

Jörg Resag

Grenzen der Wirklichkeit

Kosmologie, Quantenwelten
und die Suche nach der
Unendlichkeit

SACHBUCH

 Springer

Grenzen der Wirklichkeit

Jörg Resag

Grenzen der Wirklichkeit

Kosmologie, Quantenwelten und die
Suche nach der Unendlichkeit



Springer

Jörg Resag
Leverkusen, Nordrhein-Westfalen
Deutschland

ISBN 978-3-662-67399-7 ISBN 978-3-662-67400-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-67400-0>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Covermotiv: NGC 346, © NASA
Covergestaltung: deblik, Berlin

Planung/Lektorat: Caroline Strunz
Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

*Ich behaupte, dass das All unendlich ist, dass eine Unzahl von Weltkörpern existiert: Gestirne, Erden, Sonnen.*¹

Ein unendliches Universum mit einer Unzahl an Sternen – eine Vorstellung, die uns in der heutigen Zeit durchaus plausibel erscheint. Und doch sind diese Worte bereits mehr als 400 Jahre alt. Sie stammen von einem streitbaren Dominikanermönch, der in der 2. Hälfte des 16. Jahrhunderts in Europa rastlos umherzog – eine Zeit, in der die Idee eines unendlichen Universums eine geradezu ungeheuerliche Zumutung war. Schon die Idee, dass die Sonne und nicht die Erde im Zentrum der Welt stünde, stieß damals auf erbitterten Widerstand – Nikolaus Kopernikus hatte sie im Jahr 1543 veröffentlicht und starb kurz darauf. Fünf Jahre später erblickte besagter Mönch in Süden Italiens in Nola nahe Neapel das Licht der Welt. Sein Name war *Giordano Bruno* (Abb. 1).

Man kann sich leicht vorstellen, dass Bruno mit seinen Ansichten bei vielen seiner Zeitgenossen nicht auf Gegenliebe stieß. Hinzu kam, dass er wohl ein ziemlich rechthaberischer und schwer erträglicher Mensch gewesen sein muss, der sich gerne mit der Obrigkeit anlegte. So kam es schließlich, wie es damals kommen musste: Die Inquisition warf Bruno in Rom in den Kerker der Engelsburg, wo er fast 8 Jahre vor sich hin schmachtete, bis er schließlich im Jahr 1600 auf dem Campo de' Fiori auf dem Scheiterhaufen

¹ Man findet dieses Zitat von Giordano Bruno an vielen Stellen im Internet, z. B. unter <https://doormann.tripod.com/bruno.htm>



Abb. 1 Giordano Bruno (1548–1600). (Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Giordano_Bruno.jpg)

brutal verbrannt wurde. Ein Denkmal erinnert dort heute an den tragischen Tod des widerspenstigen Mönchs.

Bleibt die Frage: Hatte Giordano Bruno recht? Ist unser Universum tatsächlich unendlich? Und wie lange existiert es schon? Ist es ewig, ohne Anfang und Ende, wie Bruno ebenfalls behauptete? Ist es grenzenlos, sowohl im Raum als auch in der Zeit?

In einem Punkt muss man der Inquisition recht geben: Bruno hatte keinerlei Beweise für seine Behauptungen. Für ihn war einfach klar, dass es dem Wesen des allmächtigen Gottes widersprechen würde, wäre sein göttlicher Kosmos endlich.

Nur wie soll man sich etwas „Unendliches“ überhaupt vorstellen? Wie soll man diesen Begriff fassen? In der Mathematik beschäftigt sich ein ganzer Zweig – die Mengenlehre – mit dieser Frage. Dabei stößt sie auf so manche Merkwürdigkeit. So gibt es nicht nur eine, sondern unendlich viele mathematische Unendlichkeiten, und man muss sich immer ganz genau überlegen, welche Annahmen man zugrunde legt, um Aussagen über diese Unendlichkeiten treffen zu können. Das ganze Gebiet ist überaus interessant und vielschichtig und zeigt, dass das mit der Unendlichkeit auch in der Mathematik keine einfache Angelegenheit ist.

Andererseits: Wenn die Welt nun *nicht* unendlich ist, muss sie dann nicht Grenzen haben? Nur was ist dann jenseits der Grenze? Etwas anderes? Aber dann wäre hinter der Grenze ja noch gar nicht Schluss, und die Welt würde sich immer weiter fortsetzen. Ein Widerspruch! Ähnlich ist es auch bei der

Zeit: Wenn die Welt einen Anfang hat, was geschah davor? Was hat Gott gemacht, bevor er die Welt schuf?

Immer wieder haben sich die großen Denker der Menschheit mit diesen Fragen beschäftigt und sind mal zu der einen und mal zu der anderen Antwort gelangt. Letztlich war aber niemand von ihnen in der Lage, die Widersprüche überzeugend aufzulösen.

Wenn man etwas nicht auflösen kann, dann muss man wohl damit leben. Das dachte sich auch der an der Mosel geborene Philosoph, Naturforscher und Kardinal *Nikolaus von Kues* (1401–1464), besser bekannt unter seinem lateinischen Namen *Cusanus*. Im Spätherbst des Jahres 1437, also gut 100 Jahre vor Giordano Brunos Geburt, war er als päpstlicher Gesandter auf einer 2-monatigen Schiffsfahrt von Konstantinopel nach Venedig unterwegs und hatte dort viel Zeit zum Nachdenken. Plötzlich überkam ihn eine entscheidende Erkenntnis: Warum sollte unser menschlicher Verstand überhaupt in der Lage sein, solche unlösbaren Fragen zu beantworten? Wäre es nicht vielmehr sinnvoll, die Welt als ein Zusammenspiel von Gegensätzen zu begreifen, die erst zusammen ein sinnvolles Ganzes ergeben? Ein wirklich interessanter Gedanke, der uns in diesem Buch auch im Begriff der Komplementarität bei der Quantenmechanik wieder begegnen wird.

Besonders gründlich hat sich mehr als 300 Jahre später der bekannte deutsche Philosoph *Immanuel Kant* (1724–1804) mit solchen logischen Gegensätzen beschäftigt, die er *Antinomien* nannte. Haben Raum und Zeit Grenzen oder sind sie unendlich? Besteht Materie aus einfacheren Bausteinen, und wenn ja, woraus bestehen diese dann wieder? Nach 12 Jahren aufreibender Arbeit präsentierte Kant der Welt im Jahr 1781 schließlich sein kompliziertes Werk *Kritik der reinen Vernunft*, in dem er diese und viele andere Fragen untersuchte. Seine Antwort war ernüchternd: Unser Verstand ist schlichtweg nicht in der Lage, solche Fragen zu beantworten: „Die menschliche Vernunft hat das besondere Schicksal in einer Gattung ihrer Erkenntnisse: dass sie durch Fragen belästigt wird, die sie nicht abweisen kann; denn sie sind ihr durch die Natur der Vernunft selbst aufgegeben, die sie aber auch nicht beantworten kann, denn sie übersteigen alles Vermögen der menschlichen Vernunft.“

Würden Sie dem zustimmen? Zwei Jahrtausende vergeblicher Suche nach Antworten durch die klügsten Denker und Philosophen scheinen hier eine eindeutige Sprache zu sprechen. Aber Kant konnte noch nicht wissen, welche enormen Fortschritte uns Menschen in den nächsten 2 Jahrhunderten noch gelingen sollten. Wir haben die Atome und die Quantenmechanik entdeckt und damit die Frage nach der Struktur der Materie teilweise beantwortet. Wir haben die Relativitätstheorie formuliert und

damit tiefe Einsichten in das Wesen von Raum und Zeit gewonnen. Wir wissen heute, was Licht ist. Und wir haben den Urknall entdeckt und sind damit den räumlichen und zeitlichen Grenzen der Welt auf der Spur.

Wie ist uns all dies gelungen? Und warum haben sich die großen Denker der Vergangenheit, die uns an Intelligenz mindestens ebenbürtig waren, daran die Zähne ausgebissen?

Es liegt nicht an der Intelligenz oder Findigkeit der Menschen. Es ist vielmehr eine der großen Kulturleistungen der Menschheit, die uns immer besser in die Lage versetzt, die Rätsel des Universums zu ergründen: die moderne Naturwissenschaft! Dieses sehr scharfe Schwert erweitert die Möglichkeiten unseres Verstandes enorm, indem es zwei sehr mächtige Werkzeuge in sich vereint.

