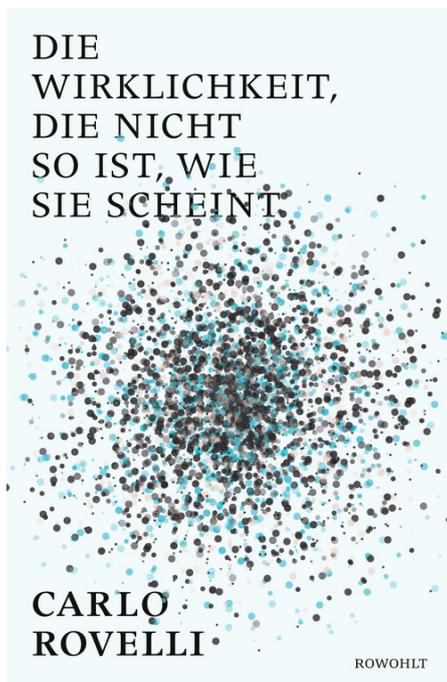


## Leseprobe aus:



ISBN: 978-3-498-05806-7

Mehr Informationen zum Buch finden Sie auf [www.rowohlt.de](http://www.rowohlt.de).

Carlo Rovelli

**Die Wirklichkeit, die  
nicht so ist, wie sie scheint**

Eine Reise in die Welt der Quantengravitation

Aus dem Italienischen von  
Enrico Heinemann

Rowohlt

Die italienische Originalausgabe erschien 2014  
unter dem Titel *La realtà non è come ci appare. La struttura elementare delle cose*  
bei Raffaello Cortina Editore, Mailand.

1. Auflage Dezember 2016  
Copyright der deutschsprachigen Ausgabe  
© 2016 by Rowohlt Verlag GmbH, Reinbek bei Hamburg  
*La realtà non è come ci appare* Copyright © 2014 by Raffaello Cortina Editore  
Lektorat Frank Strickstroock  
Fachlektorat Bernd Schuh  
Satz DTL Vanden Keere PostScript (InDesign) bei  
Pinkuin Satz und Datentechnik, Berlin  
Druck und Bindung CPI books GmbH, Leck, Germany  
ISBN 978 3 498 05806 7

# Inhalt

Inhalt

Vorbemerkung

Einleitung Spaziergang auf der Strandpromenade

Erster Teil Wurzeln

1. Körnchen

2. Die Klassiker

Zweiter Teil Der Beginn der Revolution

3. Albert

4. Die Quanten

Dritter Teil Quantenraum und relationale Zeit

5. Die Raumzeit besteht aus Quanten

6. Raumquanten

7. Die Zeit existiert nicht

Vierter Teil Jenseits von Raum und Zeit

8. Vor dem Urknall

9. Empirische Bestätigungen?

10. Die Wärme der Schwarzen Löcher

11. Das Ende der Unendlichkeit

12. Information

13. Das Mysterium

Kommentiertes Literaturverzeichnis

Register

# Vorbemerkung

In der ganzen Zeit, in der ich mich mit der Quantengravitation befasste, haben mich Freunde und Neugierige immer wieder um Erklärungen gebeten, was sich in diesem Forschungsbereich eigentlich abspielte. Wie war es möglich, auf neue Art über Raum und Zeit nachzudenken? Wieder und wieder wurde ich gebeten, eine allgemeinverständliche Darstellung zu diesem Gebiet zu verfassen. Zur Kosmologie und zur Stringtheorie lag bereits eine Fülle entsprechender Veröffentlichungen vor, aber zur Quantennatur von Raum und Zeit und insbesondere zur Schleifen-Quantengravitation gab es noch kein einziges Buch. Da ich mich auf meine Forschungen konzentrieren wollte, zögerte ich lange. Aber vor einigen Jahren, nach Abschluss meines Fachbuchs zum Thema, hatte ich das Gefühl, dass zahlreiche Wissenschaftler den Themenbereich gemeinschaftlich so weit vorangebracht hatten, dass die Zeit für eine allgemeinverständliche Darstellung reif war. Wir erkundeten ein bezauberndes Gebiet. Warum unsere Forschungen unter Verschluss halten?

Aber ich zögerte mit dem Projekt noch immer, weil ich das Buch im Kopf noch nicht vor mir «sah». Wie sollte ich eine Welt ohne Raum und Zeit erklären? Als ich 2012 nachts auf einer langen einsamen Fahrt von Italien nach Frankreich unterwegs war, wurde mir klar, dass sich die gegenwärtigen Veränderungen der Begriffe von Raum und Zeit nur dann verständlich erläutern ließen, wenn man die Geschichte von Anfang an erzählt: beginnend mit Demokrit über den ganzen Weg bis hin zu den Raumquanten. So jedenfalls verstehe ich die Geschichte. Ich begann das ganze Buch zu entwerfen und wurde immer aufgeregter, bis ich eine Polizeisirene hörte: Ich musste rechts heranfahren, weil ich deutlich zu schnell gewesen war. Höflich fragte mich der italienische Polizeibeamte, ob ich verrückt sei, mit so einem Tempo über die Straße zu jagen. Ich erklärte ihm, dass mir soeben eine Idee gekommen war, nach der ich so lange gesucht hatte. Der Polizist ließ mich ohne Strafzettel weiterziehen und wünschte mir für mein Buch viel Glück. Und hier ist es nun.

Dieses Buch ist Anfang 2014 entstanden und zunächst auf Italienisch erschienen. Wenig später verfasste ich für eine italienische Zeitung einige Artikel zu den Grundlagen der Physik. Der angesehene italienische Verlag Adelphi bat mich, den Inhalt zu einer Version zu erweitern, die als kleines Bändchen erscheinen sollte. So entstand *Sieben kurze Lektionen über Physik*, ein Buch, das zu meiner großen Überraschung ein internationaler Bestseller wurde und einen herrlichen Kommunikationskanal zwischen mir und zahlreichen wunderbaren Lesern rund um die Welt eröffnet hat. Die *Sieben kurzen Lektionen* entstanden folglich *nach* diesem Buch und fassen bis zu einem gewissen Maß einige der Themen zusammen, die hier behandelt werden. Wer dieses Bändchen gelesen hat und Weiteres erfahren, tiefer in die seltsame Welt eintauchen will, die es skizziert hat, der findet hier mehr davon.

Auch wenn ich die althergebrachte Physik aus meiner besonderen Perspektive präsentiere, entspricht diese Darstellung weitgehend dem allgemeinen Konsens. Dagegen entspringt der Teil des Buchs, der schildert, wo die Forschung in der Quantengravitation gegenwärtig steht, meinem ganz persönlichen Verständnis: im Grenzbereich zwischen dem, was wir verstanden haben, und dem, was wir noch nicht begreifen. In dieser Region ist bei weitem noch keine Einigkeit in Sicht. Einige Physikerkollegen werden dem, was ich hier schreibe, zustimmen, andere dagegen nicht. Auch wenn es für jede Forschung in den Grenzbereichen des Wissens gilt, sage ich es klar und deutlich: Dies ist kein Buch über Gewissheiten, sondern eines über das Abenteuer einer Reise, die ins Unbekannte führt.

Es ist insgesamt ein Reisebuch, das eines der spektakulärsten Unternehmungen beschreibt, auf das sich die Menschheit eingelassen hat: eine Reise, auf der wir uns aus unseren engen beschränkten Anschauungen über die Realität herausbegeben und auf ein immer umfassenderes Verständnis der Struktur der Dinge zubewegen. Eine magische Reise, weg von unserer alltäglichen Sichtweise der Dinge, aber längst nicht zu Ende.

Marseille, 4. Mai 2016

# Einleitung

## Spaziergang auf der Strandpromenade

Wir sind besessen von uns selbst. Wir studieren *unsere* Geschichte, *unsere* Psychologie, *unsere* Philosophie, *unsere* Literatur und *unsere* Götter. Der Großteil unseres Wissens kreist um uns selbst, als seien wir Menschen das Wichtigste im Universum. Ich glaube, dass mich die Physik deshalb so fasziniert, weil sie ein Fenster öffnet und in die Ferne hinausblickt. Nach meiner Empfindung lässt sie wieder Frischluft ins Haus einziehen.

Der Blick aus dem Fenster versetzt uns ins Staunen. Wir haben über das Universum unglaublich viel gelernt. Im Verlauf der Jahrhunderte haben wir zahlreiche unserer Irrtümer erkannt. Wir glaubten, dass die Erde flach und unbeweglich im Mittelpunkt der Welt stehe, in einem kleinen, ewig gleichbleibenden Universum. Ebenso glaubten wir, dass der Mensch ein ganz eigenes Wesen ohne jede Beziehung zur Tierwelt sei. Wir erfuhren, dass es Quarks, Schwarze Löcher, Lichtteilchen, Raumwellen gibt – und erstaunliche molekulare Strukturen in allen unseren Körperzellen. Die Menschheit ist wie ein Kind, das größer wird und verwundert entdeckt, dass sich die Welt nicht auf sein Kinderzimmer und seine Spielplätze beschränkt, sondern riesengroß ist, dass es tausend Dinge und Ideen zu entdecken gibt, die anders sind als jene, mit denen es herangewachsen ist. Das Universum ist vielfältig und grenzenlos, und ständig entdecken wir neue Aspekte. Je mehr wir über die Welt erfahren, desto ehrfürchtiger staunen wir über ihre Vielfalt, Schönheit und Einfachheit.

