlung ab. Es verliert Energie in Form von

Radiowellen, Infrarotlicht, sichtbarem Licht, ultraviolettem Licht, Röntgenstrahlen und Gammastrahlen, alle von gleicher Stärke. Das bedeutete, wenn wir dem Determinismus folgen, nicht nur, dass wir alle an Hautkrebs sterben würden, sondern auch, dass alles im Universum die gleiche Temperatur hätte, was offensichtlich nicht der Fall ist.

Freilich zeigte Planck, dass sich diese Katastrophe vermeiden lässt, wenn man auf die Vorstellung verzichtet, die Strahlungsmenge könne jeden Wert annehmen, und stattdessen davon ausgeht, die Strahlung werde nur in *Päckchen* oder *Quanten* einer bestimmten Größe abgegeben – etwa so, als stellte man fest, dass sich Zucker im Supermarkt nicht lose kaufen lässt, sondern in Kilotüten. Die Energie in den Päckchen oder Quanten ist beim ultravioletten Licht und bei Röntgenstrahlen höher als beim infraroten oder sichtbaren Licht. Daraus folgt: Wenn ein Körper nicht so heiß ist – wie beispielsweise die Sonne –, dann hat er auch nicht genügend Energie, um auch nur ein einziges Quantum ultraviolettes Licht oder Röntgenstrahlung abzugeben. Aus diesem Grund bekommen wir von einer Tasse Kaffee keinen Sonnenbrand.

Planck hielt die Quantenhypothese nur für einen mathematischen Trick ohne irgendeine physikalische Wirklichkeit, was immer das heißen mag. Doch die Physiker entdeckten andere Verhaltensweisen, die sich nur durch Größen erklären ließen, die diskrete oder gequantelte und keine kontinuierlich veränderlichen Werte hatten. Beispielsweise fand man heraus, dass Elementarteilchen sich wie kleine Kreisel verhalten, die um eine Achse rotieren. Wir bemerken nicht, dass ein normaler Kreisel sich tatsächlich in einer raschen Folge diskreter – das heißt gesonderter – Schritte und nicht kontinuierlich verlangsamt. Doch bei Kreiseln, die so klein wie Atome sind, spielt der diskrete Charakter eine wichtige Rolle.

Es dauerte einige Zeit, bis den Forschern klar wurde, was dieses Quantenverhalten für den Determinismus bedeutete. Erst 1925 wies Werner Heisenberg, ein weiterer deutscher Physiker, darauf hin, dass man nicht gleichzeitig die exakte Position und die Geschwindigkeit eines atomaren Teilchens messen kann. Um zu sehen, wo sich ein Teilchen befindet, muss man einen Lichtstrahl darauf richten. Doch nach Plancks Hypothese kann man keine beliebig kleine Lichtmenge dazu verwenden. Es muss mindestens ein Quantum sein. Dieses aber wird das Verhalten des Teilchens stören und seine Geschwindigkeit in einer Weise verändern, die wir nicht vorhersagen

können. Um die Position des Teilchens genau zu bestimmen, muss man kurzwelliges Licht verwenden – ultraviolettes Licht, Röntgenstrahlen oder Gammastrahlen. Doch auch hier sagt uns Plancks Hypothese, dass Quanten dieses nicht sichtbaren Lichtes höhere Energien besitzen als die Quanten des sichtbaren Lichtes. Daher werden diese Lichtquanten die Geschwindigkeit des Teilchens noch stärker stören. Das ist eine No-win-Situation: Je genauer wir versuchen, die Position des Teilchens zu messen, desto weniger genau können wir die Geschwindigkeit in Erfahrung bringen, und umgekehrt.

Diese Erkenntnis fasste Heisenberg in seiner *Unschärferelation* zusammen: Die Ungewissheit der Position eines Teilchens mal der Ungewissheit seiner Geschwindigkeit ist immer größer als die sogenannte Planck-Konstante geteilt durch die doppelte Masse des Teilchens.

Laplaces Entwurf des wissenschaftlichen Determinismus setzte voraus, man könne die Positionen und Geschwindigkeiten der Teilchen im Universum zu einem bestimmten Zeitpunkt genau kennen. Diesem Determinismus wurde durch Heisenbergs Unschärferelation die Grundlage entzogen. Wie sollte man die Zukunft vorhersagen, wenn man zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht die Positionen und Geschwindigkeiten von Teilchen genau messen konnte? Egal, wie leistungsfähig Ihr Computer ist, wenn Sie lausige Daten eingeben, werden Sie lausige Vorhersagen herausbekommen.

Einstein war sehr unglücklich über den scheinbaren Zufallscharakter der Natur. Seine Auffassung fasste er in einem berühmten Ausspruch zusammen: »Gott würfelt nicht.« Er war wohl der Ansicht, diese Ungewissheit sei nur vorläufig; dahinter verberge sich eine Wirklichkeit, in der Teilchen genau definierte Positionen und Geschwindigkeiten hätten und sich ganz im Geist der Laplaceschen Gesetze deterministisch verhielten. Diese Wirklichkeit mag Gott bekannt sein, aber die Quantenbeschaffenheit des Lichtes hindert uns daran, sie zu sehen.

Einsteins Auffassung würde man heute als eine Theorie mit verborgenen Variablen bezeichnen. Solche Theorien bieten eine ideale Möglichkeit, die Unschärferelation in die Physik einzugliedern. Sie sind die Grundlage der Vorstellung, die sich viele Wissenschaftler und fast alle Wissenschaftsphilosophen vom Universum machen. Aber diese Theorien mit verborgenen Variablen sind falsch. Der britische Physiker John Bell entwarf einen experimentellen Test, der Theorien mit verborgenen Variablen

falsifizieren konnte. Als das Experiment mit großer Sorgfalt durchgeführt wurde, widersprachen die Ergebnisse den verborgenen Variablen. Folglich hat es den Anschein, als wäre selbst Gott an die Unschärferelation gebunden, sodass er nicht gleichzeitig die Position und die Geschwindigkeit eines Teilchens kennen kann. Alle Evidenz lässt darauf schließen, *dass Gott ein unverbesserlicher Spieler ist, der bei jeder Gelegenheit zu den Würfeln greift.*

Andere Wissenschaftler zeigten weit größere Bereitschaft als Einstein, den klassischen Determinismus des 19. Jahrhunderts zu überwinden. Werner Heisenberg, der Österreicher Erwin Schrödinger und der britische Physiker Paul Dirac stellten eine neue Theorie auf: die *Quantenmechanik*. Dirac war mein Vorgänger auf dem Lucasischen Lehrstuhl für Mathematik in Cambridge. Obwohl es die Quantenmechanik schon seit fast 70 Jahren gibt, wird sie noch immer nicht generell verstanden oder gewürdigt, selbst von denen nicht, die sie in ihren Berechnungen verwenden. Dabei betrifft sie uns alle, weil sie ein vollkommen anderes Bild des klassisch-physikalischen Universums und der Wirklichkeit selbst vermittelt. Teilchen haben in der Quantenmechanik keine genau definierten Positionen und Geschwindigkeiten. Stattdessen werden sie durch eine sogenannte Wellenfunktion mit einer Zahl für jeden Raumpunkt dargestellt. Die Größe der Wellenfunktion gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Teilchen an dieser Position anzutreffen ist. Die Rate, mit der sich die Wellenfunktion von Punkt zu Punkt ändert, entspricht der Geschwindigkeit des Teilchens. Eine Wellenfunktion kann sehr steile Anstiege in einer kleinen Region aufweisen. Das bedeutet, dass die Ungewissheit an dieser Position klein ist. Aber die Wellenfunktion wird sich in der Nähe des Anstiegs sehr rasch verändern, auf der einen Seite steil nach oben steigen, auf der anderen steil nach unten fallen. Das heißt, die Ungewissheit der Geschwindigkeit wird groß sein. Entsprechend gibt es Wellenfunktionen, in denen die Ungewissheit der Geschwindigkeit klein, aber die Ungewissheit der Position groß ist.

Die Wellenfunktion enthält alles, was man über das Teilchen wissen kann, seine Position wie seine Geschwindigkeit. Wenn man die Wellenfunktion zu einem bestimmten Zeitpunkt kennt, werden ihre Werte zu anderen Zeitpunkten durch die sogenannte Schrödinger-Gleichung bestimmt. Damit haben wir zwar einen Determinismus, jedoch nicht den von Laplace. Statt in der Lage zu sein, die Positionen und Geschwindigkeiten von Teilchen vorherzusagen, beschränkt sich unser Vermögen auf die Voraussage der

Wellenfunktion. Wir können also gerade einmal die Hälfte dessen voraussagen, was nach der klassischen Theorie des 19. Jahrhunderts möglich war.

Obwohl die Quantenmechanik zu Ungewissheit führt, wenn wir versuchen, sowohl die Position wie die Geschwindigkeit vorherzusagen, ermöglicht sie uns immerhin, eine Kombination aus Position und Geschwindigkeit mit Gewissheit vorherzusagen. Doch selbst dieses Maß an Gewissheit scheint durch neuere Entwicklungen infrage gestellt zu sein. Das Problem entsteht, weil die Gravitation die Raumzeit so stark zu krümmen vermag, dass möglicherweise Raumregionen entstehen, die wir gar nicht beobachten können.

Solche Regionen sind das Innere von Schwarzen Löchern. Mit anderen Worten, wir können noch nicht mal im Prinzip die Teilchen in einem Schwarzen Loch beobachten. Es gibt keine Möglichkeit, ihre Positionen oder Geschwindigkeiten zu messen. Das wirft die Frage auf, ob damit eine Form der Unvorhersagbarkeit ins Spiel kommt, die über die Ungewissheit der Quantenmechanik hinausgeht.

Fassen wir zusammen: Die *klassische Theorie*, die von Laplace begründet wurde, besagte, dass sich die zukünftigen Bewegungen von Teilchen vollständig bestimmen ließen, wenn man ihre Positionen und Geschwindigkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt kannte. Diese Auffassung musste revidiert werden, als Heisenberg seine *Unschärferelation* entwickelte, nach der man nicht gleichzeitig Position und Geschwindigkeit exakt ermitteln konnte. Doch es war immer noch möglich, eine Kombination aus Position und Geschwindigkeit vorherzusagen. Nun könnte selbst diese begrenzte Vorhersagbarkeit verloren gehen, wenn man *Schwarze Löcher* in die Überlegungen einbezieht.

Erlauben uns die Gesetze des Universums, genau vorherzusagen, was in der Zukunft mit uns geschieht?

Die kurze Antwort ist nein und ja. Im Prinzip erlauben uns die Gesetze, die Zukunft vorauszusagen. Aber in der Praxis sind die Berechnungen oft zu schwierig.

Was befindet sich in einem Schwarzen Loch?

Fakten sind manchmal phantastischer als Fiktionen. Und das trifft wohl nirgendwo mehr zu als auf Schwarze Löcher. Schwarze Löcher sind seltsamer, sonderbarer und erstaunlicher als alles, was Science-Fiction-Autoren sich ausgedacht haben. Aber bei Schwarzen Löchern handelt es sich zweifellos um wissenschaftliche Fakten.

Im Jahr 1783 erwähnte John Michell, ein Professor in Cambridge, zum ersten Mal Schwarze Löcher und argumentierte folgendermaßen: Wenn man einen Körper – zum Beispiel eine Kanonenkugel – senkrecht nach oben schießt, wird er von der Gravitation abgebremst. Schließlich endet die Aufwärtsbewegung des Körpers, und er fällt zurück. Wenn jedoch die Anfangsgeschwindigkeit nach oben einen bestimmten kritischen Wert überschreitet, die sogenannte Entweichgeschwindigkeit, ist die Gravitation nicht in der Lage, einen Körper oder ein Teilchen abzubremesen, und es wird entkommen. Die Flucht- oder Entweichgeschwindigkeit von der Erde beträgt rund elf, die von der Sonne etwa 617 Kilometer pro Sekunde. Beide Geschwindigkeiten sind viel größer als die von echten Kanonenkugeln. Aber sie sind gering im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit, die bei 300000 Kilometern pro Sekunde liegt. Folglich kann das Licht der Erde oder der Sonne ohne große Schwierigkeiten entkommen.

Michell meinte jedoch, es könnte Sterne geben, die sehr viel massereicher als die Sonne wären. Ihre Entweichgeschwindigkeit wäre dann größer als die Lichtgeschwindigkeit. Da alles Licht, das sie abstrahlten, von der Gravitation zurückgezogen würde, könnten wir sie nicht sehen. Daher nannte Michell sie *Dunkle Sterne*, und wir bezeichnen sie heute als *Schwarze Löcher*.

Um Schwarze Löcher zu verstehen, müssen wir mit der Gravitation beginnen. Gravitation wird von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie beschrieben, die eine Theorie von Zeit, Raum und Gravitation ist. Das Verhalten von Raum und Zeit wird durch eine Reihe von Gleichungen bestimmt, die man als Einstein-Gleichungen bezeichnet und die 1915 von Einstein veröffentlicht wurden. Obwohl die Gravitation bei weitem die schwächste der bekannten Naturkräfte ist, besitzt sie zwei entscheidende Vorteile gegenüber anderen Kräften. Erstens, sie wirkt über große Entfernungen. Die Erde wird von der Sonne, die 150 Millionen Kilometer entfernt ist, in ihrer Bahn gehalten und die Sonne vom Zentrum der Milchstraße über eine Distanz von ungefähr 10000 Lichtjahren dirigiert. Die Gravitation wirkt – ihr zweiter Vorteil – immer anziehend, im Gegensatz zu den elektrischen Kräften, die entweder anziehend oder abstoßend sein können. Beide Merkmale haben zur Folge, dass sich in einem Stern, der über eine hinreichend große Masse verfügt, die Gravitationsanziehung zwischen den Teilchen gegen alle anderen Kräfte durchsetzt. Dann kann die Gravitationsanziehung einen Gravitationskollaps auslösen. Trotz dieser Fakten dauerte es lange, bis die wissenschaftliche Gemeinschaft erkannte, dass massereiche Sterne unter ihrer eigenen Gravitation zusammenstürzen können, ehe sie darüber nachdachte, wie sich wohl das übrig bleibende Objekt verhalten könnte.

Albert Einstein behauptete 1939 in einem Aufsatz, Sterne könnten keinen Gravitationskollaps erleiden, denn Materie lasse sich über einen bestimmten Punkt hinaus nicht zusammenpressen. Viele Wissenschaftler teilten Einsteins Bauchgefühl. Die große Ausnahme war der amerikanische Physiker John Wheeler, der in vielerlei Hinsicht der Held in der Geschichte der Schwarzen Löcher ist. In seinen Arbeiten aus den 1950er und 1960er Jahren betonte er, viele Sterne kollabierten am Ende ihres Lebens, und untersuchte die Probleme, die sich daraus für die Theoretische Physik ergaben. Er sagte auch zahlreiche Eigenschaften der Objekte – das heißt, der Schwarzen Löcher – voraus, die aus dem Zusammensturz von Sternen entstehen.

Während des größten Teils seines Lebens – über viele Milliarden Jahre – behauptet sich ein normaler Stern durch den thermischen Druck der nuklearen Prozesse, die Wasserstoff in Helium umwandeln, gegen seine eigene Gravitation. Schließlich aber verbraucht der Stern seinen Kernbrennstoff, zieht sich zusammen und kann in einigen Fällen als Weißer

Zwerg weiterexistieren, wobei es sich dabei um Überreste eines Sternkerns handelt. Doch 1930 zeigte Subrahmanyam Chandrasekhar, dass die Höchstgrenze der Masse eines Weißen Zwergs beim 1,4-Fachen der Sonnenmasse liegt. Eine ähnliche Höchstgrenze errechnete der russische Physiker Lew Landau für einen Stern, der nur aus Neutronen besteht.

Welches Schicksal erwartete die zahllosen Sterne mit einer Masse, die die Höchstmasse eines Weißen Zwergs oder Neutronensterns überstieg, sobald sie ihren Kernbrennstoff aufgebraucht hatten? Mit diesem Problem beschäftigte sich Robert Oppenheimer, dessen Name heute mit dem Bau der ersten Atombombe verknüpft ist. In einigen Aufsätzen aus dem Jahr 1939 wies er in Zusammenarbeit mit George Volkoff und Hartland Snyder nach, dass ein solcher Stern sich mit seinem thermischen Druck nicht gegen den Zusammensturz wehren könnte. Vernachlässigte man den Druck, so zeigte sich, dass sich ein gleichförmiger sphärisch-symmetrischer Stern zu einem Punkt von unendlicher Dichte zusammenzieht. Ein solcher Punkt heißt *Singularität*. Alle unsere Raumtheorien gehen von der Annahme aus, die Raumzeit wäre glatt und fast flach, daher versagen sie bei der Singularität, wo die Krümmung der Raumzeit unendlich ist. Tatsächlich bezeichnet die Singularität das Ende von Raum und Zeit selbst. Das fand Einstein besonders anstößig.

Als der Krieg ausbrach, wandten die meisten Wissenschaftler, auch Robert Oppenheimer, ihre Aufmerksamkeit der Kernphysik zu, und die Frage des Gravitationskollapses geriet in Vergessenheit. Erst mit der Entdeckung der weiter entfernten Quasare erwachte das Interesse an dem Thema zu neuem Leben. 1963 wurde der erste Quasar entdeckt, 3C273, und bald folgten viele andere nach. Trotz der großen Entfernungen waren sie außergewöhnlich hell. Kernprozesse kamen als Erklärung für ihren Energieausstoß nicht infrage, weil sie nur einen kleinen Bruchteil ihrer Restmasse als reine Energie abstrahlten. Die einzige Erklärung war Gravitationsenergie, die ein Gravitationskollaps freigesetzt hatte.

Der Gravitationskollaps von Sternen wurde also wiederentdeckt. Es war klar, dass sich ein gleichförmig-sphärischer Stern zu einem Punkt von unendlicher Dichte, einer Singularität, zusammenzog. Doch was geschah, wenn der Stern nicht gleichförmig und sphärisch war? Könnte diese ungleiche Massenverteilung des Sternes einen ungleichförmigen Kollaps auslösen und so eine Singularität vermeiden? In einer bemerkenswerten

Arbeit bewies Roger Penrose 1965, dass sich eine Singularität allein aufgrund der Gravitationsanziehung bildet.

An einer Singularität versagen die Einstein-Gleichungen. Daraus folgt, dass sich die Zukunft an diesem Punkt von unendlicher Dichte nicht vorhersagen lässt. Es kann also Seltsames geschehen, wenn ein Stern in sich zusammenstürzt. Wir wären von dem Zusammenbruch der Vorhersage nicht betroffen, wenn die Singularitäten nicht nackt wären, das heißt, sie sind nach außen nicht abgeschirmt. Penrose schlug die *Hypothese der kosmischen Zensur* vor: Alle Singularitäten, entstanden durch den Zusammensturz von Sternen oder anderen Körpern, werden vor Blicken in Schwarze Löcher geschützt. Ein Schwarzes Loch ist eine Region, in der die Gravitation so stark ist, dass ihr kein Licht entweichen kann. Die *Hypothese der kosmischen Zensur* ist mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit wahr; zahlreiche Versuche, sie zu widerlegen, sind gescheitert.

Als John Wheeler 1967 den Begriff Schwarzes Loch einführte, ersetzte er damit den früheren Namen *gefrorener Stern*. Wheelers Namensschöpfung betonte, dass die Überreste kollabierter Sterne um ihrer selbst willen von Interesse sind, unabhängig von der Art und Weise, wie sie gebildet wurden. Die Bezeichnung setzte sich rasch durch.

Von außen können Sie nicht erkennen, was sich im Inneren des Schwarzen Loches befindet. Egal, was Sie hineinwerfen, und ganz gleich, welche Form es hat, es verändert nichts am Aussehen Schwarzer Löcher. John Wheeler hat einen Ausdruck für dieses Prinzip gefunden: »Ein Schwarzes Loch hat keine Haare.«

Ein Schwarzes Loch hat eine Grenze, die wir als *Ereignishorizont* bezeichnen. Dort ist die Gravitation gerade noch stark genug, um das Licht zurückzuziehen und am Entweichen zu hindern. Da nichts schneller als das Licht sein kann, wird alles andere ebenfalls zurückgezogen. Der Sturz durch den Ereignishorizont ähnelt ein wenig dem Versuch, die Niagarafälle mit einem Kanu hinunterzufahren. Wenn Sie sich im Wasser über den Fällen befinden, können Sie noch mit heiler Haut davonkommen, indem sie rasch genug paddeln. Doch sobald Sie sich jenseits des Randes befinden, sind Sie verloren, es gibt keinen Weg zurück. Je näher Sie den Fällen kommen, desto schneller wird die Strömung. Am Bug des Kanus zieht die Strömung stärker als am hinteren Teil, dem Heck, und droht, das Kanu auseinanderzureißen.

Gleiches gilt für Schwarze Löcher. Wenn Sie, die Füße voran, auf ein

Schwarzes Loch zu fallen, wird die Gravitation unendlich viel stärker an Ihren Füßen als an Ihrem Kopf ziehen, weil Ihre Füße dem Schwarzen Loch näher sind. Infolgedessen werden Sie der Länge nach gestreckt und seitlich zusammengequetscht. Besitzt das Schwarze Loch eine Masse, die mehreren Sonnenmassen entspricht, werden Sie auseinandergerissen und zu Spaghetti verarbeitet, bevor Sie den Horizont erreichen.

Fallen Sie jedoch in ein viel größeres Schwarzes Loch, das mehr als eine Million Sonnenmassen umfasst, würde sich die Anziehungskraft auf Ihren gesamten Körper auswirken und Sie würden den Horizont ohne Schwierigkeiten erreichen. Wenn Sie also das Innere eines Schwarzen Loches erkunden wollen, sorgen Sie dafür, dass es möglichst groß ist. Im Zentrum der Milchstraße gibt es ein Schwarzes Loch mit rund vier Millionen Sonnenmassen.

Obwohl Sie, fielen Sie in ein Schwarzes Loch, nichts Außergewöhnliches bemerken würden, könnte jemand, der Sie aus sicherer Entfernung beobachtet, erkennen, dass Sie den Ereignishorizont nie überqueren. Sie würden, so sein Eindruck, unmittelbar außerhalb des Schwarzen Loches immer langsamer und langsamer werden und schließlich schweben. Ihr Anblick würde immer blasser und röter, bis Sie praktisch nicht mehr zu sehen wären. Auf ewig wären Sie für die Außenwelt verloren.

Einen entscheidenden Einfall hatte ich kurz nach der Geburt meiner Tochter Lucy. Ich entdeckte das *Flächentheorem*: Wenn die Allgemeine Relativitätstheorie zutrifft und die Energiedichte der Materie positiv ist, was gewöhnlich der Fall ist, wird die Fläche des Ereignishorizonts, die Grenze eines Schwarzen Loches, stets größer, wenn zusätzliche Materie oder Strahlung in das Schwarze Loch fällt. Verschmelzen zwei Schwarze Löcher miteinander, ist die Fläche des dabei entstehenden Schwarzen Loches immer größer als die Flächensumme der ursprünglichen Schwarzen Löcher.

Das *Flächentheorem* lässt sich experimentell mit dem *Gravitationswellen-Observatorium LIGO* überprüfen. Am 14. September 2015 entdeckte LIGO Gravitationswellen aus der Kollision und Verschmelzung eines binären Schwarzen Loches, also eines Paares Schwarzer Löcher. Anhand der Wellenform kann man die Masse und den Drehimpuls der Schwarzen Löcher schätzen, und nach dem *Keine-Haare-Theorem* bestimmen diese die Horizontflächen.

Diese Eigenschaften lassen auf eine Ähnlichkeit zwischen der Fläche des

Ereignishorizonts eines Schwarzen Loches und der konventionellen klassischen Physik schließen, insbesondere dem Entropiebegriff der Thermodynamik. Entropie lässt sich als ein Maß für die Störung oder Unordnung eines Systems betrachten oder, entsprechend, für die Unkenntnis hinsichtlich seines exakten Zustands. Dass die Entropie mit der Zeit immer mehr zunimmt, genau das besagt der berühmte Zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Diese Entdeckung war der erste Hinweis auf jenen entscheidenden Zusammenhang.

Die Analogie zwischen den Eigenschaften Schwarzer Löcher und den Gesetzen der Thermodynamik lässt sich erweitern. Nach dem Ersten Hauptsatz der Thermodynamik wird eine kleine Entropieveränderung eines Systems von einer proportionalen Energieveränderung dieses Systems begleitet. Brandon Carter, Jim Bardeen und ich entdeckten ein ähnliches Gesetz, das den Zusammenhang zwischen einer Masseveränderung eines Schwarzen Loches und der Flächenveränderung seines Ereignishorizonts beschreibt. Der Proportionalitätsfaktor ist dabei eine Größe, die als Oberflächengravitation bezeichnet wird und ein Maß für die Stärke des Gravitationsfeldes am Ereignishorizont bildet. Gehen wir davon aus, dass die Fläche des Ereignishorizonts der Entropie entspricht, dann könnte die Oberflächengravitation der Temperatur entsprechen. Unterstrichen wird die Ähnlichkeit dadurch, dass die Oberflächengravitation an allen Punkten des Ereignishorizonts gleich ist, ebenso wie in einem Körper, der sich im thermischen Gleichgewicht befindet, die Temperatur überall gleich ist.