Da ist zum einen die Sprache der Mathematik, die unsere menschliche Sprache an Präzision weit übertrifft. Mit ihr lassen sich Zusammenhänge darstellen, die weit jenseits unserer menschlichen Vorstellungskraft liegen. Immer wieder haben die großen Philosophen versucht, ihre Ideen in eine ähnlich präzise Sprache zu kleiden. Doch unsere menschliche Sprache eignet sich nun einmal nur sehr eingeschränkt für diesen Zweck, denn dafür ist sie nicht gemacht. „Das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben.“ So brachte es Galilei schon vor rund 4 Jahrhunderten auf den Punkt.

Das 2. Werkzeug der Naturwissenschaft ist die Methode des Experiments und der Beobachtung mithilfe technischer Instrumente, die unsere menschlichen Sinne in den Schatten stellen. Mit ihnen lassen sich die hintersten Winkel der Natur ausleuchten. Was wir dabei entdecken, können wir wiederum in der Sprache der Mathematik ausdrücken, und so schließt sich der Kreis.

Damit ist das Thema dieses Buches umrissen: Wir wollen uns anschauen, was die moderne Naturwissenschaft über die großen Fragen des Universums herausgefunden hat. Wie ist das mit der Unendlichkeit der Welt? Was geschieht, wenn wir uns bis zu den größten sowie den kleinsten zeitlichen und räumlichen Dimensionen vorwagen? Ist irgendwo ein Ende unserer Welt in Sicht? Und wie hat die Natur die scheinbaren Widersprüche gelöst, die für Cusanus und Kant noch jenseits der Möglichkeiten unserer Vernunft lagen? Sind Raum, Zeit und Materie wirklich das, wofür wir sie intuitiv halten? Das sind die Fragen, um die es in den 4 Kapiteln dieses Buches gehen wird.

Im 1. Kapitel steht dabei die Zeit im Mittelpunkt. Wir begeben uns auf die Suche nach den Grenzen der Ewigkeit, nach dem Anfang und dem Ende der Zeit. Immer tiefer sind unsere Vorfahren bei ihren Nachforschungen in den Nebel der Vergangenheit vorgedrungen. Noch in der frühen Neuzeit war man davon überzeugt, dass unsere Erde nur wenige Tausend Jahre alt ist. Doch die genauere Untersuchung der Gesteine und die Entdeckung atomarer Uhren haben enthüllt, dass sich das Alter der Welt nicht in Jahrtausenden, sondern in Jahrmilliarden misst. Der Blick hinauf zu den Galaxien, die schon Kant völlig zurecht als Welteninseln bezeichnet hatte, liefert dann den deutlichen Hinweis auf einen Anfang der Welt: den Urknall. Seitdem fliehen die Galaxien voneinander, und wie neuere Forschungen zeigen, offenbar mit zunehmender Geschwindigkeit. Was bedeutet das für unsere Zukunft? Gibt es ein Ende der Zeit?

Im 2. Kapitel setzen wir die Reise zu den Sternen fort. Was sehen wir in den fernsten Tiefen des Raums? Gibt es irgendwo eine Grenze? Woraus besteht unsere Welt? Und was lässt sich über den Urknall herausfinden, wenn wir unser Universum genauer betrachten? Was knallte da? Und knallte es womöglich nicht nur einmal? Gab es eine Welt vor dem Urknall? Und gibt es gar jenseits unseres Horizonts weitere Universen, die unseren Augen auf ewig verborgen sind?

In die umgekehrte Richtung geht es im 3. Kapitel, in dem wir tief hinabtauchen in das unendlich Kleine, in das Innerste der subatomaren Welt. Dort begegnen wir der Quantenmechanik, die unseren Blick auf die Wirklichkeit auf den Kopf stellt. Besonders der Begriff der Messung wird uns einiges Kopfzerbrechen bereiten und lässt einen Verdacht in uns aufkeimen: Das Quantenuniversum könnte womöglich viel größer sein als das, was wir normalerweise für unsere Welt halten.

Quanten, Raum und Zeit – ihr Zusammenspiel wird besonders deutlich, wenn wir uns im 4. Kapitel den Schwarzen Löchern zuwenden. Dabei tauchen neue überraschende Fragen auf: Wie viel Information passt eigentlich in ein Raumvolumen hinein? Ist die Informationsmenge des Universums begrenzt? Und was bedeutet das alles für das Wesen von Raum und Zeit in unserem Quantenkosmos?

Lassen Sie uns gemeinsam aufbrechen zu einer spannenden Reise in die Unendlichkeit. Eines kann ich Ihnen dabei versprechen: Unsere Welt wird sich als sehr viel größer und bizarrer erweisen als alles, was wir Menschen uns jemals hätten ausdenken können.

X **Vorwort**

An dieser Stelle möchte ich sehr herzlich Caroline Strunz vom Springer-Verlag danken. Ihre Ideen, Ermutigungen und ihr scharfer Blick auf die Verständlichkeit des Textes haben dem Buch sehr gutgetan. Nicht zuletzt geht ein besonderer Dank an meine Familie, die sich immer wieder tapfer angehört hat, was ich so an Ideen für mein Buch ausgebrütet habe.

Leverkusen
Februar 2023

Jörg Resag
www.joerg-resag.de

Inhaltsverzeichnis

1	Die Grenzen der Ewigkeit: Anfang und Ende der Zeit	1
2	Die Grenzen des Raums: Wo endet die Welt?	75
3	Die Grenzen der Winzigkeit: hinab in die Quantenwelt	159
4	Die Grenzen der Information: Schwarze Löcher und der Quantenkosmos	221
	Quellen und Literatur	279



1

Die Grenzen der Ewigkeit: Anfang und Ende der Zeit

Einst gebräuchliche Worte sind jetzt unverständliche Ausdrücke. [...] Alles vergeht und wird bald zum Märchen und sinkt rasch in völlige Vergessenheit. (Mark Aurel: Selbstbetrachtungen, Viertes Buch, 33., z. B. unter https://www.gutzitiert.de/des_kaisers_marcus_aurelius_antonius_selbstbetrachtungen-mark_aurel-kapitel_5.html.)

Alles vergeht! Das war dem Autor dieser Zeilen nur allzu bewusst, als er sie vor über 1800 Jahren in seinen letzten Lebensjahren niederschrieb. Er selbst ist uns auch nach so langer Zeit dank geschichtlicher Quellen noch gut bekannt: Es handelt sich um den römischen Kaiser *Mark Aurel* (121–180).

Ein gebildeter römischer Kaiser mag vielleicht noch ein gewisses Gefühl für den Gang der Geschichte gehabt haben, zu deren Teil er selbst wurde. Aber auch er konnte angesichts der ewig scheinenden Zeit nur zu Bescheidenheit und Gelassenheit mahnen. Was ist schon unser kurzes Menschenleben im Vergleich zur kosmischen Ewigkeit? Für uns spielt es im Grunde keine Rolle, ob irgendein Ereignis der Vergangenheit 1000, 10.000 oder gar 1 Mio. Jahre her ist. Welche Bedeutung haben solche unbegreiflichen Zeiträume schon, wenn, wie Mark Aurel glaubte, sowieso alles seit Ewigkeiten gleichartig ist und sich in ständigem Kreislauf wiederholt?

Bis ins Mittelalter hinein dürften die meisten unserer Vorfahren kaum eine Vorstellung davon gehabt haben, was Zeit wirklich bedeutet. Das gleichmäßige Ticken einer Uhr, das uns das gleichmäßige Verstreichen der Zeit anschaulich vor Augen führt, war erst ab der frühen Neuzeit zu hören. Man orientierte sich am Sonnenstand und am Lauf der Jahreszeiten und hörte ehrfurchtsvoll zu, wenn Eltern oder Großeltern Geschichten aus längst

vergangenen Tagen erzählten. Mir selbst geht es auch nicht anders. Wenn ich beispielsweise Berichte über den 2. Weltkrieg höre, dann scheinen sie mir aus einer fernen Zeit voller Grausamkeiten zu stammen, die ich mir kaum vorstellen kann. Meine Großeltern haben sie dagegen noch selbst erlebt.

Wie lässt sich der Nebel der noch fernerer Geschichte durchdringen, wenn uns niemand mehr von diesen Zeiten erzählen kann? Wir brauchen schriftliche Zeugnisse, die uns unsere Vorfahren hinterlassen haben, alte Quellen, die wir heute noch lesen und verstehen können. Eine dieser Quellen – davon war man im Mittelalter und der frühen Neuzeit überzeugt – sollte über jeden Zweifel erhaben sein, denn sie enthielt Gottes Wort: die Bibel!