Aber mit jeder neuen Entdeckung wird uns auch klar, dass die Menge dessen, was wir noch nicht wissen, deutlich größer ist als alles, was wir bereits verstanden haben. Je leistungsfähiger unserer Teleskope werden, desto mehr seltsame und überraschende Himmelsregionen entdecken wir. Je genauer wir die winzigen Bestandteile der Materie untersuchen, auf desto mehr Tiefenstrukturen stoßen wir. Heute blicken wir

fast schon bis zum Urknall, der großen Explosion, aus der vor rund 14 Milliarden Jahren das Weltall und danach alle Galaxien am Himmel hervorgingen. Und inzwischen ahnen wir, dass es auch jenseits des Urknalls noch etwas gibt. Wir haben gelernt, dass sich der Raum krümmt, und beginnen schon zu erkennen, dass ebendieser Raum aus einem Gewebe von vibrierenden Quantenkörnchen besteht.

Unser Wissen über den Grundaufbau des Universums wächst kontinuierlich. Wenn wir die Erkenntnisse über die physische Welt, die wir im zwanzigsten Jahrhundert gewonnen haben, miteinander in Einklang zu bringen versuchen, deuten zahlreiche Hinweise auf etwas ganz anderes hin als auf die Vorstellungen, die uns über Materie und Energie, Raum und Zeit in der Schule vermittelt worden sind. Inzwischen zeichnet sich eine Grundstruktur der Welt ab, in der es weder Zeit noch Raum gibt und die vielmehr aus einem Gewimmel aus Quantenereignissen hervorgeht. Quantenfelder bilden Raum, Zeit, Materie und Licht, indem sie von einem Ereignis zum nächsten Informationen austauschen. Die Realität ist ein Netzwerk aus körnigen Ereignissen, zusammengehalten durch eine Dynamik, die probabilistischer Natur ist. Zwischen zwei Ereignissen sind Raum, Zeit, Materie und Energie in einer Wolke aus Wahrscheinlichkeiten aufgelöst.

Diese seltsame neue Welt kristallisiert sich heute aus der Beschäftigung mit dem ungelösten Hauptproblem der physikalischen Grundlagen heraus: die *Quantengravitation*. Dieses Problem besteht darin, das unterschiedliche Weltverständnis der beiden großen Entdeckungen der Physik des zwanzigsten Jahrhunderts – der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantentheorie – miteinander in Einklang zu bringen. Um die *Quantengravitation* und die seltsame Welt, die uns eine solche Forschung eröffnet, geht es in diesem Buch.

Es berichtet gewissermaßen live aus der derzeitigen Forschung: über das, was wir lernen, was wir wissen und was wir vom Wesen der Dinge heute allmählich zu verstehen glauben. Es beginnt bei den weit zurückliegenden Ursprüngen einiger wichtiger Ideen, dank derer wir heute Ordnung in unsere Vorstellung von der Welt bringen können. Es beschreibt die beiden großen Entdeckungen des zwanzigsten Jahrhunderts, Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantenmecha-

nik, und nimmt den Kern ihres physikalischen Gehalts in den Blick. Es stellt das Weltbild vor, das sich heute in den Forschungen zur Quantengravitation abzeichnet, und berücksichtigt die Hinweise, die uns die Natur in jüngster Zeit gegeben hat: So bestätigten Beobachtungen mit dem Planck-Weltraumteleskop (2013) das kosmologische Standardmodell, während sich die von vielen erwarteten supersymmetrischen Teilchen im CERN (2013) nicht blicken ließen. Das Buch erörtert die Konsequenzen dieser Konzepte: die Körnchenstruktur, das Verschwinden der Zeit, wenn wir die Welt im kleinsten Maßstab betrachten, die Physik des Urknalls, die Entstehung der Wärmestrahlung Schwarzer Löcher und schließlich das, was wir allmählich über die Rolle erkennen, die Information für die Grundlagen der Physik spielt.

In seinem vielzitierten Gleichnis in Buch VII von *Der Staat* erzählt Platon (428/7 – 348/7 v. Chr.) von Menschen, die tief im Inneren einer finsternen Höhle angekettet sind und im Schein eines Feuers, das hinter ihnen lodert, nur Schatten an der Wand sehen. Sie halten diese für die Realität. Einer kann sich befreien, steigt ins Freie empor und entdeckt das Sonnenlicht und die weite Welt. Das Licht blendet und verwirrt ihn zunächst: Aber als sich seine Augen daran gewöhnt haben, kehrt er glücklich zu seinen Gefährten zurück und verkündet ihnen, was er erblickt hat. Sie wollen ihm nicht glauben. Wir alle sind in einer Höhle gefangen, liegen in den Ketten unserer Unwissenheit, Vorurteile und unzulänglichen Sinne, die uns nur Schatten zeigen. Zu versuchen, in größere Ferne zu blicken, stürzt uns häufig in Verwirrung: Wir sind dies nicht gewohnt. Dennoch versuchen wir es. So funktioniert Wissenschaft. Wissenschaftliches Denken erkundet die Welt, gestaltet sie neu und bietet uns ein immer wirklichkeitsnäheres Bild von ihr: Es lehrt uns, sie in tauglicheren Begriffen zu denken. Wissenschaft ist die ständige Erkundung von Denkschemata. Sie bezieht ihre Kraft und ihre Visionen aus der Fähigkeit, althergebrachte Denkgebäude zum Einsturz zu bringen, neue Wirklichkeitsfelder zu erschließen und neue, tauglichere Weltbilder zu entwickeln. Auch wenn sich dieses Abenteuer auf das gesamte bislang angehäuften Wissen stützt, besteht sein Kern im Wandel. Weiter hinauszublicken in eine uferlose und schillernde Welt. Umfängen von ihrem Mysterium und ihrer Schönheit, wollen wir ausziehen,

sie zu erkunden. Hinter dem nächsten Berg harren unerforschte Gefilde ihrer Entdeckung. Die Ungewissheit um uns, die Unsicherheit, mit der wir in die unermesslichen Tiefen unseres Nichtwissens blicken, macht das Leben keineswegs sinnlos, sondern kostbar.

Ich habe dieses Buch verfasst, um zu schildern, was für mich das wunderbare Abenteuer der Wissenschaft ausmacht. Es richtet sich an Leser, die von Physik keine Ahnung haben, aber neugierig sind, was wir heute vom Grundgewebe der Welt wissen oder nicht wissen und wo wir nach ihm suchen. Und um etwas über den atemberaubend schönen Ausblick auf die sichtbare Realität mitzuteilen, der sich von diesem Standpunkt aus bietet.

Im Sinn habe ich dabei auch die Kollegen, Weggefährten auf der ganzen Welt, und junge Wissenschaftsbegeisterte, die diesen Weg beschreiten wollen. Ich habe versucht, die allgemeine Übersicht über den Aufbau der physikalischen Welt im doppelten Licht der Relativität und der Quanten so zu beleuchten, dass sich meiner Überzeugung nach ein zusammenhängendes Bild ergibt. Dies ist nicht nur ein allgemeinverständliches Buch, sondern auch eines, das einen kohärenten Standpunkt auf einem Forschungsgebiet darlegen will, auf dem das große Ganze hinter der abstrakten Fachsprache zuweilen aus dem Blick zu geraten droht. Auch wenn zur Wissenschaft Experimente, Hypothesen, Gleichungen, Berechnungen und lange Diskussionen gehören – sie sind doch nur Instrumente: so wie jene der Musiker. Wie in der Musik am Ende nur die Musik zählt, so zählt auch in der Wissenschaft am Ende nur das Weltverständnis, das sie vermitteln kann. Um die Bedeutung der Entdeckung zu erkennen, dass die Erde um die Sonne kreist, braucht es keine tiefe Einarbeitung in die komplizierten Berechnungen des Kopernikus. Um nachzuvollziehen, wie wichtig die Entdeckung ist, dass alle Lebewesen auf unserem Planeten von gemeinsamen Vorfahren abstammen, kommt man ohne die komplexen Argumentationen aus, die Darwin in seinem Buch niedergelegt hat. Wissenschaft besteht darin, die Welt aus einem sich ständig erweiternden Blickwinkel heraus zu deuten.

In diesem Buch stelle ich den gegenwärtigen Forschungsstand zu diesem neuen Bild der Welt vor, wie ich sie derzeit verstehe, und versuche, die wesentlichen Probleme und logischen Verbindungen in dieser

Forschung herauszuarbeiten. So wie man es einem Kollegen und Freund gegenüber tun würde, wenn er einen während eines langen nächtlichen Spaziergangs am Meer fragt: «Und was meinst du, wie sind die Dinge wirklich?»

# Erster Teil

## Wurzeln

Diese Erzählung beginnt in der kleinasiatischen Stadt Milet vor sechs- und zwanzig Jahrhunderten. Wieso fängt ein Buch zur Quantengravitation mit Ereignissen, Personen und Gedanken aus einer Zeit an, die so lange zurückliegt? Der Leser, der rasch zu den Raumquanten vordringen möchte, möge es mir verzeihen. Konzepte sind stets leichter nachzuvollziehen, wenn man sich mit ihren Ursprüngen auseinandersetzt. Und diese reichen bei einem bedeutenden Teil der Ideen, die sich als nützlich erwiesen, um die Welt zu verstehen, weit über zwanzig Jahrhunderte zurück. Wenn wir kurz rekapitulieren, wie diese entstanden, verstehen wir die nachfolgende Entwicklung besser und können sie einfacher und logischer darlegen.