Obwohl es eine unübersehbare Ähnlichkeit zwischen der Entropie und der Fläche des Ereignishorizonts gibt, war uns nicht klar, wie sich die Fläche mit der Entropie eines Schwarzen Loches gleichsetzen ließ. Was war unter der Entropie eines Schwarzen Loches zu verstehen? Jacob Bekenstein, der damals an der *Princeton University* promovierte, formulierte 1972 das entscheidende Argument folgendermaßen: Erzeugt ein Gravitationskollaps ein Schwarzes Loch, nimmt es rasch einen stationären Zustand an, den drei Parameter charakterisieren: Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung.

Das erweckt den Eindruck, als ob der endgültige Zustand des Schwarzen Loches unabhängig davon wäre, ob der kollabierte Körper aus Materie oder Antimaterie bestand oder ob seine Form sphärisch oder vollkommen unregelmäßig war. Mit anderen Worten, ein Schwarzes Loch von gegebener Masse, Drehimpuls und elektrischer Ladung könnte sich durch den Kollaps

einer beliebig großen Zahl von unterschiedlichen Materiekonfigurationen gebildet haben. Ein vollkommen identisch erscheinendes Schwarzes Loch könnte, so wäre folglich denkbar, durch den Kollaps einer großen Zahl unterschiedlicher Arten von Sternen entstanden sein. Vernachlässigt man die Quanteneffekte, wäre die Zahl der Konfigurationen tatsächlich unendlich, da das Schwarze Loch auch durch den Kollaps einer Wolke aus einer unendlichen Zahl von Teilchen mit unendlich geringer Masse gebildet sein könnte. Aber könnte die Zahl der Konfigurationen tatsächlich unendlich sein?

Eine fundamentale Kernaussage der Quantenmechanik bildet die Unschärferelation. Ihr zufolge ist es unmöglich, gleichzeitig die Position *und* die Geschwindigkeit irgendeines Elementarteilchens zu messen. Misst man exakt, *wo* sich ein Elementarteilchen befindet, lässt sich seine *Geschwindigkeit* nicht bestimmen. Misst man die *Geschwindigkeit* eines Elementarteilchens, so lässt sich seine *Position* nicht feststellen und bestimmen. In der Praxis bedeutet dies: Es ist unmöglich, ein beliebiges Elementarteilchen zu lokalisieren.

Angenommen, Sie wollen die Größe eines Elementarteilchens messen, dann müssen Sie herausfinden, wo dieses sich bewegende Elementarteilchen anfängt und endet. Ganz exakt wird Ihnen das nie gelingen, denn dann müssten Sie die Positionen eines beliebigen Elementarteilchens und seine Geschwindigkeit gleichzeitig messen können. Folglich können Sie die Größe eines Objekts nicht genau bestimmen.

Das Unsicherheitsprinzip macht es unmöglich, so könnte man sagen, überhaupt festzustellen, wie groß ein beliebiges Elementarteilchen wirklich ist. Das Unsicherheitsprinzip schränkt seine Größe ein. Nach einer kleinen Berechnung werden Sie feststellen, dass es für eine bestimmte Masse eines Teilchens eine Mindestgröße gibt. Diese Mindestgröße ist bei schweren Objekten klein, nimmt aber, wie sich herausstellte, immer mehr zu, je leichter die Objekte werden.

Verbindet man diese Überlegungen mit denen der Allgemeinen Relativitätstheorie, so ergibt sich der Schluss, dass nur Objekte, die ein bestimmtes Gewicht überschreiten, Schwarze Löcher bilden können. Dieses Gewicht entspricht ungefähr dem eines Salzkorns. Diese Überlegungen haben noch eine weitere Konsequenz: Die Zahl der Konfigurationen, die ein Schwarzes Loch von gegebener Masse, Drehimpuls und elektrischer Ladung bilden könnten, ist ungeheuer groß, aber endlich.

Jacob Bekenstein behauptete, anhand dieser endlichen Zahl könne man die Entropie oder Unordnung eines Schwarzen Loches bestimmen. Das sei ein Maß für die Informationsmenge, die bei dem Kollaps, der das Schwarze Loch erzeuge, offenbar unwiederbringlich verloren ginge.

Anscheinend hatte Bekensteins Argumentation einen fatalen Fehler: Besitzt ein Schwarzes Loch eine endliche Entropie, die der Fläche seines Ereignishorizonts proportional ist, müsste es auch eine Temperatur ungleich null aufweisen, die ihrer Oberflächengravitation proportional wäre. Das würde bedeuten, dass ein Schwarzes Loch sich bei irgendeiner Temperatur ungleich null mit der Wärmestrahlung im Gleichgewicht befände. Doch nach der klassischen Theorie wäre gerade ein solches Gleichgewicht nicht möglich, weil alle Wärmestrahlung, die in ein Schwarzes Loch fiel, zwar von ihm absorbiert wird, aber definitionsgemäß sollte das Schwarze Loch nicht in der Lage sein, die Wärme wieder abzustrahlen. Nichts könnte emittieren, auch keine Wärme.

Daraus ergab sich ein Paradox hinsichtlich der Schwarzen Löcher, dieser unglaublich dichten Objekte, die durch den Kollaps von Sternen entstehen. Nach einer Theorie könnten Schwarze Löcher mit identischen Eigenschaften durch eine unendliche Zahl verschiedener Arten von Sternen gebildet werden. Nach einer anderen wäre die Zahl möglicherweise endlich. Das ist ein Problem der Informationen – der Idee nämlich, jedes Teilchen und jede Kraft im Universum enthalte Informationen.

Weil *Schwarze Löcher keine Haare haben*, wie Wheeler es formuliert hat, können wir von außen nicht erkennen, was sich im Inneren eines Schwarzen Loches befindet, abgesehen von Masse, elektrischer Ladung und Drehimpuls. Ein Schwarzes Loch muss folglich eine große Informationsmenge enthalten, die vor der Außenwelt verborgen ist. Allerdings ist die Informationsmenge begrenzt, die sich in einer Raumregion unterbringen lässt. Information braucht Energie, und Energie hat Masse, wie wir dank Einsteins berühmter Gleichung $E = mc^2$ wissen. Wenn sich also zu viel Information in einer Raumregion befindet, wird sie zu einem Schwarzen Loch zusammenfallen, und die Größe des Schwarzen Loches wird die Informationsmenge widerspiegeln. Es ist genau wie mit einer Bibliothek, in der Sie immer mehr Bücher aufstapeln. Das Ende wird sein, dass die Regale brechen und die Bibliothek zu einem Schwarzen Loch zusammenstürzt.

Wenn die Menge der verborgenen Informationen in einem Schwarzen Loch von der Größe des Loches abhinge, wäre zu erwarten gewesen, dass das Schwarze Loch eine Temperatur hätte und wie ein Stück heißes Metall glühte. Das aber war unmöglich, weil, wie jeder weiß, nichts aus einem Schwarzen Loch hinausgelangen kann. Zumindest dachte man das.

Dieses Problem bestand bis Anfang 1974, als ich untersuchte, wie sich Materie nach den Gesetzen der Quantenmechanik in der Nähe Schwarzer Löcher verhalten würde. Zu meiner großen Überraschung stellte ich fest, dass das Schwarze Loch mit gleichmäßiger Rate Teilchen zu emittieren schien. Wie alle anderen nahm ich damals als gegeben hin, dass ein Schwarzes Loch nichts emittieren könnte. Daher investierte ich große Mühe in den Versuch, diesen störenden Effekt zu beseitigen. Doch je verbissener ich es versuchte, desto hartnäckiger weigerte sich dieser Störeffekt, das Feld zu räumen, sodass ich ihn am Ende akzeptieren musste.

Letztlich überzeugte mich ein realer physikalischer Prozess: Die abgestrahlten Elementarteilchen hatten ein ausgesprochen thermisches Spektrum. Ein Schwarzes Loch erzeugt und emittiert, so sagten meine Berechnungen voraus, Teilchen und Strahlung, so als wäre es ein gewöhnlicher heißer Körper, mit der Temperatur, die der Oberflächengravitation proportional und der Masse umgekehrt proportional ist. Das ließ Jacob Bekensteins problematische These, ein Schwarzes Loch besitze eine endliche Entropie, als vollkommen schlüssig erscheinen, weil es bedeutete, dass ein Schwarzes Loch sich zu einer endlichen Temperatur ungleich null im thermischen Gleichgewicht befinden konnte.

Inzwischen ist die mathematische Evidenz, dass Schwarze Löcher thermische Strahlung emittieren, von zahlreichen anderen Forschern durch viele unterschiedliche Ansätze bestätigt worden. Unter anderem lässt sich die Emission wie folgt verstehen: Aus der Quantenmechanik folgt, dass der gesamte Raum mit Paaren aus virtuellen Teilchen und Antiteilchen gefüllt ist, die sich ständig paarweise materialisieren, trennen, wieder zusammenkommen und einander vernichten. Virtueller sind diese Elementarteilchen, weil sie anders als echte Teilchen nicht direkt von einem Teilchendetektor nachgewiesen werden können. Ihre indirekten Effekte lassen sich aber sehr wohl messen, und ihre Existenz ist durch eine kleine Verschiebung belegt worden, die sogenannte Lamb-Verschiebung, die sie im Energiespektrum der Strahlung angeregter Wasserstoffatome hervorrufen. In

der Gegenwart eines Schwarzen Loches kann nun ein virtuelles Teilchen des Paares in das Schwarze Loch fallen, sodass das andere Teilchen ohne einen Partner, mit dem es sich vernichten könnte, draußen zurückbleibt. Das verlassene Teilchen oder Antiteilchen könnte seinem Partner ins Schwarze Loch folgen, aber auch in die Unendlichkeit entkommen, wo es dann wie eine vom Schwarzen Loch emittierte Strahlung erscheint.

Eine andere Möglichkeit zum Verständnis des Prozesses besteht darin, den Partner des Teilchenpaares zu betrachten, der in das Schwarze Loch fällt – sagen wir, das Antiteilchen, das sich in der Zeit zurückbewegt. Folglich lässt sich das Antiteilchen, das ins Schwarze Loch fällt, als ein Teilchen betrachten, das aus dem Schwarzen Loch kommt, aber in der Zeit rückwärtsreist. Erreicht das Teilchen den Punkt, an dem sich das Teilchen-Antiteilchen-Paar ursprünglich materialisierte, wird es vom Gravitationsfeld gestreut, sodass es in der Zeit vorwärtsreist.

Ein Schwarzes Loch mit ungefähr einer Sonnenmasse würde Teilchen so langsam abgeben, dass es unmöglich wäre, sie nachzuweisen. Doch es wären auch sehr viel kleinere Schwarze Minilöcher mit der Masse, sagen wir, eines Berges denkbar. Diese könnten sich im ganz frühen Universum gebildet haben, als es chaotisch und unregelmäßig war. Ein Schwarzes Loch von der Größe eines Berges würde Röntgen- und Gammastrahlen mit einer Rate von ungefähr zehn Millionen Megawatt abgeben, genug, um die ganze Erde mit Elektrizität zu versorgen. Allerdings wäre es nicht leicht, ein Schwarzes Miniloche anzuzapfen. Man könnte es nicht in einem Kraftwerk einschließen, weil es durch den Fußboden fallen und im Mittelpunkt der Erde enden würde. Wenn wir ein solches Schwarzes Loch hätten, bestünde die einzige Möglichkeit, seiner habhaft zu werden, darin, es auf einen Orbit um die Erde zu bringen.

Man hat nach Schwarzen Minilöchern von dieser Masse gesucht, aber bislang keine gefunden. Das ist schade, weil ich dann einen Nobelpreis bekommen hätte. Eine andere Möglichkeit wäre jedoch, dass es uns gelänge, Schwarze Mikrolöcher in den Extradimensionen der Raumzeit zu erzeugen. Nach einigen Theorien ist das Universum, das sich unserer Erfahrung erschließt, nur die vierdimensionale Oberfläche eines zehn- oder elfdimensionalen Raumes.

Der Film *Interstellar* vermittelt einen gewissen Eindruck davon, wie das wäre. Wir würden diese Extradimensionen nicht sehen, weil sich das Licht

nicht in ihnen ausbreitete, sondern nur die vier Dimensionen unseres Universums durchdränge. Allerdings würde die Gravitation auf diese Extradimensionen einwirken und wäre dort weit stärker als in unserem Universum. Vielleicht werden wir dieses Phänomen im LHC, dem Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider, am *CERN* beobachten können. Der LHC besteht aus einem 27 Kilometer langen, kreisförmigen Tunnel. Darin lässt man zwei Teilchenstrahlen gegenläufig kreisen und schließlich zusammenprallen. Einige dieser Kollisionen könnten Schwarze Mikrolöcher erzeugen, die Teilchen in einem leicht erkennbaren Muster emittieren würden. Dann könnte ich doch noch einen Nobelpreis bekommen.¹

Entweichen Teilchen aus einem Schwarzen Loch, wird das Schwarze Loch an Masse verlieren und schrumpfen. Das wird die Rate der Teilchenemission beschleunigen. Schließlich wird das Schwarze Loch seine gesamte Masse verlieren und verschwinden. Was geschieht aber dann mit all den Teilchen und unglücklichen Astronauten, die in das Schwarze Loch gefallen sind? Sie könnten nicht einfach wieder auftauchen, wenn das Schwarze Loch verschwindet. Die Teilchen, die aus einem Schwarzen Loch kommen, scheinen vollkommen zufällig zu sein und völlig beziehungslos zu den Objekten zu sein, die in das Schwarze Loch hineingefallen sind. Offenbar sind die Informationen über die Dinge, die das Schwarze Loch verschluckt hat, verloren, bis auf die gesamte Masse und die Rotation. Doch wenn die Informationen verloren sind, wirft das ein ernsthaftes Problem auf: Es betrifft den fundamentalen Kern unseres Wissenschaftsverständnisses.

Denn seit mehr als 200 Jahren halten wir den wissenschaftlichen Determinismus für wahr: Die Gesetze der Wissenschaft bestimmen die Entwicklung des Universums. Wenn in Schwarzen Löchern wirklich Informationen verloren gingen, wären wir nicht in der Lage, die Zukunft vorauszusagen, weil es möglich wäre, dass ein Schwarzes Loch jede beliebige Ansammlung von Teilchen abstrahlte. Es könnte einen funktionierenden Fernsehapparat oder die gesammelten Werke Shakespeares in Leder emittieren, obwohl die Wahrscheinlichkeit solcher exotischen Emissionen äußerst gering sein dürfte. Sehr viel wahrscheinlicher wäre eine thermische Strahlung, wie man sie von rotglühendem Metall kennt. Es mag den Anschein haben, es spiele keine besondere Rolle, ob wir vorhersagen können, was aus Schwarzen Löchern entweicht. Schwarze Löcher gibt es

schließlich nebenan oder in unserer Nachbarschaft nicht.

Und doch ist es eine Frage des Prinzips. Wenn der Determinismus, die Vorhersagbarkeit des Universums, in Bezug auf Schwarze Löcher nicht mehr gilt, dann könnte der Determinismus auch in anderen Situationen seine Geltung verlieren. Vielleicht gäbe es dann virtuelle Schwarze Löcher, die als Fluktuationen aus dem Vakuum auftauchten, eine Reihe von Teilchen absorbierten, andere emittierten und wieder im Vakuum verschwänden. Schlimmer noch – gilt der Determinismus nicht mehr, könnten wir auch unserer Geschichte nicht mehr sicher sein. Die Geschichtsbücher und unsere Gedächtnisse könnten reine Illusionen sein. Die Vergangenheit teilt uns mit, wer wir sind. Ohne sie verlieren wir unsere Identität.

Daher mussten wir unbedingt herausfinden, ob in Schwarzen Löchern tatsächlich Informationen verloren gehen oder ob sie im Prinzip wieder geborgen werden können. Viele Forscher waren der Meinung, Informationen dürften nicht einfach verschwinden, doch jahrelang konnte niemand erklären, wie sich die Informationen bewahren ließen. Dieser scheinbare Informationsverlust, das sogenannte *Informationsparadox*, beschäftigt die Forschung nun schon seit 40 Jahren und ist noch immer eines der größten ungelösten Rätsel in der Theoretischen Physik.

Unlängst ist das Interesse an möglichen Lösungen des Informationsparadoxes wieder erwacht, als neue Erkenntnisse zur *Vereinheitlichung von Gravitation und Quantenmechanik* bekannt wurden. Von entscheidender Bedeutung für diese jüngsten Fortschritte ist das Verständnis der *Raumzeit-Symmetrien*.

Nehmen wir an, es gäbe keine Gravitation, und die Raumzeit wäre vollkommen flach. Dann wäre die Raumzeit wie eine vollkommen gleichförmige Wüste. Ein solcher Ort besitzt zwei Symmetriearten. Die erste heißt *Translationssymmetrie*. Wenn Sie sich von einem Punkt in dieser Wüste zu einem anderen bewegen, bemerken Sie keine Veränderung. Die zweite Symmetrie ist die *Rotationssymmetrie*. Wenn Sie irgendwo in der Wüste stehen und anfangen, sich um sich selbst zu drehen, erkennen Sie wiederum keinen Unterschied in dem, was Sie sehen. Diese Symmetrien liegen auch in der »flachen« Raumzeit vor, der Raumzeit, die in Abwesenheit von aller Materie existiert.

Wenn man jedoch etwas in dieser Wüste aufstellt, werden die Symmetrien gebrochen. Nehmen wir an, in der Wüste gibt es einen Berg, eine Oase und

einige Kakteen, dann sieht sie an verschiedenen Orten und in verschiedenen Richtungen jeweils anders aus. Das Gleiche gilt für die Raumzeit. Wenn man Objekte in die »flache« Raumzeit stellt, werden die Translations- und Rotationssymmetrien gebrochen. Außerdem erzeugt man Gravitation, wenn man Objekte in einer Raumzeit einführt.

Ein Schwarzes Loch ist eine Raumzeitregion, in der die Gravitation stark und die Raumzeit enorm verformt ist, sodass man eigentlich davon ausgehen sollte, dass die Symmetrien dort gebrochen werden. Doch je weiter man sich vom Schwarzen Loch entfernt, desto geringer wird die Raumzeitkrümmung. In großer Entfernung vom Schwarzen Loch sieht die Raumzeit fast vollkommen flach aus.

In den 1960er Jahren haben Hermann Bondi, A. W. Kenneth Metzner, M. G. J. van der Burg und Rainer Sachs die wahrhaft bemerkenswerte Entdeckung gemacht, dass die Raumzeit weit entfernt von aller Materie eine unendliche Zahl von Symmetrien besitzt, die *Supertranslationen* heißen. Jede dieser Symmetrien ist mit einer Erhaltungsgröße assoziiert, den sogenannten Supertranslationsladungen. Eine Erhaltungsgröße besitzt die besondere Eigenschaft, sich nicht zu verändern, während sich ein System entwickelt. Supertranslationsladungen sind Verallgemeinerungen sehr vertrauter Erhaltungsgrößen. Wenn sich beispielsweise die Raumzeit nicht mit der Zeit verändert, bleibt die Energie erhalten. Wenn die Raumzeit an verschiedenen Punkten im Raum gleich aussieht, bleibt der Drehimpuls erhalten.

Die Entdeckung der Supertranslationen ist so bemerkenswert, weil es in großer Entfernung von einem Schwarzen Loch eine unendliche Zahl von Erhaltungsgrößen gibt. Diesen Erhaltungsgrößen verdanken wir eine ungewöhnliche und unerwartete Einsicht in die Prozesse der Gravitationsphysik.

Im Jahr 2016 habe ich zusammen mit meinen Mitarbeitern Malcolm Perry und Andy Strominger daran gearbeitet, mithilfe dieser neuen Ergebnisse und der dazugehörigen Erhaltungsgrößen eine mögliche Lösung für das Informationsparadox zu finden. Die drei erkennbaren Eigenschaften des Schwarzen Loches sind, wie wir wissen, Masse, Ladung und Drehimpuls. Das sind die klassischen Ladungen, die wir schon lange verstehen. Doch Schwarze Löcher besitzen auch Supertranslationsladungen. Daher enthalten sie vielleicht weit mehr, als wir ursprünglich dachten. Sie sind nicht kahl oder haben nicht nur drei Haare, sondern verfügen in Wirklichkeit über eine

Menge Supertranslationshaar.

Das Supertranslationshaar könnte in verschlüsselter Form beträchtliche Informationen über den Inhalt des Schwarzen Loches enthalten. Wahrscheinlich besitzen diese Supertranslationsladungen nicht alle Informationen, doch der Rest könnte vielleicht durch zusätzliche Erhaltungsgrößen erklärt werden, die mit weiteren Symmetrien verknüpft sind, den sogenannten, bislang kaum verstandenen Superrotationen. Wenn diese Annahme richtig ist und sich tatsächlich alle Informationen über ein Schwarzes Loch anhand seiner »Haare« beschaffen lassen, gibt es möglicherweise doch keinen Informationsverlust. Unsere neuesten Berechnungen haben gerade diese Ideen bestätigt. Strominger, Perry und ich haben zusammen mit Sasha Haco, einer Doktorandin, herausgefunden, dass diese Superrotationsladungen die gesamte Entropie eines Schwarzen Loches ausmachen können. Die Quantenmechanik behält ihre Geltung, und die Informationen werden auf dem Horizont, der Oberfläche des Schwarzen Loches, gespeichert.

Bislang sind Schwarze Löcher außerhalb des Ereignishorizonts auch weiterhin nur durch ihre Masse, ihre elektrische Ladung und ihren Drehimpuls charakterisiert, aber der Ereignishorizont selbst enthält die Informationen, die wir brauchen, um mit einer Genauigkeit, die über die drei bekannten Eigenschaften des Schwarzen Loches hinausgeht, bestimmen zu können, was in das Schwarze Loch hineingefallen ist. Wir arbeiten noch an diesen Problemen, daher bleibt das Informationsparadox noch ungelöst. Aber ich bin zuversichtlich, dass wir auf dem Weg zu einer Lösung sind. Beobachten Sie, wie es weitergeht!

Ist der Sturz in ein Schwarzes Loch Pech für einen Raumreisenden?

Eindeutig Pech: Wenn es sich um ein Schwarzes Loch von Sternenmasse handelt, werden Sie zu Spaghetti verarbeitet, bevor Sie den Horizont erreichen. Handelt es sich dagegen um ein supermassives Schwarzes Loch, überqueren Sie den Horizont ohne Schwierigkeiten, werden aber an der Singularität zu Tode gequetscht.

Sind Zeitreisen möglich?

In der Science-Fiction-Literatur ist die Verformung oder Krümmung der Raumzeit ein Gemeinplatz. Dort nutzt man sie für blitzschnelle Reisen durch die Milchstraße oder Zeitreisen. Die Science-Fiction von heute ist oft die wissenschaftliche Tatsache von morgen. Wie stehen also die Chancen für Zeitreisen?

Die Idee, dass Raum und Zeit gekrümmt oder verformt werden können, ist ziemlich neu. Mehr als zwei Jahrtausende lang hielt man die Axiome der euklidischen Geometrie für selbstverständlich. Wie sich der eine oder andere von Ihnen vielleicht noch aus dem Geometrieunterricht in der Schule erinnern wird, ergibt sich aus diesen Axiomen unter anderem, dass die Winkelsumme im Dreieck 180 Grad beträgt.

Doch im vergangenen Jahrhundert wurde den Menschen klar, dass auch andere Formen der Geometrie möglich sind, in denen die Winkel im Dreieck sich nicht unbedingt zu 180 Grad addieren. Betrachten Sie beispielsweise die Oberfläche der Erde. Auf der Oberfläche der Erde ist die größte Annäherung an eine gerade Linie ein sogenannter Großkreis. Großkreise sind die kürzesten Wege zwischen zwei Punkten, daher entsprechen sie den Routen der Fluglinien. Wenden wir uns nun dem Dreieck auf der Erdoberfläche zu, das vom Äquator, dem durch London verlaufenden Nullmeridian und dem durch Bangladesch führenden 90. Meridian östlicher Länge gebildet wird. Die beiden Meridiane bilden mit dem Äquator jeweils einen rechten Winkel, das heißt, einen Winkel von 90 Grad. Die beiden Meridiane treffen sich am Nordpol und bilden dort ebenfalls einen rechten Winkel. So erhalten wir ein Dreieck mit drei rechten Winkeln. Die Winkelsumme in diesem Dreieck beträgt folglich 270 Grad und ist damit offensichtlich größer als die Winkelsumme von 180 Grad, die sich bei dem Dreieck auf einer flachen

Ebene ergab. Zeichnete man ein Dreieck auf einer sattelförmigen Fläche, würde man feststellen, dass die Winkelsumme kleiner als 180 Grad ist.

Die Erdoberfläche ist ein sogenannter zweidimensionaler Raum. Das heißt, man kann sich auf der Erdoberfläche in zwei Richtungen bewegen, die miteinander einen rechten Winkel bilden: in die Nord-Süd-Richtung oder die Ost-West-Richtung. Natürlich gibt es noch eine dritte Richtung im rechten Winkel zu diesen beiden, die nach oben oder nach unten gerichtet ist. Mit anderen Worten, die Erdoberfläche befindet sich im dreidimensionalen Raum. Der dreidimensionale Raum ist flach. Er gehorcht der euklidischen Geometrie. Die Winkel eines Dreiecks addieren sich zu 180 Grad. Doch man könnte sich auch eine Spezies zweidimensionaler Geschöpfe vorstellen, die sich auf der Erdoberfläche umherbewegen, aber nicht fähig wären, die dritte Dimension nach oben oder nach unten zu erfahren. Diese Spezies wüsste nichts von dem flachen dreidimensionalen Raum, in dem sich die Erdoberfläche befindet. Für sie wäre der Raum gekrümmt und die Geometrie nichteuklidisch.

