

Jörg Resag

# Mehr als nur schön



Wie  
Symmetrien  
unsere  
Naturgesetze  
formen

SACHBUCH

 Springer

Mehr als nur schön

Jörg Resag

# Mehr als nur schön

Wie Symmetrien unsere Naturgesetze  
formen

 Springer

Jörg Resag  
Leverkusen, Nordrhein-Westfalen,  
Deutschland

ISBN 978-3-662-61809-7      ISBN 978-3-662-61810-3 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-61810-3>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

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.

Einbandgestaltung: deblik, Berlin

Planung/Lektorat: Lisa Edelhäuser

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

Am 4. Juli 2012 ging eine Nachricht um die Welt, in der eine der größten Entdeckungen der modernen Teilchenphysik verkündet wurde: „*CERN experiments observe particle consistent with long-sought Higgs boson.*“ (Die CERN-Experimente beobachten ein Teilchen, das mit dem lang gesuchten Higgs-Boson vereinbar ist.) Auf diese Nachricht hatten die Physiker seit geraumer Zeit gewartet, und nicht wenige hatten bereits ihre Zweifel, ob das gesuchte Higgs-Teilchen überhaupt existiert. Immerhin waren mittlerweile mehr als vier Jahrzehnte vergangen, seit Mitte der 1960er-Jahre unabhängig voneinander mehrere Physiker, insbesondere der Brite Peter Higgs und sein belgischer Kollege François Englert, die Existenz dieses Teilchens gefordert hatten. Nun schien man es tatsächlich gefunden zu haben. Weitere Messungen in den nächsten Monaten bestätigten dies, sodass man im Jahr 2013 den beiden Physikern endlich den wohlverdienten Nobelpreis verleihen konnte. Peter Higgs war mittlerweile 84 Jahre alt – manchmal braucht man in der Physik offenbar einen langen Atem.

Warum ist das Higgs-Teilchen so wichtig? Warum hatte man am europäischen Forschungszentrum CERN bei Genf über mehr als zwei Jahrzehnte hinweg den weltgrößten Teilchenbeschleuniger – den Large Hadron Collider (LHC) – entwickelt und gebaut, dessen vielleicht wichtigstes Ziel es war, dieses Teilchen zu finden?

Offensichtlich ist das Higgs-Teilchen nicht irgendein Teilchen – es ist etwas ganz Besonderes. Man braucht es, um zu verstehen, wie unsere Welt mit all ihren verschiedenen Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen im Innersten funktioniert. Dabei spielt eine Erkenntnis eine ganz entscheidende Rolle: die Form der Naturgesetze, die unser Universum regieren,

wird von *Symmetrien* und deren *Brechung* geprägt. Hätten Peter Higgs und seine Kollegen nicht intensiv über diese Symmetrien nachgedacht, wären sie nie auf die Idee gekommen, dass unsere Welt ein Higgs-Teilchen braucht, um zu funktionieren.

„*We are all children of broken symmetry*“ (Wir sind alle Kinder gebrochener Symmetrie)<sup>1</sup> – so formulierte es die Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften, als sie im Jahr 2008 den Physik-Nobelpreis an Yoichiro Nambu, Makoto Kobayashi und Toshihide Maskawa für ihre Untersuchungen zur Symmetriebrechung verlieh. Auf den Erkenntnissen insbesondere von Nambu hatten Peter Higgs und seine Kollegen aufgebaut und waren so bis zum Higgs-Teilchen vorgestoßen.

Nur, was genau soll es bedeuten, wir seien Kinder gebrochener Symmetrie? Was für eine Symmetrie ist das, und was ist damit gemeint, sie sei gebrochen?

In der Umgangssprache steht der Begriff der Symmetrie oft für Schönheit und Eleganz. Menschen mit symmetrischen Gesichtern erscheinen uns als attraktiv. Auch der französische Sonnenkönig Ludwig XIV. wusste die Schönheit der Symmetrie zu schätzen: Mitte des 17. Jahrhunderts ließ er das Schloss Versailles (Abb. 0.1) im typischen Stil des Barocks so symmetrisch wie möglich anlegen – ein Sinnbild von Perfektion, Reichtum und Macht.



**Abb. 0.1** Das Schlosses Versailles, hier auf einem Bild von Pierre-Denis Martin aus dem Jahr 1722, ist ein Inbegriff von Symmetrie und Eleganz. (© akg-images/picture alliance)

<sup>1</sup>Siehe <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2008/illustrated-information/>.

Auch die Vorstellungen, die sich unsere Vorfahren von der Antike bis in die frühe Neuzeit vom Universum machten, besaßen diese Art von ästhetischer Symmetrie: mit der Erde in der Mitte und um sie herum die Sphären der Planeten und Gestirne. Später wurde die Erde zwar aus dem Zentrum der Welt verbannt und durch die Sonne ersetzt, doch die wunderbare kugelsymmetrische Gestalt des Kosmos blieb erhalten.