Mehr noch: Einige der Probleme, die in dieser frühen Zeit aufgeworfen wurden, sind für das Verständnis der Welt noch heute von zentraler Bedeutung. Einige neuere Konzepte zur Struktur des Raumes speisen sich aus damals eingeführten Vorstellungen und Problemen. Indem ich über dieses antike Gedankengut spreche, bringe ich sofort einige Grundfragen aufs Tapet, die entscheidend sein werden, wenn man die Grundlagen der Quantengravitation verstehen will. Wir sind dann in der Lage, zwischen solchen Ideen zu unterscheiden, die, wenn auch wenig bekannt, auf die Ursprünge des wissenschaftlichen Denkens zurückgehen, und anderen, die ihnen radikal neue Aspekte abgewinnen. Wie wir sehen werden, besteht zwischen den Problemen, die von antiken Naturphilosophen formuliert wurden, und den Lösungen, mit denen Einstein und die Quantengravitation aufwarteten, eine enge Beziehung.

## 1. Körnchen

Die Überlieferung sagt, dass im Jahr 450 v. Chr. in Milet ein Mann an Bord eines Schiffes mit dem Ziel Abdera ging – es wurde der Beginn einer Reise von grundlegender Bedeutung für die Wissenschaftsgeschichte (Abbildung 1.1).

Wahrscheinlich floh er vor politischen Wirren in dieser Stadt, in der die Aristokratie gerade dabei war, gewaltsam die Macht zurückzuerobern. In seiner Blütezeit war Milet eine reiche griechische Stadt gewesen, wenn nicht sogar die wichtigste in der hellenischen Welt vor dem Goldenen Zeitalter Athens und Spartas. Als quirliges Handelszentrum hatte es über ein Netz aus fast hundert Kolonien und Handelsstützpunkten geherrscht, die sich vom Schwarzen Meer bis nach Ägypten erstreckten. In Milet trafen Karawanen aus Mesopotamien und Schiffe aus dem halben Mittelmeerraum ein. Und neue Ideen waren im Umlauf.

In jener Zeit, dem Jahrhundert vor unserem Reisenden, hatte sich in Milet eine geistige Revolution vollzogen, die für die Menschheit von fundamentaler Bedeutung war. Ein Kreis von Philosophen hatte einen neuen Ansatz begründet, sich Fragen über die Welt zu stellen und nach Antworten zu suchen. Der bedeutendste von ihnen war Anaximander (um 610 – 547 v. Chr.).

Schon immer, zumindest seitdem es schriftliche Aufzeichnungen gibt, haben sich die Menschen gefragt, wie die Welt entstanden ist, woraus sie besteht, wie sie aufgebaut ist und wie die Naturphänomene entstanden. Seit Jahrtausenden hatten sie sich bis dahin immer recht ähnliche Antworten gegeben: Sie verwiesen auf Erzählungen mit verschlungenen Handlungssträngen, in denen Geister, Götter und Fabelwesen auftraten. Von den Tontafeln, die eine Keilschrift trugen, bis zu den antiken chinesischen Schriften, von den Hieroglyphentexten in den altägyptischen Pyramiden bis zu den Mythen der Sioux-Indianer, von den altindischen Werken bis zur Bibel und von den afrikanischen Erzählungen bis zu den Legenden der australischen Aborigines: Stets ist es ein buntes – aber im Grunde kaum sachdienliches – Defilee von gefiederten Schlangen oder großen Rindern, jähzornigen, streitsüchtigen oder freundlich gesinnten Göttern, welche die Welt erschufen, indem sie in

Abgründe bliesen, *Fiat lux* sagten oder einem steinernen Ei entschlüpfen.



Abbildung 1.1 Die Reise Leukipps von Milet, des Begründers der Atomisten-Schule (um 450 v. Chr.).

Zu Beginn des vierten Jahrhunderts v. Chr. entdecken dann Thales (um 624 – nach 547 v. Chr.), sein Schüler Anaximander, Hekataios (um 560 – 480 v. Chr.) und ihre Schule eine andere Art, nach Antworten zu suchen. Sie greifen nicht mehr auf Mythen, Geister und Götter zurück, sondern befragen die Dinge selbst nach ihrer Natur. Diese geistige Revolution begründet eine neue Art der Erkenntnisgewinnung und markiert den Anbeginn des wissenschaftlichen Denkens.

Die Philosophen von Milet erkennen, dass wir unsere Sichtweisen über die Welt ständig verbessern, Aspekte der Wirklichkeit, die dem gewöhnlichen Blick verborgen bleiben, entdecken und Neues lernen können, wenn wir scharf beobachten und unseren Verstand walten lassen, anstatt Antworten auf ungelöste Fragen in der Phantasie, in alten Mythen oder der Religion zu suchen. Sie setzen vor allem auf das kritische Denken.

Die wohl entscheidende Entdeckung ist ein neuer Ansatz, der den Schüler nicht mehr allein darauf festlegt, die Anschauungen seines Leh-

rers zu respektieren und ihnen zu folgen. Jetzt kann er sie vielmehr als Grundlage zur Weiterentwicklung nutzen und als verbesserungswürdig erachtete Teile ohne Scheu kritisieren und aussortieren. Dieser dritte Weg, der die Zugehörigkeit zu einer Schule und die Kritik an ihr in eine Balance bringt, macht die Bahn frei für die nachfolgende gewaltige Entwicklung im philosophischen und wissenschaftlichen Denken: Fortan erlebt die Menschheit einen rasanten Wissenszuwachs, gespeist aus den überlieferten Kenntnissen, die durch die Möglichkeit zur Kritik stets verbessert werden. Die glanzvollen Worte, die Hekataios seinem Geschichtsbuch voranstellt, erfassen den Kern des kritischen Denkens, einschließlich eines Bewusstseins für die eigene Fehlbarkeit: «Dies schreibe ich, wie es mir wahr erscheint; denn die Erzählungen der Griechen sind widersprüchlich und muten mich lächerlich an.»

Hekataios schenkt der Sage von Herakles, der am Tainaron in den Hades hinabgestiegen sei, keinen Glauben. Er reist zu dem Kap, vergewissert sich, dass es dort weder einen unterirdischen Gang noch einen Einstieg zur Unterwelt gibt, und beurteilt den Inhalt der Sage folglich als falsch. Das ist der Beginn einer neuen Ära.

Dieser neue Ansatz, Wissen zu erwerben, führt zu beeindruckenden Erfolgen. Binnen weniger Jahre gewinnt Anaximander eine Vielzahl von Erkenntnissen: Die Erde schwebt in einem Himmel, der sich auch unter ihr fortsetzt. Regen ist Wasser, das an der Erdoberfläche verdunstet ist. Die vielfältigen Substanzen der Welt müssen so verstanden werden, dass sie sich aus einem einzigen Grundelement zusammensetzen, welches er das *Apeiron* (ἄπειρον), das Unbestimmte, nennt. Pflanzen- und Tierarten entwickeln sich weiter und passen sich an eine veränderliche Umwelt an. Der Mensch muss aus anderen Tieren hervorgegangen sein und so weiter. Mit alldem legt Anaximander die Fundamente zu einem Weltverständnis, das bis in unsere Zeit hinein ausstrahlt.

An der Schnittstelle zwischen der aufstrebenden griechischen Zivilisation und den antiken Reichen Mesopotamiens und Ägyptens nährt sich Milet von deren Wissen, lebt aber in der Freiheit und politischen Veränderlichkeit, wie sie für die griechische Welt typisch sind: In seinem sozialen Gefüge gibt es weder Kaiserpaläste noch eine mächtige Priesterkaste, sondern Bürger, die im öffentlichen Raum über ihre Ge-

schicke debattieren. Hier diskutieren Menschen erstmals kollektiv über die eigenen Gesetze, tritt – im *Panionion*, dem Zentralheiligtum und Versammlungsort der Abgesandten des Ionischen Bundes – das erste Parlament der Geschichte zusammen und ziehen die Menschen erstmals den Gedanken in Zweifel, dass die unergründlichen Dinge der Welt nur mit der Existenz von Göttern erklärlich seien. Diskussionen führen zu den besten Entscheidungen für die Gemeinschaft. Und mit Diskussionen kann man auch zu einem Verständnis der Welt gelangen. Dies ist das gewaltige Erbe von Milet, der Wiege der Philosophie, der Naturwissenschaften und der geographischen wie historischen Studien. Ohne Übertreibung lässt sich sagen, dass die gesamte abendländische und später moderne wissenschaftliche und philosophische Tradition des Mittelmeerraumes maßgeblich von den Spekulationen der Denker Milets aus dem fünften vorchristlichen Jahrhundert herrührt.<sup>1</sup>

Dieses glanzvolle Milet fand alsbald ein schreckliches Ende. Nach seiner Unterwerfung unter das Perserreich und einem gescheiterten Aufstand fiel es 494 v. Chr. der Zerstörung anheim. Ein Großteil seiner Einwohner landete in der Sklaverei. In Athen verfasste der Dichter Phrynichos die Tragödie *Die Eroberung Milets*, die die Athener so tief bewegte, dass ihre Aufführung am Ende verboten wurde, weil sie dem Publikum zu große seelische Schmerzen zumutete. Doch zwanzig Jahre später drängten die Griechen die persische Bedrohung zurück. Milet erlebte eine Auferstehung, wurde erneut besiedelt und entwickelte sich wieder zu einem wirtschaftlichen und geistigen Zentrum, dessen Denken weithin ausstrahlte.

Der Geist dieser Stadt muss auch jenen Mann erfüllt haben, mit dem dieses Kapitel begonnen hat und der sich der Überlieferung nach 450 v. Chr. von Milet nach Abdera einschiffte: Er hieß Leukipp. Über sein Leben ist wenig bekannt.<sup>2</sup> Er soll die Schrift *Das große Weltsystem* verfasst

---

1 Zum wissenschaftlichen Denken Milets und insbesondere Anaximanders siehe C. Rovelli, *Che cos'è la scienza. La rivoluzione di Anassimandro*, Mailand 2012.