Doch so, wie man sich zweidimensionale Lebewesen ausmalen kann, die auf der zweidimensionalen Erdoberfläche leben, könnte man sich auch vorstellen, dass der dreidimensionale Raum, in dem wir leben, die Oberfläche einer Kugel in einer weiteren Dimension wäre, die wir nicht sehen können. Wäre die Kugel sehr groß, wäre der Raum fast flach und die euklidische Geometrie bei kleinen Abständen eine sehr gute Annäherung. Die euklidische Geometrie aber versagt, wie wir leicht feststellen können, bei großen Abständen. Sie können sich das veranschaulichen, indem Sie sich eine Gruppe von Malern vorstellen, die Farbe auf die Oberfläche einer großen Kugel auftragen.

Je dicker die Farbschicht wird, desto weiter wächst die Oberfläche nach oben. Befindet sich die Kugel in einem flachen dreidimensionalen Raum, kann man unbegrenzt Farbe hinzufügen, woraufhin die Kugel immer größer wird. Doch wenn der dreidimensionale Raum tatsächlich die Oberfläche einer Kugel in einer anderen Dimension ist, ist sein Volumen groß, aber endlich. Irgendwann werden die Farbschichten auf der Kugel den halben Raum ausfüllen. Später werden die Maler feststellen, dass sie in einer Region von ständig abnehmender Größe gefangen sind. Fast der ganze Raum ist von der Kugel und ihren Farbschichten ausgefüllt. So werden die Maler feststellen, dass sie in einem gekrümmten und nicht in einem flachen Raum leben.

Dieses Beispiel zeigt, dass wir die Geometrie der Welt nicht aus den ersten Prinzipien ableiten können, wie die alten Griechen glaubten. Stattdessen müssen wir den Raum, in dem wir leben, messen und seine Geometrie durch Experimente erforschen. Obwohl der Deutsche Bernhard Riemann bereits 1854 eine Methode entwickelte, um gekrümmte Räume zu beschreiben, blieb sie 60 Jahre lang ausschließlich eine Domäne der Mathematik. Sie konnte gekrümmte Räume beschreiben, die völlig abstrakt waren, aber es schien keinen Grund zu geben, warum der physikalische Raum, in dem wir leben, gekrümmt sein sollte. Das änderte sich erst 1915, als Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie veröffentlichte.

Die Allgemeine Relativitätstheorie war eine tiefgreifende geistige Revolution, die unsere Vorstellung vom Universum vollkommen veränderte. Dabei ist sie eine Theorie nicht nur des gekrümmten Raumes, sondern auch der gekrümmten oder verformten Zeit. 1905 hatte Einstein erkannt, dass Raum und Zeit eng miteinander verknüpft sind. Man kann ein Ereignis durch vier Zahlen lokalisieren: Drei Zahlen beschreiben die Position des Ereignisses, zum Beispiel eine bestimmte Anzahl von Kilometern nördlich und östlich von Oxford Circus und die Höhe über dem Meeresspiegel. In einem größeren Maßstab könnten es die galaktische Breite und Länge und die Entfernung vom Mittelpunkt der Galaxis sein.

Die vierte Zahl ist der Zeitpunkt des Ereignisses. Folglich kann man Raum und Zeit zu einer vierdimensionalen Einheit zusammenfassen, der Raumzeit. Jedem Punkt der Raumzeit werden vier Zahlen zugewiesen, die seine Position in Raum und Zeit angeben. Wenn wir Raum und Zeit auf diese Weise zusammenfassten, bliebe es ein ziemlich trivialer Vorgang, wenn man sie wieder auf eine Art voneinander trennen könnte. Es gäbe dann nur eine einzige Möglichkeit, die Zeit und die Position jedes Ereignisses zu definieren.

Doch 1905 wies Einstein – zu dieser Zeit technischer Experte beim Schweizer Patentamt in Bern – in einem fulminanten Aufsatz nach, dass die Zeit und der Ort, an denen sich ein Ereignis unserer Meinung nach zuträgt, davon abhängen, wie wir uns bewegen. Daraus folgte, dass Zeit und Raum unauflöslich miteinander verbunden sind.

Die Zeiten, die verschiedene Beobachter Ereignissen zuordnen, stimmen nur dann überein, wenn die Beobachter sich nicht relativ zueinander bewegen. Die Angaben weichen umso stärker voneinander ab, je größer die

relative Geschwindigkeit der Beobachter ist. Daher können wir fragen, wie rasch die Beobachter sich bewegen müssen, damit die Zeit des einen relativ zur Zeit des anderen rückwärts verläuft. Die Antwort liefert der folgende Limerick:

*There was a young lady of Wight
Who traveled much faster than light
She departed one day
In a relative way
And arrived on the previous night.*

Der Ruhm gebührt Lady Bright allein
noch schneller als Licht zu sein.
Eines Tags ging sie auf Reise
doch auf relative Weise
und kam nachts zuvor schon heim.²

Alles, was wir benötigen, ist also ein Raumschiff, das schneller als das Licht ist. Leider bewies Einstein in demselben Artikel, dass die Beschleunigungsenergie des Raumschiffs umso größer wird, je näher es der Lichtgeschwindigkeit kommt. Daher brauchte es eine unendliche Energiemenge, um die Lichtgeschwindigkeit zu übertreffen.

Einsteins Artikel aus dem Jahr 1905 schien die Möglichkeit einer Zeitreise in die Vergangenheit auszuschließen. Er ließ auch erkennen, dass Zeitreisen zu anderen Sternen ein sehr langsames und mühsames Geschäft sein würden. Wenn man nicht schneller als das Licht vorankommt, braucht man für die Hin- und Rückreise zum nächsten Stern mindestens acht Jahre und zum Mittelpunkt der Milchstraße mindestens 50000 Jahre.

Würden Sie sich in einem Raumschiff fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, könnte es Ihnen an Bord vorkommen, als hätte Ihre Reise zum Mittelpunkt unserer Galaxis nur einige wenige Jahre gedauert. Doch das wäre nur ein schwacher Trost, denn bei Ihrer Rückkehr müssten Sie feststellen, dass alle Menschen, die Sie gekannt hatten, schon seit Jahrtausenden tot und vergessen wären. Auch für Science-Fiction-Romane wäre das nicht unbedingt von Vorteil, deshalb haben ihre Autoren nach Möglichkeiten gesucht, sich

dieser Schwierigkeit zu entziehen.

Wie Einstein zehn Jahre später in einem Aufsatz aus dem Jahr 1915 zeigte, lassen sich die Gravitationseffekte beschreiben, indem man von der Annahme ausgeht, die Raumzeit werde durch die in ihr enthaltene Materie und Energie gekrümmt oder verformt, und diese Theorie ist seither als Allgemeine Relativitätstheorie bekannt. Eine solche Raumzeitkrümmung lässt sich direkt beobachten, wenn die Masse der Sonne die Licht- oder Radiowellen in ihrer unmittelbaren Nähe ein wenig von ihrem Weg ablenkt.

Die scheinbare Position des Sternes oder der Radioquelle verlagert sich um ein kleines Stück, wenn die Sonne zwischen der Erde und der Quelle steht. Die Verschiebung ist sehr klein; sie beträgt rund ein Tausendstel Grad, das sind ungefähr anderthalb Zentimeter, aus einer Entfernung von einem Kilometer betrachtet. Trotzdem kann diese Verschiebung mit großer Genauigkeit gemessen werden und deckt sich mit den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Wir haben experimentelle Belege für die Verformung von Raum und Zeit.

Die Raumzeitkrümmung in unserer Nachbarschaft ist sehr gering, weil alle Gravitationsfelder in unserem Sonnensystem schwach sind. Doch wir wissen, dass beim Urknall oder in großen Schwarzen Löchern sehr starke Felder auftreten können. Daher können Raum und Zeit ausreichend gekrümmt werden, um dem Science-Fiction-Bedarf nach Dingen wie Hyperspace-Antrieben, Wurmlöchern oder Zeitreisen gerecht zu werden.

Auf den ersten Blick scheint all das möglich zu sein. Beispielsweise fand Kurt Gödel 1948 eine Lösung für Einsteins Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, die ein Universum beschreibt, in dem die gesamte Materie rotiert. In diesem Universum könnte man in einem Raumschiff aufbrechen und zurückkehren, bevor man sich auf die Reise begeben hat. Gödel arbeitete am *Institute for Advanced Study* in Princeton, als Einstein dort seine letzten Jahre verbrachte. Gödel war in erster Linie dafür bekannt, bewiesen zu haben, dass man nicht alles beweisen könne, was selbst auf einen anscheinend so einfachen Bereich wie die Arithmetik zutrifft. Aber sein Beweis, dass die Allgemeine Relativitätstheorie Zeitreisen zulässt, ärgerte Einstein, der geglaubt hatte, das sei unmöglich.

Heute wissen wir, dass Gödels Lösung nicht das Universum beschreiben kann, in dem wir leben. Gödels Universum expandiert nicht. Es hat auch einen ziemlich hohen Wert für die sogenannte kosmologische Konstante, von

der man allgemein glaubt, sie sei extrem klein. Doch inzwischen sind offensichtlich viel realistischere Lösungen gefunden worden, die Zeitreisen erlauben. Eine besonders interessante geht von zwei kosmischen Strings aus, die mit einem nur knapp unter der Lichtgeschwindigkeit liegenden Tempo aneinander vorbeirasen. Kosmische Strings sind ein bemerkenswertes Konzept der Theoretischen Physik, das sich Science-Fiction-Autoren offenbar noch nicht richtig zu eigen gemacht haben. Wie ihr Name – *string*, englisch für »Saite« – besagt, sind diese Objekte lang, haben aber nur einen winzigen Querschnitt. Tatsächlich gleichen sie eher Gummibändern, weil sie unter enormer Spannung stehen – im Bereich von 100 Milliarden Milliarden Tonnen. Würde man einen kosmischen String an der Sonne befestigen, könnte er die Sonne in einer Dreißigstelsekunde von null auf 60 beschleunigen.

Kosmische Strings mögen den Eindruck erwecken, sie wären weit hergeholt und reine Science-Fiction, aber es gibt gute wissenschaftliche Gründe für die Annahme, dass sie sich kurz nach dem Urknall in dem sehr frühen Universum gebildet haben. Da sie unter extremer Spannung stehen, wäre denkbar, dass sie fast Lichtgeschwindigkeit erreichen.

Sowohl das Gödel-Universum wie die Raumzeit der extrem schnellen kosmischen Strings sind von Anfang an so verformt und gekrümmt, dass Reisen in die Vergangenheit möglich erscheinen. Gott könnte ein solches gekrümmtes Universum geschaffen haben, aber wir haben keinen Grund zu der Annahme, dass er es tatsächlich getan hat. Alle Anhaltspunkte sprechen dafür, dass das Universum im Urknall ohne eine Krümmung begann, die groß genug gewesen wäre, um Reisen in die Vergangenheit zu gestatten.

Da wir den Anfang des Universums nicht verändern können, bleibt nur die Frage, ob wir im Nachhinein die Raumzeit so krümmen können, dass wir in die Vergangenheit zurückkönnen. Ich denke, es ist ein wichtiges Forschungsthema, bei dem man aber darauf achten sollte, nicht als Sonderling abgestempelt zu werden. Ein Antrag auf Mittel für ein Forschungsprojekt über Zeitreisen würde sicherlich auf der Stelle abgeschmettert werden. Keine Regierungsbehörde könnte es sich leisten, öffentliche Gelder für ein Vorhaben auszugeben, das in irgendeiner Weise mit Zeitreisen in Verbindung zu bringen wäre. Stattdessen verwenden wir Fachbegriffe wie »geschlossene zeitähnliche Kurven« als Codenamen für Zeitreisen. Allerdings verbirgt sich dahinter ein sehr ernstes Problem. Da die

Allgemeine Relativitätstheorie Zeitreisen zulässt, stellt sich die Frage: Gilt das auch für unser Universum? Und wenn nicht, warum nicht?

Eng verwandt mit dem Problem der Zeitreisen ist die Fähigkeit, von einer Position im Raum rasch zu einer anderen zu gelangen. Wie erwähnt, hat Einstein gezeigt, dass man eine unendliche Energiemenge bräuchte, um ein Raumschiff auf eine Geschwindigkeit jenseits der Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen. Wenn wir also in einer vernünftigen Zeitspanne von einer Seite der Milchstraße zur anderen gelangen wollen, müssten wir dazu wohl die Raumzeit so krümmen, dass eine kleine Röhre oder ein Wurmloch entstünde. Das könnte die beiden Seiten der Milchstraße miteinander verbinden und als Abkürzung dienen, die uns erlaubte, die Hin- und Rückreise noch zu Lebzeiten unserer Freunde zu absolvieren. Man hat ernsthaft vermutet, dass solche Wurmlöcher von einer künftigen Zivilisation angelegt werden könnten. Doch wenn Sie in ein oder zwei Wochen von einer Seite der Galaxis zur anderen reisen könnten, wäre es auch möglich, dass sie in einem anderen Wurmloch zurückreisten und an ihrem Ausgangspunkt anlangten, bevor sie aufgebrochen wären. Sie können sogar mit einem einzigen Wurmloch in der Zeit zurückreisen, wenn sich seine beiden Enden relativ zueinander bewegten.

Es lässt sich nachweisen, dass die Raumzeit umgekehrt gekrümmt werden muss, wenn man ein Wurmloch herstellen will: Gewöhnliche Materie krümmt die Raumzeit in sich zusammen wie die Oberfläche der Erde – sie ist nach außen gewölbt. Um ein Wurmloch zu erzeugen, muss die Materie entgegengesetzt nach innen gekrümmt werden wie die Oberfläche eines Sattels oder einer Vertiefung. Das Gleiche gilt für jede Krümmung der Raumzeit, die Reisen rückwärts in der Zeit ermöglicht – es sei denn, das Universum wäre von Anfang an so gekrümmt, dass es Zeitreisen zugelassen hätte. Man brauchte also Materie mit negativer Masse und negativer Energiedichte, wenn man die Raumzeit in der erforderlichen Weise krümmen wollte.

Energie ist wie Geld. Wenn Sie ein Guthaben auf der Bank haben, können Sie es auf unterschiedliche Weise ausgeben. Aber nach den klassischen Gesetzen, die noch bis vor kurzem allgemein akzeptiert wurden, war keine Energieüberziehung erlaubt. Daher hätten diese klassischen Gesetze uns untersagt, das Universum in der für Zeitreisen erforderlichen Weise zu krümmen. Doch die klassischen Gesetze wurden von der Quantentheorie

verdrängt, die neben der Allgemeinen Relativitätstheorie die zweite große Revolution unseres Weltbilds war. Die Quantentheorie ist großzügiger und erlaubt uns Überziehungen auf ein oder zwei Konten. Wenn die Banken doch ebenso entgegenkommend wären! Mit anderen Worten, die Quantentheorie lässt zu, dass die Energiedichte an einigen Orten negativ ist, vorausgesetzt, sie ist an anderen positiv.

Der Grund, warum die Quantentheorie der Energiedichte erlauben kann, negativ zu sein, hängt mit der Unschärferelation zusammen. Diese besagt, dass bestimmte Größen wie Position und Geschwindigkeit eines Teilchens nicht beide genau definierte Werte haben können. Je genauer die Position eines Teilchens bestimmt ist, desto größer ist die Ungewissheit seiner Geschwindigkeit und umgekehrt. Die Unschärferelation gilt auch für das elektromagnetische Feld oder das Gravitationsfeld. Sie setzt voraus, dass diese Felder nicht genau gleich null sein können, selbst wenn es sich um vermeintlich leeren Raum handelt. Denn wären sie genau gleich null, hieße das, dass ihre Werte eine exakt definierte Position bei null und eine exakt definierte Geschwindigkeit bei null hätten. Das wäre eine Verletzung der Unschärferelation, stattdessen haben die Felder ein bestimmtes Mindestmaß an *Fluktuationen*. Man kann diese sogenannten *Vakuumsfluktuationen* als Partner von Teilchen und Antiteilchen interpretieren, die plötzlich gemeinsam auftauchen, sich voneinander entfernen, dann wieder zusammenkommen, um sich gegenseitig zu vernichten.

Diese Teilchen-Antiteilchen-Paare heißen virtuell, weil sie sich nicht direkt mit einem Teilchendetektor nachweisen lassen. Aber wir können ihre Wirkung beobachten: etwa durch den *Casimir-Effekt*. Stellen Sie sich vor, Sie hätten zwei parallele Metallplatten, die durch einen kleinen Abstand getrennt sind. Die Platten sind wie Spiegel für die virtuellen Teilchen und Antiteilchen. Die Folge ist, dass die Region zwischen den Platten wie eine Orgelpfeife wirkt und nur Lichtwellen bestimmter Resonanzfrequenzen zulässt. Das Ergebnis: Es gibt etwas weniger Vakuumsfluktuationen oder virtuelle Teilchen zwischen den Platten als außerhalb, wo die Vakuumsfluktuationen jede Wellenlänge haben können. Die Reduzierung der Zahl virtueller Teilchen zwischen den Platten bedeutet, dass sie die Platten nicht so häufig treffen und damit einen geringeren Druck auf diese ausüben als die virtuellen Teilchen draußen. Es gibt also eine schwache Kraft, die die Platten zusammendrückt. Diese Kraft hat man experimentell gemessen. Diese

virtuellen Teilchen gibt es also wirklich und sie üben reale Wirkung aus.

Da es weniger virtuelle Teilchen oder Vakuumsfluktuation zwischen den Platten gibt, liegt dort eine geringere Energiedichte vor als in der Region draußen. Aber die Energiedichte des leeren Raumes in größerer Entfernung von den Platten muss null sein, sonst wäre die Raumzeit gekrümmt und das Universum nicht mehr fast flach. Folglich muss die Energiedichte in der Region zwischen den Platten negativ sein.

Die Ablenkung des Lichtes belegt dabei experimentell die Raumzeitkrümmung und bestätigt durch den *Casimir-Effekt*, dass wir die Raumzeit negativ krümmen können. Es erscheint also als möglich, dass wir bei entsprechenden Fortschritten in Wissenschaft und Technik eines Tages in der Lage sein werden, ein Wurmloch zu konstruieren oder Raum und Zeit auf eine andere Weise zu krümmen, die uns erlaubt, in der Zeit zurückzureisen. Wenn dies der Fall wäre, würde das eine Vielzahl von Fragen und Problemen aufwerfen. Wenn wir beispielsweise in der Zukunft lernten, Zeitreisen zu unternehmen, müssten wir uns fragen, warum noch niemand aus der Zukunft zurückgekommen ist, um uns zu zeigen, wie man das macht.

Selbst wenn es vernünftige Gründe gäbe, uns unwissend zu lassen, da die menschliche Natur nun einmal ist, wie sie ist, kann ich mir kaum vorstellen, dass nicht irgendein Angeber der Versuchung erlage und uns unterbelichteten Bauern das Geheimnis der Zeitreise verriete. Natürlich behaupten einige Leute, wir hätten schon Besuch aus der Zukunft gehabt. Sie sagen, Ufos seien aus der Zukunft gekommen und Regierungen hätten eine gewaltige Verschwörung angezettelt, um diese Ereignisse totzuschweigen und sich die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Besucher unter den Nagel zu reißen.

Dazu kann ich lediglich sagen: Wenn die Regierungen tatsächlich etwas verbergen würden, hätten sie sich bei dem Versuch, den Außerirdischen nützliche Informationen zu entlocken, nicht gerade mit Ruhm bekleckert. Ich bin ziemlich skeptisch gegenüber Verschwörungstheorien und glaube eher an Pfusch. Die Berichte über Ufo-Sichtungen können nicht alle auf echten Begegnungen mit Außerirdischen beruhen, da sie sich gegenseitig widersprechen. Doch wenn Sie zugeben, dass einige falsch oder halluziniert sind, ist da nicht die Annahme wahrscheinlicher, dass sie es alle sind, als zu glauben, dass wir tatsächlich von Leuten aus der Zukunft oder von der anderen Seite der Milchstraße besucht worden sind? Wenn sie die Erde wirklich kolonisieren oder uns vor irgendeiner Gefahr warnen wollten, dann

würden sie sich ziemlich ungeschickt anstellen.

Eine Möglichkeit, Zeitreisen mit der Tatsache zu vereinbaren, dass wir offenbar noch keine Besucher aus der Zukunft gehabt haben, wäre die Annahme, dass solche Reisen nur in der Zukunft stattfinden können. Die Raumzeit wurde demnach in unserer Vergangenheit festgelegt, denn wir haben sie beobachtet und haben gesehen, dass sie nicht hinreichend gekrümmt ist, um Zeitreisen in die Vergangenheit zu ermöglichen. Aber die Zukunft steht uns offen. Folglich könnten wir eines Tages in der Lage sein, eine Krümmung zu erzeugen, die uns Zeitreisen erlaubt. Aber da wir die Raumzeit nur in der Zukunft krümmen können, wären wir nicht in der Lage, in die Gegenwart oder in die Vergangenheit, also in eine noch frühere Zeit, zurückzureisen. Diese Annahme würde erklären, warum wir noch nicht von Touristen aus der Zukunft überlaufen sind.

Aber es gibt noch viele weitere Paradoxa. Nehmen wir an, Sie könnten mit einem Raumschiff davonfliegen und zurückkommen, bevor Sie aufgebrochen sind. Was würde Sie daran hindern, die Rakete auf der Startrampe in die Luft zu sprengen oder in irgendeiner anderen Weise Ihren eigenen Abflug zu vereiteln? Man kennt andere Versionen dieses Paradoxons. So wäre denkbar, dass Sie in der Zeit zurückgehen und Ihre Eltern umbringen, bevor Sie geboren wurden, aber im Kern ähneln sich diese paradoxen Beispiele alle. Anscheinend sind nur zwei Lösungen möglich.

Die eine möchte ich als den *Ansatz der konsistenten Geschichten* bezeichnen. Danach hat man eine konsistente, also widerspruchsfreie Lösung für die physikalischen Gleichungen zu finden, selbst wenn die Raumzeit so gekrümmt sein sollte, dass wir in die Vergangenheit reisen könnten. Uns wäre es dann möglich, mit dem Raumschiff in die Vergangenheit aufzubrechen, es sei denn, wir wären bereits zurückgekehrt und hätten die Startrampe in die Luft gesprengt. Es ist ein schlüssiges Bild, setzt aber voraus, dass wir vollkommen determiniert sind: Wir können unsere Meinung nicht ändern. So viel zum freien Willen.

Die andere Möglichkeit bezeichne ich als den *Ansatz der alternativen Geschichten*. Er wurde von dem Physiker David Deutsch vertreten und scheint den Regisseur Robert Zemeckis zu seinem Film *Zurück in die Zukunft* inspiriert zu haben. Dabei ist eine mögliche alternative Geschichte, dass es keine Rückkehr aus der Zukunft gibt, bevor die Rakete gestartet ist, daher auch keine Möglichkeit, dass sie vor dem Start zerstört wird. Aber wenn der

Reisende aus der Zukunft zurückkehrt, tritt er in eine andere, alternative Geschichte ein. Darin macht die Menschheit eine gewaltige Anstrengung, ein Raumschiff zu bauen, aber kurz bevor es gestartet werden soll, erscheint ein ähnliches Raumschiff von der anderen Seite der Milchstraße und zerstört das erste.

Für David Deutsch erhält sein Ansatz der alternativen Geschichten vom Konzept der *Summe über alle Geschichten* des Physikers Richard Feynman Unterstützung. Danach hat das Universum infolge der Quantentheorie nicht nur eine einzige Geschichte, sondern *alle* Geschichten, die möglich sind, wobei jede ihre eigene Wahrscheinlichkeit besitzt. Es muss eine mögliche Geschichte geben, in der dauerhafter Frieden im Nahen Osten herrscht, mag die Wahrscheinlichkeit auch gering sein.

In einigen Geschichten wird die Raumzeit so gekrümmt sein, dass Objekte wie Raketen in der Lage sind, in ihre jeweilige Vergangenheit zurückzukehren. Aber jede Geschichte ist vollständig und in sich abgeschlossen, wobei sie die gekrümmte Raumzeit und die Objekte, die in ihr enthalten sind, beschreibt. Eine Rakete kann daher nicht zu einer anderen alternativen Geschichte wechseln, wenn eine andere Rakete wieder vorbeikommt. Es ist immer noch dieselbe Geschichte, die in sich schlüssig sein muss. Daher bin ich trotz aller Behauptungen von Deutsch der Meinung, dass das Konzept der *Summe über alle Geschichten* eher die Hypothese der *konsistenten* Geschichten stützt als die Idee der *alternativen* Geschichten.