Nun ist Schönheit nicht alles. Symmetrien sind mehr als nur schön! Sie besitzen eine wichtige Eigenschaft, die sie für die Physik so interessant macht. Am Schloss Versailles können wir diese Eigenschaft gut erkennen: Würden wir das gesamte Schloss in Gedanken abreißen und spiegelsymmetrisch wiederaufbauen, so sähe es im Idealfall genauso aus wie zuvor. Wir könnten also rechts und links vertauschen, und nichts Wesentliches würde sich am Aufbau des Schlosses ändern. Ähnlich ist es bei den früheren Vorstellungen vom Kosmos mit der Erde oder der Sonne in der Mitte: Wir können sie um den Mittelpunkt drehen, ohne dass sich etwas Wesentliches ändert.

In der modernen Physik beschränkt man sich nun nicht alleine auf die Vertauschung von rechts und links oder Drehungen um einen Mittelpunkt, sondern fasst den Begriff der Symmetrie weiter. Der deutsche Mathematiker und Physiker Hermann Weyl, der uns in diesem Buch noch begegnen wird, hat es sinngemäß so ausgedrückt: „Ein Ding ist symmetrisch, wenn man es einer bestimmten Operation aussetzen kann und es danach als genau das Gleiche erscheint wie vor der Operation.“<sup>2</sup> Dabei meint man mit „Ding“ nicht unbedingt das äußere Erscheinungsbild eines Gegenstandes, sondern seine physikalische Funktionsweise. Funktioniert der Gegenstand und damit die zugrunde liegende Physik nach der Symmetrieoperation noch genauso wie vorher?

Ein einfaches Beispiel für eine solche Symmetrieoperation wäre die Verschiebung an einen anderen Ort. So macht es beispielsweise bei einer komplizierten Apparatur – sagen wir, einer Uhr – normalerweise keinen Unterschied, ob wir sie in unserem Wohnzimmer oder im Schlafzimmer aufstellen. Der eine Ort ist so gut wie der andere, egal, wie die Uhr im Detail funktioniert. Die Physik, die den Mechanismus im Inneren der Uhr ablaufen lässt, ist an beiden Orten dieselbe, unabhängig davon, ob es sich um eine mechanische Uhr, eine elektronische Quarzuhr oder eine hochpräzise Atomuhr handelt.

---

<sup>2</sup>Zitiert nach Feynman Vorlesungen über Physik, Band I, Kap. 11-1.

Diese Überlegung mag uns trivial erscheinen, doch sie hat wichtige Konsequenzen, wie wir noch sehen werden. Und natürlich ist die Verschiebung an einen anderen Ort nicht die einzige Symmetrieeoperation, die den physikalischen Ablauf im Inneren der Uhr unverändert lässt. Was geschieht beispielsweise, wenn wir eine stehen gebliebene Uhr wieder in Betrieb setzen – spielt es dann eine Rolle, wann wir das tun? Verändert sich der Lauf der Uhr, wenn wir sie um 180 Grad gedreht aufstellen, also mit dem Ziffernblatt zur Wand? Und was ist, wenn wir die Uhr auf einer Kreuzfahrt in unserer Schiffskabine aufstellen, während das Schiff sein nächstes Ziel ansteuert?

Wir können sogar noch weiter gehen und beispielsweise sämtliche Materie in der Uhr durch Antimaterie ersetzen, wobei wir die Uhr im leeren Weltraum postieren sollten, denn Materie und Antimaterie vertragen sich nicht gut miteinander. Würde also eine Antimaterieuhr genauso funktionieren wie ihr Gegenstück aus Materie? Und warum gibt es Antimaterie überhaupt?

Diesen und vielen weiteren Fragen werden wir in diesem Buch nachgehen, wobei wir dem Lauf der Geschichte von der Antike bis hin zur aktuellen Front der Forschung folgen wollen. Auf mathematische Formeln möchte ich dabei weitgehend verzichten. Nur gelegentlich werde ich die eine oder andere Formel der Vollständigkeit halber erwähnen; für das Verständnis des Buches spielen sie keine Rolle.

Auch wenn die Physik im Mittelpunkt dieses Buches steht, so möchte ich zugleich auch die Frauen und Männer würdigen, die uns auf dem Weg durch die Geschichte begegnen. So treffen wir beispielsweise zu Beginn im antiken Griechenland auf den Philosophen Aristoteles, der sich als einer der ersten Menschen umfassende Gedanken darüber macht, wie unsere Welt beschaffen ist und wie sie funktioniert. Seine Ideen haben einen tief greifenden Einfluss bis weit ins Mittelalter hinein, auch wenn im Laufe der Zeit immer mehr Unstimmigkeiten sichtbar wurden. Es ist eben keineswegs einfach, die richtigen Ideen und Begriffe zu finden, mit denen sich die Natur beschreiben lässt.