2 Dass Leukipp aus Milet stammen soll, ist beispielsweise durch Simplicios überliefert (siehe M. Andolfo, *Atomisti antichi. Frammenti e testimonianze*, Mailand 1999, S. 103). Diese Herkunft ist allerdings ungewiss. Als Alternative kommt nach antiken Autoren auch Elea in Frage. Mit Blick auf die kulturellen Wurzeln von Leukipps Denken wird bezeich-

haben. Nach seiner Ankunft in Abdera gründete er eine naturphilosophisch ausgerichtete Schule, der sich bald ein junger Schüler anschloss, in dessen Schatten das gesamte Denken der nachfolgenden Zeiten liegen sollte: Demokrit (Abbildung 1.2).

Die Gedanken beider Männer sind kaum auseinanderzuhalten. Ihre Originalschriften sind verschollen. Leukipp war der Lehrer, Demokrit der große Schüler. Letzterer verfasste zu allen Wissensgebieten zahlreiche Texte und genoss in der Antike, in der seine Schriften bekannt waren, hohes Ansehen. Er galt als Großer unter den Gelehrten. Den «feinsinnigsten aller Alten» nannte ihn Seneca.<sup>3</sup> «Was soll ich ferner von Demokrit sagen? Wen könnten wir mit ihm vergleichen, nicht nur hinsichtlich der Größe seiner Begabung, sondern auch seiner Denkweise?», fragte Cicero.<sup>4</sup> Demokrit errichtete den gewaltigen Tempelbau der antiken Atomlehre.

---

nenderweise auf Milet und Elea verwiesen. Zum Einfluss Zenons von Elea auf Leukipp siehe die nachfolgenden Seiten.

3 Seneca, *Naturales quaestiones*, VII 3, 2d.

4 Cicero, *Academica priora*, ii, 23, 73., Marcus Tullius Cicero, *Akademische Abhandlungen Lucullus: lateinisch – deutsch*, Text und Übers. von Christoph Schäublin. Einl. von Andreas Graeser und Christoph Schäublin. Anm. von Andreas Bächli und Andreas Graeser, Hamburg 1995, S. 95.



Abbildung 1.2 Demokrit von Abdera (459/460 – ca. 371 v. Chr.).

Was also hatten Leukipp und Demokrit entdeckt? Die Milesier hatten begriffen, dass man die Welt mit den Kräften des Verstandes erkennen kann. Sie waren zu der Überzeugung gelangt, dass sich die vielfältigen Naturphänomene auf ein einfaches Prinzip zurückführen ließen, und hatten diesem auf die Spur zu kommen versucht. Sie stellten sich eine Art Grundsubstanz vor, aus der sich alles Seiende in der Welt zusammensetzte. In Milet hatte Anaximander einen Grundstoff konzipiert, der sich zusammenballen und verflüchtigen und so von einem Element der Welt in ein anderes übergehen konnte. Elementar und grob, stellte diese Annahme nur im Keim eine Physik dar, ging aber in die richtige Richtung. Sie bildete die Grundlage zu einer Idee, einem grandiosen Gedanken oder einer großen Vision, um der verborgenen Ordnung der Welt auf die Spur zu kommen. Diese Idee hatten Leukipp und Demokrit.

In Demokrits System stellt sich dieser Gedanke ganz schlicht dar: Das gesamte Universum besteht aus einem endlosen leeren Raum, in dem zahllose Atome unterwegs sind. Im Kosmos gibt es nichts anderes. Der Raum kennt kein Oben oder Unten und hat weder ein Zentrum noch eine Grenze. Die Atome haben keinerlei Eigenschaften außer ihrer Form. Sie haben weder Gewicht noch Farbe oder Geschmack: «Der Be-

stimmung zufolge gibt es Süßes, [...] Bitteres, [...] Warmes, [...] Kaltes, [...] Farbe; in Wirklichkeit aber nur Atome und Leere.»<sup>5</sup>

Die Atome sind unteilbar, sind die elementaren Körnchen der Realität, die sich nicht weiter zerteilen lassen und aus denen alles besteht. Sie bewegen sich frei im Raum, prallen aufeinander, verbinden sich untereinander, stoßen sich ab und ziehen sich wechselseitig an. Gleichartige Atome ziehen einander an und gehen Verbindungen ein.

So stellt sich die Struktur der Welt, die Realität dar. Alles Übrige ist nur ein abgeleitetes, beiläufiges und zufälliges Produkt der Bewegung und Kombination der Atome. Aus deren Zusammenstellung geht die unendliche Vielfalt aller Substanzen hervor, aus denen die Welt besteht.

Wenn sich Atome miteinander verbinden, zählt mit Blick auf ihr Sein auf elementarer Ebene nur ihre Form, ihre Anordnung in der Struktur und die Art ihrer Kombination. So, wie aus der unterschiedlichen Kombination der damals gut zwanzig Buchstaben des Alphabets Komödien oder Tragödien, spaßhafte Erzählungen oder große Epen entstehen, so geht aus dem Zusammengehen der elementaren Atome die Welt in ihrer endlosen Vielfalt hervor. Der Vergleich stammt von Demokrit.<sup>6</sup>

Im diesem gewaltigen Tanz der Atome gibt es weder eine Finalität noch einen Plan. Wie die übrige Welt sind wir demnach eines der vielen Ergebnisse dieses endlosen Reigens, das Produkt einer Zufallskombination. Die Natur experimentiert beständig mit Formen und Strukturen, während wir mit allem Getier das Ergebnis einer zufälligen Auswahl sind, die in schier endlosen Zeiträumen erfolgte. Unser Leben ist ein Zusammengehen von Atomen. Unser Denken besteht aus winzigen Atomen. Unsere Träume sind das Ergebnis von Atomen. Unsere Hoffnungen und Gefühle sind in der Buchstabensprache der Atome geschrieben. Das Licht, das wir sehen, besteht aus Atomen, die uns Bilder übermit-

---

5 Sextus Empiricus, *Adversus mathematicos*, VII, 135; dt.: *Gegen die Dogmatiker*, übers. von Hansueli Flückiger, 1. Aufl., Sankt Augustin 1998, S. 37.

6 Siehe Aristoteles, *De generatione et corruptione*, A1, 315b 6. (Dt.: *Über Werden und Vergehen*, *Griechisch-Deutsch*, Griech. Text nach Harold H. Joachim, Übers., mit einer Einl. und Anm. hg. v. Thomas Buchheim, Hamburg 2011.)

teln. Aus Atomen bestehen die Meere, die Städte und die Sterne. Auf dieser gewaltigen und unendlichen, unglaublich einfachen und kraftvollen Vorstellung sollte später das Wissen einer Zivilisation aufbauen.

Auf ihrer Grundlage errichtet Demokrit in Dutzenden von Schriften ein weitreichendes System, das Fragen der Physik, der Philosophie, der Ethik, der Politik und der Kosmologie behandelte. Er schreibt über die Natur der Sprache, über Religion, die Entstehung der menschlichen Gesellschaft und vieles mehr. (Der Einstieg in seine *Kleine Weltordnung* beeindruckt: «In diesem Werk behandle ich alles.») Alle seine Schriften sind verschollen. Was wir von seinem Denken kennen, verdanken wir den Hinweisen, Zitaten und Zusammenfassungen anderer antiker Autoren.<sup>7</sup> Sein Gedankengut stellt sich als ein tiefeschürfender rationalistischer und materialistischer Humanismus dar.<sup>8</sup> Demokrit verbindet ein umfassendes Interesse an der Natur, die er mit naturwissenschaftlicher Klarheit und ohne jedes Überbleibsel mythischen Denkens erklärt, mit einer ebenso großen Aufmerksamkeit für die Menschheit. Er behandelt die ethische Dimension des Lebens mit größtem Ernst und nimmt so um zweitausend Jahre das Beste der Aufklärung des achtzehnten Jahrhunderts vorweg. Demokrits ethisches Ideal ist das der Seelenruhe, die mit Maßhalten, Ausgleich und dem Vertrauen auf den Verstand erreicht wird, ohne sich von Leidenschaften hinreißen zu lassen.

Platon und Aristoteles, die mit Demokrit vertraut waren, bekämpften seine Ideen entschieden zugunsten von Anschauungen, die in den nachfolgenden Jahrhunderten dem Erkenntnisgewinn Steine in den Weg legten. Beide lehnten seine naturwissenschaftlichen Erklärungen nachdrücklich ab und versuchten die Welt stattdessen teleologisch zu begreifen, also in der Annahme, dass allem Geschehen ein Zweck zugrunde liegen müsse. Dabei brachten sie mit Blick auf Kategorien wie

---

7 Eine Sammlung von Fragmenten und antiken Zeugnissen zur Atomlehre siehe M. Andolfo, *Atomisti antichi*, a. a. O. Eine schöne vollständige Sammlung zu den Fragmenten Demokrits und Zeugnissen siehe Solomon Lur'e, *Demokrit: teksty, perevod, issledovanija*, Leningrad 1970.

8 Ein kurzer und interessanter neuerer Text zum Denken Demokrits, der den Humanismus ins Blickfeld rückt, siehe S. Martini, *Democrito: filosofo della natura o filosofo dell'uomo?*, Rom 2002.

das Gute und das Schlechte solche Fragen, die den Menschen betreffen, mit völlig andersgearteten durcheinander. Dieses Denken sollte sich für das Naturverständnis als ziemlich untauglich erweisen.