James Ussher und der Tag der Schöpfung

Während sich die allermeisten Menschen des Mittelalters nur wenig um den Lauf der Jahrhunderte scherten und froh waren, wenn sie sich und ihre Familien über die Runden brachten, gab es in der Kirche den einen oder anderen gebildeten Kleriker, den die Frage nach dem Lauf der Geschichte bis hin zum Moment der Schöpfung umtrieb. So studierte beispielsweise der Benediktinermönch *Beda der Ehrwürdige* (672–735) im 8. Jahrhundert minutiös die alten Schriften und datierte den Beginn der Welt schließlich auf den 18. März 3952 v. Chr. Andere Gelehrte kamen zu etwas anderen Ergebnissen, über deren Details teilweise heftiger Streit entbrannte. Im Großen und Ganzen war man sich aber weitgehend einig: Unsere Welt entstand ungefähr um das Jahr 4000 v. Chr.

Auf die Spitze trieb diese Art von Schriftforschung der irische Gelehrte und Theologe *James Ussher* (Abb. 1.1). Als anglikanischer Erzbischof im katholisch dominierten Irland des 17. Jahrhunderts war es ihm ein Herzensanliegen, zu zeigen, wozu ein protestantischer Gelehrter fähig war. Seine Berechnungen sollten über jeden Zweifel erhaben sein und an Präzision alles übertreffen, was katholische Gelehrte bisher zustande gebracht hatten. Also machte er sich ans Werk und studierte nicht nur die Bibel, sondern auch unzählige andere antike Schriften. Schritt für Schritt setzte er in jahrelanger Arbeit das Puzzle aus griechischen und römischen Geschichtsdaten, Lebenszeiten babylonischer Könige, biblischen Stammbäumen seit Adam und Eva und vieles mehr zusammen. Es war eine Herkulesaufgabe, die ihn viel Kraft gekostet haben muss. Immer wieder galt es, Lücken in den Überlieferungen zu füllen oder widersprüchliche Daten verschiedener Quellen miteinander abzugleichen und zu einem konsistenten Ganzen zu verbinden.

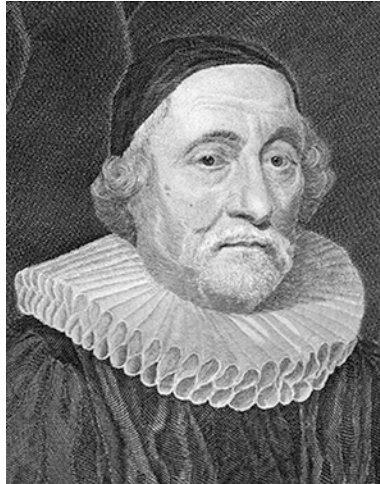


Abb. 1.1 Erzbischof James Ussher (1581–1656), porträtiert von Jacobus Houbraken. (Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:James_Ussher_001.jpg)

Im Jahr 1650 hatte er es endlich geschafft und konnte voller Stolz sein großes Werk *Annales veteris testamenti, a prima mundi origine deducti* (Annalen des Alten Testaments, hergeleitet von den frühesten Anfängen der Welt) der Öffentlichkeit vorstellen. Gleich auf der ersten Seite präsentiert er das Ergebnis seiner Mühen: Übersetzt ins Deutsche mit modernen Datumsangaben schreibt er dort sinngemäß: „Am Anfang schuf Gott Himmel und die Erde. Dieser Anbeginn der Zeit ereignete sich nach unserer Chronik am Vorabend des 21. September des Jahres 4004 vor Christus.“ Damit lag er recht nahe an dem Ergebnis, das der ehrwürdige Beda bereits rund 900 Jahre zuvor ermittelt hatte.

Aus heutiger Sicht mag eine derart präzise Datumsangabe für den Tag der Schöpfung vielleicht lächerlich und naiv erscheinen. Nach damaliger Auffassung war sie jedoch eine Meisterleistung, denn man ging wie selbstverständlich davon aus, dass die Angaben der Bibel wörtlich zu nehmen seien. Selbst der große Physiker *Isaac Newton* (1643–1727), der in seiner berühmten *Principia* mit seinen 3 Grundgesetzen der Mechanik das Fundament der modernen Physik schuf, stellte ähnliche Überlegungen an, wobei er auch astronomische Daten mit einbezog. Newton zufolge sollte die Welt rund 500 Jahre jünger sein als von James Ussher berechnet. Man sieht: Physik, Philosophie und religiöse Mystik waren damals noch eng miteinander verwoben.

Anders als Newtons Berechnungen hatte der von Ussher errechnete Anbeginn der Welt das Glück, in den nachfolgenden Jahrhunderten Eingang in viele gängige Bibelausgaben zu finden, sodass er wie die Bibel selbst einen fast göttlichen Status bekam. In manchen christlich-fundamentalistischen Kreisen verteidigt man das Schöpfungsjahr 4004 v. Chr. selbst heute noch vehement gegen jede Kritik. Aber hält es wirklich einer modernen wissenschaftlichen Überprüfung stand? Können wir jenseits aller strengen Bibelgläubigkeit in der Natur Hinweise finden, die es entweder untermauern oder widerlegen?

Fossilien und Steine als Zeitzeugen

Vielleicht haben Sie schon einmal davon gehört, dass man versteinerte Meerestiere selbst in den höchsten Gebirgen finden kann. Eines der berühmtesten Fundgebiete für besonders alte Meeresfossilien aus dem Kambrium, der *Burgess-Schiefer* (engl. „*Burgess shale*“), liegt beispielsweise in den kanadischen Rocky Mountains. Wie sind diese Überreste ehemaliger Meerestiere dort nur hingekommen?

Nun ja, vielleicht lag der Meeresspiegel ja irgendwann einmal sehr viel höher als heute, sodass selbst hohe Gebirge einst unter Wasser lagen. Diese Ansicht vertraten im 18. Jahrhundert, als die Geologie noch in den Kinderschuhen steckte, die sogenannten *Neptunisten*. Ein schwankender Meeresspiegel ist durchaus plausibel, steigt doch auch aktuell der Ozean aufgrund der globalen Erwärmung um fast 4 mm pro Jahr an. Aber kann er auch selbst hohe Gebirge überfluten? Wo soll so viel Wasser herkommen, und wohin soll es wieder verschwinden? So ganz plausibel erscheint das nicht.

Das dachte sich auch der schottische Naturforscher *James Hutton* (1726–1797), der zu den frühen Begründern der Geologie gehörte. Nicht das Meer sei zu den Gipfeln emporgestiegen, behauptete er, sondern die heutigen Gipfel waren vor langer Zeit einfach nur platter Meeresboden, den enorme Kräfte aus dem heißen Erdinneren ganz allmählich emporgehoben haben. Gäbe es solche Hebungsprozesse nicht, so dürfte es eigentlich überhaupt keine Berge mehr geben. Die ständig an ihnen nagende Erosion müsste sie längst eingeebnet haben. Auch heute noch seien solche Prozesse am Werk und veränderten langsam, aber unaufhörlich das Gesicht der Erde.

Wenn man also nur lange genug wartet, dann können aus ehemaligen Meeresböden selbst die höchsten Gebirge entstehen. Was diese Hebungsprozesse hervorrief, konnte Hutton damals allerdings noch nicht genau sagen. Er vermutete, die Hitze aus dem Erdinneren habe etwas damit zu tun.

Damit lag er durchaus richtig. Es sollte aber noch bis ins 20. Jahrhundert dauern, bis die Geologen endlich die genauen Zusammenhänge erkannten: Es ist die *Plattentektonik*, also die langsame Drift und Kollision großer Erdplatten, die angetrieben von den Umwälzungen im heißen Erdinneren unaufhörlich das Gesicht unserer Erde verändern.

Wie lange dauert es, bis sich ein Meeresboden allmählich zu einem majestätischen Hochgebirge emporheben kann? Das wusste natürlich niemand. Nun sind aus unserer menschlichen Sicht Usshers 6000 Jahre für das Weltalter sicher eine sehr lange Zeit. Aber sie erscheinen doch zu kurz, um ganze Gebirge entstehen zu lassen. Hutton ging jedenfalls davon aus, dass die Erde deutlich älter sein musste, damit auch sehr langsame Prozesse auf Dauer große Veränderungen hervorrufen können.