Es sieht also so aus, als kämen wir um das Konzept der konsistenten Geschichten nicht herum. Das muss allerdings nicht unbedingt Probleme mit dem Determinismus oder dem freien Willen aufwerfen, wenn die Wahrscheinlichkeiten von Geschichten, in denen die Raumzeit so gekrümmt ist, dass Zeitreisen in einer makroskopischen Region möglich sind, äußerst gering sind. Das habe ich die *Chronologie-Schutz-Vermutung* genannt: Die Gesetze der Physik verschwören sich, um Zeitreisen auf der makroskopischen Größenskala zu verhindern.

Wäre die Raumzeit in sich fast so gekrümmt, dass Reisen in die Vergangenheit möglich würden, dann scheinen virtuelle Teilchen fast reale Teilchen werden zu können und geschlossenen Bahnen zu folgen. Die Dichte der virtuellen Teilchen und ihre Energie werden dann sehr groß. Die Wahrscheinlichkeit dieser Geschichten ist also sehr gering. Folglich scheint es eine *Chronologie-Schutz-Behörde* zu geben, die dafür sorgt, dass sich

Historiker in dieser Welt sicher fühlen. Aber das Forschungsfeld von Raum- und Zeitkrümmungen steckt noch in seinen Kinderschuhen. Der Vereinheitlichung der Stringtheorie zufolge müsste die Raumzeit elf Dimensionen umfassen und nicht nur die vier, die sich unserer Erfahrung erschließen. Diese Vereinheitlichung der Stringtheorie – auch als M-Theorie bekannt – ist unsere beste Kandidatin, der es gelingen könnte, die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantentheorie zu einer *Theorie von Allem* zu vereinheitlichen. Dem liegt die Vorstellung zugrunde, dass sieben dieser elf Dimensionen so eng in einem Raum aufgewickelt sind, dass wir sie nicht bemerken. Andererseits sind die verbleibenden vier Dimensionen ziemlich flach und konstituieren die Raumzeit. Wenn dieses Bild richtig ist, könnte es möglich sein, die vier flachen Dimensionen mit den sieben stark gerollten oder gekrümmten Dimensionen zu mischen. Was sich daraus ergeben könnte, wissen wir noch nicht. Doch es eröffnet faszinierende Möglichkeiten.

Abschließend können wir feststellen, dass rasche Raumreisen oder Reisen in die Vergangenheit nach unserem gegenwärtigen Wissensstand nicht ausgeschlossen werden können. Sie würden allerdings große logische Probleme aufwerfen, daher können wir nur hoffen, dass das Chronologie-Schutz-Gesetz die Menschen daran hindert, in der Zeit zurückzureisen und ihre Eltern umzubringen. Hoffnung könnte die Stringtheorie bringen.

Macht es Sinn, eine Party für Zeitreisende zu veranstalten? Würdest du hoffen, dass jemand auftaucht?

Im Jahr 2009 veranstaltete ich eine Party für Zeitreisende in meinem College, Gonville & Caius in Cambridge, um einen Film über Zeitreisen zu zeigen.

Damit nur echte Zeitreisende kommen, habe ich die Einladungen erst nach der Party verschickt. Am Tag der Party saß ich im College und hoffte, aber niemand kam.

Ich war enttäuscht, aber nicht überrascht, denn ich hatte ja gezeigt, dass Zeitreisen nicht möglich sind, wenn die Allgemeine Relativitätstheorie stimmt und die Energiedichte positiv ist. Aber ich hätte mich riesig gefreut, wenn eine meiner Annahmen sich als falsch herausgestellt hätte.

Werden wir auf der Erde überleben?

Im Januar 2018 stellte *The Bulletin of the Atomic Scientists*, eine Körperschaft, die einige Physiker begründeten, die am *Manhattan-Projekt* gearbeitet hatten, die *Atomkriegsuhr* oder auch *Doomsday Clock* auf zwei Minuten vor zwölf. Mit der Atomkriegsuhr, die auch als »Uhr des Jüngsten Gerichts« bekannt ist, wird der Abstand zu der Katastrophe – sei sie militärischer oder ökologischer Art – gemessen, die unserem Planeten bevorsteht.

Die Uhr hat eine interessante Geschichte. Sie wurde im Jahr 1947 in Betrieb genommen, zu einem Zeitpunkt also, als das Atomzeitalter gerade erst begonnen hatte. Robert Oppenheimer, wissenschaftlicher Leiter des *Manhattan-Projekt*, sagte später über die erste Explosion einer Atombombe, die zwei Jahre zuvor, am 16. Juli 1945, stattgefunden hatte: »Wir wussten, dass die Welt nicht mehr dieselbe sein würde. Einige wenige Menschen lachten, einige wenige weinten, die meisten waren still. Ich musste an eine Zeile aus der Bhagavadgita denken, der Heiligen Schrift der Hindus: ›Jetzt bin ich der Tod geworden, Zertrümmerer der Welten.««

Im Jahr 1947 stand die Uhr auf sieben Minuten vor zwölf. Heute ist sie dem *Doomsday* (Tag des Weltuntergangs oder des Jüngsten Gerichts) näher als je zuvor, außer in den frühen 1950er Jahren (1953), zu Beginn des Kalten Krieges. Diese Uhr und ihre Zeitanzeige haben natürlich rein symbolische Bedeutung, aber als Wissenschaftler sehe ich mich genötigt, diese alarmierende Warnung anderer Wissenschaftler ernst zu nehmen, die zumindest teilweise durch die Wahl von Donald Trump motiviert war. Ist diese Uhr, verbunden mit der Vorstellung, dass die Zeit tickt oder für die Menschen sogar abläuft, realistisch oder Panikmache? Kommt ihre Warnung zur rechten Zeit – oder ist alles nur Zeitverschwendung?

An der Zeit habe ich ein eminent persönliches Interesse. Erstens trug mein Bestseller – der Hauptgrund, weswegen ich über die Grenzen der Wissenschaftsgemeinde hinaus bekannt bin – den Titel *Eine kurze Geschichte der Zeit*. Womöglich halten mich viele Menschen für einen Zeit-Experten, obwohl es in unserer Zeit nicht unbedingt von Vorteil ist, ein Experte zu sein. Zweitens bin ich in einem ganz anderen Sinn Zeit-Experte: Als jemand, der mit 21 Jahren von den Ärzten erfuhr, dass er nur noch fünf Jahre leben werde, und im Jahr 2018 76 Jahre alt geworden ist, habe ich ein ausgesprochen persönliches Verhältnis zur Zeit. Wie die Zeit verrinnt, ist mir unangenehm und überdeutlich bewusst und die überwiegende Zeit meines Lebens habe ich im Gefühl gelebt, dass die Zeit, die mir gewährt wurde, »geborgt« ist, wie man so sagt.

Unsere Welt ist politisch offensichtlich instabiler als je zuvor in meiner Erinnerung. Viele Menschen haben das Gefühl, wirtschaftlich und gesellschaftlich abgehängt zu sein. Das hat zur Folge, dass sie sich Populisten – oder zumindest populären Politikern – anschließen, die nur begrenzte Regierungserfahrungen haben und deren Fähigkeit, in einer Krise einen kühlen Kopf zu bewahren, sich erst noch erweisen muss. Und deshalb muss der Zeiger der Atomkriegsuhr näher an den kritischen Punkt herangerückt werden, denn die Wahrscheinlichkeit nimmt zu, dass leichtfertige oder böswillige Kräfte eine weltweite Katastrophe auslösen.

Die Erde ist in so vieler Hinsicht bedroht, dass es mir schwerfällt, optimistisch zu sein. Die Bedrohungen sind zu gewaltig, und es sind zu viele.

Erstens: Die Erde wird zu klein für uns. Unsere Ressourcen wie beispielsweise die Bodenschätze erschöpfen sich mit rasanter Geschwindigkeit. Wir haben unserem Planeten das katastrophale Geschenk des Klimawandels beschert. Steigende Temperaturen, Rückgang der Polkappen, Waldsterben, Überbevölkerung, Krankheiten, Krieg, Hungersnot, Wassermangel und die Dezimierung der Tierarten – eigentlich alles lösbare Probleme, die aber sämtliche bis heute nicht gemeistert sind.

Wir alle verursachen die globale Erwärmung. Wir wollen Autos, Reisen, einen höheren Lebensstandard. Das Problem ist nur: Wenn die Menschen schließlich merken, was sie anrichten, ist es höchstwahrscheinlich schon zu spät. Wir stehen an der Schwelle eines zweiten Atomzeitalters und einer Periode eines noch nie dagewesenen Klimawandels. Wissenschaftler haben eine besondere Verantwortung dafür, die Öffentlichkeit zu informieren und

die politischen Führungspersönlichkeiten hinsichtlich der Gefahren zu beraten, vor denen die Menschheit steht. Als Naturwissenschaftler kennen wir die Gefahren von Atomwaffen und ihre verheerenden Auswirkungen. Wir haben studiert, wie menschliche Aktivitäten und Technologien die Klimasysteme in einer Art und Weise angreifen, die das Leben auf Erden auf Dauer verändern kann. Als Weltbürger haben wir die Pflicht, dieses Wissen nicht für uns zu behalten, sondern die Öffentlichkeit auf die unnötigen Risiken hinzuweisen, mit denen wir täglich leben. Wir sehen eine große Gefahr auf uns zukommen, wenn Regierungen und Gesellschaften jetzt nichts unternehmen, um Atomwaffen überflüssig zu machen und dem fortgesetzten Klimawandel Einhalt zu gebieten.

Gleichzeitig leugnen viele der besagten Politiker die Realität eines vom Menschen verursachten Klimawandels – oder jedenfalls die Fähigkeit des Menschen, ihn aufzuhalten, und das genau zur selben Zeit, da unsere Welt mit mehreren höchst bedrohlichen Umweltkrisen konfrontiert ist. Die akute Gefahr besteht, dass die globale Erwärmung selbsterhaltend wird, wenn das nicht schon eingetreten ist. Das Abschmelzen der Eiskappen in der Arktis und Antarktis reduziert den Anteil an Sonnenenergie, der in den Weltraum zurückgestrahlt wird, und erhöht damit die Temperatur noch weiter. Der Klimawandel vernichtet mutmaßlich den Regenwald im Amazonasgebiet und andere Regenwälder, womit einer der wichtigsten natürlichen Prozesse verschwindet, durch den Kohlendioxid aus der Atmosphäre beseitigt wird. Der Anstieg der Meerestemperatur könnte große Mengen Kohlendioxid freisetzen. Beide Phänomene würden den Treibhauseffekt und damit die globale Erwärmung insgesamt verstärken. Beide Auswirkungen könnten dazu führen, dass wir ein Klima wie das auf der Venus bekommen: siedend heiß, Schwefelsäureregen und eine Temperatur von weit über 250 Grad. Menschliches Leben wäre nicht mehr möglich. Wir müssen mehr tun, als das Kyoto-Protokoll vorgibt. Dieses internationale Abkommen, das 1997 beschlossen wurde, verlangt, dass wir *jetzt* die Kohlendioxidemissionen radikal reduzieren. Die Technologie dazu haben wir. ›Nur‹ der politische Wille dafür fehlt uns.

Wir können ein ignoranter, gedankenloser Haufen sein. Als wir in unserer Geschichte mit vergleichbaren Krisen konfrontiert waren, konnte man sich anderswo ansiedeln. Man denke nur an Kolumbus und seine Entdeckung der Neuen Welt 1492. Aber jetzt gibt es keine neue Welt mehr, kein Utopia

gleich um die Ecke. Unser Lebensraum wird knapp. Uns bleibt keine andere Wahl, als auf andere Welten auszuweichen.

Das Universum ist ein Weltraum voller Gewalt: Sterne verschlingen Planeten, Supernovas feuern tödliche Strahlen ab, Schwarze Löcher prallen aufeinander, und Asteroiden rasen mit einer Geschwindigkeit von Hunderten von Meilen pro Sekunde durchs All. Natürlich lassen diese Phänomene den Weltraum nicht sonderlich einladend erscheinen, aber sie sind genau die Gründe, warum wir uns ins All hinauswagen sollten, statt auf der Erde stillzuhalten.

Dem Zusammenstoß mit einem Asteroiden hätten wir nichts entgegenzusetzen. Der letzte Zusammenstoß fand vor 70 Millionen Jahren statt, er vernichtete die Dinosaurier, und es wird wieder dazu kommen. Science-Fiction ist das keineswegs, sondern es ist durch die Naturgesetze und die Gesetzmäßigkeiten der Wahrscheinlichkeit vorgegeben.

Gegenwärtig bedeutet ein Atomkrieg wahrscheinlich immer noch die größte Bedrohung für die Menschheit – eine Gefahr, die wir schon fast verdrängt haben. Russland und die USA sind nicht mehr ganz so kriegsbereit, dennoch verfügen sie nach wie vor über so viele atomare Sprengköpfe, dass sie alles, was auf dem Planeten lebt, vernichten könnten. Nehmen wir an, es kommt zu einem Unfall, oder Terroristen bemächtigen sich dieses Arsenal. Ferner nimmt das Risiko mit der Anzahl der Länder zu, die über Atomwaffen verfügen. Selbst nach dem Ende des Kalten Krieges gibt es noch genügend Atomwaffen, um uns alle auszulöschen, und das mehrfach, und neue Nuklearnationen steigern die Instabilität noch weiter. Im Lauf der Zeit mag die atomare Bedrohung vielleicht zurückgehen – dafür werden sich andere Bedrohungen entwickeln. Deshalb müssen wir wachsam bleiben.

Eine nukleare Konfrontation oder eine Umweltkatastrophe wird, das halte ich für nahezu unausweichlich, die Erde auf die eine oder andere Weise irgendwann in den kommenden 1000 Jahren verheeren – auf der geologischen Zeitachse ein kurzer Augenblick. Ich hoffe und glaube, dass unsere geniale Gattung bis dahin einen Weg gefunden hat, den beklemmenden Grenzen der Erde zu entkommen und die Katastrophe zu überleben. Den Millionen anderen Arten, die auf Erden leben, wird das womöglich nicht vergönnt sein – das haben wir dann als Gattung uns selbst zuzuschreiben.

Mit unserer Zukunft auf dem Planeten Erde gehen wir nach meiner

Überzeugung mit unverantwortlicher Gleichgültigkeit um. Ausweichmöglichkeiten haben wir momentan keine, aber auf Dauer sollte die Gattung Mensch wirklich nicht bloß auf eine Möglichkeit setzen – nicht alle Eier in einem Korb aufheben: oder auf einem Planeten. Hoffentlich lassen wir den Korb bis dahin nicht fallen. Aber wir sind ja von unserer Veranlagung her Entdecker. Angetrieben von Neugier – eine spezifisch menschliche Eigenschaft. Ihre unersättliche Neugier motivierte die Entdecker dazu zu beweisen, dass die Erde keine Scheibe ist. Und genau dieser Instinkt schickt uns mit der Schnelligkeit unserer Gedanken zu den Sternen und drängt uns, uns auch wirklich dorthin zu begeben. Und jedes Mal, wenn wir, wie etwa bei den Mondlandungen, einen bedeutenden Schritt vorwärtsgehen, bringen wir die Menschheit voran, wir bringen Menschen und Nationen zusammen, stoßen neue Entdeckungen und neue Technologien an. Das Projekt, die Erde zu verlassen, setzt eine globale konzertierte Aktion voraus; jeder sollte daran beteiligt sein. Wir müssen die Begeisterung der frühen Tage der Weltraumreisen in den 1960er Jahren wieder entfachen. Die nötige Technologie ist schon fast in Reichweite. Es ist an der Zeit, andere Sonnensysteme zu erforschen. Der Aufbruch ins Weltall ist vielleicht die einzige Möglichkeit, uns vor uns selbst zu retten. Die Menschen müssen, davon bin ich überzeugt, die Erde verlassen. Wir riskieren, ausgelöscht zu werden, sollten wir bleiben.

Abgesehen von meiner Hoffnung auf die Erkundung des Weltraums – wie wird die Zukunft aussehen, und wie kann uns die Wissenschaft helfen?

Das populäre Bild der Wissenschaft in der Zukunft wird in Science-Fiction-Serien wie *Star Trek* vorgeführt. Sogar mich haben sie überredet, daran mitzuwirken (was nicht sonderlich schwer war). Der Auftritt hat Spaß gemacht, und ich erwähne ihn nur, um ein ernstes Argument vorzubringen. Fast sämtliche Zukunftsvisionen, die wir kennen, angefangen bei H.G. Wells, sind im Prinzip statisch. Sie zeigen eine Gesellschaft, die im Vergleich zu unserer in vielerlei Hinsicht weit fortgeschritten ist – auf wissenschaftlichem und technischem Gebiet und was die politische Verfassung angeht. (Letzteres dürfte auch nicht allzu schwer sein.) Es muss in der Zeit zwischen unserer Gegenwart und der dargestellten Zukunft zu großen Veränderungen

gekommen sein, die natürlich mit Spannungen und Störungen einhergingen. Doch in dem Zeitraum, der uns vorgeführt wird, haben die zukünftige Wissenschaft, Technik und Gesellschaft einen Zustand fast vollkommener Perfektion erreicht.

Ich glaube nicht an dieses Bild und frage mich, ob wir überhaupt je einen endgültigen, stabilen Zustand in Wissenschaft und Technik erreichen können. Zu keiner Zeit in den rund 10000 Jahren seit der letzten Eiszeit war die Menschheit im Zustand konstanten Wissens und etablierter Technologie. Rückschläge wie das Mittelalter nach dem Untergang des Römischen Reiches gab es zwar, aber die Weltbevölkerung – ein Maßstab für unsere technologische Fähigkeit, Leben zu erhalten und uns zu ernähren – ist stetig angewachsen, von wenigen Einbrüchen wie der Pest abgesehen. In den vergangenen 200 Jahren wurde das Wachstum exponentiell, das heißt, die Bevölkerung nimmt jährlich um denselben Prozentsatz zu. Momentan liegt die Rate bei jährlich ungefähr 1,9 Prozent. Vielleicht klingt »1,9 Prozent« nicht sonderlich eindrucksvoll, es bedeutet freilich, dass die Weltbevölkerung sprunghaft von einer auf etwa 7,6 Milliarden Menschen angewachsen ist. Andere Messgrößen für die technische Entwicklung in der jüngeren Vergangenheit sind der Stromverbrauch oder die Anzahl an wissenschaftlichen Artikeln. Auch sie zeigen ein exponentielles Wachstum mit einer Verdoppelungszeit von 40 Jahren oder weniger.

Wir haben mittlerweile so übersteigerte Erwartungen, dass manche Leute sich von Politikern und Wissenschaftlern betrogen fühlen, weil wir die utopischen Zukunftsvisionen nicht bereits eingeholt haben. So erzählt beispielsweise der Film *2001: Odyssee im Weltraum* von einem Stützpunkt auf dem Mond und von einem bemannten Flug zum Jupiter.

Nichts deutet darauf hin, dass die Entwicklung von Wissenschaft und Technik in nächster Zukunft sich drastisch verlangsamen oder an einen Endpunkt gelangen wird. Mit Sicherheit wird das nicht bis zu der Zeit geschehen sein, in der *Star Trek* spielt, und diese Zeit liegt nur 350 Jahre in der Zukunft. Die gegenwärtige Wachstumsrate darf sich hingegen in unserem Jahrtausend keineswegs fortsetzen. Im Jahr 2600 würde die Weltbevölkerung Schulter an Schulter stehen, und der Stromverbrauch ließe den Globus erglühen. Wenn Sie die neuen Bücher, die dann veröffentlicht werden, in einer Reihe nebeneinander aufstellen würden, mit der gegenwärtigen Publikationsrate an gedruckten Büchern, müssten Sie sich mit etwa

150 Stundenkilometern fortbewegen, um nur mit den letzten erschienenen Büchern am Ende der Reihe auf gleicher Höhe zu bleiben. Natürlich werden bis zum Jahr 2600 neue literarische und wissenschaftliche Veröffentlichungen in elektronischer Form erscheinen und nicht mehr als physische Bücher oder Aufsätze. Dennoch – wenn das exponentielle Wachstum anhält, würden in meiner Sparte der Theoretischen Physik zehn Aufsätze pro Sekunde erscheinen, aber es gäbe keine Zeit mehr, sie zu lesen.

Natürlich kann es mit dem gegenwärtigen exponentiellen Wachstum nicht unendlich so weitergehen. Was wird also geschehen? Eine Möglichkeit: Wir löschen uns durch eine Katastrophe wie etwa einen Atomkrieg vollständig selbst aus. Aber selbst wenn wir uns nicht vollständig selbst zerstören, könnten wir in einen Zustand der Brutalität und Barbarei zurückfallen wie in der Eröffnungsszene des Filmes *Terminator*.

Wie werden wir die Naturwissenschaften und die Technik im Lauf des kommenden Jahrtausends weiterentwickeln? Das ist schwer zu sagen. Aber lassen Sie mich trotzdem einige Vorhersagen riskieren. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit behalte ich für die kommenden 100 Jahre recht – der Rest des Jahrtausends hingegen ist reine Spekulation.

Unser modernes Verständnis von Wissenschaft begann etwa zur gleichen Zeit wie die europäische Besiedlung Nordamerikas, und gegen Ende des 19. Jahrhunderts schienen wir im Begriff zu sein, ein vollständiges Verständnis des Universums im Rahmen dessen zu erreichen, was heute als klassische Gesetze bekannt ist. Im 20. Jahrhundert aber begannen Beobachtungen zu zeigen, dass Energie nur in diskreten Paketen namens Quanten abgegeben und aufgenommen wird: Eine neue Art von Theorie namens Quantenmechanik wurde von Max Planck und anderen Wissenschaftlern formuliert.

So entstand ein völlig anderes Bild der Wirklichkeit: Die Dinge haben keine einzigartige unverwechselbare Geschichte mehr, sondern können jede mögliche Geschichte mit einer eigenen Wahrscheinlichkeit durchlaufen. Wenn wir die Teilchen einzeln betrachten, müssen die möglichen Geschichten der Teilchen auch Pfade berücksichtigen, die schneller als das Licht durchheilt werden, und sogar Pfade aufweisen, die rückwärts in der Zeit verlaufen.

Wege, die in die Vergangenheit führen, sind nicht nur müßige Gedankenspiele. Diese Wege haben auch wirkliche Konsequenzen für die

Beobachtung. Denn selbst das, was wir als leeren Raum betrachten, ist voll von Teilchen, die sich in geschlossenen Kreisläufen in Raum und Zeit bewegen. Vorwärts bewegen sich die Teilchen in der Zeit auf der einen Seite der Schleife und rückwärts in der Zeit auf der anderen Seite.

Das Fatale ist nun: Weil es eine unendliche Anzahl von Punkten in Raum und Zeit gibt, sind unendlich viele geschlossene Partikelschleifen möglich. Diese geschlossenen Partikelschleifen würden über unendliche Energie verfügen und Raum und Zeit sich dann in einem einzigen Punkt zusammenrollen. Nicht einmal in Science-Fiction-Geschichten kommt etwas derart Sonderbares vor.

Der Umgang mit dieser unendlichen Energie benötigt sehr kreative Berechnungen, und ein Großteil der Arbeit in der Theoretischen Physik der vergangenen 20 Jahre bestand darin, nach einer Theorie Ausschau zu halten, in der die unendliche Anzahl geschlossener Schleifen in Raum und Zeit sich vollständig aufhebt. Erst dann werden wir in der Lage sein, die Quantentheorie mit Einsteins Allgemeiner Relativität zu vereinen und eine vollständige Theorie der Grundgesetze des Universums zu erstellen.

Wie stehen die Aussichten auf einen Erfolg unserer Suche nach dieser vollständigen Theorie innerhalb des nächsten Jahrtausends? Ich hätte gesagt, dass sie sehr gut waren – allerdings bin ich bekanntlich Optimist. 1980 ging ich davon aus, wir hätten eine 50:50-Chance, eine vollständige, einheitliche Theorie in den kommenden 20 Jahren zu entwerfen. In der Zeit seit damals haben wir einige bemerkenswerte Fortschritte gemacht, doch von der abschließenden Theorie sind wir heute wahrscheinlich noch genauso weit entfernt wie damals. Wird sich der Heilige Gral der Physik immer gerade ein kleines Stück außerhalb unserer Reichweite befinden? Das denke ich nicht.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts verstanden wir die Wirkweisen der Natur auf dem Raster der klassischen Physik, die bis auf ungefähr das Hundertstel eines Millimeters hinunterreicht. Die Forschungen in der Atomphysik in den ersten 30 Jahren des 20. Jahrhunderts weiteten unser Verständnis bis auf Längen von einem Millionstel eines Millimeters aus. Seit damals haben uns Forschungen in der Nuklear- und der Hochenergiephysik in Größenordnungen gelangen lassen, die noch einmal um den Faktor von einer Milliarde kleiner sind. Es hat ganz den Anschein, als könnten wir so immer weitermachen und Strukturen entdecken, die auf immer kleineren Längenskalen liegen. Allerdings gibt es eine Grenze für diese Serie – so wie

es auch bei der Russischen Puppe in der Puppe eine Grenze gibt. Irgendwann kommt man bei der kleinsten Puppe an, und die kann dann nicht mehr auseinandergenommen werden. In der Physik bezeichnet man diese kleinste Puppe als Planck-Länge, das ist ein Millimeter geteilt durch 100000 Milliarden Milliarden Milliarden. Es ist uns nicht möglich, Teilchenbeschleuniger zu bauen, die Untersuchungen an so winzigen Abständen anstellen können. Diese Apparaturen müssten größer sein als das Sonnensystem, und im gegenwärtigen Finanzklima macht dafür keiner Gelder locker. Die Folgen unserer Theorien können allerdings auch mit erheblich bescheideneren Apparaturen getestet werden.