Während sich Aristoteles (384–322 v. Chr.) über Demokrits Gedanken ausgiebig und durchaus respektvoll äußert, führt Platon (428/7–348/7 v. Chr.) den Philosophen an keiner Stelle an, doch sind die heutigen Forscher der Ansicht, dass dies einer bewussten Entscheidung und keineswegs der Unkenntnis geschuldet war. Kritik an Demokrits Denken äußert Platon implizit in zahlreichen seiner Schriften, so durch seine Einwände gegen die «Physiker». In einer Passage des *Phaidon* legt er Sokrates einen pauschalen Vorwurf in den Mund, der seine Spuren hinterlassen sollte. Er habe sich, so sagt er, gegen die Behauptung der Physiker aufgelehnt, dass die Erde rund sei, weil er habe wissen wollen, was für die Erde das «Gute» sei, wie denn eine runde Gestalt ihrem Wohle nützen könne. Platons Sokrates berichtet, er habe sich für die Physik interessiert, sei aber enttäuscht worden:

[Anaxagoras werde] mir nun auch sagen [...], zuerst, ob die Erde flach ist oder kugelrund, und wenn er es mir gesagt, mir dann auch die Notwendigkeit der Sache und ihre Ursache dazu erklären [...], indem er auf das Bessere zurückginge und mir zeigte, dass es für sie besser wäre, so zu sein. Und wenn er behauptete, sie stände in der Mitte, werde er mir dabei erklären, dass es für sie besser wäre, in der Mitte zu stehn.<sup>9</sup>

Der große Platon, völlig auf dem Holzweg!

### **Gibt es eine Grenze der Teilbarkeit?**

Richard Feynman, der größte Physiker der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts, schrieb zu Beginn seiner wunderbaren einführenden Vorlesungen über Physik:

---

<sup>9</sup> Platon, *Phaidon*, nach der Übersetzung von Friedrich D. E. Schleiermacher, in: *Platons Werke*, zweiten Teiles dritter Band, 3. Aufl., Berlin 1861. Siehe auch unter <http://www.opera-platonis.de/Phaidon.pdf>.

Wenn in einer Sintflut alle wissenschaftlichen Kenntnisse vernichtet würden und nur ein Satz an die nächste Generation von Lebewesen weitergereicht werden könnte, welche Aussage würde die meisten Informationen in den wenigsten Wörtern enthalten? Ich bin davon überzeugt, dass es die *Atomhypothese* (oder welchen Namen sie auch immer hat) wäre, die besagt, dass alle Objekte aus Atomen aufgebaut sind [...]. In diesem Satz werden Sie mit ein wenig Fantasie und Nachdenken eine enorme Menge an Informationen über die Welt entdecken.<sup>10</sup>

Auch ohne die gesamte moderne Physik im Hintergrund war Demokrit auf die Idee gekommen, dass alles aus Atomen bestehe. Woher hatte er diese Eingebung?

Demokrit gründete seine Argumente auf Beobachtung: So erkannte er beispielsweise (richtig), dass ein Rad deshalb verschleißt, weil von ihm winzige Teilchen Holz abgerieben werden, oder dass nasse Wäsche an der Leine trocknet, weil sich das Wasser in einzelnen Teilchen langsam verflüchtigt. Entscheidend waren auch philosophische Argumente, die wir hier kurz beleuchten, weil sie so kraftvoll sind, dass sie bis in die Quantengravitation hineinwirken.

Demokrit bemerkt, dass die Materie kein kontinuierliches Ganzes sein kann, da der gegenteilige Fall einen Widerspruch beinhalten würde. Aristoteles hat uns seine Argumentation überliefert.<sup>11</sup> Stellt euch vor, so sagt Demokrit, die Materie sei unendlich teilbar, könne also endlose Male weiter zerstückelt werden. Was würde geschehen, wenn wir ein solches Teilchen tatsächlich unendliche Male zerteilten? Was bliebe von ihm übrig?

Erhielten wir Teilchen mit einer Ausdehnung? Nein, denn sonst wäre das Materieteilchen ja nicht endlose Male zerteilt worden. Folglich behielten wir nur *Punkte* ohne jede Ausdehnung. Versuchen wir nun

---

**10** R. Feynman, *Feynman-Vorlesungen über Physik*, Bd. 1, Berlin und Boston 2015, S. 3.

**11** Siehe Aristoteles, *De generatione et corruptione*, a. a. O., A2, 316a. (Dt.: *Über Werden und Vergehen*, Griechisch-Deutsch, Griech. Text nach Harold H. Joachim, Übers., mit einer Einl. und Anm. hg. von Thomas Buchheim, Hamburg 2011.)

in Gedanken, das Stück Materie aus seinen einzelnen Punkten wieder zusammenzusetzen: Fügt man zwei Punkte ohne Ausdehnung zusammen, ergibt sich daraus nichts, was eine Ausdehnung hätte, so wenig wie aus drei oder vier zusammengefühten Punkten. Ganz gleich, wie viele Punkte man zusammensetzt, das Ergebnis hat niemals eine Ausdehnung, da Punkte keine Ausdehnung haben. Folglich kann Materie unmöglich aus solchen Punkten bestehen, denn unabhängig davon, wie viele man von diesen zusammenfügt, würde man niemals zu einer Ausdehnung gelangen. Als einzige Möglichkeit, so schließt Demokrit, müsse jedes Stück Materie aus einer *endlichen* Anzahl diskreter, unteilbarer Teilchen bestehen, die jeweils eine *endliche* Ausdehnung aufwiesen: aus Atomen.

Dieser scharfsinnige Argumentationsstil geht auf eine Zeit vor Demokrit zurück. Er stammt aus der süditalienischen Region Cilento, aus dem Städtchen Velia, das im fünften Jahrhundert v. Chr. eine blühende griechische Siedlung war und Elea hieß. Hier hatte der Philosoph Parmenides gelebt, der den Rationalismus Milets und den dort entwickelten grandiosen Gedanken, nach dem uns der Verstand beweist, dass Dinge anders sein können, als sie uns erscheinen, ganz wörtlich oder vielleicht sogar allzu wörtlich genommen hatte. Parmenides erkundete einen Weg, um allein mit dem Verstand zur Wahrheit zu gelangen, und behauptete am Ende, dass jedwede Erscheinung Täuschung sei. Der damit eröffnete Weg sollte zur Metaphysik und immer weiter weg von dem führen, was man später «Naturwissenschaft» nennen würde.

Sein Schüler Zenon, auch er aus Elea, stützte diesen fundamentalen Rationalismus, der die Glaubwürdigkeit der Erscheinungen radikal leugnet, und zwar mit spitzfindigen Argumenten. Dass jede Erscheinung Täuschung sei, versuchte er mit einer Reihe von Paradoxa nachzuweisen, denen zufolge die landläufige Vorstellung von Bewegung absurd sei.<sup>12</sup>

Sein bekanntestes Paradoxon präsentiert Zenon in Form eines Märchens: Eine Schildkröte stellt sich einem Wettlauf mit Achilles, von dem

---

12 Ein schöner neuerer Text zu Zenons Paradoxa und deren philosophische und mathematische Bedeutung siehe V. Fano, *I paradossi di Zenone*, Rom 2012.

sie einen Vorsprung von zehn Metern erhält. Wird Achilles die Schildkröte einholen? Zenon argumentiert streng logisch, dass Achilles scheitern muss. Ehe er die Schildkröte einholt, muss er zehn Meter zurücklegen, für die er eine gewisse Zeit benötigt. In dieser Zeit kommt die Schildkröte einige Dezimeter weiter voran. Um auch diese zurückzulegen, braucht Achilles erneut Zeit, in der die Schildkröte wieder weiter vorankommt. Und so geht es endlos weiter. Achilles benötigt folglich eine *unendliche Anzahl an Zeiträumen*, um die Schildkröte einzuholen, und diese, so die Argumentation, ergäben zusammen einen *unendlichen Zeitraum*. Sein logischer Schluss lautet folglich, dass Achilles die Schildkröte erst nach unendlich langer Zeit, also niemals, einholen werde. Da wir aber doch sehen könnten, wie Achilles jede beliebige Schildkröte einholt, folge daraus, dass das, was unsere Augen uns zeigen, dem Verstand widerspreche, also Täuschung sei.

Seien wir ehrlich: Diese Argumentation überzeugt nicht wirklich. Wo liegt der Fehler? Eine mögliche Antwort lautet: Zenon irrt darin, dass die Summe einer endlosen Anzahl von Dingen etwas Endloses ergibt. Man denke an eine Schnur, die man in der Mitte durchschneidet, die beiden Hälften ebenfalls in der Mitte durchtrennt und diesen Vorgang endlose Male wiederholt. Am Ende erhält man eine endlose Anzahl von Stücken, die immer kürzer geworden sind, in der Summe aber eine endliche Länge ergeben, die ja jener der ursprünglichen Schnur entspricht. Eine endlose Anzahl von Zeitabschnitten kann folglich durchaus einen endlichen Zeitraum ergeben. Auch wenn der Held eine unendliche Anzahl immer kürzerer Wegstrecken zurücklegen muss, für die er jeweils eine endliche Zeit benötigt, holt er die Schildkröte am Ende doch in endlicher Zeit ein.<sup>13</sup>

---

13 Mathematisch gesprochen, gibt es konvergente unendliche Reihen oder «Summenfolgen». Die des Beispiels der Schnur ist  $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n}$ , die gegen 1 konvergiert. Zu Zenons Zeit wurden unendliche Summenfolgen noch nicht verstanden. Aber später nutzte sie Archimedes dazu, Flächeninhalte zu berechnen. Newton setzte sie ebenfalls ein. Dennoch sollte das mathematische Konzept erst im neunzehnten Jahrhundert durch Bolzano und Weierstraß umfassend aufgeklärt werden. Aber schon Aristoteles deutete mit seiner Antwort auf Zenon in diese Richtung. Seine Unterscheidung zwischen dem aktualen und dem poten-

Das scheinbare Paradox scheint gelöst. Die Lösung liegt im Begriff des Kontinuums, also im Gedanken, dass es beliebig kleine Zeiträume geben kann, die sich trotz ihrer unendlichen Anzahl zu einer begrenzten Zeit aufaddieren. Als erster erkannte Aristoteles diese Möglichkeit, die von der modernen Mathematik im Einzelnen ausgeführt wird.