Im 19. Jahrhundert machte die Geologie große Fortschritte und zog immer mehr Menschen in ihren Bann. Besonders der einflussreiche schottische Geologe *Charles Lyell* (1797–1875), der im Todesjahr Huttons in einem kleinen schottischen Dorf das Licht der Welt erblickte, hatte daran einen großen Anteil. Wie Hutton war er der Meinung, dass sich die Oberfläche der Erde durch Hebungen und Erosion sehr langsam, aber stetig verändere, und zwar heute ebenso wie zu allen Zeiten zuvor. Und diese Vorgänge hinterlassen ihre Spuren!

So war ihm und vielen seiner Kollegen aufgefallen, dass man an vielen Stellen auf der Erde bestimmte typische Gesteinsschichten finden kann, wobei die Schichten normalerweise umso älter sind, je tiefer sie liegen. Ganz unten liegen also die ältesten Schichten, darüber die nächstältesten usw. Das leuchtet ein, denn schließlich entstanden die Schichten dadurch, dass im Lauf der Zeit immer mehr Gesteinsmaterial beispielsweise durch Flüsse dort abgelagert wurde – da liegt die neueste Schicht natürlich ganz oben.

Oft enthalten diese Schichten jeweils unterschiedliche, für sie ganz typische Fossilien – man spricht heute von *Leitfossilien*. Findet man irgendwo auf der Welt zwei Gesteinsschichten mit denselben Leitfossilien, so weiß man, dass sie aus demselben Erdzeitalter stammen, in dem diese Tiere auf der Erde vorkamen. Aus den Schichten konnten die Geologen nach und nach eine komplette Abfolge der verschiedenen Erdzeitalter rekonstruieren.

Dabei fiel auf, dass immer wieder ganze Tiergruppen ausstarben und durch neue ersetzt wurden. Besonders deutlich wurde dies bei den Fossilien merkwürdiger Riesenechsen, die man nach und nach entdeckte. Diese *Dinosaurier* (schreckliche Echsen), wie der englische Naturforscher *Richard Owen* sie im Jahr 1841 nannte, waren ganz offensichtlich Lebewesen, die über lange Zeiträume die Erde bevölkert hatten, bevor sie ganz plötzlich verschwanden. Der liebe Gott schien seine Schöpfung immer wieder zu

erneuern und – unzufrieden mit dem bisher geschaffenen – öfter mal etwas anderes ausprobieren zu wollen. Das war schon ein merkwürdiger Gedanke, mit dem sich besonders die Kirche kaum anfreunden konnte. Reichte denn nicht *eine* Sintflut? Und wie kam es, dass immer wieder neue Tierarten entstanden? Wo kamen sie plötzlich her?

Erst *Charles Darwin* (1809–1882), der mit Lyell befreundet war, machte sich den richtigen Reim darauf und sprach von der *Evolution* der Lebewesen. Die einzelnen Tier- und Pflanzenarten behalten offenbar nicht auf ewig ihre jeweilige Gestalt, sondern es gibt ständig kleine Veränderungen, durch die sie sich besser an ihre Umwelt anpassen können. Damit auf diese Weise ganz neue Tierarten entstehen können, braucht es Zeit – viel Zeit! Darwin selbst vermutete in seinem Hauptwerk *Über die Entstehung der Arten*, dass die Welt mindestens 300 Mio. Jahre alt sein müsse, strich diese Angabe jedoch aus späteren Auflagen wieder, um der ständigen nervigen Kritik zu entgehen. Seine Erkenntnisse waren auch so schon revolutionär genug!

Letztlich hatten aber alle Geologen und Naturforscher dasselbe Problem: Sie mochten in der Lage sein, die Erdzeitalter aufzuzählen, aber niemand war in der Lage, wirklich zu sagen, wie alt die Erde denn nun ist. Es gab zwar viele Versuche, aber konsistente Ergebnisse erhielt man damit nicht. Die typischen Angaben schwankten von einigen wenigen Mio. Jahren bis zu einigen Hundert Mio. Jahren, was keinen besonders vertrauenerweckenden Eindruck macht. Nur in einem waren sich alle einig: 6000 Jahre sind eindeutig zu kurz!

Radioaktive Uhren im Gestein

Wie sollte man hier nur weiterkommen? Jeder hatte so seine Lieblingsmethode, das Erdalter zu berechnen, und nicht selten geriet man in heftige Auseinandersetzungen – in der Wissenschaft oft ein Zeichen dafür, dass man eigentlich im Dunkeln tappt.

Ein schönes Beispiel ist die Berechnung des Erdalters durch den hoch angesehenen britischen Physiker *Lord Kelvin* (Abb. 1.2), der bis zur Verleihung seines Adelstitels im Jahr 1892 einfach nur *William Thomson* hieß. Kelvin war eine Lichtgestalt des viktorianischen Zeitalters, ein Wunderkind, das schon mit 10 Jahren an die Universität Glasgow ging, gefolgt von London, Paris und Cambridge. Er leistete bahnbrechende Arbeiten auf vielen Gebieten, insbesondere in der Elektrizitätslehre und der Thermodynamik – nicht ohne Grund ist die Maßeinheit der absoluten Temperaturskala nach

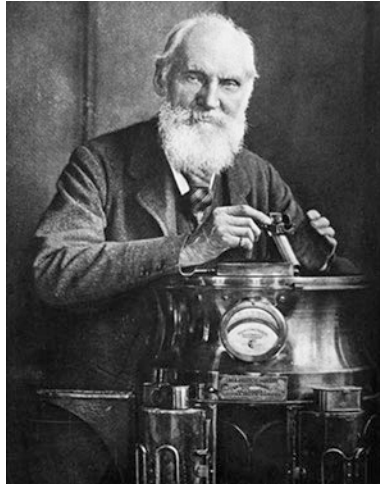


Abb. 1.2 Lord Kelvin (1824–1907), zusammen mit dem von ihm erfundenen Kompass im Jahr 1902. (Quelle: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Baron-Kelvin-William-Thomson-compass-1902.jpg>)

ihm benannt. Nebenbei erfand er auch noch einen beliebten Schiffskompass, einen Verstärker für die Telegrafie über den Atlantik sowie ein Tiefenecholot und hielt schließlich 69 Patente, die ihn zu einem wohlhabenden Mann machten.

Wenn man ihn selbst nach seiner größten Leistung fragte, so nannte er selbstbewusst seine Berechnung des Erdalters. Kelvin hatte sich nämlich überlegt, wie lange es wohl braucht, bis eine einst glutflüssige Kugel von der Größe der Erde auf ihre heutige Temperatur abgekühlt wäre. Hinzu kamen Überlegungen von ihm und dem deutschen Physiker *Hermann von Helmholtz* (1821–1894), wie lange die Sonne wohl in der Lage wäre, ihre heutige Strahlungsleistung aufrechtzuerhalten. Die einzige bekannte Energiequelle, die dafür aus damaliger Sicht infrage kam, war die Gravitation, die auf der Sonnenoberfläche rund 28-mal so stark ist wie auf der Erde. Ein 80-kg-Mensch würde dort also so viel wiegen, wie ein Elefant von gut 2 t auf der Erde wiegt. Würde man uns auf die Sonne verfrachten, so würde uns allein schon ihre Gravitation in kurzer Zeit umbringen.

Wenn sich die Sonne nun unter ihrer enormen Gravitation ganz langsam immer weiter zusammenzöge, dann könne sie nach den Berechnungen von Kelvin und Helmholtz sicher einige Mio. Jahre aus dieser Energiequelle schöpfen. Konkret kam Kelvin zunächst zu dem Ergebnis, dass Erde und Sonne rund 100 Mio. Jahre alt seien – ein Wert, den er im Lauf der Zeit bis

auf 24 Mio. Jahre reduzierte. Für die Evolution des Lebens, wie sein Zeitgenosse Darwin sie propagierte, erschienen diese 24 Mio. Jahre deutlich zu kurz.