Bei unseren Laborexperimenten ist es uns also unmöglich, die Planck-Länge zu erforschen, den Big Bang hingegen können wir untersuchen, um Beobachtungsnachweise bei höheren Energien und kürzeren Längenskalen zu erhalten als auf der Erde. Wir werden uns jedoch zum Großteil auf mathematische Schönheit und Schlüssigkeit stützen müssen, um die *ultimate Weltformel* – die *Theorie von Allem* – zu finden.

Die *Star-Trek*-Vision der Zukunft, wonach wir ein zwar fortgeschrittenes, im Wesentlichen aber statisches Level erreichen, könnte möglicherweise im Hinblick auf unsere Kenntnis der Grundgesetze Realität werden, die das Universum regieren. Allerdings glaube ich nicht, dass wir im Gebrauch, den wir von diesen Gesetzen machen, jemals einen stabilen Zustand erreichen werden. Die *ultimate Theorie von Allem* wird der Komplexität der Systeme, die wir produzieren können, keine Grenzen setzen, und ich bin überzeugt, dass sich die wichtigsten Entwicklungen unseres Jahrtausends innerhalb dieser Komplexität abspielen werden.

Die komplexesten Systeme, über die wir verfügen, sind unsere Körper. Das Leben entstand allem Anschein nach in den ersten Ozeanen, die die Erde vor vier Milliarden Jahren bedeckt haben. Wie das geschah, wissen wir nicht. Vielleicht bauten sich aus zufälligen Atomkollisionen Makromoleküle auf, die sich selbst reproduzieren und zu komplizierteren Strukturen zusammenschließen konnten. Vor etwa dreieinhalb Milliarden Jahren hat sich, wie wir wissen, das hochkomplexe Molekül DNA gebildet.

Die DNA ist die Grundlage für alles Leben auf der Erde. Sie hat die

Struktur einer Doppelhelix, wie eine Wendeltreppe, und wurde im Jahr 1953 von Francis Crick und James Watson im *Cavendish-Laboratorium* in Cambridge entdeckt. Die beiden Stränge der Doppelhelix sind durch Basenpaare wie durch die Stufen einer Wendeltreppe miteinander verbunden. Es gibt vier Arten Basen: Cytosin, Guanin, Adenin und Thymin.

Die Anordnung der unterschiedlichen Basen entlang der Wendeltreppe trägt die genetischen Informationen, die es dem DNA-Molekül erlauben, einen Organismus um sich herum zusammenzusetzen und sich selbst zu reproduzieren. Wenn die DNA Kopien von sich selbst herstellt, dürfte es gelegentlich bei der Abfolge der Basenpaare entlang der Spirale zu Irrtümern gekommen sein. Meistens hatte das zur Folge, dass die DNA sich nicht mehr vervielfältigen konnte. Diese genetischen Irrtümer – Mutationen – sterben dann aus. Doch in einigen wenigen Fällen erhöhte die Mutation die Chancen der DNA auf Überleben und Reproduktion. So entwickelte sich der Informationsinhalt der Sequenz aus Basenpaaren allmählich und nahm immer größere Komplexität an. Diese natürliche Auswahl von Mutationen schlug erstmals ein anderer Mann aus Cambridge, Charles Darwin, vor, obgleich er den zugrunde liegenden Mechanismus dafür nicht kannte.

Weil die biologische Evolution letztlich eine Zufallsbewegung im Raum sämtlicher genetischer Möglichkeiten ist, vollzog sie sich äußerst langsam. Die Komplexität oder die Zahl an Informationsbits, die in der DNA codiert sind, entspricht ungefähr der Anzahl an Basenpaaren im Molekül. Man kann sich jedes Informationsbit als die Antwort auf eine Ja-nein-Frage vorstellen. In den ersten rund zwei Milliarden Jahren dürfte die Komplexität ungefähr in einer Größenordnung von einem Informationsbit alle 100 Jahre zugenommen haben. Die Zuwachsrate an DNA-Komplexität stieg dann in den zurückliegenden paar Millionen Jahren auf ungefähr ein Bit pro Jahr an.

Heute dagegen stehen wir an der Schwelle eines ganz neuen Zeitalters. Wir werden fähig sein, die Komplexität unserer DNA zu erhöhen, ohne den langsamen Prozess biologischer Evolution abwarten zu müssen. In der menschlichen DNA gab es in den vergangenen 10000 Jahren keine nennenswerten Veränderungen. Sehr wahrscheinlich können wir uns aber in den vor uns liegenden 1000 Jahren komplett neu gestalten. Natürlich werden viele Menschen einwenden, Genmanipulation an Menschen müsse verboten werden. Ich bezweifle allerdings, dass sie sich damit durchsetzen werden.

Genmanipulation an Pflanzen und Tieren wird allein schon aus

ökonomischen Gründen zugelassen werden, und irgendjemand wird es zwangsläufig auch an Menschen ausprobieren. Wenn wir keine totalitäre Weltordnung bekommen, dann wird irgendjemand irgendwo ›verbesserte‹ oder ›veredelte‹ Menschen designen.

Natürlich wird die Entwicklung von verbesserten Menschen gewaltige soziale und politische Probleme im Hinblick auf nicht verbesserte Menschen mit sich bringen. Ich sage nicht, Genmanipulation an Menschen sei eine gute Sache, ich sage lediglich, es wird wahrscheinlich im nächsten Jahrtausend dazu kommen, ob wir es wollen oder nicht. Deshalb glaube ich auch nicht an Science-Fiction-Filme wie *Star Trek*, in denen die Menschen über 350 Jahre in die Zukunft sich selbst gleich geblieben sind. Ich nehme an, die Gattung Mensch und ihre DNA wird sich in puncto Komplexität ziemlich rapide steigern.

In gewisser Weise ist es für die menschliche Gattung unumgänglich, ihre geistigen und körperlichen Qualitäten zu verbessern, wenn sie es mit der zunehmend komplexen Welt, in der sie lebt, und mit neuen Herausforderungen wie Weltraumreisen aufnehmen will. Biologische Systeme müssen komplexer werden, wenn sie mit elektronischen Systemen mithalten wollen. Computer sind momentan hinsichtlich der Geschwindigkeit unschlagbar, Anzeichen von Intelligenz sind bei ihnen allerdings nicht auszumachen. Sonderlich überraschend ist das nicht, denn die heutigen Computer sind weniger komplex als das Gehirn eines Regenwurms – einer Spezies, die nicht gerade für ihre überragenden intellektuellen Fähigkeiten bekannt ist.

Computer gehorchen annähernd dem Mooreschen Gesetz, das Gordon Moore von der Firma Intel formulierte. Die Geschwindigkeit und die Komplexität von Computern verdoppeln sich danach alle 18 Monate. Auch hier hat man es mit einer dieser exponentiellen Wachstumsraten zu tun, die selbstverständlich nicht unendlich fortsetzbar sind und tatsächlich bereits begonnen haben, sich zu verlangsamen. Allerdings wird sich wohl die rasante Verbesserung noch so lange fortsetzen, bis Computer eine ähnliche Komplexität erreicht haben wie das menschliche Gehirn. Computer, behaupten einige Leute, werden nie über echte Intelligenz verfügen – was auch immer das sein mag. Wenn jedoch sehr komplizierte chemische Moleküle beim Menschen zusammenwirken und ihn intelligent werden lassen, könnten vergleichbar komplizierte elektronische Schaltkreise bei

Computern dazu führen, dass sie intelligent agieren. Und wenn sie dann intelligent sind, dann sind sie wahrscheinlich dazu fähig, selbst Computer zu entwickeln, die noch komplexer und intelligenter sind als sie selbst.

Das ist ein weiterer Grund, warum ich nicht an das Science-Fiction-Bild von einer fortgeschrittenen, dabei aber konstanten Zukunft glaube.

Stattdessen rechne ich damit, dass Komplexität rasant schnell zunehmen wird, im biologischen wie im elektronischen Bereich. Das wird sich nur zu einem kleinen Teil in den kommenden 100 Jahren abspielen – und mehr ist nicht vorhersagbar. Doch bis zum Ende dieses Jahrtausends – wenn wir denn überhaupt so weit kommen – werden die Veränderungen gewaltig sein.

Der Journalist Lincoln Steffens sagte einmal: »Ich habe die Zukunft gesehen, und sie funktioniert.« Er sprach von der Sowjetunion – von der wir heute wissen, dass sie nicht gerade ausnehmend gut funktioniert hat. Die gegenwärtige Weltordnung wird, das glaube ich trotz allem, eine Zukunft haben, aber sie wird ganz anders aussehen.

Wie sieht die schlimmste Bedrohung für die Zukunft dieses Planeten aus?

Das wäre der Zusammenstoß mit einem Asteroiden, dagegen können wir uns nicht verteidigen. Die letzte Kollision fand vor 66 Millionen Jahren statt und löschte die Dinosaurier aus.

Eine akutere Gefahr ist der Klimawandel, der aus dem Ruder läuft. Ein Anstieg der Meerestemperatur würde die Polareiskappen abschmelzen und die Freisetzung großer Mengen von Kohlendioxid verursachen. Beide Prozesse könnten dazu führen, dass wir ein Klima wie auf der Venus mit einer Temperatur von weit über 250 Grad bekommen.

Sollten wir den Weltraum besiedeln?

Warum sollten wir das All erkunden? Wie lässt sich der ganze Aufwand an Energie und Geld rechtfertigen, nur um ein paar Brocken Mondgestein zu ergattern? Gibt es hier auf der Erde nicht drängendere Probleme? Die Antwort liegt auf der Hand: weil der Weltraum da ist, überall um uns herum. Wenn wir den Planeten Erde nicht verlassen, dann sind wir Schiffbrüchigen auf einer einsamen Insel vergleichbar, die nicht versuchen, von dort wegzukommen. Wir müssen das Sonnensystem erforschen, um herauszufinden, wo Menschen leben könnten.

In gewisser Weise ähnelt die Situation derjenigen in Europa vor dem Jahr 1492. Sicher haben die Leute damals argumentiert, es sei Geldverschwendung, Kolumbus auf diese hirnrissige Fahrt zu schicken. Doch die Entdeckung der Neuen Welt bedeutete eine riesige Veränderung für die Alte Welt.

Stellen Sie sich bloß einmal vor, wir hätten keinen Big Mac oder keine Restaurants von *Kentucky Fried Chicken*! Wenn wir uns in den Weltraum ausbreiten, wird das sogar noch gravierendere Folgen haben. Es wird die Zukunft der Gattung Mensch vollständig verändern – und möglicherweise darüber entscheiden, ob wir überhaupt eine Zukunft haben. Die auf unserem Planeten unmittelbar anstehenden Probleme sind so nicht zu lösen. Wir werden aber einen anderen Blick auf die Erde bekommen und dazu motiviert sein, nach draußen statt nach innen zu schauen. Und es wird uns Menschen hoffentlich – angesichts der allen gemeinsamen Herausforderung – zusammenschweißen.

Natürlich würde es sich dabei um eine langfristige Strategie handeln, und mit »langfristig« meine ich Hunderte, womöglich sogar Tausende von Jahren. Wir könnten innerhalb von 30 Jahren auf dem Mond einen Stützpunkt haben,

den Mars in 50 Jahren erreichen und die Monde der äußeren Planeten in 200 Jahren erkunden. Mit »den Mars erreichen« meine ich, dass wir dort mit einem bemannten Raumschiff landen. Mit Rovern waren wir auf dem Mars schon unterwegs und wir haben auf dem Titan, einem Mond des Saturn, eine Sonde gelandet; wenn wir allerdings über die Zukunft der Gattung Mensch nachdenken, müssen wir uns persönlich dort hinbegeben.

In den Weltraum vorzudringen, wird sicher nicht billig sein, aber es würde nur einen kleinen Teil der weltweiten Ressourcen beanspruchen. Das Budget der NASA ist effektiv seit der Zeit der *Apollo*-Landungen konstant geblieben, allerdings ist es von 0,3 Prozent des US-amerikanischen Bruttoinlandsprodukts im Jahr 1970 auf heute 0,1 Prozent zurückgegangen. Selbst wenn wir das internationale Budget um das 20-Fache erhöhen würden, um ernsthaft mit einem Ausgriff ins All beginnen zu können, wäre es immer noch nur ein winziger Bruchteil des globalen BIP.

Manche sind der Meinung, es wäre besser, unser Geld in die Lösung der Probleme hier auf der Erde zu stecken – Klimawandel, Luftverschmutzung und so weiter –, statt es für eine womöglich ergebnislose Suche nach einem neuen Planeten zu verschwenden. Natürlich erkenne ich die Bedeutung des Kampfes gegen den Klimawandel und die globale Erwärmung an. Aber wir können den Kampf aufnehmen und trotzdem noch ein Viertel von einem Prozent des globalen BIP für den Weltraum erübrigen. Oder ist uns unsere Zukunft nicht ein viertel Prozent wert?

In den 1960er Jahren dachten wir, der Weltraum sei es wert, dass eine gewaltige Anstrengung zu seiner Erkundung unternommen wird. Im Jahr 1962 versprach Präsident Kennedy, dass die USA bis zum Ende des Jahrzehnts einen Mann auf den Mond bringen werde. Am 20. Juli 1969 landeten Buzz Aldrin und Neil Armstrong auf der Oberfläche des Mondes. Das veränderte die Zukunft der Menschheit. Ich war damals 27 Jahre alt, ein junger Forscher in Cambridge, und habe das Ereignis verpasst. Zu dem Zeitpunkt, als die Landung stattfand, war ich bei einer Konferenz über Singularitäten in Liverpool und lauschte einem Vortrag von René Thom über Katastrophentheorie. Eine TV-Mediathek gab es damals noch nicht, wir hatten kein Fernsehgerät, aber mein zweijähriger Sohn Robert beschrieb mir das Ereignis.

Der Wettlauf ins All trug dazu bei, eine Faszination für Naturwissenschaften entstehen zu lassen, und beschleunigte unseren

technischen Fortschritt. Für viele der heutigen Naturwissenschaftler waren es letztlich die Mondlandungen, die sie dazu inspirierten, sich für diesen Bereich zu entscheiden: Sie wollten mehr über uns und unseren Ort im Universum wissen. Die Landungen schenkten uns neue Perspektiven auf unsere Welt und motivierten uns dazu, unseren Planeten als Ganzheit zu sehen. Allerdings flaute das öffentliche Interesse am Weltraum nach der letzten Mondlandung im Jahr 1972 wieder ab, als keine weiteren bemannten Raumflüge mehr geplant wurden. Im Westen ging damit eine allgemeine Entzauberung der Naturwissenschaften einher, weil sie zwar große Leistungen erbracht, aber die gesellschaftlichen Probleme nicht gelöst hatten, welche zunehmend ins Zentrum der öffentlichen Aufmerksamkeit rückten.

Ein neues Programm bemannter Weltraumflüge könnte dabei Wunder wirken, die öffentliche Begeisterung für den Weltraum und für Naturwissenschaft allgemein wiederzuerwecken. Missionen mit Robotern sind viel billiger und erbringen möglicherweise mehr wissenschaftliche Informationen, doch fesseln sie nicht auf dieselbe Weise die Vorstellungskraft der Öffentlichkeit. Und sie tragen nicht dazu bei, die Spezies Mensch in den Weltraum hinein zu verbreiten, was meiner Meinung nach das Ziel unserer langfristigen Strategie sein sollte. Eine Mondbasis im Jahr 2050 und die Landung mit einem bemannten Raumschiff auf dem Mars im Jahr 2070 würde das Weltraumprogramm wiederbeleben und ihm ein Ziel geben – so wie damals in den 1960er Jahren die Vorgabe von Präsident Kennedy. Ende 2017 kündigte Elon Musk SpaceX-Pläne für eine Mondbasis und eine Marsmission bis 2022 an, und Präsident Trump unterzeichnete einen Beschluss, der die NASA auf die Erforschung und die Entdeckung des Weltraums ausrichtet, sodass wir möglicherweise früher dorthin kommen.

Ein neu gewecktes Interesse am Weltraum würde auch zu einem größeren öffentlichen Ansehen der Naturwissenschaften ganz allgemein führen. Dass Wissenschaft und Wissenschaftler so wenig wertgeschätzt werden, hat schwerwiegende Folgen. Wir leben in Gesellschaften, die zunehmend von Wissenschaft und Technik geprägt sind, aber mittlerweile wollen immer weniger junge Menschen Wissenschaftler werden. Ein neues, ehrgeiziges Weltraumprogramm wäre für junge Menschen spannend und würde sie dazu motivieren, sich auf das weite Feld der Naturwissenschaften einzulassen – es müssen ja nicht nur Astrophysik oder Weltraumforschung sein.

Das war und ist bei mir genauso. Ich habe immer von Raumflügen

geträumt. Und viele Jahre lang dachte ich, dabei würde es bleiben – beim Träumen. Ich war an die Erde und an einen Rollstuhl gefesselt, wie sollte es mir je außerhalb meiner Phantasie und meiner Arbeit auf dem Feld der Theoretischen Physik möglich sein, die Majestät des Weltraums zu erfahren? Ich hätte nie gedacht, dass ich die Möglichkeit haben würde, unseren herrlichen Planeten aus dem Weltall zu sehen oder die ihn umgebende Unendlichkeit zu bestaunen. Das war den Astronauten vorbehalten, den wenigen Glücklichen, die das Wunder und den Kick eines Weltraumflugs erleben dürfen. Doch im Jahr 2007 hatte ich das Glück, auf einen Schwerelosigkeits- oder Parabelflug mitgenommen zu werden und zum ersten Mal zu erfahren, wie sie sich anfühlt, diese Schwerelosigkeit: Es war phantastisch, ich wollte gar nicht mehr zurück in die Schwerkraft, auf die Erde ...

Können Menschen denn überhaupt lange Zeit außerhalb der Erde existieren? Unsere Erfahrung mit der ISS, der *International Space Station*, zeigt, dass es für Menschen möglich ist, viele Monate in großer Entfernung vom Planeten Erde zu leben. Die Schwerelosigkeit verursacht allerdings mehrere unerwünschte physiologische Veränderungen sowie eine Schwächung der Knochen, außerdem praktische Probleme mit Flüssigkeiten und so weiter. Auf einem Planeten oder einem Mond sollten daher auf Dauer angelegte Stützpunkte für Menschen errichtet werden. Wenn man sich in die Oberfläche eingräbt, würde man eine Wärmedämmung erzielen, sich außerdem vor Meteoren und kosmischer Strahlung schützen. Der Planet oder Mond könnte auch als Rohstoffquelle dienen, die nötig wäre, wenn die außerirdische Gemeinschaft autark, unabhängig von der Erde sein müsste.

Welches wären mögliche Orte einer menschlichen Siedlung im Sonnensystem? Am offensichtlichsten wäre der Mond. Er liegt in der Nähe und ist relativ einfach zu erreichen. Wir sind dort bereits gelandet und haben ihn mit einem Buggy befahren. Der Mond ist jedoch klein, besitzt kein Magnetfeld und keine Atmosphäre, die – wie auf der Erde – die Partikel der Sonneneinstrahlung ablenkt. Flüssiges Wasser gibt es auch nicht, wobei sich möglicherweise in den Kratern am Nord- und Südpol des Mondes Eis finden ließe. Eine Kolonie auf dem Mond könnte es als Sauerstoffquelle nutzen, Energie könnte aus Kernenergie oder von Sonnensegeln gewonnen werden. Der Mond könnte als Stützpunkt dienen, von dem aus das übrige Sonnensystem bereist würde.

Der Mars wäre offensichtlich das nächstmögliche Ziel. Seine Entfernung von der Sonne ist noch einmal um die Hälfte größer als die der Erde, er empfängt also die Hälfte der Wärme. Früher einmal hatte der Mars ein Magnetfeld, das jedoch vor vier Milliarden Jahren zerfiel. Auch dort gibt es also keinen Schutz vor der Sonneneinstrahlung. Damit verlor der Planet den größten Teil seiner Atmosphäre, übrig ist lediglich ein Prozent des Druckes der Erdatmosphäre. Allerdings muss der Druck früher größer gewesen sein, denn wir können Formationen ausmachen, bei denen es sich um ausgetrocknete Kanäle und Seen handeln könnte. Heute kann es auf der Oberfläche des Mars kein flüssiges Wasser mehr geben. Es würde im fast vollständigen Vakuum verdunsten. Der Mars hatte – dies kann man daher annehmen – eine warme Feuchtperiode, in der möglicherweise Leben aufkeimte, entweder spontan oder durch Panspermie (das heißt, von einem anderen Ort im Universum hierher gebracht). Gegenwärtig gibt es keine Anzeichen für Leben auf dem Mars, doch wenn wir auf Hinweise stießen, dass es dort früher einmal Leben gegeben hätte, dann ließe das auf eine recht hohe Wahrscheinlichkeit schließen, dass Leben sich auf einem passenden Planeten entwickeln kann. Wir müssen uns freilich davor hüten, das Ganze nicht dadurch zu vermässeln, dass wir den Planeten mit Leben von der Erde kontaminieren. Und ebenso müssen wir sorgfältig vermeiden, irgendwelche Formen von Leben vom Mars auf die Erde zu bringen. Wir würden keine Widerstandskräfte dagegen aufbringen, sodass alles Leben auf der Erde vollständig ausgelöscht werden könnte.

Die NASA hat eine große Anzahl an Raumfahrzeu-gen auf den Mars geschickt, angefangen mit *Mariner 4* im Jahr 1964. Der Planet wurde mit mehreren Raumsonden erforscht, unter anderem durch den *Mars Reconnaissance Orbiter*. Diese Orbiter haben tiefe Rinnen entdeckt und die höchsten Berge im Sonnensystem. Die NASA hat außerdem mehrere Mars-Mobile auf der Oberfläche des Mars ausgesetzt, zuletzt die beiden Mars-Rover. Von ihnen kamen Bilder einer trockenen Wüstenlandschaft. Wie auf dem Mond könnte man auch auf dem Mars Wasser und Sauerstoff aus dem Polareis gewinnen. Außerdem herrscht auf dem Mars Vulkanaktivität. Mineralien und Metalle könnten dadurch an die Oberfläche gelangt sein und einer Mars-Siedlung nützlich sein.

Mond und Mars sind die passendsten Orte für Weltraumkolonien in unserem Sonnensystem. Merkur und Venus sind zu heiß; Jupiter und Saturn

sind Gasriesen ohne feste Oberfläche. Die Monde des Mars sind sehr klein und bieten im Vergleich zum Mars keine Vorteile. Der eine oder andere Mond von Jupiter oder Saturn könnte infrage kommen. Die Oberfläche von Europa, einem Jupiter-Mond, besteht aus Eis. Unter der Eisdecke könnte sich flüssiges Wasser befinden, in dem sich Leben hätte entwickeln können. Wie können wir das herausfinden? Müssen wir dazu auf Europa landen und ein Loch ins Eis bohren?

Titan, ein Eismond des Saturn, ist größer und massiver als unser Mond und verfügt über eine dichte Atmosphäre. Die *Cassini-Huygens-Mission* von NASA und ESA hat eine Sonde auf Titan gelandet, die Bilder von der Oberfläche zur Erde geschickt hat. Allerdings ist es dort, in so großer Entfernung von der Sonne, unsäglich kalt, und den Gedanken, bei Temperaturen von etwa minus 179 °C in der Nähe eines Sees aus flüssigem Methan zu wohnen, finde ich nicht gerade anheimelnd.

Aber wie wäre es, wenn wir kühn die Grenzen des Sonnensystems überschritten? Unsere Beobachtungen lassen darauf schließen, dass mehrere Sterne von Planeten umkreist werden. Bislang können wir nur Planeten von der Größe von Jupiter und Saturn entdecken, aber man kann vernünftigerweise annehmen, dass sich in deren Nähe kleinere, mit der Erde vergleichbare Planeten befinden. Einige Planeten dürften in der Goldilocks- oder auch Lebenszone liegen, wo der Abstand vom Stern in einem Bereich liegt, dass es auf seiner Oberfläche flüssiges Wasser geben könnte. Rund 1000 Sterne umgeben die Erde innerhalb einer Zone von 30 Lichtjahren. Wenn ein Prozent dieser Sterne in der Goldilocks-Zone Planeten von der Größe der Erde hat, haben wir zehn Kandidaten für neue Welten.

Nehmen wir zum Beispiel *Proxima b*. Dieser *Exoplanet*, der der Erde am nächsten, aber immer noch viereinhalb Lichtjahre entfernt liegt, umkreist den Stern Proxima Centauri, und neuere Untersuchungen haben gewisse Ähnlichkeiten mit der Erde ergeben.

Mit der heutigen Technik mag es als unmöglich erscheinen, zu diesen »Kandidaten« zu reisen, aber wenn wir unsere Phantasie aktivieren, können interstellare Reisen zu einem langfristig zu erreichenden Ziel, sagen wir: in den nächsten 200 bis 500 Jahren, möglich sein. Die Geschwindigkeit, mit der wir eine Rakete losschicken können, hängt von zwei Faktoren ab: der Ausstoßgeschwindigkeit und dem Anteil an Masse, den die Rakete bei der Beschleunigung verliert. Die Ausstoßgeschwindigkeit chemischer Raketen

der Art, wie wir sie bislang im Einsatz hatten, beträgt ungefähr drei Kilometer pro Sekunde. Indem sie 30 Prozent ihrer Masse abstoßen, können sie eine Geschwindigkeit von rund 500 Metern pro Sekunde erreichen, danach werden sie wieder langsamer.