Aber ist diese Lösung in der *realen* Welt wirklich die richtige? Gibt es tatsächlich beliebig kurze Stücke Schnur? Können wir ein Seil wirklich *beliebig oft* zerschneiden? Gibt es wahrhaftig unendlich kleine Räume? Mit diesem Problem wird sich die Quantengravitation befassen müssen.

Der antiken Überlieferung zufolge hatte Zenon Leukipp zu seinem Schüler gemacht. Folglich kannte Leukipp dessen Rätsel, dachte sich zu seiner Lösung aber einen *anderen* Weg aus. Vielleicht, so legte er nahe, existierte gar nichts beliebig Kleines: Vielleicht hatte ja die Teilbarkeit eine Untergrenze.

Das Universum besteht demnach aus Körnchen und ist kein Kontinuum. Mit unendlich kleinen Teilchen ließe sich niemals eine Ausdehnung erzeugen (entsprechend dem oben ausgeführten Argument Demokrits, das Aristoteles überliefert hat). Die Länge der Schnur muss sich aus einer *endlichen* Anzahl aus Stücken mit *endlicher* Länge zusammensetzen. Eine Schnur lässt sich nicht endlose Male unterteilen. Materie ist nicht kontinuierlich aufgebaut. Sie besteht vielmehr aus einzelnen Atomen von endlicher Größe.

Ob richtig oder falsch, dieses theoretische Argument hat jedenfalls zu einer Schlussfolgerung geführt, von der wir heute wissen, dass sie viel Richtiges enthält. Die Materie ist tatsächlich aus Atomen aufgebaut. Wenn ich einen Wassertropfen in zwei Teile zerlege, erhalte ich zwei Wassertropfen, die sich ebenfalls teilen lassen, und so weiter. Aber dies geht nicht endlos. Irgendwann ist nur noch ein Molekül übrig. Es gibt keinen Wassertropfen, der kleiner als ein Wassermolekül ist.

Woher wissen wir das heute? Weil sich entsprechende Hinweise darauf über die Jahrhunderte verdichtet haben. Viele kamen aus der Chemie. Alle chemischen Substanzen setzen sich aus Kombinationen weniger Elemente zusammen und bestehen aus (Gewichts-)Anteilen, de-

---

ziellen Unendlichen enthält bereits die Unterscheidung zwischen einer fehlenden Grenze der Teilbarkeit und der Möglichkeit, dass etwas schon unendlich viele Male geteilt wurde.

ren Verhältnis sich als ganze Zahlen ausdrücken lässt. Die Chemiker schufen ein Modell, wonach Reinstoffe aus einer festen Kombination aus Atomen bestehen. So setzt sich Wasser –  $H_2O$  – beispielsweise aus zwei Teilen Wasserstoff und einem Teil Sauerstoff zusammen.

Aber dies sind nur Indizien. Noch zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts hielten viele Wissenschaftler und Philosophen die Atomhypothese für Unfug, darunter der bedeutende Physiker und Philosoph Ernst Mach, dessen Konzepte zum Raum für Einstein höchste Bedeutung erhalten sollten. Als Ludwig Boltzmann einen Vortrag in der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien beendet hatte, verkündete Mach öffentlich: «Ich glaube nicht, dass die Atome existieren!» Und dies im Jahr 1897. Wie Mach glaubten damals viele, dass die Notation der Chemiker nur eine Konvention sei, um Regeln für chemische Reaktionen zusammenzufassen. Wassermoleküle, die sich aus zwei Atomen Wasserstoff und einem Atom Sauerstoff zusammensetzten, existierten demnach nicht *wirklich*. Atome sehe man nicht, so sagten sie, und werde sie auch niemals sehen. Wie groß soll so ein Atom denn sein?, fragten sie. Demokrit hatte die Größe seiner Atome ja nie messen können ...

Die sogenannte «Atomhypothese», nach der sich Materie aus kleinsten Teilchen zusammensetzt, wurde erst 1905 endgültig bewiesen. Dass Leukipps und Demokrits Annahme richtig war, zeigte am Ende ein rebellischer und rastloser Fünfundzwanzigjähriger, der Physik studiert, aber an der Universität keine Anstellung gefunden hatte und sich deswegen als Angestellter im Patentamt in Bern durchschlug. Von ihm wird in diesem Buch ausführlich die Rede sein – und von den drei Artikeln, die er 1905 bei den *Annalen der Physik* einreichte, der damals angesehensten Fachzeitschrift auf dem Gebiet. Der erste enthält den endgültigen Beweis, dass Atome existieren, mitsamt einer Berechnung ihrer Größe. Damit war das Problem, das Leukipp und Demokrit dreiundzwanzig Jahrhunderte zuvor aufgeworfen hatten, definitiv gelöst.

Natürlich ist dieser junge Mann Albert Einstein (Abbildung 1.3).



Abbildung 1.3 Albert Einstein (1879–1955)

Wie schafft er das? Seine Idee ist unglaublich einfach. Seit Demokrits Zeiten hätte jeder darauf kommen können, der über Einsteins Scharfsinn und genügend mathematische Kenntnisse verfügte, um die etwas knifflige Berechnung durchzuführen. Die Idee ist folgende: Wenn wir sehr kleine Teilchen wie Staub- oder Pollenkörnchen, die in der Luft oder einer Flüssigkeit schweben, aufmerksam beobachten, stellen wir fest, dass sie eine zuckende Bewegung ausführen, sich langsam in einem Zickzack von ihrer ursprünglichen Position wegbewegen. Dieses Verhalten wurde «Brown'sche Bewegung» genannt – nach Robert Brown (1773–1858), einem Botaniker, der sie im neunzehnten Jahrhundert für Teilchen in einer Flüssigkeit sorgfältig beschrieben hatte. Ein typischer Ablauf ist in Abbildung 1.4 dargestellt. Es ist, als ob das Körnchen von verschiedenen Seiten nach dem Zufallsprinzip irgendwelche Stöße erhalte. Und nicht nur «als ob». Es ist tatsächlich so. Die Teilchen zucken, weil sie bald von der einen, bald von der anderen Seite her von einzelnen Luftmolekülen angestoßen werden.

Die scharfsinnige Überlegung ist folgende: Luftmoleküle sind in einer ungeheuren Anzahl vorhanden und stoßen das Körnchen *im Durchschnitt* von den verschiedenen Seiten gleich häufig an. Wären Moleküle

unendlich klein und unendlich zahlreich, müssten sich ihre Stöße von verschiedenen Seiten zu jedem Zeitpunkt exakt ausgleichen. Dann bliebe das Körnchen regungslos auf der Stelle stehen. Aber die endliche Kleinheit der Moleküle, die Tatsache, dass sie in nur endlicher Anzahl vorhanden sind, sorgt für *Fluktuationen* (der Schlüsselbegriff): Die Stöße gleichen sich nie zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern immer nur *im Durchschnitt* exakt aus. Man stelle sich kurz vor, dass Moleküle in geringer Anzahl und in ausreichender Größe vorhanden wären: In diesem Fall erhielte das Körnchen eindeutig nur dann und wann, bald von der einen, bald von der anderen Seite, einen Anstoß und bewegte sich wie ein Ball, der von Jungs auf einem Fußballfeld gekickt wird, erkennbar in die eine oder andere Richtung. Je kleiner die Moleküle sind, desto stärker gleichen sich ihre Stöße in einem bestimmten Zeitraum aus. Und desto weniger bewegt sich das Körnchen.

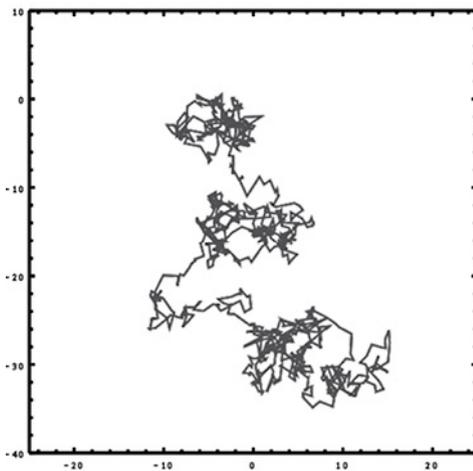


Abbildung 1.4 Typische Brown'sche Bewegung.

Mit ein wenig Mathematik ist es folglich möglich, anhand der Heftigkeit der Bewegung des beobachtbaren Körnchens die Größe der Moleküle zu errechnen. Einstein hat dies im Alter von fünfundzwanzig Jahren vollbracht. Anhand von Beobachtungen zur Abdrift der Körnchen

in Flüssigkeiten, dem Maß, in dem diese «abtreiben», errechnete er die Größe von Demokrits Atomen, den Elementarteilchen, aus denen die Materie besteht. Damit lieferte er nach zweitausenddreihundert Jahren den endgültigen Beweis dafür, dass die wichtigste Eingebung Demokrits richtig war: Materie ist gekörnt.