Aus physikalischer Sicht waren die Überlegungen Kelvins durchaus stichhaltig. Wenn ein Stern aus einer kontrahierenden Gas- und Staubwolke geboren wird, dann schöpft er als junger Protostern tatsächlich seine Leuchtkraft zunächst aus seiner Gravitationsenergie, weshalb man in dieser frühen Entwicklungsphase auch heute noch von der *Kelvin-Helmholtz-Kontraktion* spricht. Von der Kernfusion, die erst in späteren Entwicklungsphasen im Sternzentrum zündet, wusste Kelvin noch nichts. Und auch bei der sich abkühlenden Erde war an Kelvins Überlegungen grundsätzlich etwas dran. Allerdings hatte er zwei Dinge übersehen: die langsamen Umwälzungen des Erdmantels, die mit der Plattentektonik zusammenhängen, und eine neue Energiequelle im Gestein, die der französische Physiker *Antoine Henri Becquerel* sowie das Physikerehepaar *Marie* und *Pierre Curie* am Ende des 19. Jahrhunderts entdeckt hatten: die *Radioaktivität*.

Wie wichtig die Entdeckung der Radioaktivität für die Bestimmung des Erdalters sein würde, ahnte als Erster der ebenso findige wie pragmatische Physiker *Ernest Rutherford* (Abb. 1.3). Im Jahr 1871 im fernen Neuseeland geboren und damit fast ein halbes Jahrhundert jünger als Lord Kelvin, zog es ihn nach Cambridge, Montreal und Manchester, wo er sich zu einem der bedeutendsten experimentellen Physiker des frühen 20. Jahrhunderts

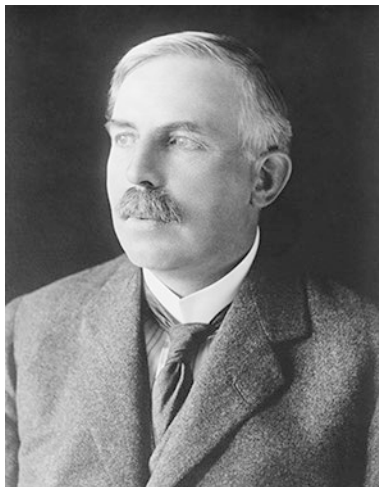


Abb. 1.3 Ernest Rutherford (1871–1937). (Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sir_Ernest_Rutherford_LCCN2014716719_-_restoration1.jpg)

entwickelte. Besonders bekannt ist er für seinen berühmten Streuversuch, in dem er zusammen mit Hans Geiger und Ernest Marsden um das Jahr 1909 nachwies, dass sich der Löwenanteil der Masse jedes Atoms in einem winzigen Atomkern in dessen Zentrum konzentriert. Der Rest des Atoms ist einfach nur leerer Raum, in dem auf geheimnisvolle Weise die 1000fach leichteren Elektronen den zentralen massiven Kern umschwirren.

Zusammen mit seinem Kollegen Frederick Soddy erkannte Rutherford, was bei der Radioaktivität beispielsweise von Uranerz eigentlich passiert: Die Uranatome zerfallen nach und nach über einige Zwischenstationen zu Bleiatomen und strahlen dabei hohe Energiemengen ab, die wir als radioaktive Strahlung messen können. Diese Energiemengen sind millionenfach größer als alles, was bei chemischen Reaktionen an Energie frei wird. Auch die Gesteine des Erdinneren enthalten radioaktive Elemente, deren Zerfälle das Erdinnere aufheizen, was Kelvins Berechnungen der Erdabkühlung über den Haufen werfen sollte.

Was veranlasst ein Uranatom eigentlich, irgendwann zu Blei zu zerfallen? Nach heutiger Auffassung lautet die Antwort: gar nichts! Der Zerfall ist ein quantenmechanischer Zufallsprozess und niemand kann bei einem Uranatom vorhersagen, wann es zerfallen wird. Das kann schon in der nächsten Sekunde passieren oder auch erst in 10 Mrd. Jahren. Dabei ist es auch egal, wie alt ein einzelnes Uranatom bereits ist, denn es altert nicht und besitzt kein Zeitgedächtnis. Die Wahrscheinlichkeit, innerhalb einer bestimmten Zeitspanne zu zerfallen, ist immer gleich groß, egal wie alt das Atom ist.

Aber auch wenn man einem einzelnen Uranatom nicht ansehen kann, wie alt es ist – wenn man Billionen Uranatome vor sich hat, sieht die Sache schon anders aus. So beträgt die Wahrscheinlichkeit bei dem häufigsten Uranatom U-238¹, innerhalb von 4,468 Mrd. Jahren zu Blei zu zerfallen, genau 50 % – daher auch die krumme Zeitangabe, die sogenannte *Halbwertszeit*. Bei Billionen von Uranatomen kann man sich nun sehr sicher sein, dass innerhalb der Halbwertszeit ziemlich genau die Hälfte von ihnen zerfällt. Das mag Ihnen vielleicht etwas unsicher vorkommen, aber werfen Sie in Gedanken einmal 1 Mrd. Münzen in die Luft. Jede einzelne Münze

¹U-238 bedeutet, dass dieses Uranisotop, wie man es auch nennt, in seinem Atomkern 238 Kernbausteine (Nukleonen) enthält, nämlich 92 Protonen (deshalb ist es das Element Uran) und 146 Neutronen. Das seltenere Uranisotop U-235 enthält dagegen 3 Neutronen weniger, aber genauso viele Protonen (sonst wäre es kein Uran). U-235 zerfällt gut 6-mal schneller als U-238, nämlich mit einer Halbwertszeit von 703,8 Mio. Jahren.

entscheidet sich zufällig mit einer 50:50-Wahrscheinlichkeit für Kopf oder Zahl, wobei sich das Ergebnis nicht vorhersehen lässt. Aber bei einer sehr großen Anzahl an Münzen mittelt sich der Zufall gleichsam raus und es werden ziemlich genau die Hälfte der Münzen Kopf und die andere Hälfte Zahl zeigen. Alles andere wäre schon eine unglaubliche Glückssträhne! Je mehr Münzen es sind, umso genauer stimmt das. Jede Spielbank verdient ihr Geld nach diesem Prinzip.

In ihrer Gesamtheit wirken die unzähligen Uranatome in einem passenden Gestein dadurch wie eine präzise natürliche Uhr. Man kann sie sich wie eine Sanduhr vorstellen, bei der oben die Uranatome und unten die Bleiatome liegen. Am Anfang ist die untere Hälfte leer, sofern wir uns sicher sind, dass das Gestein zu Beginn kein Blei enthält. Dann beginnen zufällig einzelne Uranatome zu Blei zu zerfallen und nach unten zu rieseln, sodass nach 4,468 Mrd. Jahren die Hälfte von ihnen als Bleiatom unten angekommen ist.

Man könnte nun meinen, dass nach weiteren 4,468 Mrd. Jahren auch die andere Hälfte der Uranatome zu Blei zerfällt und nach unten rieselt, aber so ist es nicht! Bedenken Sie: Die Uranatome haben kein Gedächtnis und wissen nicht, dass sie bisher Glück hatten. Sie zerfallen vielmehr mit derselben Wahrscheinlichkeit wie zuvor, sodass nach weiteren 4,468 Mrd. Jahren wieder die Hälfte von ihnen zu Blei zerfallen ist. Mit dem nun übrig gebliebenen Viertel geht es analog weiter: $1/4$, $1/8$, $1/16$ und so fort, sodass nach 10 Halbwertszeiten nur noch $1/1024$ der Uranatome übrig ist (Abb. 1.4). Dasselbe geschieht in unserem Beispiel mit der Milliarde

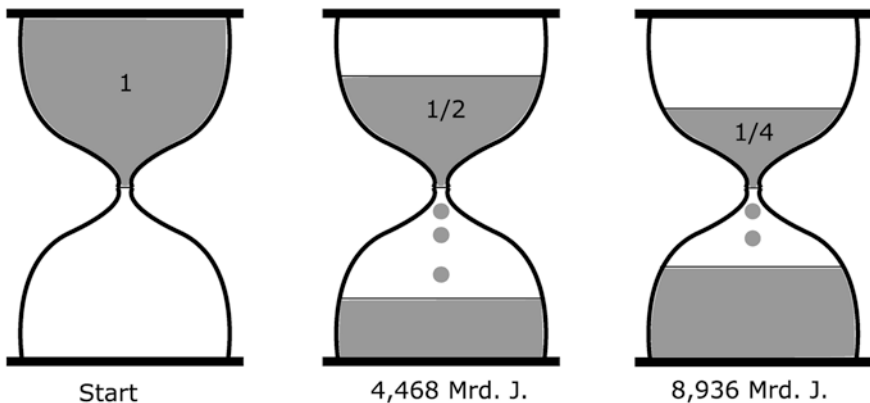


Abb. 1.4 Der radioaktive Zerfall von Uran-238 zu Blei wirkt wie eine Sanduhr, deren oberes Uranreservoir sich alle 4,468 Mrd. Jahre halbiert und in das untere Bleireservoir herabrieselt. (Quelle: Eigene Grafik)

geworfener Münzen, wenn sie immer wieder diejenigen, die Kopf zeigen, erneut hochwerfen.