Nach Berechnungen der NASA könnte der Mars in lediglich 260 Tagen erreicht werden – zehn Tage hin oder her; einige Wissenschaftler der NASA sagen sogar einen Zeitraum von nur 130 Tagen voraus. Dennoch würde es dann drei Millionen Jahre dauern, das nächstgelegene Sternsystem zu erreichen. Will man schneller unterwegs sein, dann braucht man eine sehr viel höhere Ausstoßgeschwindigkeit, als chemische Raketen sie liefern können – nämlich die von Licht. Ein mächtiger Lichtstrahl könnte das Raumschiff von hinten vorwärtstreiben. Kernfusion könnte ein Prozent der Massenenergie des Raumschiffs liefern, das auf ein Zehntel der Lichtgeschwindigkeit beschleunigen würde. Darüber hinaus würden wir entweder eine Materie-Antimaterie-Annihilation oder irgendeine komplett neue Form von Energie nutzen. Der Abstand zu Alpha Centauri ist faktisch so groß, dass ein solches Raumschiff, um im Zeitraum eines menschlichen Lebens dorthin zu gelangen, Treibstoff im Umfang der Masse ungefähr sämtlicher Sterne in der Galaxie mit sich führen müsste. Kurz: Beim gegenwärtigen Stand der Technik sind interstellare Reisen absolut undurchführbar. Alpha Centauri wird nie zu einem Urlaubsziel werden.

Wir haben die Möglichkeit, das zu ändern – mit Phantasie und Erfindergeist. Ich habe mich mit Juri B. Milner zusammengetan, um *Breakthrough Starshot* zu gründen, ein langfristiges Forschungs- und Entwicklungsprogramm, das dazu beitragen soll, dass interstellare Reisen Realität werden. Wenn wir Erfolg haben, werden wir eine Sonde nach Alpha Centauri schicken, und zwar noch zu Lebzeiten der jetzigen Generation. Darauf komme ich gleich zurück.

Wie sieht der Anfang dieser Reise aus? Bis jetzt waren unsere Erkundungen auf unsere lokale kosmische Nachbarschaft beschränkt. Gerade hat *Voyager*, unser kühnster Entdecker seit 40 Jahren, es in den interstellaren Raum geschafft. Mit ihrer Geschwindigkeit – elf Meilen pro Sekunde – würde die Raumsonde ungefähr 70000 Jahre brauchen, um in Alpha Centauri anzukommen. Die Konstellation ist 4,37 Lichtjahre entfernt: etwa 25 Billionen Meilen und weit mehr als 41 Billionen Kilometer. Sollte es heute Lebewesen auf Alpha Centauri geben, bleibt diesen Glücklichen das Wissen

um den Aufstieg von Donald Trump erspart.

Offensichtlich treten wir in ein neues Weltraumzeitalter ein. Die ersten privaten Astronauten werden Pioniere sein und die ersten Flüge immens teuer, doch ich hoffe, dass im Lauf der Zeit Weltraumflüge für sehr viel größere Teile der Erdbevölkerung erschwinglich sein werden. Wenn immer mehr Passagiere in den Weltraum reisen, dann wird das unsere Stellung auf der Erde wie auch unsere Verantwortung als Hüter der Erde in neuem Licht erscheinen lassen, und wir können dann auch besser unseren Ort und unsere Zukunft im Kosmos sehen – den Ort und den Planeten, der, so glaube ich, letztlich unser Schicksal ist.

Wie erwähnt, bietet *Breakthrough Starshot* dem Menschen eine realistische Möglichkeit, baldige Abstecher in den äußeren Weltraum zu machen, wobei es das Ziel ist, die Möglichkeiten der Besiedlung zu sondieren und zu bewerten. Die Mission soll die Machbarkeit dreier Projekte überprüfen: miniaturisierte Raumsonden, Lichtantrieb und phasengekoppelte Laser. Der Star Chip, eine voll funktionsfähige Raumsonde, deren Größe auf wenige Zentimeter reduziert ist, wird mit einem Lichtsegel verbunden. Das aus Metamaterialien hergestellte Lichtsegel wiegt nur wenige Gramm. Wir planen, 1000 Star Chips und Lichtsegel – das *Nanocraft* – in den Orbit zu schicken. Am Boden wird ein Laserarray, der mehrere Kilometer umfasst, sein Licht zu einem einzigen sehr energiereichen Strahl bündeln. Der Strahl wird durch die Atmosphäre geschossen und trifft die Segel im All mit einer Energie von mehreren Gigawatt.

Diesem innovativen Projekt liegt die Überlegung zugrunde, das Nanocraft gleichsam auf einem Lichtstrahl zu beschleunigen – wie Einstein mit 16 Jahren davon träumte, auf einem Lichtstrahl zu ›reiten‹. Nicht ganz mit Lichtgeschwindigkeit, aber doch mit einem Fünftel von ihr, das heißt mit gut 150 Millionen Kilometern pro Stunde. Ein solches System könnte den Mars in weniger als einer Stunde erreichen, zu Pluto in Tagen gelangen, Voyager nach einer knappen Woche passieren und bei Alpha Centauri in etwas mehr als 20 Jahren eintreffen. Dort angelangt, könnte Nanocraft Bilder von jedem in dem System entdeckten Planeten machen, prüfen, ob es Magnetfelder und organische Moleküle gibt, und die Daten mit einem anderen Laserstrahl zurück zur Erde senden. Dieses extrem schwache Signal würde von derselben Anordnung von Parabolantennen empfangen, die zur Bündelung des Startstrahls verwendet wurde.

Die Rückkehr wird, so schätzt man, ungefähr vier Lichtjahre dauern. Ein wichtiger Aspekt ist, dass die Wege der Star Chips möglicherweise einen Vorbeiflug an *Proxima b* einschließen, dem erdgroßen Planeten, der in der bewohnbaren Zone seines Wirtssterns Alpha Centauri liegt. *Breakthrough* und die europäische Südsternwarte haben im Jahr 2017 beschlossen, bei der Suche nach bewohnbaren Planeten im System von Alpha Centauri zusammenzuarbeiten.

Es gibt noch einige nachgeordnete Ziele für *Breakthrough Starshot*. So sollen auch das Sonnensystem erkundet und »erdkreuzende« Asteroiden entdeckt werden. Außerdem hat der deutsche Physiker Claudius Gros die Ansicht vertreten, mit dieser Technologie könnte man auch eine Biosphäre von einzelligen Mikroben auf sonst nur vorübergehend bewohnbaren Exoplaneten schaffen.

So weit, so machbar. Es gibt jedoch erhebliche Schwierigkeiten. Ein Laser mit einer Leistung von einem Gigawatt würde nur eine Schubkraft von einigen Newton liefern. Allerdings gleicht das Nanocraft dieses Manko durch seine niedrige Masse von nur wenigen Gramm aus. Die technischen Herausforderungen sind immens. Das Nanocraft muss widrigste Verhältnisse überleben: extreme Beschleunigung, Kälte, Vakuum und Protonen sowie Kollisionen mit Weltraummüll und -staub. Außerdem wird es angesichts atmosphärischer Turbulenzen schwierig sein, eine Anordnung von Lasern, die es insgesamt auf 100 Gigawatt bringen, auf die Sonnensegel zu fokussieren. Wie kombinieren wir Hunderte von Lasern ungeachtet der Bewegung in der Atmosphäre? Wie treiben wir das Nanocraft an, ohne es einzuäschern? Wie lenken wir es in die vorgesehene Richtung? 20 Jahre lang müssten wir die Funktionen des Nanocraft erhalten, damit es Signale über eine Entfernung von vier Lichtjahren an uns zurückschicken kann.

Aber das sind technische Probleme, und technische Probleme werden in der Regel irgendwann gelöst. Wenn die Technologie ausgereift ist, lassen sich andere faszinierende Missionen ins Auge fassen. Selbst mit weniger leistungsfähigen Laserarrays könnten sich Reisezeiten zu anderen Planeten, in die Außenbezirke des Sonnensystems oder in den interstellaren Raum erheblich verringern.

Natürlich wären das noch keine interstellaren Reisen für Menschen, selbst wenn sich die Technologie eines Tages auf bemannte Raumfahrzeuge anwenden ließe. Ein solches Raumschiff könnte nicht abgebremst werden,

nicht anhalten oder landen. Dennoch wäre es der Moment, in dem die menschliche Kultur interstellar wird, in dem wir unsere Fühler endlich in die Milchstraße ausstrecken würden. Und wenn *Breakthrough Starshot* uns Bilder von einem bewohnbaren Planeten sendete, könnte es von ungeheurer Bedeutung für die Zukunft der Menschheit sein.

Lassen Sie mich am Schluss wieder zu Albert Einstein zurückkehren. Wenn wir einen Planeten im System Alpha Centauri finden, wird das Bild dieses Planeten, aufgenommen mit einer Kamera, die sich – in einem Raumschiff – mit einem Fünftel der Lichtgeschwindigkeit bewegt, aufgrund der Auswirkungen der Speziellen Relativität leicht verzerrt sein. Es wäre das erste Mal, dass ein Raumschiff schnell genug unterwegs ist, um solche Effekte beobachten zu können. Faktisch ist Einsteins Theorie für die gesamte Mission von zentraler Bedeutung. Ohne sie hätten wir weder Laser noch die Fähigkeit, die Berechnungen anzustellen, die für die Lenkung, Bildgebung und Datenübertragung über 25 Billionen Meilen mit einem Fünftel der Lichtgeschwindigkeit notwendig sind.

Wir können einen Weg erkennen: Er beginnt bei jenem 16-jährigen Jungen, der davon träumt, auf einem Lichtstrahl zu reiten, und mündet in unseren Traum, den wir verwirklichen wollen – auf unserem eigenen Lichtstrahl zu den Sternen zu reiten. Wir stehen an der Schwelle einer neuen Ära. Die Besiedlung anderer Planeten durch den Menschen ist dann nicht mehr Science-Fiction. Sie kann zum Faktum werden – zu Science-Fact. Die Gattung Mensch existiert seit rund zwei Millionen Jahren. Die Zivilisation begann vor rund 10000 Jahren, und das Tempo dieser Entwicklung hat sich ständig beschleunigt.

Wenn die Menschheit noch eine Million Jahre weiter existieren soll, dann liegt unsere Zukunft darin, kühn dorthin vorzudringen, wo noch kein Mensch zuvor gewesen ist.

Ich hoffe das Beste. Ich muss es. Eine andere Wahl haben wir nicht.

Bald wird das Zeitalter der zivilen Raumfahrt anbrechen. Was bedeutet das für uns?

Ich freue mich auf Weltraumreisen. Ich wäre unter den Ersten, die sich ein Ticket kaufen. Ich erwarte, dass wir bis in 100 Jahren fähig sein werden, im Sonnensystem überallhin zu reisen, vielleicht abgesehen von den äußeren Planeten.

Mit Reisen zu den Sternen wird es etwas länger dauern. Ich nehme an, dass wir bis in 400 Jahren einige der nähergelegenen Sterne besucht haben werden. Es wird nicht wie in *Star Trek* sein. Wir werden nicht mit Warpgeschwindigkeit reisen können. Eine derartige Rundreise wird also mindestens zehn Jahre, wahrscheinlich sogar sehr viel länger dauern.

Wird uns Künstliche Intelligenz überflügeln?

Intelligenz ist entscheidend für das, was es bedeutet, ein Mensch zu sein. Alles, was die Zivilisation zu bieten hat, ist ein Produkt menschlicher Intelligenz.

Die DNA gibt die Blaupausen des Lebens von einer Generation an die nächste weiter. Immer komplexere Lebensformen erhalten Informationen von Sensoren wie den Augen und den Ohren und verarbeiten Informationen in Gehirnen oder in anderen Systemen, um herauszufinden, was in einer bestimmten Situation zu tun ist, und dann auf die Welt einzuwirken, indem beispielsweise Informationen an die Muskeln weitergegeben werden.

Irgendwann in den 13,8 Milliarden Jahren kosmischer Geschichte geschah dann etwas Wunderbares. Die Informationsverarbeitung wurde so intelligent, dass bestimmte Lebensformen Bewusstsein erlangten. Zu diesem Zeitpunkt erwachte unser Universum und wurde sich seiner selbst bewusst. Ich sehe einen Triumph darin, dass wir zwar nur aus Sternenstaub bestehen, aber ein so genaues Verständnis des Universums entwickelt haben, in dem wir leben.

Dass es einen qualitativen Unterschied zwischen dem Gehirn eines Regenwurms und dem eines Computers gibt, glaube ich nicht. Ich glaube darüber hinaus, dass es aufgrund der Evolution keinen qualitativen Unterschied zwischen dem Gehirn eines Regenwurms und dem eines Menschen gibt. Daraus folgt: Computer können im Prinzip menschliche Intelligenz nachahmen oder sie sogar verbessern. Es ist für ein Lebewesen offensichtlich möglich, höhere Intelligenz zu entwickeln als seine Vorfahren: Wir haben uns so entwickelt, dass wir schlauer sind als unsere affenähnlichen Vorfahren. Auch Albert Einstein war schlauer als seine Eltern.

Wenn Computer sich weiterhin gemäß Moores Gesetz entwickeln und also ihre Geschwindigkeit und Speicherkapazität alle 18 Monate verdoppeln, dann hat das zur Folge, dass Computer wahrscheinlich früher oder später in den kommenden 100 Jahren die Menschen hinsichtlich der Intelligenz überholen werden. Wenn eine *Künstliche Intelligenz* (KI) besser wird als Menschen bei der Konstruktion von KI, sodass sie sich rekursiv ohne menschliche Hilfe selbst verbessern kann, dann steht uns höchstwahrscheinlich eine Intelligenzexplosion bevor, die letztlich in die Maschinenintelligenz mündet: Sie wird unsere Intelligenz in viel höherem Maß übertreffen als unsere menschliche Intelligenz die von Schnecken. Bevor es so weit ist, müssen wir sicherstellen, dass die Computer Ziele verfolgen, die auf einer Linie mit unseren Zielen liegen. Die Vorstellung hochintelligenter Maschinen nur als Science-Fiction abzutun, ist verführerisch, doch das wäre ein Fehler – womöglich überhaupt der schlimmste Fehler, den wir begehen könnten.

In den zurückliegenden rund 20 Jahren hat sich die KI-Forschung auf Probleme bei der Konstruktion intelligenter Agenten konzentriert, von Systemen also, die eine bestimmte Umgebung wahrnehmen und darin agieren. In diesem Kontext bezieht sich Intelligenz auf statistische und ökonomische Konzepte von Rationalität – einfacher gesagt: auf die Fähigkeit, gute Entscheidungen zu treffen, Pläne zu entwickeln oder Schlüsse zu ziehen. Das Ergebnis dieser Arbeit der vergangenen Jahre war ein hohes Maß an Integration und gegenseitiger Befruchtung auf dem Gebiet der KI:

- bei maschinellern Lernen
- Statistik
- Kontrolltheorie
- Neurowissenschaft und in anderen Bereichen

Das Schaffen gemeinsamer theoretischer Rahmenkonzepte, kombiniert mit der Verfügbarkeit von Daten und Rechenleistung, hat bei unterschiedlichen zusammengesetzten Aufgaben zu beachtlichen Erfolgen geführt – man denke nur an:

- Spracherkennung

- maschinelle Übersetzung
- Körperbewegung (z. B. der Beine)
- Bildklassifikation
- autonome Fahrzeuge
- Frage-Antwort-Systeme

Während die Entwicklung in diesen und anderen Bereichen die Laborforschung hinter sich lässt und zu ökonomisch ergiebigen Techniken führt, wird ein positiver Kreislauf in Gang gesetzt, in dem selbst kleine Leistungsverbesserungen große Geldsummen wert sind, was weitergehende, umfangreichere Investitionen in die Forschung ermöglicht. Heute gibt es einen breiten Konsens, dass die KI-Forschung kontinuierlich fortschreitet und dass ihr gesellschaftlicher Einfluss sich offensichtlich erheblich vergrößern wird. Der potentielle Nutzen ist immens. Wir können nicht voraussagen, was noch alles zu vollbringen ist, wenn diese Intelligenz durch solche Werkzeuge erweitert wird, die uns die KI ihrerseits bereitstellt. Die Überwindung von Krankheit und Armut ist möglich. Wegen des gewaltigen Potentials der KI ist es allerdings wichtig, genau zu untersuchen, wie man von den Vorteilen profitieren kann und zugleich potentielle Fallstricke umgeht. Die erfolgreiche Hervorbringung Künstlicher Intelligenz wäre das größte Ereignis in der Geschichte der Menschheit.

Fatalerweise könnte es auch das letzte Ereignis der Menschheit werden, außer wir lernen, Risiken zu vermeiden. Als Werkzeug benutzt, kann KI unsere aktuelle Intelligenz erweitern und Vorteile in allen Bereichen der Wissenschaft und der Gesellschaft bringen. Allerdings gehen mit der Künstlichen Intelligenz auch Gefahren einher. Die bislang entwickelten primitiven Formen Künstlicher Intelligenz haben sich als sehr nützlich herausgestellt, allerdings habe ich Angst vor den Folgen, die es haben könnte, wenn wir etwas schaffen, das dem Menschen ebenbürtig oder ihm sogar überlegen ist.

Es ist zu befürchten, dass die KI alleine weitermacht und sich mit ständig zunehmender Geschwindigkeit selbst überarbeitet. Menschen, die aufgrund der Langsamkeit ihrer biologischen Evolution beschränkt sind, könnten nicht mithalten und würden verdrängt. Und zukünftig könnte KI einen eigenen

Willen entwickeln, der zu unserem Willen im Widerspruch steht. Manche glauben, der Mensch könne die Wachstumsrate der Technologie angemessen lange kontrollieren, und das Potential von KI könne ein- und umgesetzt werden, um zahlreiche Weltprobleme zu lösen. Ich bin zwar bezüglich der Gattung Mensch als Optimist bekannt, doch in dieser Frage bin ich mir nicht so sicher.

So denken etwa weltweit Militärs bereits jetzt darüber nach, ob sie ein Wettrüsten auf dem Feld der *Autonomen Waffensysteme* starten sollen, die selbstständig ihre Ziele auswählen und eliminieren. Während die UN über einen Vertrag diskutieren, der solche Waffen verbieten soll, vergessen diejenigen, die sich für Autonome Waffen einsetzen, in der Regel, die wichtigste Frage zu stellen: Wie sieht der wahrscheinliche Endpunkt eines solchen Wettrüstens aus? Ist er für die Menschheit insgesamt annehmbar und vorteilhaft? Wollen wir wirklich, dass günstige KI-Waffen zu den Kalaschnikows von morgen werden, die auf dem Schwarzmarkt an Kriminelle und Terroristen verkauft werden? Wir müssen uns Gedanken über unsere Fähigkeit machen, langfristig die Kontrolle über immer weiter entwickelte KI-Systeme zu behalten – können wir es uns da leisten, sie zu bewaffnen und unsere Verteidigung ihnen zu überlassen? Am 6. Mai 2010 lösten computerbasierte Handelssysteme den Flashcrash am Finanzmarkt aus. Wie würde ein von Computern ausgelöster Crash auf dem Verteidigungssektor aussehen? Der ideale Augenblick, um das Wettrüsten mit Autonomen Waffen zu beenden, ist: Jetzt! Sofort!

Mittelfristig könnten durch KI unsere Arbeitsstellen automatisiert werden, was mehr Wohlstand und Gleichheit bedeutet. Blickt man in die fernere Zukunft, dann sind keine fundamentalen Grenzen hinsichtlich dessen in Sicht, was erreicht werden kann. Es gibt kein physikalisches Gesetz, das Partikel daran hindert, sich zu organisieren, und zwar auf eine Art und Weise, die noch ausgereifere Berechnungen ermöglicht als durch die Partikelanordnungen im menschlichen Gehirn. Ein explosiver Wandel ist möglich, wobei er sich allerdings vielleicht anders vollzieht, als es in Filmen dargestellt wird. Irving Good stellte 1965 fest, dass Maschinen mit übermenschlicher Intelligenz immer neu ihre Konstruktion überarbeiten, verbessern und so das einleiten könnten, was Vernor Vinge eine *Technologische Singularität* nennt. Man kann sich lebhaft vorstellen, dass eine solche Technologie Finanzmärkte austrickst, menschliche Forscher

überflüssig macht, menschliche Führungspersonen ausbremst und uns mit ihren Waffen, die wir überhaupt nicht verstehen, unterwirft. Momentan und auf kurze Sicht hängt der Einfluss der KI davon ab, wer sie kontrolliert, auf lange Sicht davon, ob sie überhaupt kontrollierbar ist.

Kurz: Das Aufkommen superintelligenter KI wäre entweder das Beste oder das Schlimmste, was der Menschheit passieren kann. Das eigentliche Risiko bei KI ist nicht Bosheit, sondern Kompetenz. Eine superintelligente KI wird extrem gut darin sein, ihre Ziele anzusteuern – und sollten diese Ziele nicht mit unseren übereinstimmen, bekommen wir Probleme. Bestimmt sind Sie kein schlimmer Ameisenhasser, der diese Tiere aus purer Bosheit tottritt. Wenn Sie allerdings die Verantwortung für den Bau eines Wasserkraftwerks zur Erzeugung von Ökostrom haben und ein Ameisenhügel im betroffenen Gebiet geflutet wird – Pech für die Ameisen.

Wir sollten es vermeiden, die Menschheit in die Lage dieser Ameisen zu bringen. Wir sollten vorausdenken. Wenn eine überlegene außerirdische Zivilisation uns in einer Textmessage mitteilte: »In ein paar Jahrzehnten treffen wir ein«, würden wir dann einfach nur antworten: »Okay, sagt uns Bescheid, wenn ihr da seid, wir lassen das Licht brennen«? Wahrscheinlich nicht – aber mehr oder weniger so lief es bislang mit KI. Bezüglich dieser Themen wurde kaum ernsthafte Forschungsarbeit geleistet, abgesehen von einigen wenigen kleinen gemeinnützigen Instituten.

Das ändert sich nun glücklicherweise. Die Technikpioniere Bill Gates, Steve Wozniak und Elon Musk haben auf meine Bedenken reagiert, und eine leistungsfähige Kultur aus Risikoabwägung und Einbeziehung der gesellschaftlichen Implikationen beginnt sich in der KI-Community auszubreiten. Im Januar 2015 habe ich zusammen mit dem Technologie-Unternehmer Elon Musk und zahlreichen weiteren KI-Experten einen offenen Brief zum Thema Künstliche Intelligenz verfasst, in dem wir zu massiven Forschungen zu deren Einfluss auf die Gesellschaft aufrufen. Elon Musk hat früher darauf hingewiesen, dass übermenschliche Künstliche Intelligenz unermessliche Vorteile mit sich bringen kann. Wenn wir damit allerdings unvorsichtig umgehen, stellt sich der gegenteilige Effekt auf die Menschheit ein.

Elon und ich gehören zum wissenschaftlichen Beirat des *Future of Life Institute*, einer Organisation, deren Ziel es ist, existentielle Risiken für die Menschheit zu mildern. Der offene Brief wurde von diesem Beirat verfasst

und rief zu konkreter Forschung über die Frage auf, wie wir potentiellen Problemen vorbeugen können, während wir gleichzeitig von dem Potential profitieren, das die KI uns bietet. Unser Brief soll KI-Forscher und -Entwickler dazu bewegen, dem Thema KI-Sicherheit mehr Aufmerksamkeit zukommen zu lassen. Außerdem sollte der Brief, der sich auch an Politiker und die weltweite Öffentlichkeit wandte, informativ sein, aber nicht alarmierend wirken. Jeder soll wissen, und das halten wir für äußerst wichtig, dass KI-Forscher sich mit diesen Bedenken und ethischen Problemen ernsthaft auseinandersetzen.

So hat beispielsweise die KI das Potential, Krankheit und Armut endgültig zu beseitigen, doch die Forschung muss an der Entwicklung einer kontrollier- und steuerbaren KI arbeiten.

Im Oktober 2016 eröffnete ich außerdem ein neues Zentrum in Cambridge, das versuchen soll, einige der offenen Fragen anzugehen, welche die rapiden Fortschritte der KI-Forschung aufwerfen. Das *Leverhulme Centre for the Future of Intelligence* ist ein interdisziplinäres Institut, das die Zukunft der Intelligenz untersucht, die entscheidend ist für die Zukunft unserer Kultur und der Spezies Mensch. Wir verbringen viel Zeit damit, die Geschichte der Menschheit zu studieren, die – machen wir uns nichts vor – überwiegend eine Geschichte der Dummheit ist. Es ist also eine willkommene Abwechslung, wenn die Leute sich mit der Zukunft der Intelligenz befassen. Wir sind uns der potentiellen Gefahren bewusst, aber vielleicht können wir mit den intelligenten Werkzeugen dieser neuen technischen Revolution sogar einige der Schäden wiedergutmachen, die der Natur durch die Industrialisierung zugefügt wurden.