## Die Natur der Dinge

Carmina sublimis tunc sunt peritura Lucreti,  
exitio terras cum dabit una dies.  
Ovid, Amores<sup>14</sup>

Ich denke oft, dass der Verlust von Demokrits gesamtem Werk<sup>15</sup> in der Geistesgeschichte die größte Tragödie war, die der Untergang der an-

---

14 «Die Verse des erhabenen Lukrez / sterben erst an jenem Tag, an dem die gesamte Erde untergeht» (I,15, 23 f.).

15 Diogenes Laertios hat einige der Titel von Demokrits Werken überliefert: *Große Weltordnung; Kleine Weltordnung; Kosmographie; Über die Planeten; Über die Natur I, Über die Natur des Menschen, Über den Geist; Über die Sinne; Über die Seele; Über die Geschmacksarten; Über Farben; Über verschiedene Gestaltungen; Über Gestaltenwechsel; Astronomische Erklärungen; Atmosphärische Erklärungen; Erklärungen über Feuer und Feuersubstanz; Akustische Erklärungen; Erklärungen zu Samen, Pflanzen und Früchten; Zoologische Erklärungen III; Verschiedene Erklärungen; Uranographie; Geographie; Polbeschreibung; Über die unterschiedliche Auffassung der Tangente des Kreises und der Kugel; Über Geometrie; Geometrische Probleme; Zahlen; Über inkommensurable Linien und Körper II; Projektionen; Das große Jahr oder Astronomie; Strahlendarstellung; Über Abbilder; Über Rhythmus und Harmonie; Über Poetik; Über epische Schönheit; Über wohlklingende und misstönende Buchstaben; Über Homer oder Sprachrichtigkeit und eigentümliche Ausdrücke; Über Gesang, Über Verben, Über Benennungen; Über Tapferkeit oder über Tugend; Über die Disposition des Weisen, Prognostik, Über Diät und Diätetik; Ärztliche Diagnose, Über Landwirtschaft oder Landarbeiten; Über Malerei; Zur Taktik; Zum Waffengebrauch; Über die heiligen Schriften in Babylon; Über die heiligen Schriften in Meroe; Küstenbeschreibung des Ozeans; Über Geschichtsforschung; Traktat über die Chaldäer; Traktat über die Phryger; Über Fieber und Husten; Rechtsgründe; Handwerkliche Fragen; Das Horn der Amaltheia, über Gemütsheiterkeit; Ethische Auf-*

tiken Zivilisation mit sich brachte. Man lese nur die Liste von Demokrits Schriften, die in der vorangegangenen Fußnote aufgeführt sind. Die Vorstellung, welch breitgefächertes antikes Gedankengut da verloren ging, muss einen erschüttern. Leider ist uns von Aristoteles, auf den sich später das abendländische Denken gründete, alles und von Demokrit nichts erhalten geblieben. Im umgekehrten Fall hätte die Geistesgeschichte unserer Kultur wohl einen besseren Verlauf genommen.

Dagegen sorgten Jahrhunderte der Vorherrschaft eines monotheistischen Einheitsdenkens dafür, dass sich das rationalistische und materialistische naturphilosophische Denken Demokrits nicht halten konnte. Die Edikte von Theodosius 390/391, die das Christentum zur einzigen und verpflichtenden Religion des Reichs erklärten, lösten schonungslose antiheidnische Unterdrückungsmaßnahmen aus: Die Schulen der antiken Philosophie wurden flächendeckend geschlossen. Sämtliche Schriften, die mit dem christlichen Denken unvereinbar erschienen, wurden vernichtet. Platon und Aristoteles, Heiden, die aber ebenfalls an die Unsterblichkeit der Seele glaubten, blieben zwar verschont, Demokrit aber fiel dem Siegeszug des Christentums zum Opfer.

Eine Schrift entging allerdings der Katastrophe und ist uns vollständig überliefert. Ihr verdanken wir es, dass wir mit der antiken Atomlehre und vor allem mit dem Geist dieser Wissenschaft ein wenig vertraut sind: dem glanzvollen Lehrgedicht *Über die Natur der Dinge* (*De rerum natura*) des lateinischen Dichters Lukrez.

Lukrez war Anhänger der Philosophie Epikurs, des Schülers eines Schülers von Demokrit. Epikur interessierte sich mehr für ethische als für naturwissenschaftliche Fragen. Ihm fehlte der gedankliche Tiefgang Demokrits, dessen Atomlehre er an einigen Stellen oberflächlich vermittelt. Aber seine Sicht von der natürlichen Welt deckte sich im Kern mit der des großen Philosophen aus Abdera. Lukrez gießt Epikurs Denken und damit Demokrits Atomlehre in Verse und rettet so einen Teil dieser tief sinnigen Gedanken vor der geistigen Katastrophe der finsternen Jahrhunderte.

---

zeichnungen; Wohlbefinden. Alle diese Schriften sind verschollen ... Siehe hierzu Diogenes Laertios, *Leben und Lehre der Philosophen*, aus dem Griech. übers. und hg. v. Fritz Jüriß, Stuttgart 2010, S. 427 f.

Lukrez besingt die Atome, das Meer, die Natur und den Himmel. In brillanten Versen setzt er sich mit philosophischen Fragen, naturphilosophischen Gedanken und scharfsinnigen Argumenten auseinander.

So ist's an uns, nicht nur von den Dingen des Himmels unbeirrt Bericht zu geben, zu erläutern, wie die Bahnen von Sonne und Mond entstehen und durch welche Kraft alles auf der Erde geschieht ...<sup>16</sup>

Die Schönheit des Lehrgedichts liegt in diesem Staunen, das die grandiose atomistische Sichtweise durchwirkt, im Erspüren dieser tiefgründigen Einheit der Dinge, das dem Wissen entspringt, dass wir aus demselben Stoff geschaffen sind wie die Sterne und das Meer:

Letztlich sind wir doch alle himmlischen Samen entsprossen, alle haben wir den gleichen Vater, von ihm empfängt die gütige Mutter den feuchten Tropfen des Regens, sie nimmt die Erde auf und bringt aufblühend schimmernde Früchte hervor, üppige Bäume, auch der Menschen Geschlecht, gibt Lebenskraft den wilden Tieren aller Arten, stillt, für Nahrung sorgend und Futter, den Hunger aller, lässt sie ein wohl ausgestattetes Leben führen und ihren Nachwuchs aufziehen [...].<sup>17</sup>

Ein Gefühl von heiterer Ruhe und Gelassenheit geht aus der Erkenntnis hervor, dass es keine launischen Götter gibt, die uns schwierige Dinge abverlangen oder uns Strafen auferlegen. Schon die wunderschönen einleitenden Verse, gewidmet der Venus, dem glanzvollen Symbol für die Schöpferkräfte der Natur, strahlen Unbeschwertheit und Leichtigkeit aus:

Dich, sobald du nahest, Göttin, fliehen die Winde, die Wolken des Himmels, dir sendet die vielgestaltige schöpferische Erde liebliche Blumen

---

**16** Lukrez, *De rerum natura*, I, 129, dt.: *Über die Natur der Dinge*, in deutsche Prosa übertragen und kommentiert von Klaus Binder. Mit einer Einführung von Stephen Greenblatt, Berlin 2014, S. 42.

**17** Ebenda, II, 990; *Über die Natur der Dinge*, a. a. O., S. 98.

empor, dir lacht hell die Fläche des Meeres; und der Himmel, ruhig nun,  
ist durchflossen von gleißendem Licht.<sup>18</sup>

Zu spüren ist eine tiefe Bejahung des Lebens, von dem wir ein Teil sind:

Dass ihr nicht seht, was die Natur verlangt, nicht mehr nämlich, als dass  
Schmerzen weit ferngehalten werden vom Leib und der Geist sich, von  
Sorge erlöst und Furcht, heiter fühle und gelassen!<sup>19</sup>

Spürbar ist auch die gelassene Akzeptanz des unausweichlichen Todes,  
der alle Übel auslöscht, eines Todes, vor dem keiner sich zu fürchten  
braucht. Für Lukrez ist Religion Unwissenheit und der Verstand das er-  
hellende Licht.

Über Jahrhunderte vergessen, tauchte das Lehrgedicht im Januar  
1417 in der Bibliothek eines deutschen Klosters wieder auf. Sein Entde-  
cker, der Humanist Poggio Bracciolini, Sekretär mehrerer Päpste, hatte  
sich im Kielwasser der bedeutenden Funde des Dichterstürzen Frances-  
co Petrarca auf die Jagd nach antiken Schriften begeben. Ein Werk des  
römischen Rhetorikers Quintilian, das er aufspürte, krepelte das Stu-  
dium der Rechtswissenschaften an den Fakultäten in ganz Europa um.  
Eine Abhandlung Vitruvs zur Architektur, auf die er stieß, veränderte  
die Bauweise der Paläste. Sein großer Triumph war freilich die Wieder-  
entdeckung des Lukrez. Das von ihm entdeckte Manuskript ging verlo-  
ren, aber eine Abschrift, die sein Freund Niccolò Niccoli anfertigte, wird  
heute als «Codice Laurenziano 35.30» in der Biblioteca Laurenziana in  
Florenz verwahrt.