Rutherford war klar, was er da entdeckt hatte: Das Uran-zu-Blei-Verhältnis im Gestein zeigt wie eine Sanduhr an, wann das Gestein mit den darin enthaltenen Uranatomen entstanden ist. Er hatte endlich das gefunden, was alle Geologen zuvor vergeblich gesucht hatten: eine radioaktive Uhr für das Alter von Gesteinen! Dabei läuft diese Uhr langsam genug, um auch sehr große Zeitspannen anzeigen zu können. Das musste sie auch, denn erste Messungen zeigten, dass manche Gesteine mehrere Hundert Mio. Jahren alt sein konnten.

Hätte Charles Darwin das noch miterlebt, so hätte er sich über dieses Ergebnis sicher sehr gefreut! Solch lange Zeiträume waren groß genug, um seine Theorie der Evolution zu stützen. Die 24 Mio. Jahre des großen Lord Kelvin wären damit klar aus dem Rennen. Aber würde der erfolgsverwöhnte Physiker diese Niederlage auch akzeptieren?

Im Mai 1904 bot sich für Rutherford die Chance, in einem Vortrag seinen Kollegen an der Royal Institution in London von seiner Entdeckung zu berichten. Rutherford war nervös, als er den halbdunklen Vortragssaal betrat, in dem sich mittlerweile mehrere Hundert Zuhörer eingefunden hatten. Mitten unter ihnen entdeckte er ihn: die altherwürdige Eminenz der damaligen Physik – Lord Kelvin.

Während Rutherford zunächst über andere Themen referierte, schielte er immer wieder hinüber zu dem Platz, wo sich Kelvin niedergelassen hatte. Zunächst sah es ganz so aus, als habe er Glück: Der ältere Herr schien eingeschlafen zu sein. Doch kaum kam Rutherford zum entscheidenden Punkt, war Kelvin auf einmal hellwach. Wie würde er reagieren, wenn Rutherford seine geliebte Theorie infrage stellte?

Zum Glück konnte Rutherford gut mit Menschen umgehen, und so kam ihm auch hier die rettende Idee: Kelvin selbst hatte einst darauf hingewiesen, dass eine neue Wärmequelle im Gestein seine Berechnungen modifizieren könne. Nun war die Radioaktivität der Gesteine genau eine solche Wärmequelle, wie Rutherford sich beeilte zu erwähnen. Selbst wenn es nur Spuren radioaktiver Elemente im Gestein gab, so setzten deren radioaktive Zerfälle dennoch große Energiemengen frei, die man nicht ignorieren konnte. Kelvin war nicht wirklich überzeugt, aber Rutherford hatte den Konflikt geschickt entschärft. Etwas Diplomatie kann auch in der Wissenschaft nicht schaden, besonders wenn man als junger Wissenschaftler aus dem fernen Neuseeland, das eher für seine Schafzucht als für seine Wissenschaft bekannt ist, einer Legende der Physik die Stirn bietet.

Das Alter der Erde

Rutherfords Erkenntnisse öffneten eine neue Tür in die Vergangenheit der Erde. Es stellte sich allerdings heraus, dass es keineswegs einfach war, die radioaktiven Uhren im Gestein präzise genug auszulesen. In den meisten Gesteinen kommen die relevanten Elemente wie Uran und Blei nämlich nur in geringen Spuren vor und ihre genauen Mengen sind nicht leicht zu bestimmen. Da können Verunreinigungen und Veränderungen in der Gesteinszusammensetzung die radioaktiven Uhren leicht verstellen und die Ergebnisse verfälschen.

Hinzu kam, dass die Geologie, die im 19. Jahrhundert so viele Menschen in ihren Bann gezogen hatte, im frühen 20. Jahrhundert ziemlich aus der Mode gekommen war. So musste sich beispielsweise der britische Geologe *Arthur Holmes*, der sich immer wieder mit bescheidenen finanziellen Mitteln an der radiometrischen Altersbestimmung von alten Gesteinen versuchte, zeitweise sogar ganz aus der Wissenschaft verabschieden – er musste schlicht Geld verdienen und eröffnete ein Kuriositätengeschäft. Doch trotz dieser Schwierigkeiten gelang es ihm, das Alter verschiedener Gesteine relativ genau zu bestimmen. In seinem berühmten Buch *The Age of the Earth* beschrieb er im Jahr 1913 sehr alte sogenannte Gneise, deren Alter er auf rund 1,5 Mrd. Jahren gemessen hatte. Bischof James Ussher hätte sich angesichts solch unbiblisch hoher Zahlen womöglich im Grabe umgedreht.

Wie sich herausstellte, ist es gar nicht einfach, noch deutlich ältere Gesteine zu finden. Unsere Erdoberfläche ist ständig im Wandel, neue Gesteine entstehen und werden von den Kräften der Erosion wieder zerstört. Da muss ein sehr alter Stein schon viel Glück haben, alle diese Veränderungen weitgehend unbeschadet zu überstehen. Der heute älteste bekannte Spitzenreiter unter den intakten Gesteinen ist der sogenannte *Acasta-Gneis* aus dem Nordwesten Kanadas, der es auf ein Alter von rund 4 Mrd. Jahren bringt. Vielleicht sind manche Gesteine im sogenannten Nuvvuagittuq-Grünsteingürtel an der Hudson Bay Kanadas mit bis zu 4,4 Mrd. Jahren sogar noch älter, aber die Ergebnisse sind umstritten.

Gibt es auf der Erde etwas noch Älteres, dessen Alter wir bestimmen können? Bei intakten Gesteinen kommen wir hier an eine Grenze, aber es muss ja nicht unbedingt ein kompletter Stein sein. Mikroskopisch betrachtet bestehen Gesteine nämlich aus vielen, meist winzigen Mineralkristallen. Manche von ihnen wie beispielsweise Quarz sind sehr beständig und bleiben übrig, wenn das Gestein um sie herum verwittert – nicht umsonst gibt es in

der Wüste so viel Quarzsand. Ein bestimmtes Mineral ist besonders unverwüstlich: *Zirkon*.

Zirkonkristalle bilden wahre Zeitkapseln. Das Besondere an ihnen ist, dass sie bei ihrer Entstehung gerne Uranatome, aber keine Bleiatome einlagern, denn Letztere passen nicht gut in ihr Kristallgitter. Damit ist ein neu entstandener Zirkonkristall wie eine frisch aufgezoogene radioaktive Uhr.

Die ältesten Zirkonkristalle, die man bis heute auf der Erde entdeckt hat, stammen aus den Jack Hills im Westen Australiens. Es sind winzige Körnchen, eingebacken in Sedimentgestein, das vor ungefähr 3 Mrd. Jahren entstanden ist. Die Zirkonkristalle selbst sind deutlich älter. Das Gestein, in dem sie einst entstanden sind, ist längst dem Zahn der Zeit zum Opfer gefallen. Liest man ihre radioaktive Uhr ab, so findet man ein Alter von bis zu 4,404 Mrd. Jahren. Das ist wirklich schon sehr alt, aber ist es auch das Alter der Erde?

Wo könnte es noch ältere Relikte aus der Frühzeit der Erde geben? Darüber zerbrach sich in den frühen 1950er-Jahren der US-amerikanische Geochemiker *Clair Cameron Patterson* (1922–1995) den Kopf. Schließlich kam er auf eine geniale Idee: Es muss nicht unbedingt ein Stein von der Erde sein! Wenn die Erde und das restliche Sonnensystem mit allem, was darin umherfliegt, gemeinsam aus einer sich zusammenziehenden Gas- und Staubwolke entstanden sind, dann hätten alle Himmelskörper darin ungefähr dasselbe Alter. Nun war beispielsweise an Mondgestein damals noch nicht heranzukommen, das sollte erst rund 20 Jahre später möglich werden. Aber es gibt Himmelskörper, die gelegentlich ganz freiwillig zur Erde kommen: Meteoriten. Wenn so ein Meteorit vor nicht allzu langer Zeit auf der Erde eingeschlagen ist, dann wäre er nicht über Jahrmilliarden hinweg den ständigen Umwälzungen auf der Erde ausgesetzt gewesen und hätte seinen ursprünglichen Zustand weitgehend bewahren können.