Zu den aktuellen Trends in der Weiterentwicklung der KI gehört auch ein Bericht des Europaparlaments, in dem es dazu aufruft, ein Regelwerk zu entwerfen, das für die Produktion von Robotern und ihrer KI einen verbindlichen Rahmen festlegt. Erstaunlicherweise ist darin auch eine Art elektronische »Personalität« enthalten, die die Rechte und Pflichten der fähigsten und fortgeschrittensten KI festschreiben will. Ein Sprecher im Europäischen Parlament meinte dazu, immer mehr Bereiche unseres Alltags seien von Robotern beeinflusst, wir müssten daher sicherstellen, dass Roboter im Dienst der Menschheit stehen – und bleiben.

Der Report, der den Mitgliedern des Europaparlaments vorgelegt wurde, lässt klar erkennen, dass man davon ausgeht, dass die Welt an der Schwelle

zu einer neuen industriellen Roboterrevolution steht. Er untersucht, ob es statthaft und angebracht wäre (oder nicht), *Robotern als elektronischen Personen* – auf einer Stufe mit der rechtlichen Definition juristischer Personen – gesetzliche Rechte einzuräumen. Gleichzeitig wird aber auch unterstrichen, Forscher und Entwickler hätten jederzeit darauf zu achten, dass sämtliche Roboterkonstrukte über einen Notschalter verfügen.

Das nützte nun aber den Wissenschaftlern an Bord eines Raumschiffs nichts, denn HAL, der Roboter-Computer in Kubricks *2001: Odyssee im Weltraum*, funktionierte nicht mehr richtig – aber das war Fiktion. Wir haben es hingegen mit Fakten zu tun. Lorna Brazell, eine Partnerin in der multinationalen Anwaltskanzlei *Osborne Clarke*, gibt in ihrem Bericht zu bedenken, solange wir Walen und Gorillas keinen Personenstatus zusprechen, gäbe es keinen Grund, dieses Recht Robotern zu bewilligen. Eine gewisse Skepsis ist dabei unverkennbar. Der Bericht räumt ein, innerhalb weniger Jahrzehnte könne die KI die menschliche intellektuelle Kapazität überholen und die Mensch-Roboter-Beziehung grundsätzlich infrage stellen.

Bis zum Jahr 2025 wird es rund 30 Megastädte geben, jede mit über zehn Millionen Einwohnern. Wenn all diese Menschen nach Waren und Dienstleistungen verlangen, die ihnen zu jeder Tages- und Nachtzeit zur Verfügung stehen sollen – kann die Technik uns dabei behilflich sein, mit der umgehenden Erfüllung unserer Kundenwünsche Schritt zu halten? Roboter werden zweifellos die Abläufe im Online-Handel beschleunigen. Um allerdings das Einkaufsverhalten wirklich zu revolutionieren, müssten sie schnell genug sein, jeder Bestellung am selben Tag nachkommen zu können.

Die Möglichkeiten, mit der Welt in Verbindung zu treten, ohne physisch anwesend zu sein, nehmen rapide zu. Ich finde das verlockend, wie Sie sich bestimmt vorstellen können, nicht zuletzt deswegen, weil das Großstadtleben für uns alle so hektisch ist. Wie oft haben Sie sich nicht schon ein Double gewünscht, das Ihnen einen Teil Ihrer Arbeitsbelastung abnehmen könnte? Eine ehrgeizige Wunschvorstellung wäre es, realistische digitale Stellvertreter für uns konstruieren zu lassen. Diese Idee ist gar nicht so weit hergeholt, wie neueste Entwicklungen belegen.

Als ich noch jünger war, ließen die zunehmenden technischen Neuerungen darauf schließen, dass uns eine Zukunft bevorstand, in der wir alle mehr Freizeit haben würden. Tatsächlich aber sind wir mit der Zunahme unserer Handlungsmöglichkeiten auch immer mehr beschäftigt. Unsere Städte sind

bereits voller Maschinen, die unsere Fähigkeiten erweitern – wie aber wäre es, wenn wir an zwei Orten gleichzeitig sein könnten? Wir haben uns an Automatenstimmen in Telefonsystemen und bei öffentlichen Lautsprecherdurchsagen gewöhnt. Nun arbeitet der Erfinder Daniel Kraft daran herauszufinden, wie wir uns selbst visuell nachbilden können. Die Frage ist: Wie überzeugend kann ein Avatar wirken?

Interaktive Tutoren könnten sich für offene Onlinekurse (MOOCs), die sich an ein breites Publikum wenden, und für Unterhaltungszwecke als nützlich erweisen; das stelle ich mir großartig vor. Oder digitale Schauspieler, die ewig jung bleiben und eigentlich undurchführbare Kunststückchen vollbringen könnten. Unsere zukünftigen Idole sind dann vielleicht gar nicht mehr real.

Wie wir an die digitale Welt angebunden sind, ist entscheidend für die Richtung des zukünftigen Fortschritts. In den schlauesten Städten werden die schlauesten Wohnungen mit hochintuitiven Anlagen ausgerüstet sein; man wird sie nahezu mühelos bedienen, sich mit ihnen verbinden und in sie einloggen können.

Als die Schreibmaschine erfunden wurde, machte sie den Weg frei für die Art, wie wir mit Maschinen interagieren. Fast 150 Jahre später haben Touchscreens neue Wege eröffnet, mit der digitalen Welt zu kommunizieren. Die neuesten bahnbrechenden Errungenschaften im Bereich der KI – wie die bereits erwähnten autonomen Fahrzeuge oder ein Computer, der beim Go-Spiel gewinnt – sind Zeichen für das, was noch kommt. Enorme Mengen an Geld fließen in diese Technologien, die schon heute einen Großteil unseres Lebens beeinflussen. In den nächsten Jahrzehnten werden sie jeden Bereich unserer Gesellschaft besetzen, intelligente Hilfe leisten und uns auf vielen Gebieten – dem Gesundheitswesen, der Arbeit, der Bildung und der Wissenschaft – unterstützen. Die Errungenschaften, die wir bis heute kennengelernt haben, werden mit Sicherheit von dem, was die nächsten Jahrzehnte bringen, völlig in den Schatten gestellt, und überhaupt nicht voraussagen können wir, was wir zu leisten vermögen, wenn unser Geist durch KI erweitert wird.

Vielleicht können wir mit den Werkzeugen dieser neuen technologischen Revolution das menschliche Leben verbessern. Beispielsweise arbeiten Wissenschaftler an einer KI, die es möglich macht, die Lähmung bei Menschen mit Rückenmarksverletzungen aufzuheben. Mit implantierten

Chips aus Silikon und kabellosen elektronischen Schnittstellen zwischen Gehirn und Körper würde es diese Technik den Kranken ermöglichen, ihre Körperbewegungen mit ihren Gedanken zu steuern.

Die Zukunft der Kommunikation liegt, davon gehe ich aus, in Gehirn-Computer-Schnittstellen. Es gibt zwei Möglichkeiten: auf dem Kopf angebrachte Elektroden oder Implantate. Bei der ersten Möglichkeit hat man den Eindruck, durch zugefrorene Glasscheiben zu schauen; die zweite Möglichkeit ist besser, birgt allerdings das Risiko von Infektionen. Wenn wir ein menschliches Gehirn mit dem Internet verbinden können, steht ihm das gesamte Wikipedia als Ressource zur Verfügung.

Die Welt verändert sich mit immer höherer Geschwindigkeit, seit Menschen, Geräte und Informationen zunehmend miteinander verbunden werden. Die Leistung von Computern nimmt ständig zu, und es gibt bereits Quantencomputer. Sie werden das Gebiet der Künstlichen Intelligenz mit exponentiell noch höherer Geschwindigkeit revolutionieren und die Chiffrierung vorantreiben. *Quantencomputer werden alles verändern. Auch die Biologie des Menschen.*

Es gibt bereits eine Technik, mit der sich die DNA präzise aufbereiten lässt, die sogenannte CRISPR-Methode (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*, dabei handelt es sich um *gruppierte, kurze palindromische Wiederholungen* mit regelmäßigen Abständen). Die Grundlage dieser genomverändernden Technik ist ein bakterielles Abwehrsystem. Es kann Abschnitte des genetischen Codes exakt ansteuern und verändern. Die beste Zielsetzung für genetische Manipulation wäre: Genveränderungen würden es Wissenschaftlern ermöglichen, genetische Krankheitsursachen durch die Korrektur von Genmutationen zu behandeln.

Es gibt allerdings auch moralisch kaum vertretbare Möglichkeiten der DNA-Manipulation. Wie weit wir bei der Genmanipulation gehen dürfen, ist eine immer dringlicher werdende Frage. Wenn wir über die Möglichkeiten nachdenken, Motoneuron-Krankheiten – wie meine Amyotrophe Lateralsklerose (ALS) – zu heilen, dürfen wir die Gefahren jedoch nicht aus dem Blick verlieren.

Intelligenz wird als die Fähigkeit zur Veränderung charakterisiert. Die menschliche Intelligenz ist das Ergebnis einer sich über viele Generationen hinziehenden natürlichen Auswahl derjenigen, die fähig waren, sich veränderten Umständen anzupassen. Wir brauchen keine Angst vor

Veränderungen zu haben. Wir müssen jedoch dafür sorgen, dass sie sich zu unserem Vorteil auswirken.

Wir alle müssen daran mitwirken sicherzustellen, dass wir und die nach uns kommende Generation nicht nur die Möglichkeit haben, sondern entschlossen sind, sich so früh wie möglich auf ein Studium der Naturwissenschaften einzulassen, damit wir auch weiterhin unser Potential voll ausschöpfen und eine bessere Welt für die gesamte Menschheit schaffen können. Unser Lernen darf sich nicht darauf beschränken, Wesen und Wirkung der KI theoretisch zu diskutieren. Wir müssen aktiv werden und sicherstellen, dass wir zukünftige Optionen planen. Sie alle haben das Potential, die Grenzen dessen, was akzeptiert oder erwartet wird, auszuweiten und groß zu denken. Wir stehen an der Schwelle zu einer schönen neuen Welt. Es ist ein aufregender und gleichzeitig gefährlicher Ort. Und Sie sind die Pioniere dieser Welt.

Nachdem wir das Feuer erfunden hatten, haben wir uns ein paarmal dumm angestellt. Und dann den Feuerlöscher erfunden. Bei mächtigeren Technologien wie Nuklearwaffen, Synthetischer Biologie und hoch entwickelter Künstlicher Intelligenz sollten wir uns vorher Gedanken machen und uns große Mühe geben, alles gleich beim ersten Mal richtig zu machen. Denn womöglich haben wir nur diese eine Chance. Unsere Zukunft ist ein Wettlauf zwischen der wachsenden Macht unserer Technologien und der Weisheit, mit der wir davon Gebrauch machen. Wir sollten sicherstellen, dass die Weisheit gewinnt.

Warum machen wir uns wegen Künstlicher Intelligenz so große Sorgen? Der Mensch wird doch jederzeit dazu in der Lage sein, den Stecker zu ziehen!

Die Menschen fragten einen Computer: »Gibt es einen Gott?« Und der Computer sagte: »Ja. Ab jetzt« – und brannte mit dem Stecker durch.

Wie gestalten wir unsere Zukunft?

Vor 100 Jahren revolutionierte Albert Einstein unser Verständnis des Universums, von Zeit, Energie und Materie. Immer noch stoßen wir auf überwältigende Bestätigungen seiner Voraussagen, so etwa die Gravitationswellen, die am 14. September 2015 im *LIGO*-Experiment erstmals beobachtet werden konnten.

Denke ich über Genialität nach, kommt mir immer Albert Einstein in den Sinn. Woher nahm er seine genialen Ideen? Wahrscheinlich war es eine Mischung aus Eigenschaften: Intuition, Originalität, Brillanz. Einstein besaß die Fähigkeit, unter die Oberfläche zu schauen und die zugrunde liegende Struktur freizulegen. Um den Common Sense scherte er sich nicht – also um die Vorstellung, die Dinge müssten so sein, wie sie zu sein schienen. Er hatte den Mut, Ideen zu verfolgen, die anderen absurd vorkamen. Und das machte ihn frei dafür, genial zu sein – ein Genie seiner Zeit und für alle späteren Zeiten.

Ein Schlüsselement für Einstein war Phantasie. Viele seiner Entdeckungen entsprangen seiner Fähigkeit, sich mithilfe von Gedankenexperimenten das Universum ganz neu vorzustellen. Mit 16 Jahren stellte er sich vor, er würde auf einem Lichtstrahl reiten, und da fiel ihm auf, dass von dieser Position aus das Licht als gefrorene, feststehende Welle wahrgenommen wird. Diese anschauliche Vorstellung führte ihn schließlich zur Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie.

100 Jahre später wissen die Physiker über das Universum sehr viel mehr als Einstein damals. Wir verfügen heute über grandiose Entdeckungswerkzeuge: Teilchenbeschleuniger, Supercomputer, Weltraumteleskope und Experimente wie die Arbeit des *LIGO* über Gravitationswellen. Doch unsere mächtigste Eigenschaft ist nach wie vor die Phantasie. Mit ihr können wir überall in Raum und Zeit frei umherschweifen. Wir können die exotischsten Naturphänomene beobachten, während wir Auto

fahren, im Bett vor uns hindämmern oder so tun, als würden wir bei einer Party jemandem aufmerksam zuhören.

Als Junge untersuchte ich leidenschaftlich gerne Gegenstände, um herauszubekommen, wie sie funktionierten. Damals war es naheliegend, etwas auseinanderzunehmen und seine Funktionsweise aufzuspüren. Nicht immer schaffte ich es, die Spielzeuge wieder zusammenzubauen, die ich zerlegt hatte, aber ich lernte sicher mehr als ein Junge oder ein Mädchen, das heute den gleichen Trick mit einem Smartphone ausprobieren würde.

Immer noch ist es mein Job herauszubekommen, wie Dinge funktionieren – verändert hat sich lediglich die Größenordnung. Ich zerlege keine Modelleisenbahnen mehr. Stattdessen versuche ich mir vorzustellen, wie das Universum unter Verwendung der Gesetze der Physik funktioniert.

Wenn Sie wissen, wie etwas funktioniert, können Sie es kontrollieren. Das klingt absolut simpel, wenn ich es so formuliere! Und doch ist es ein spannendes, komplexes Unterfangen, das ich während meines gesamten Lebens als Erwachsener immer faszinierend fand und als spannend erlebte. Ich habe mit einigen der weltweit bedeutendsten Wissenschaftler zusammengearbeitet. Ich hatte das Glück, in einer veritablen Glanzzeit meines Spezialgebiets – der Kosmologie, der Erforschung der Ursprünge des Universums – zu leben.

Der menschliche Geist ist ein ganz unglaubliches Phänomen. Er kann sich die Grandiosität der Himmelsphären und die undurchschaubaren Feinheiten der Grundbestandteile der Materie vorstellen. Damit der Geist sein volles Potential erreicht, ist allerdings ein Funke erforderlich: der Funke der Wissbegierde und des Staunens.

Dieser Funke springt häufig von einem Lehrer über. Lassen Sie mich das erklären. Ich war nicht der angenehmste Schüler – lernte nur langsam lesen, und meine Handschrift war krakelig. Als ich 14 Jahre alt war, zeigte mir mein Lehrer Dikran Tahta in meiner Schule in Saint Albans, wie ich meine Energie bündeln konnte, und brachte mich dazu, Mathematik als ein kreatives Feld anzusehen. Er öffnete mir die Augen für Mathematik als Blaupause des gesamten Universums. Wenn Sie nach den Ursprüngen einer außerordentlichen Persönlichkeit fragen, werden Sie immer auf einen außerordentlichen Lehrer stoßen. Wenn wir darüber nachdenken, was wir im Leben tun können, dann tun wir das mit größter Wahrscheinlichkeit, weil ein Lehrer uns dazu motiviert hat.

Bildung, Wissenschaft und Technologieforschung sind heute jedoch mehr denn je bedroht. Aufgrund der aktuellen Finanzkrise und der Sparmaßnahmen werden auf allen Gebieten der Wissenschaft Forschungsmittel gestrichen; ganz besonders schlimm trifft es die Grundlagenforschung. Außerdem besteht die Gefahr, dass wir kulturell isoliert werden und zunehmend von den Orten abgeschnitten sind, wo sich Fortschritte ereignen. Auf dieser Forschungsstufe ermöglicht der Austausch zwischen Menschen über Grenzen hinweg einen schnelleren Wissenstransfer und bringt neue Menschen mit unterschiedlichen Ideen zusammen, die aus jeweils unterschiedlichen Kulturen stammen. Das könnte den Fortschritt erleichtern, doch heute wird ein solcher Fortschritt eher erschwert. Es ist nun einmal so – wir können die Zeit nicht zurückdrehen. Indem der Brexit und Donald Trump jetzt neuen Druck auf die Immigration und die (Aus-)Bildungsentwicklung ausüben, erleben wir eine weltweite Revolte gegen Experten, die Wissenschaftler miteinschließt. Was können wir also jetzt tun, um die Zukunft der Wissenschafts- und Technologieausbildung zu sichern?

Ich komme auf meinen Lehrer zurück, Herrn Tahta. Die Zukunft der Bildung muss in Schulen und durch inspirierende Lehrer grundgelegt werden. Schulen können jedoch nur für die ersten elementaren Voraussetzungen sorgen, um sich den Naturwissenschaften zu nähern, denn manchmal wirken Gleichungen, dröges Auswendiglernen und Prüfungen auf die Kinder abschreckend. Die meisten Menschen reagieren auf qualitative Wissensvermittlung, die ohne komplizierte Gleichungen auskommt, besser als auf quantitative Vermittlung. Populärwissenschaftliche Bücher und Artikel können ebenfalls Ideen darüber vermitteln, wie wir leben können. Allerdings werden selbst die erfolgreichsten Bücher nur von einem kleinen Anteil der Bevölkerung gelesen. Wissenschaftliche Fernsehdokumentationen und Filme erreichen ein Massenpublikum, aber die Kommunikation erfolgt nur in eine Richtung.

Als ich in den 1960er Jahren die Kosmologie zu erforschen begann, war sie ein obskures Forschungsfeld für ein paar wenige Sonderlinge. Heute hat die Kosmologie aufgrund theoretischer Arbeit und experimenteller Triumphe wie etwa des Large Hadron Collider (LHC) und der Entdeckung des Higgs-Teilchens oder auch Higgs-Bosons das Universum für uns geöffnet. Große Fragen, die noch beantwortet werden müssen, gibt es nach wie vor und es ist noch viel zu tun. Aber wir wissen jetzt mehr und haben in dieser

vergleichsweise kurzen Zeit mehr geschafft, als man es sich vor wenigen Jahrzehnten noch hätte vorstellen können.

Was aber steht denen, die jetzt jung sind, noch bevor? So viel steht fest: Ihre Zukunft wird viel stärker von Naturwissenschaften und Technik abhängen als die sämtlicher Generationen vor uns. Mehr denn je müssen sie sich mit den Naturwissenschaften auskennen, weil diese in bislang unvorstellbarem Ausmaß zu einem Teil ihres täglichen Lebens geworden sind.

Ohne zu wild zu spekulieren, lassen sich dennoch Trends und Probleme ausmachen, die sich bereits abzeichnen. Von diesen Problemen wissen wir, dass wir uns heute und in Zukunft mit ihnen auseinandersetzen müssen. Ich zähle – um nur einige wenige zu nennen – dazu:

- die globale Erwärmung
- die Notwendigkeit, Raum und Ressourcen für die massiv anwachsende Erdbevölkerung zu finden
- die rapide Ausrottung anderer Arten
- die Notwendigkeit, erneuerbare Energiequellen zu entwickeln
- die Zerstörung der Ozeane und der Wälder
- die Ausbreitung von Epidemien

Außerdem wird es in der Zukunft große Erfindungen geben. Sie werden die Art und Weise revolutionieren, wie wir leben, arbeiten, essen, kommunizieren und reisen. Auf jedem Gebiet des Lebens eröffnet sich eine enorme Bandbreite an möglichen Innovationen. Das ist hoch spannend. Wir könnten nach seltenen Metallen auf dem Mond schürfen, einen mit Menschen besetzten Außenposten der Erde auf dem Mars gründen und Heilmittel und Behandlungsweisen für Krankheiten finden, die momentan noch als unheilbar gelten. Die großen existentiellen Fragen sind nach wie vor unbeantwortet – wie begann das Leben auf der Erde? Was ist Bewusstsein? Gibt es da draußen noch irgendjemanden, oder sind wir im Universum allein? An diesen Fragen sollte die nächste Generation arbeiten.

Manche glauben tatsächlich, die heutige Menschheit bilde den Gipfel der Evolution: Besser ginge es gar nicht, besser würde es nicht. Ich bin ganz

anderer Meinung. Mit den Grenzbedingungen unseres Universums hat es sicher etwas Besonderes auf sich, und was könnte »besonderer« sein, als dass es keine Grenze gibt. Das menschliche Streben sollte jedenfalls keine Grenze haben. Für die Zukunft stehen uns zwei Möglichkeiten offen, soweit ich das sehe: erstens die Erkundung des Weltraums mit dem Ziel, alternative Planeten zu finden, auf denen wir leben können; und zweitens der gezielte Einsatz Künstlicher Intelligenz zur Verbesserung unserer Welt.

Die Erde wird für uns zu klein. Ressourcen aller Art werden mit alarmierender Geschwindigkeit verbraucht. Die Menschheit hat unserem Planeten verhängnisvolle Geschenke gemacht: Klimawandel, Luftverschmutzung, steigende Temperaturen, Rückgang der Polareiskappen, das Verschwinden von Wäldern und die Dezimierung der Tierarten. Die Weltbevölkerung aber vermehrt sich mit ebenfalls alarmierender Geschwindigkeit: Alle 40 Jahre verdoppelt sich die Erdbevölkerung. Nimmt man diese Zahlen zur Kenntnis, dann ist völlig klar: Ein solches exponentielles Bevölkerungswachstum darf und kann sich in unserem Jahrtausend nicht fortsetzen.

Ein weiterer Grund, sich Gedanken über die Besiedlung eines anderen Planeten zu machen, ist die Gefahr eines Atomkriegs. Außerirdische haben noch keinen Kontakt zu uns aufgenommen, so besagt eine Theorie, weil eine Zivilisation, wenn sie unser Entwicklungsstadium erreicht hat, instabil wird und sich selbst zerstört. Uns steht mittlerweile dieses technische Selbstzerstörungspotential zur Verfügung, jedes Lebewesen auf Erden zu vernichten. Wie wir in den letzten Jahren in Nordkorea gesehen haben, ist das ein ernüchternder, besorgniserregender Gedanke.

Aber ich bin Optimist. Wir müssen dieses Armageddon-Potential, davon bin ich überzeugt, nicht nutzen, und eine der besten Möglichkeiten, um dieser Gefahr aus dem Weg zu gehen, besteht darin, sich in den Weltraum zu begeben und das Potential für Menschen zu erforschen, auf anderen Planeten zu leben.

Die zweite Entwicklungsrichtung, die sich auf die Zukunft der Menschheit auswirken wird, ist das Aufkommen Künstlicher Intelligenz. Die Forschung auf diesem Gebiet macht rasante Fortschritte. Aktuelle Wendepunkte wie selbstfahrende Autos ohne Fahrer, ein Computer, der bei *Jeopardy* gewinnt, und die digitalen *Personal Assistants* wie *Siri*, *Google Now* und *Cortana* sind lediglich Symptome eines Wettrüstens auf dem Feld der

Informationstechnologie, das mit ungeheuren Mengen an Geldern finanziert wird und zunehmend auf seriösen theoretischen Grundlagen aufbaut. Solche Leistungen sehen vermutlich im Vergleich zu dem, was die kommenden Jahrzehnte bringen, eher unbedeutend aus.

Aber das Aufkommen superintelligenter Künstlicher Intelligenz würde sich entweder als das Beste oder als das Schlimmste erweisen, was der Menschheit widerfahren kann. Wir wissen nicht, ob wir von Künstlicher Intelligenz hervorragend unterstützt oder ignoriert und ausgebremst oder womöglich sogar zerstört werden. Ich bin Optimist und glaube, dass wir Künstliche Intelligenz zum Wohl der Welt schaffen können und dass sie mit uns harmonisch zusammenarbeiten kann. Wir müssen uns einfach nur der Gefahren bewusst bleiben, diese identifizieren, die bestmöglichen Verfahren wählen und uns rechtzeitig auf die Folgen einstellen.

Technik hat auf mein Leben einen immensen Einfluss gehabt. Ich spreche mithilfe eines Computers. Von der computergestützten Technologie habe ich profitiert, denn sie hat mir eine Stimme wiedergegeben, nachdem meine Krankheit sie mir genommen hatte. Ich hatte das Glück, meine Stimme zu Beginn des Zeitalters der Personal Computer zu verlieren. Intel hat mich mehr als 25 Jahre lang unterstützt und mir ermöglicht, jeden Tag den Tätigkeiten nachzugehen, die ich liebe. Im Verlauf dieser Jahre haben sich die Welt und der Einfluss der Technik auf die Welt dramatisch verändert. Technik hat unsere Art zu leben verändert, angefangen bei der Kommunikation über genetische Forschung bis zum Zugriff auf Informationen und noch vielem mehr.