Der Boden für Neues war zwar schon vorbereitet, als Poggio das Werk  
des Lukrez wieder in Europa bekannt machte. Schon seit Dantes Gene-  
ration waren recht neue Akzente zu hören:

Die Ihr mit Eurem Blick das Herz durchstacht,  
die Ihr den Geist aus seinem Schlaf geweckt,

---

18 Ebenda, I, 5 ff; *Über die Natur der Dinge*, a. a. O., S. 39.

19 Ebenda, II, 18 ff; *Über die Natur der Dinge*, a. a. O., S. 71.

schaut auf mein angsterfülltes Sein, entdeckt  
sein Leid, da es die Liebe umgebracht.<sup>20</sup>

Aber die Wiederentdeckung von *De rerum natura* wirkte sich auf die italienische und europäische Renaissance tiefgreifend aus.<sup>21</sup> Direkt und indirekt hallt der Geist dieser Schrift in den Werken einer Reihe von Autoren wider, die von Galilei<sup>22</sup> und Kepler<sup>23</sup> über Bacon bis zu Machiavelli reicht. Bei Shakespeare, der ein Jahrhundert nach Poggio wirkte, haben die Atome einen köstlichen Auftritt:

*MERCUTIO*: Nun seh ich wohl, Frau Mab hat euch besucht.  
Sie ist der Feenwelt Entbinderin.  
Sie kommt, nicht größer als der Edelstein  
Am Zeigefinger eines Aldermanns,  
Und fährt mit einem Spann von Sonnenstäubchen  
[= Drawn with a team of little atomies]  
Den Schlafenden quer auf der Nase hin.<sup>24</sup>

In Montaignes *Essais* finden sich um die hundert Anklänge an Lukrez. Aber dessen direkter Einfluss reicht bis zu Newton, Dalton, Spinoza, Darwin und Einstein. Gerade Einsteins Gedanke, dass die Brownsche Bewegung kleiner Partikel in einer Flüssigkeit die Existenz der Atome offenbart, lässt sich auf Lukrez zurückführen. In der nachfolgenden Passage aus *De rerum natura* legt Lukrez beispielhaft die Argumente dar,

---

20 Guido Cavalcanti, *Sämtliche Gedichte. Tutte le rime*, übertragen und herausgegeben von Tobias Eisenmann und Wolfdietrich Kopelke, Tübingen 1990, S. 31.

21 Eine Rekonstruktion der Wiederentdeckung der Schrift des Lukrez und deren Auswirkungen auf die europäische Kultur siehe S. Greenblatt, *Die Wende: wie die Renaissance begann*. Aus dem Engl. von Klaus Binder, München 2013.

22 Siehe M. Camerota, «Galileo, Lucrezio e l'atomismo», in: F. Citti und M. Beretta (Hgg.), *Lucrezio, la natura e la scienza*, Florenz 2008, S. 141 – 175.

23 Siehe R. Kargon, *Atomism in England from Harriot to Newton*, Oxford 1966.

24 W. Shakespeare, *Romeo und Julia*, I, 4 (üb. von A. W. von Schlegel).

die für die Existenz von Atomen sprechen (mit einem «tagtägliches Bild»):

Für das, was hier dargelegt ist, kommt mir etwas Ähnliches, ein Bild in den Sinn, wie wir es tagtäglich vor Augen haben. Sieh nur genau hin, wenn die Sonne in einen dunklen Raum zu dringen vermag und ihr Licht in einzelnen Strahlen durch diesen sendet: Viele winzige Stäubchen wirst du sehen, wie sie sich im Leeren, vom Licht hellen Raum auf vielerlei Weise mischen: als lägen sie in endlosem Streit, kämpften miteinander, pausenlos, in immer neuen Verbänden, angetrieben zu immer neuer Verknüpfung und wieder Trennung. Dies mag dir eine Vorstellung davon geben, wie es sich verhält mit den Urelementen, die im leeren Raum in unaufhörlicher Bewegung begriffen sind. So kann dir alltäglich Kleines großes Geschehen vorstellbar machen, dich zu erstem Begreifen führen.

Denn schau nur hin, viele dieser Stäubchen ändern durch unsichtbare Stöße aufgewirbelt ihre Richtung, werden mal dahin, mal dorthin gestoßen und wieder zurückgeworfen in alle Richtungen überallhin. [...] Sei sicher: Dies rastlos Bewegte empfangen sie alle von Urelementen. Diese bewegen sich zurück aus sich selbst; dann werden kleinste Verbindungen von Urelementen, die den einzeln fliegenden und ihrer Kraft gleichsam noch sehr ähnlich sind, von jenen in Bewegung versetzt, werden aufgewirbelt, von unsichtbaren Stößen getroffen. [...]

Auf diese Weise gerät, was sich bewegt, Schritt um Schritt vom einzelnen Urelement zu immer größeren Verbänden wachsend, irgendwann in den Bereich unserer Sinne und wird schließlich zu jenen Stäubchen, die wir im Sonnenlicht sehen.<sup>25</sup>

Einstein griff das «tagtägliche Bild» auf, mit dem Lukrez die Existenz der Atome beweisen wollte und das wahrscheinlich auf Demokrit zurückgeht, stellte es auf das grundsollide Fundament der Mathematik und schickte sich an, die Größe der Atome zu berechnen.

---

25 Lukrez, *De rerum natura*, a. a. O., II, 160; *Über die Natur der Dinge*, a. a. O., S. 74 f.

Die katholische Kirche versuchte Lukrez zu stoppen: Im Dezember 1516 untersagte die florentinische Synode, seine Schrift an Schulen zu lesen. 1551 wurde sein Werk vom Konzil von Trient verboten.

Aber es war zu spät. Befreit vom mittelalterlichen christlichen Fundamentalismus, richtete sich eine Weltanschauung erneut in einem Europa auf, das jetzt wieder mit offenen Augen in die Realität blickte. Das Abendland gewann so nicht nur den Naturalismus, Rationalismus, Atheismus und Materialismus des Lukrez zurück, nicht nur eine glanzvolle unbeschwerte Meditation über die Schönheit der Welt, sondern noch viel mehr: eine ausformulierte und komplexe Art des Denkens, um die Realität zu erfassen, die sich von der seit Jahrhunderten vorherrschenden des Mittelalters radikal unterschied.<sup>26</sup>

Im Mittelalter wurde der Kosmos, den Dante so wunderbar besingt, als eine spirituelle und hierarchisch aufgebaute Ordnung gedeutet, in der sich die Ständegesellschaft Europas widerspiegelte: in einzelnen Sphären aufgebaut, zentriert um die Erde, und mit einer unüberwindlichen Trennung zwischen Himmel und Erde. Alle Naturphänomene fanden teleologische und gleichnishafte Erklärungen, in denen sich die Furcht vor Gott und dem Tod ausdrückte. Die Natur selbst war kaum von Interesse. Der Vorstellung nach wurde der Aufbau der Welt durch Formen bestimmt, die den Dingen vorangingen, konnte sich Erkenntnis nur aus der Vergangenheit, aus der Offenbarung und der Überlieferung speisen ...

Von alledem ist die von Lukrez besungene Welt des Demokrit vollkommen frei. Hier gibt es keine Furcht vor Göttern, hat die Welt weder Ziele noch Ursachen, gibt es weder eine kosmische Hierarchie noch einen unüberwindbaren Gegensatz zwischen Himmel und Erde. Statt-

---

<sup>26</sup> Eine sehr gelungene kommentierte italienische Übersetzung von Lukrez' Lehrgedicht, konzipiert als Unterrichtsmaterial, siehe Piergiorgio Odifreddi, *Come stanno le cose. Il mio Lucrezio, la mia Venere*, Mailand 2013. Ich würde mir ihren Einsatz an zahlreichen Schulen in Italien wünschen, um diesen herausragenden Text bekannter zu machen. Als diametral entgegengesetzt kann eine romantisierende Darstellung des Lehrgedichts und seines Verfassers gelten: V. E. Alfieri, *Lucrezio*, Florenz 1929, betont den sehnsuchtsvollen Charakter dieser Dichtung und arbeitet mit Blick auf den Verfasser das Bild eines erhabenen, aber auch bitteren Charakters heraus.

dessen herrscht eine innige Liebe zur Natur, in die man gelassen eintaucht, die Erkenntnis, dass wir ein ureigener Teil von ihr sind, dass Männer, Frauen, Tiere, Pflanzen und Wolken organische Bestandteile eines wunderbaren Ganzen ohne jede Hierarchie sind. Aus Lukrez' Welt spricht ein tiefgründiger Universalismus, der den glanzvollen Worten Demokrits folgt: «Einem weisen Mann steht jedes Land offen. Denn einer trefflichen Seele Vaterland ist das Weltall.»<sup>27</sup>

Hier spricht auch der Ehrgeiz, die Welt in einfachen Begriffen zu denken, die Geheimnisse der Natur zu erkunden, zu begreifen und mehr zu erfahren, als die Väter wussten. Bei Lukrez tauchen besondere konzeptionelle Instrumente auf, die Galilei, Kepler und Newton später weiterentwickeln werden: die Idee der freien und geradlinigen Bewegung im Raum, die der elementaren Körper und ihrer Wechselwirkung, aus denen die Welt besteht, sowie die des Raumes als einem Behälter der Welt.

Zum Ausdruck kommt auch der elementare Gedanke an eine Grenze der Teilbarkeit der Dinge, einen gekörnten Aufbau der Welt, eine Idee, die das Unendliche anhält, bevor es uns zwischen den Fingern zerrinnt. Dieser Gedanke, der die Grundlage der Atomhypothese bildet, kehrte später, in der Quantenmechanik, in kraftvollerer Form wieder und dient heute in der Quantengravitation als ein noch mächtigerer Stützpfiler.

Die Mosaiksteine der antiken Naturlehre, die in der Renaissance wiederauftauchten, legte als Erster ein Engländer wieder zusammen und rückte so in moderner Zeit die große Vision Demokrits, deutlich verstärkt, ins Zentrum des Denkens zurück: der bedeutendste Wissenschaftler aller Zeiten, der als Hauptperson im nächsten Kapitel auftritt.

[...]

---

27 H. Diels, W. Kranz (Hg.), *Die Fragmente der Vorsokratiker*, Weidmann, Berlin 1903, 68 b 247, S. 194.