Es war für Patterson nicht ganz einfach, an entsprechendes Meteoritenmaterial heranzukommen, aber er blieb hartnäckig. Schließlich gelang es ihm, Fragmente des berühmten Meteoriten Canyon Diablo zu ergattern, der vor rund 50.000 Jahren in der Wüste Arizonas eingeschlagen war und dabei den markanten Barringer-Krater hinterlassen hatte – heute eine beliebte Touristenattraktion.

Aber es gab ein Problem: Pattersons Bleimessungen zeigten viel zu hohe Werte, sodass er die radioaktive Uhr des Meteoriten nicht ablesen konnte. Das war auch bei vielen anderen Gesteinen so. Wo kam all dieses Blei nur her?

Schließlich dämmerte es ihm: Es kam von draußen! Die gesamte Umwelt enthielt deutlich mehr Blei, als zu erwarten gewesen wäre. Überall war es zu finden, die Welt war geradezu mit Blei verseucht. Es kam aus den Auspuffrohren der Autos und stammte aus den organischen Bleiverbindungen, die man dem Benzin als Antiklopfmittel zusetzte, um störende Fehlzündungen zu vermeiden. Ich erinnere mich noch gut an das verbleite Benzin, das es früher an jeder Tankstelle zu kaufen gab. Man dachte sich nicht allzu viel dabei und tankte einfach munter den Wagen voll.

Patterson war dagegen alarmiert! Niemanden schien es zu kümmern, dass so viel gesundheitsschädliches Blei in der Umwelt vorhanden war. In seinen späteren Jahren würde er es sich zur Aufgabe machen, unermüdlich auf dieses massive Problem hinzuweisen und eine Abschaffung von Bleizusätzen in Benzin zu erwirken. Es würde ein nervenaufreibender Kampf gegen einen mächtigen Gegner werden, der über viel Geld verfügte und überall an den wichtigen Schaltstellen der Gesellschaft Verbündete hatte. Man würde Patterson Forschungsgelder entziehen, ihn von wichtigen Gremien ausschließen und sogar versuchen, ihn an seiner Universität mundtot zu machen. Aber Patterson ließ sich nicht entmutigen. Ihm und anderen ist es zu verdanken, dass es heute kein verbleites Benzin an den Tankstellen mehr gibt.

In den 1950er-Jahren war man von diesem Ziel noch weit entfernt. Patterson blieb also nichts anderes übrig, als sein Labor mit großem Aufwand hermetisch gegen die bleiverseuchte Außenwelt abzuschirmen. Damit schuf er eines der ersten sterilen Reinraumlaborer der Welt. Im Jahr 1953 war er so weit und konnte endlich die winzigen Bleimengen im Material des Meteoriten zuverlässig bestimmen. Er konnte dessen radioaktive Uran-Blei-Uhr präzise ablesen und ermittelte damit als Erster das Alter des Meteoriten und damit des Sonnensystems mitsamt der Erde. Nach Jahrhunderten des Umherirrens hatte man endlich Gewissheit: Sonnensystem, Meteorit und Erde sind 4,55 Mrd. Jahre alt!

Bis heute hat sich an diesem Wert praktisch nichts geändert. Im Gegenteil: Als man ab 1969 bei den Apollo-Mondmissionen immer mehr Mondgestein zur Erde brachte, konnte man auch dessen Alter mithilfe der darin eingebackenen radioaktiven Uhren bestimmen. Das älteste Mondgestein fand man in den Hochländern (Terrae) des Mondes, wo es die Zeiten seit seiner Entstehung weitgehend unbeschadet überdauern konnte. Mit einem Alter von 4,46 Mrd. Jahren ist es nur wenig jünger als Pattersons Meteorit. Damit können wir sicher sein: Das Rätsel vom Alter der Erde ist endgültig gelöst.

Wie alt sind die Sterne?

Mit Sternen ist es ein bisschen wie bei Menschen: Man sieht ihnen ihr Alter zwar an, aber das genaue Geburtsdatum ist ihnen nicht auf die Stirn geschrieben. Radioaktive Uhren besitzen Sterne auch nicht, und so bleibt einem nichts anderes übrig, als ihren typischen Entwicklungsweg vom Sternenkind bis zum Greis irgendwie zu rekonstruieren und daraus ungefähr abzulesen, wie alt so ein Stern gerade ist.

Zum Glück wissen wir – anders als zu Lord Kelvins Zeiten – mittlerweile sehr genau, was im Inneren eines Sterns physikalisch geschieht. Das haben wir Forschenden wie dem britischen Astrophysiker *Arthur Stanley Eddington* (1882–1944) zu verdanken, der sich im Jahr 1920 Gedanken darüber machte, was einen Stern wie die Sonne über Milliarden von Jahren zum Leuchten bringt. Es konnte nicht alleine die Gravitation sein, wie es noch Lord Kelvin vorgeschlagen hatte – die reicht nur für einige 10 Mio. Jahre. Die Gesteinsuntersuchungen des Geologen *Arthur Holmes* hatten aber mittlerweile gezeigt, dass die Erde mindestens 1,5 Mrd. Jahre alt sein sollte. Das galt dann auch für die Sonne, denn kaum jemand zweifelte daran, dass das gesamte Sonnensystem ungefähr zeitgleich aus einer sich zusammenziehenden Gas- und Staubwolke entstanden war.

Gibt es eine andere Quelle, die ausreicht, die Sonne über Jahrmilliarden mit genügend Energie zu versorgen? Lord Kelvin hatte hier noch mit den Schultern zucken müssen, aber Eddington kannte mittlerweile eine solche mögliche Quelle, die millionenfach mehr Energie erzeugt als jede chemische Reaktion: *atomare Kernreaktionen!* Sie können nicht nur das Innere der Erde aufheizen, sondern auch die Sonne in hellem Licht erstrahlen lassen.

Radioaktive Zerfälle wie im Erdinneren würden dafür bei der Sonne allerdings nicht ausreichen. Aber es gibt eine andere Möglichkeit, wie Eddington vermutete: Die Sonne besteht zu rund 73 % aus Wasserstoff und zu rund 25 % aus Helium, bezogen auf die Masse. Alle anderen Elemente machen weniger als 2 % aus, wobei Sauerstoff und Kohlenstoff am häufigsten sind. Da wäre es doch möglich, dass die Sonne tief in ihrem sehr heißen und dichten Zentrum Wasserstoffatomkerne zu Heliumatomkernen fusioniert, wobei enorme Energiemengen frei werden. Die *Kernfusion* von Wasserstoff zu Helium wäre demnach die Energiequelle der Sonne! Damit lag Eddington genau richtig, wie alle nachfolgenden Forschungen bestätigten.

Was für die Sonne gilt, gilt auch für die allermeisten Sterne. Eddington erkannte, dass sie riesige, sich selbst regulierende Fusionsreaktoren sind, bei

denen sich die starken Gravitationskräfte und der innere Strahlungsdruck durch die Kernfusion die Waage halten. Je mehr Masse ein Stern dabei besitzt, umso stärker sind seine Gravitationskräfte. Um von diesen nicht zusammengedrückt zu werden, muss der innere Strahlungsdruck ansteigen, d. h., die Kernfusion muss im Zentrum des Sterns mehr Energie erzeugen, was den Stern insgesamt heller und heißer macht.

Eddington konnte mit seinen Sternmodellen sogar ziemlich genau ausrechnen, wie stark die Helligkeit eines Sterns mit seiner Masse ansteigt. Was er herausfand, war erstaunlich! Ein Stern mit 2 Sonnenmassen leuchtet nicht etwa doppelt so hell wie die Sonne, sondern mehr als 10-mal so hell. Bei 4 Sonnenmassen leuchtet er sogar mehr als 100-mal heller.