Als die Technik immer klüger wurde, öffnete sie Türen zu Möglichkeiten, die ich nie hätte vorhersagen können. Die Technologien, die im Zusammenhang mit der Unterstützung Behinderter entwickelt werden, machen einen Weg frei, Kommunikationsschranken einzureißen, die früher den Weg versperrten. Häufig ist dieser Bereich der Hilfsmittel für Behinderte das Testfeld für die Technologien der Zukunft. »Voice to Text, Text to Voice«, »Smart Home« (Home Automation), »Drive-by-Wire«, sogar der Segway waren ursprünglich für Behinderte entwickelt worden, Jahre, bevor sie in den Alltagsgebrauch übernommen wurden. Derartige technische Errungenschaften verdanken sich dem mächtigen, kreativen Funken in unserem Inneren. Diese Kreativität kann viele Formen annehmen – von materiellen Errungenschaften bis hin zur Theoretischen Physik.

Aber noch viel mehr wird sich ereignen. Gehirn-Interfaces könnten dieses Kommunikationsmittel, das von immer mehr Menschen genutzt wird, schneller und ausdrucksstärker machen. Ich benutze mittlerweile Facebook – damit kann ich direkt mit meinen Freunden und Followern weltweit reden, und sie bleiben bei meinen neuesten Theorien auf dem Laufenden und sehen Bilder von meinen Reisen. Das bedeutet auch, dass ich sehen kann, was meine Kinder tatsächlich im Schilde führen – und nicht nur das erfahre, was sie mir erzählen.

Ebenso wie das Internet, unsere Smartphones, die bildgebende Diagnostik in der Medizin, Satellitennavigation und soziale Netzwerke für nur wenige Generationen vor uns unvorstellbar waren, so wird auch unsere zukünftige Welt so tiefgreifend auf eine Art und Weise verwandelt sein, dass wir erst andeutungsweise etwas davon erahnen. Ausschließlich mit Informationen kommen wir nicht dorthin, sondern nur durch den *intelligenten und kreativen Umgang* mit Informationen.

Noch so vieles mehr steht uns bevor, und ich hoffe, dass all das eine echte Inspiration für die heutigen Schüler und Schülerinnen darstellt. Aber auch wir haben dabei eine Rolle zu spielen: Wir müssen sicherstellen, dass diese Generation nicht nur die Möglichkeit, sondern auch den Wunsch hat, sich schon früh und gründlich auf das Studium der Naturwissenschaften einzulassen. So kann sie später ihr Potential entfalten und eine bessere Welt für die gesamte Menschheit hervorbringen. Außerdem glaube ich, dass die Zukunft von Lernen und Bildung das Internet ist. Die Menschen können aufeinander reagieren, sich austauschen und miteinander handeln. In gewisser Weise verbindet uns das Internet miteinander wie die Neuronen in einem gigantischen Gehirn. Und wäre uns mit einem solchen IQ nicht fast alles möglich?

In meiner Teenagerzeit war es – nicht von mir, aber von der Gesellschaft allgemein – durchaus noch akzeptiert zu sagen, man interessiere sich nicht für Naturwissenschaften und sehe nicht ein, weshalb man sich damit herumplagen solle. Das ist heute nicht mehr der Fall. Selbstverständlich setze ich mich nicht dafür ein, dass alle jungen Menschen später einmal Naturwissenschaftler werden sollen. Das wäre in meinen Augen auch nicht die Idealsituation, denn die Welt braucht Menschen mit einem breiten Spektrum an Fähigkeiten und Kenntnissen. Vielmehr vertrete ich die Auffassung, alle jungen Menschen sollten mit naturwissenschaftlichen

Themen vertraut sein und nicht davor zurückschrecken, egal wofür sie sich dann später beruflich entscheiden. Sie müssen naturwissenschaftlich gebildet sein, frei von Angst vor diesen Themen, und motiviert, sich mit Entwicklungen in Naturwissenschaft und Technik auseinanderzusetzen, um mehr zu erfahren.

Eine Welt, in der lediglich eine ganz kleine Superelite dazu in der Lage ist, komplexere Themen aus Naturwissenschaft und Technik und deren diverse Umsetzungsmöglichkeiten zu verstehen, wäre meiner Meinung nach gefährlich beschränkt und verblendet. Ich bezweifle ganz ernsthaft, dass in einer solchen Welt langfristige nützliche Projekte wie die Befreiung der Ozeane von Müll oder die Heilung von Krankheiten in den Entwicklungsländern durchsetzbar wären. Schlimmer: Wir müssten womöglich feststellen, dass die Technik gegen uns eingesetzt wird und wir keine Möglichkeit haben, sie aufzuhalten.

An Grenzen glaube ich nicht, weder an Grenzen des Machbaren in unserem Privatleben noch an Grenzen dessen, was Leben und Intelligenz in unserem Universum vollbringen können. Wir befinden uns an der Schwelle zu wichtigen Entdeckungen in allen möglichen naturwissenschaftlichen Gebieten. Zweifellos wird sich unsere Welt in den kommenden 50 Jahren ohnegleichen verändern.

Wir werden herausfinden, was beim Big Bang geschah. Wir werden begreifen, wie der Anfang des Lebens auf der Erde aussah. Vielleicht entdecken wir sogar, ob im Universum sonst noch irgendwo Leben existiert. Obwohl die Chancen auf eine Kommunikation mit einer intelligenten außerirdischen Spezies möglicherweise eher bescheiden sind, bedeutet die Tragweite, die eine solche Entdeckung hätte, dass wir den Versuch nicht aufgeben dürfen.

Wir werden weiterhin den Lebensraum *Kosmos* erforschen und Roboter und Menschen in den Weltraum schicken. Wir dürfen auf einem kleinen, zunehmend verschmutzten und überbevölkerten Planeten nicht weiterhin die Perspektive nach innen und auf uns selbst kultivieren. Durch naturwissenschaftliche Forschung und technische Innovation müssen wir nach außen schauen, in das weitere Universum, während wir uns gleichzeitig bemühen, die Probleme auf der Erde zu lösen. Und ich bin optimistisch, dass es uns letztlich gelingen wird, auf anderen Planeten für die menschliche Rasse bewohnbare Lebensräume zu schaffen. Wir werden die Erde

überschreiten, hinter uns lassen und lernen, im Weltraum zu leben.

Das ist also nicht das Ende der Geschichte, sondern ein anderer Anfang von – so hoffe ich – Milliarden von Jahren blühenden Lebens im Kosmos.

Und schließlich noch ein Letztes: Wir wissen nie, woher und von wem die nächste große naturwissenschaftliche Entdeckung kommen wird. Wenn man die Begeisterung und die Ehrfurcht vor dem Forschungsgebiet Naturwissenschaften weckt, wenn man für ein größtmögliches junges Publikum innovative, offene Wege schafft, dann vermehrt das die Chancen beträchtlich, *die* neue ›Einstein‹ zu finden und zu inspirieren. Wo immer *sie* sich auch befinden mag.

Denkt also daran, zu den Sternen zu schauen und nicht auf eure Füße. Versucht zu verstehen, was ihr seht, und fragt euch, wie das Existieren des Universums möglich ist.

Seid neugierig! Und ganz egal, wie schwierig euch euer Leben vorkommt: Es gibt immer etwas, das ihr tun – das ihr erfolgreich tun könnt. Gebt nie auf, das ist am wichtigsten! Lasst eurer Phantasie freien Lauf! Gestaltet die Zukunft!

ViSiT WWW.iBOOKS.TO

EBOOKS

COMICS

MAGAZINE & ZEITSCHRIFTEN

ZEITUNGEN



iBOOKS.TO

EBOOKS - GRATIS - DOWNLOADEN

Von welcher – kleinen oder großen – Idee, welche die Welt verändern kann, wünschen Sie, dass die Menschheit sie umsetzt?

Das ist einfach zu beantworten. Ich wünsche mir die Weiterentwicklung der Fusionsenergie, die uns ein unbegrenztes Quantum an sauberer Energie liefern würde. Und den Umstieg auf Elektroautos.

Kernfusion würde zu einer praktischen Energiequelle und uns – ohne Umweltverschmutzung oder globale Erwärmung – mit einem unerschöpflichen Vorrat an Energie versorgen.



Nachwort

LUCY HAWKING

An einem tristen, grauen Cambridge-Frühlingstag brachen wir in einem Trauerzug aus schwarzen Autos in Richtung *Great St. Mary's Church* auf, zur Universitätskirche, in der traditionsgemäß die Trauergottesdienste bedeutender Akademiker stattfinden. Es waren gerade Semesterferien, und die Straßen wirkten wie ausgestorben. Cambridge sah leer aus, nicht einmal ein herumspazierender Tourist war zu sehen. Die einzigen Farbtupfer waren die blauen Blinklichter der Polizeieskorte auf ihren Motorrädern, die den Leichenwagen mit dem Sarg meines Vaters bewachte und den spärlichen Autoverkehr auf unserem Weg stoppte.

Und dann bogen wir nach links um die Ecke. Und sahen die Massen, die sich entlang einer der markantesten Straßen weltweit eingefunden hatten: auf der Kings Parade, dem Herzen von Cambridge. Ich habe noch nie so viele Menschen – schweigende Menschen – gesehen. Sie hielten Spruchbänder, Fahnen, Kameras und Handys hoch, und sie verharrten in stillem Respekt, als der Oberste Pförtner von Gonville & Caius, dem College meines Vaters, in der zeremoniellen Kleidung mit Bowler und einem Ebenholzstock in der Hand feierlich die Straße überquerte und sich zu dem Leichenwagen begab, um neben ihm zur Kirche zu schreiten.

Meine Tante drückte meine Hand, als uns beiden die Tränen kamen. »Er hätte das geliebt«, flüsterte sie mir zu.

Seit mein Vater gestorben ist, gab es so viele Dinge, die er geliebt hätte, so vieles, von dem ich wünschte, er hätte es miterleben dürfen. Ich wünschte, er hätte die außerordentliche Welle von Zuneigung für ihn erlebt, Zuneigung aus der ganzen Welt. Ich wünschte, er hätte erleben können, wie sehr er von Millionen von Menschen geliebt und respektiert wurde, die ihm nie persönlich begegnet waren. Ich wünschte, er hätte erfahren, dass er in der

Westminster Abbey beigesetzt werden sollte, zwischen zwei Heroen der Wissenschaft: Isaac Newton und Charles Darwin; und dass seine Stimme, als er zur letzten Ruhe in die Erde gebettet wurde, mittels eines Radioteleskops in Richtung eines Schwarzen Loches gesendet wurde.

Aber er hätte sich auch gefragt, wozu das ganze Theater gut sein sollte. Er war ein erstaunlich bescheidener Mensch, der das Rampenlicht durchaus liebte, aber gelegentlich doch über seinen Ruhm verblüfft war. Eine Formulierung in diesem Buch hat mir sein Verhältnis zu seiner eigenen Person ganz besonders deutlich gemacht: »... wenn ich dazu einen Beitrag geleistet habe«. Ich glaube, er ist der Einzige, der diesem Halbsatz ein *wenn* vorausstellt. Und ich bin fest überzeugt, alle anderen sind absolut sicher, dass er einen Beitrag geleistet hat.

Und wie gewaltig ist doch sein Beitrag! Sowohl in der umfassenden Großartigkeit seiner Arbeit im Bereich der Kosmologie, bei der Erforschung der Struktur und der Ursprünge des Universums, als auch in seiner zutiefst menschlichen Tapferkeit und in dem Humor, mit dem er sich seinen körperlichen Einschränkungen stellte. Es ist ihm gelungen, über die Grenzen des Wissens hinauszureichen, während er gleichzeitig die Grenzen des Duldens überschritt. Ich glaube, es war diese Kombination, die ihn zugleich zur Ikone und so zugänglich machte. Er litt, aber er gab nicht auf. Es war anstrengend für ihn zu kommunizieren – doch er nahm die Anstrengung auf sich und arbeitete, während seine Beweglichkeit immer weiter abnahm, ständig daran, seine Ausrüstung mit Hilfsmitteln seinen steigenden Einschränkungen anzupassen. Er achtete sorgsam auf seine Wortwahl, damit seine Worte den größtmöglichen Effekt hatten, wenn sie mit dieser flachen elektronischen Stimme ausgesprochen wurden, die so bemerkenswert ausdrucksstark war, wenn er sie verwendete. Wenn er sprach, dann hörten die Leute zu, egal ob es um seine Ansichten über den *National Health Service* ging oder um die Ausdehnung des Universums. Und nie ließ er sich die Gelegenheit entgehen, einen Witz anzubringen, den er jeweils vollkommen ausdruckslos, aber mit einem vielsagenden Augenzwinkern formulierte.

Mein Vater war auch ein Familienmensch – das ist eine Tatsache, die den meisten Leuten nicht bewusst war, bevor der Film *Die Entdeckung der Unendlichkeit* (*The Theory of Everything*) 2014 in die Kinos kam. Es war sicherlich in den 1970er Jahren höchst ungewöhnlich, einen behinderten Mann zu treffen, der Frau und Kinder hatte und darüber hinaus eine Person

mit einem so stark ausgeprägten Autonomie- und Unabhängigkeitsbewusstsein war. Als Kind hasste ich die Art und Weise, wie Fremde uns ungeniert anglotzten, manchmal mit offenstehendem Mund, wenn mein Vater in seinem Rollstuhl in aberwitziger Geschwindigkeit durch Cambridge flitzte, flankiert von zwei wuschelköpfigen blonden Kindern, die neben ihm trabten und gleichzeitig versuchten, ihr Eis zu essen. Ich fand dieses Verhalten einfach äußerst unhöflich. Ich versuchte dann immer zurückzuglotzen, aber ich glaube, dass sich meine Empörung den Zielpersonen kaum vermittelt hat – wahrscheinlich vor allem, weil diese Empörung aus einem mit Eiscreme verschmierten Kindergesicht sprach.

Von einer normalen Kindheit konnte natürlich beim besten Willen nicht die Rede sein. Ich wusste das – aber gleichzeitig auch wieder nicht. Ich hielt es für völlig normal, Erwachsene mit herausfordernden Fragen zu löchern, weil das bei uns daheim gang und gäbe war. Erst als ich angeblich einen Vikar mit meinen penetranten Nachfragen zu seinem Gottesbeweis zum Weinen gebracht hatte, dämmerte es mir, dass das nicht ganz dem Verhalten entsprach, das man von einem kleinen Mädchen erwartete.

Als Kind dachte ich eigentlich nie, dass ich zu den Leuten gehöre, die alles und jedes hinterfragen. Das war in meinen Augen eher mein älterer Bruder, der – wie das bei älteren Brüdern so üblich ist – mir gegenüber immer alles besser wusste (woran sich bis heute nichts geändert hat). Ich erinnere mich an die Familienferien in einem Jahr, die sich wie so viele Familienferien geheimnisvollerweise mit einer internationalen Physikertagung in Übersee überlappten. Mein Bruder und ich besuchten einige Vorträge – wahrscheinlich damit meine Mutter ein bisschen Zeit für sich hatte. Damals wandten sich die Vorträge über Physik nicht an ein breites Publikum, und ganz gewiss waren sie nichts für Kinder. Ich saß da und kitzelte meinen Notizblock voll, aber mein Bruder streckte seinen dünnen Jungenarm hoch und stellte dem hervorragenden akademischen Vortragsredner eine Frage – und mein Vater glühte vor Stolz.

Ich werde immer wieder gefragt: »Wie ist es, die Tochter von Stephen Hawking zu sein?«, und natürlich gibt es darauf keine einfache Antwort. Was ich sagen kann: Die Hochs waren sehr hoch, die Tiefs reichten sehr weit hinunter, und dazwischen gab es den Bereich, den wir als »normal – für uns« bezeichneten. Als Erwachsene stellten wir dann fest, dass das, was wir als normal ansahen, wirklich für keinen außer für uns normal war. Nun, da die

Zeit den schlimmsten Schmerz ein wenig gelindert hat, habe ich mir überlegt, dass ich wohl ewig brauchen würde, um unsere Erfahrungen zu verarbeiten. In gewisser Weise weiß ich gar nicht, ob ich das überhaupt möchte. Manchmal will ich einfach nur die letzten Worte ganz festhalten, die mein Vater zu mir sagte: dass ich eine wunderbare Tochter gewesen sei und dass ich keine Angst haben sollte. Ich werde nie so tapfer sein wie er – ich bin nicht sonderlich mutig veranlagt, aber er zeigte mir, dass ich es versuchen sollte. Und dass vielleicht dieser Versuch sich als der wichtigste Teil des Mutigseins erweisen würde.

Mein Vater gab nie auf, er wich nie vor einem Kampf zurück. Mit 75 Jahren – da war er schon vollständig gelähmt und konnte nur noch einige wenige Gesichtsmuskeln bewegen – stand er noch jeden Tag auf, legte einen Anzug an und ging zur Arbeit. Er hatte seine Dinge, seine Aufgabe zu erledigen, und er würde es nicht zulassen, dass sich ihm einige wenige Belanglosigkeiten in den Weg stellten. Obwohl – ich muss sagen, wenn er von der Existenz dieser Eskorte auf ihren Polizeimotorrädern gewusst hätte, die bei seinem Begräbnis im Einsatz waren, dann hätte er verlangt, dass sie ihn jeden Tag durch den morgendlichen Verkehr von seinem Haus in Cambridge in sein Büro schleusten.

Von diesem Buch aber wusste er glücklicherweise noch. Es war eines der Projekte, an denen er in der Zeit arbeitete, die sich als sein letztes Jahr auf Erden herausstellen sollte. Er beabsichtigte, seine aktuellen Texte in einem Band zusammenzufassen. Wie so vieles, das sich seit seinem Tod ereignet hat, wünschte ich, er könnte die fertige Fassung sehen. Ich glaube, er wäre sehr stolz auf dieses Buch, und vielleicht wäre er dann sogar bereit zuzugeben, dass er tatsächlich doch *einen kleinen Beitrag geleistet hat* – für uns ist es ein gewaltiger Beitrag!

Lucy Hawking
Juli 2018

ANHANG

Danksagung

Der *Stephen-Hawking-Estate* möchte folgenden Personen ausdrücklich für ihre Hilfe bei der Erstellung dieses Buches danken: Kip S. Thorne, Eddie Redmayne, Paul Davies, Seth Shostak, Dame Stephanie Shirley, Tom Nabarro, Martin Rees, Malcolm Perry, Paul Shellard, Robert Kirby, Nick Davies, Kate Craigie, Chris Simms, Doug Abrams, Jennifer Hershey, Anne Speyer, Anthea Bain, Jonathan Wood, Elizabeth Forrester, Juri B. Milner, Thomas Hertog, Ma Hauteng, Ben Bowie und Fay Dowker.

Stephen Hawking war während seiner gesamten Karriere für seine wissenschaftliche und kreative Zusammenarbeit bekannt, angefangen mit der Arbeit mit Kollegen an bahnbrechenden wissenschaftlichen Arbeiten und bis hin zur Zusammenarbeit mit Drehbuchautoren der Fernsehserie *Die Simpsons*.

In seinen späteren Jahren brauchte Stephen immer mehr Unterstützung von seinen Mitmenschen, sowohl in technischer als auch in kommunikativer Hinsicht. Der *Stephen-Hawking-Estate* dankt allen, die Stephen geholfen haben, damit er mit der Welt kommunizieren konnte.

Bildnachweis

Der Verlag Klett-Cotta, Stuttgart, dankt dem *Stephen-Hawking-Estate* und dem Verlag John Murray, London, für die freundliche Genehmigung zum Abdruck zweier Fotos von Stephen Hawking auf den Seiten 26 und 238.

Register

A

Aldrin, Buzz 1
Aristarch von Samos 1, 2, 3, 4, 5, 6
Aristoteles 1
Armstrong, Neil 1

B

Bardeen, Jim 1
Barish, Barry 1, 2
Bekenstein, Jacob 1, 2, 3, 4
Bell, John 1
Bondi, Hermann 1, 2
Brazell, Lorna 1
Bumba 1, 2
Burg, M. G. J. van der 1

C

Carter, Brandon 1
Casimir, Hendrik B. G. 1, 2
Chalatnikow, Isaak 1, 2, 3, 4
Chandrasekhar, Subrahmanyan 1
Chiin, Richard 1, 2
Crick, Francis 1, 2

D

Darwin, Charles 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
Dean, James 1
Deutsch, David 1, 2, 3
Dirac, Paul 1, 2, 3

Drever, Ronald 1, 2

E

Einstein, Albert 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49

Ellis, George 1

Euklid 1, 2, 3, 4, 5

F

Feynman, Richard 1, 2, 3, 4, 5, 6

G

Galilei, Galileo 1, 2, 3, 4

Gates, Bill 1

Gibbons, Gary 1

Gödel, Kurt 1, 2, 3, 4, 5

Gold, Thomas 1

Good, Irving 1

Gros, Claudius 1

H

Haco, Sasha 1

Hamlet 1, 2

Harry Potter 1

Hartle, Jim 1, 2

Hawking, Frank 1, 2, 3, 4, 5, 6

Hawking, Isobel 1, 2, 3, 4, 5, 6

Hawking, Jane 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

Hawking, Lucy 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30

Hawking, Mary 1

Hawking, Robert 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

Hawking, Timothy 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

Heisenberg, Werner 1, 2, 3, 4, 5

Herkules 1

Higgs, Peter 1, 2

Hooke, Robert 1

Hoyle, Fred 1, 2, 3, 4

Hubble, Edwin 1, 2, 3, 4

K

Kant, Immanuel 1, 2, 3

Kennedy, John F. 1, 2

Kolumbus, Christoph 1, 2, 3

Kraft, Daniel 1

L

Landau, Lew 1

Laplace, Pierre-Simon 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Lifschitz, Jewgeni 1, 2, 3, 4

M

Metzner, A. W. Kenneth 1

Michelangelo (Buonarroti) 1

Michell, John 1, 2

Milner, Juri B. 1

Moore, Gordon 1, 2, 3

Musk, Elon 1, 2, 3, 4, 5

N

Napoleon I. Bonaparte 1

Newton, Isaac 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

O

Obama, Barack 1

Oppenheimer, Robert 1, 2, 3

P

Penrose, Roger 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

Penzias, Arno 1

Perry, Malcom 1, 2

Planck, Max 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Prometheus 1, 2

Proust, Marcel 1

R

Redmayne, Eddie 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

Riemann, Bernhard 1

Ryle, Martin 1

S

Sachs, Rainer 1

Schrödinger, Erwin 1, 2

Sciama, Dennis 1

Seldowitsch, Jakow Borissowitsch 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

Snyder, Hartland 1

Starobinski, Alexei 1, 2, 3

Steffens, Lincoln 1

Strominger, Andy 1, 2

T

Tahta, Dikran 1, 2

Thom, René 1

Thorne, Kip S. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19,
20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39

Trump, Donald 1, 2, 3, 4

U

Ussher, James 1, 2

V

Vinge, Vernor 1

Volkoff, George 1

W

Watson, James 1, 2

Weiss, Rainer (Rai) 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

Wells, H.G. (Herbert George) 1

Wheeler, John 1, 2, 3, 4, 5

Wilson, Robert Woodrow 1, 2

Woltosz, Walt 1

Wozniak, Steve 1

Bücher von Stephen Hawking in deutscher Übersetzung

Eine kurze Geschichte der Zeit

Einsteins Traum. Expeditionen an die Grenzen der Raumzeit

Das Universum in der Nussschale

Giganten des Wissens. Eine bebilderte Reise in die Welt der Physik

Meine kurze Geschichte

Haben schwarze Löcher keine Haare? Zwei Vorträge

Stephen Hawking als Co-Autor

Raum und Zeit

Das Große, das Kleine und der menschliche Geist

Die kürzeste Geschichte der Zeit

Der große Entwurf

»Eine wunderbare Zeit zu leben«

Schwarze Löcher gibt es nicht

Der geheime Schlüssel zum Universum (mit Lucy Hawking)

Die unglaubliche Reise ins Universum (mit Lucy Hawking)

Erläuterungen

- 1 Nobelpreise können nicht posthum vergeben werden, sodass sich diese Erwartung von Stephen Hawking nie einlösen wird (Anmerkung der Herausgeber).
- 2 *Tagesspiegel* vom 19.07.2000.
<https://www.tagesspiegel.de/weltspiegel/gesundheitslichtgeschwindigkeit-schneller-als-einstein-erlaubt/154332.html> (Zugriff: 31.8.2018).

Autoreninfo

Stephen William Hawking (1942 – 2018) war ein britischer Astrophysiker und Sachbuchautor. Von 1979 bis 2009 lehrte er als Professor für angewandte Mathematik und theoretische Physik an der University of Cambridge. Für seine bahnbrechenden Forschungsbeiträge zur Kosmologie, zur allgemeinen Relativitätstheorie und zu Schwarzen Löchern wurde er mit zahlreichen Auszeichnungen geehrt. »Eine kurze Geschichte der Zeit« und »Das Universum in der Nussschale« gehören zu den erfolgreichsten Sachbüchern der Welt. 1963 wurde bei Hawking Amyotrophe Lateralsklerose (ALS) diagnostiziert; infolge der Erkrankung verlor er seine motorischen und sprachlichen Fähigkeiten. Zur verbalen Kommunikation nutzte Hawking seit 1985 einen Sprachcomputer.