Entsprechend schnell verbraucht ein massereicher Stern seinen Brennstoff. Auch wenn er mehr davon besitzt, so geht er doch viel zu verschwenderisch damit um. Wenn ein Stern mit 4 Sonnenmassen mehr als 100-mal so hell wie die Sonne leuchtet und entsprechend viel Energie verbraucht, aber nur 4-mal so viel Energievorrat in Form von Wasserstoff besitzt, dann reicht dieser Vorrat nur für maximal $4/100 = 1/25$ der Zeit. Massereiche Sterne leben also sehr viel kürzer als massearme Sterne. Viele der Sterne, die wir nachts am Himmel sehen können, sind übrigens solche kurzlebigen massereichen Sterne, denn ihre enorme Leuchtkraft macht sie weithin sichtbar. Rigel, der helle bläuliche Stern unten rechts im Sternbild Orion, ist beispielsweise rund 20 Sonnenmassen schwer und leuchtet mehr als 50.000-mal heller als die Sonne. Wenn Sie sich an einem klaren Frühlingsabend einmal das Orion-Sternbild am Himmel anschauen, können Sie tatsächlich sehen, dass Rigel bläulich funkelt, besonders im optischen Kontrast zum rötlich leuchtenden Riesenstern Beteigeuze oben links im Sternbild. Man kann es tatsächlich auch mit bloßem Auge gut erkennen: Die Sterne sind bunt!

Schwere Sterne leben also sehr viel kürzer als leichte. Bleibt nur noch herauszufinden, *wie* lange sie leben. Das sollte eigentlich ganz einfach sein: Aus der Sternenmasse und dem Wasserstoffanteil kann man ablesen, wie groß der Wasserstoffvorrat eines Sterns ist. Die Helligkeit des Sterns legt dann fest, wie schnell dieser Vorrat verbraucht wird.

In Wirklichkeit ist es nicht ganz so einfach, denn ein Stern kommt für die Kernfusion normalerweise nicht an den gesamten Wasserstoff heran, den er besitzt, sondern nur an den Wasserstoff in seinem Zentrum, wo auch die Kernfusion stattfindet. Man muss also schon etwas genauer hinschauen und am besten konkrete Sternmodelle im Computer durchrechnen. Für einen Stern wie unsere Sonne kommt dabei heraus, dass der Wasserstoffvorrat in ihrem Zentrum für gut 10 Mrd. Jahre reicht. Danach schließen sich für etwa 1 Mrd. Jahre noch einige kurze, aber heftige Entwicklungsphasen an,

bei denen die Sonne auch den Wasserstoff außerhalb des Zentrums teilweise anzapft und schließlich sogar das Helium in ihrem Zentrum zu Kohlenstoff und Sauerstoff fusioniert. Dabei bläht sie sich immer weiter zu einem *Roten Riesen* auf und steigert ihre Energieproduktion um mehr als das 1000 fache. Am Ende ihres Lebens stößt sie schließlich ihre äußeren Hüllen ab und bläst sie als sogenannten *planetarischen Nebel* hinaus in den Weltraum. Was als erdgroßer *Weißer Zwerg* übrig bleibt, ist nur noch ihr entblößtes, sehr kompaktes Zentrum – der ausgebrannte Überrest unseres einst stolzen Muttersterns.

Für die Länge eines Sternenlebens sind diese späten turbulenten Phasen nicht so entscheidend, denn die meiste Zeit verbringt ein Stern ja damit, relativ ruhig den Wasserstoff in seinem Zentrum in Helium umzuwandeln. In dieser sogenannten *Hauptreihenphase* befindet sich aktuell – zum Glück, möchte man sagen – auch unsere Sonne. Aber können wir ihr auch ansehen, wie lange sie das schon tut? Mit anderen Worten: Wie alt ist unsere Sonne?

Nun ja, wie eingangs bereits gesagt: Das genaue Geburtsdatum ist der Sonne nicht auf die Stirn geschrieben, aber ein bisschen zumindest sieht man ihr das Alter schon an. Ein Stern verändert sich nämlich allmählich, wenn in seinem Zentrum langsam der Heliumanteil ansteigt. Er wird immer heißer und heller. Rechnet man es mit Sternmodellen nach, dann findet man heraus, dass die Sonne zu Beginn nur rund 70 % ihrer heutigen Leuchtkraft besaß. Wenn am Ende der Hauptreihenphase der Wasserstoff im Sonnenzentrum komplett zu Helium umgewandelt sein wird, so wird sie gut doppelt so hell leuchten wie heute. Schon in 1 Mrd. Jahre wird sie unsere Erde so stark aufheizen, dass es für höheres Leben langsam eng wird – keine besonders rosigen Aussichten, aber zum Glück sind 1 Mrd. Jahre ja viel Zeit; bis dahin haben wir erst einmal ganz andere Probleme.

Offenbar scheint sich die Sonne irgendwo in der Mitte ihrer gut 10 Mrd. Jahre währenden Hauptreihenphase zu befinden. Um es genauer zu sagen, muss man ihren Lebensweg mit Computermodellen im Detail nachstellen und schauen, nach welcher Zeit sie darin so aussieht wie heute. Das Alter, das sich dabei für die Sonne ergibt, stimmt gut mit den 4,55 Mrd. Jahren überein, die Patterson für das Alter der Erde ermittelt hatte. Es passt also alles wunderbar zusammen.

Nun sind Sonne und Erde natürlich nicht der Maßstab für das Alter des Universums. Irgendwo in den Tiefen des Raums könnte es Sterne geben, die noch viel älter als die Sonne sind. Machen wir uns also auf die Suche nach den ältesten Sternen im Universum.

Grillblau strahlende, massereiche Sterne wie Rigel kommen dafür nicht infrage. Solche Sterne hätten ihren Brennstoff längst aufgebraucht und

wären verglüht. Es sind also eher die kleineren, orange-rötlich leuchtenden Sterne, auf die wir unsere Suche konzentrieren müssen. Man nennt sie treffend *Rote Zwerge*.

Im Universum sind Rote Zwergsterne die häufigsten Sterne. Da sie allerdings bei Weitem nicht so hell leuchten wie ihre massereichen Verwandten, fallen sie nicht so auf. Auch dürfen sie nicht allzu weit von der Erde entfernt sein, um sich noch gut beobachten zu lassen. Und wie schon bei der Sonne geben auch sie ihr Alter nicht auf den ersten Blick preis. Man muss ihr Erscheinungsbild vielmehr sorgfältig mit den Ergebnissen von Sternmodellen vergleichen, um auf ihr Alter schließen zu können. Besonders gute Kandidaten für sehr alte Sterne sind dabei diejenigen, die nur sehr wenige Elemente jenseits von Wasserstoff und Helium enthalten – Astronomen nennen sie etwas irreführend „metallarm“, aber sie meinen damit nicht nur Metalle, sondern alle Elemente außer Wasserstoff und Helium.

Es ist nämlich so, dass es in den Gaswolken des frühen Universums, aus denen sich besonders alte Sterne einst gebildet haben müssen, kaum schwere Elemente gab. Die schweren Elemente sind erst im Lauf der Zeit im Inneren größerer Sterne entstanden und wurden an deren Lebensende in den Weltraum hinausgeschleudert, wo sie sich nach und nach anreicherten. Die knapp 2 % an schweren Elementen in unserer Sonne sind also ein klares Zeichen dafür, dass unser Heimatstern nicht zu den ersten Sternen im Universum gehört haben kann. Es muss schon Sternengenerationen vor unserer Sonne gegeben haben, die diese schweren Elemente erst erzeugt haben. Auch jedes einzelne Kohlenstoff- oder Sauerstoffatom in unserem Körper muss irgendwann im Inneren eines längst verloschenen Sterns entstanden sein – einen anderen Weg gibt es nicht.

Das sind also die Sterne, die die Astronominnen und Astronomen auf der Suche nach den ältesten Sternen untersuchen müssen: metallarme Rote Zwergsterne. Hin und wieder geht ihnen dabei ein besonders altes Sternexemplar ins Netz. Der Stern *HD 140283*, der später auch als *Methusalem-Stern* bezeichnet wurde, ist ein solches Fundstück. Bischof James Ussher hätte es sicher sofort gewusst: Methusalem ist der biblische Inbegriff der Langlebigkeit schlechthin. Seine 969 Lebensjahre machen ihn zum ältesten Menschen, der in der Bibel Erwähnung findet. Als Großvater von Noah lebte er laut Bibel noch vor der Sintflut.

Der Zwergstern HD 140283 hat den Vorteil, dass er sich mit nur etwa 200 Lichtjahren Entfernung noch einigermaßen gut mit dem Hubble-Teleskop beobachten lässt. Es handelt sich um einen metallarmen, bereits leicht aufgeblähten Stern von rund 0,8 Sonnenmassen – einen sogenannten