Fast zwei Jahrtausende vergehen, bis es gelingt, sich von den Ideen der Antike zu lösen. So rückt der Domherr Nikolaus Kopernikus die Sonne anstelle der Erde ins Zentrum der Welt, und der deutsche Naturphilosoph Johannes Kepler entdeckt am Vorabend des dreißigjährigen Krieges auf der Suche nach himmlischer Schönheit und Harmonie die elliptische Form der Planetenbahnen. Sein eher praktisch veranlagter Kollege Galileo Galilei stellt sich derweil in Italien eine wegweisende Symmetrieffrage: Merkt man unter Deck eines Schiffes überhaupt, ob dieses gleichmäßig durch die ruhige See gleitet oder fest vertäut im Hafen liegt? Mit solchen Überlegungen und

konkreten Experimenten stößt er schließlich auf das Trägheitsgesetz und versetzt so einige Jahrzehnte später den englischen Naturforscher Isaac Newton in die Lage, die falschen Vorstellungen von Aristoteles endgültig zu überwinden und die richtigen Gesetze der Bewegung und der Gravitation zu finden – der Durchbruch ist geschafft.

Erst allmählich kann Newtons Werk in der Welt Fuß fassen. Einen bedeutenden Beitrag dazu leistet Émilie du Châtelet – die „göttliche Émilie“ – die wir im Frankreich des Sonnenkönigs Ludwig XIV. kennen lernen. Sie überarbeitet Newtons Werk, übersetzt es ins moderne Französisch und macht es so in weiten Kreisen bekannt.

Immer schneller wandelt sich die Welt. Die industrielle Revolution fegt alte Gesellschaftsordnungen hinweg und schafft ein Umfeld, in dem die Wissenschaften an Bedeutung gewinnen und zunehmend schneller voranschreiten. Im neunzehnten Jahrhundert gelingt es Naturforschern wie dem englischen Experimentator Michael Faraday und dem schottischen Theoretiker James Clerk Maxwell schließlich, die Gesetze der Elektrizität und des Magnetismus zu entschlüsseln und in einer umfassenden Theorie zu vereinen.

Ein besonderes Highlight dieses Buches ist unsere Begegnung mit der Mathematikerin und Physikerin Emmy Noether, die es im Deutschland des frühen zwanzigsten Jahrhunderts – einer von Männern dominierten Welt – nicht leicht hat. Dennoch schafft sie es, einen tiefen Zusammenhang zwischen Symmetrien und Erhaltungsgrößen aufzudecken. Die Tatsache, dass beispielsweise Energie weder erzeugt noch zerstört werden kann, sondern sich nur von einer Form in eine andere umwandelt, ist tatsächlich die Folge einer Symmetrie! Offenbar haben Symmetrien neben ihrem ästhetischen Schönheitswert auch ganz handfeste physikalische Konsequenzen.

Albert Einstein, der drei Jahre jünger als Emmy Noether ist, darf in diesem Buch natürlich nicht fehlen. Die bahnbrechenden Symmetrieüberlegungen dieses berühmten Freigeistes revolutionieren im Jahr 1905 unser Verständnis von Raum und Zeit und stellen zehn Jahre später die Beschreibung der Gravitation auf eine ganz neue Basis – die Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie sind geboren.

Einige Jahre nach Einsteins Erfolg kommt es zu einem fundamentalen Umbruch in der Physik: Männer wie der französische Adelige Louis de Broglie, der österreichische Physiker Erwin Schrödinger, der ebenso scharfsinnige wie schonungslos kritische Wolfgang Pauli, das stille Genie Paul Dirac und viele andere entdecken die Quantenmechanik, in der Symmetrien eine absolut grundlegende Rolle spielen. Sie führen zum Phänomen des Spins, sorgen dafür, dass manche Teilchen sich wie Einzelgänger

und andere wie Herdentiere verhalten, und erzwingen sogar die Existenz von Antimaterie. Dabei gibt es auch manche Überraschung: Gilt in einer gespiegelten Welt tatsächlich dieselbe Physik wie vor der Spiegelung? Das galt als Selbstverständlichkeit – bis die chinesisch-amerikanische Experimentalphysikerin Chien-Shiung Wu das Gegenteil beweist.

Symmetrien haben im Rahmen der Quantenmechanik noch mehr zu bieten: So nutzt Einsteins visionärer Kollege Hermann Weyl – ein Meister der Symmetrie und ständiger Grenzgänger zwischen Mathematik und Physik – eine sogenannte *Eichsymmetrie* dazu, unser Verständnis der elektromagnetischen Kräfte auf eine neue Grundlage zu stellen. Damit legt er das Fundament für die heutige Theorie aller bekannten Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen.

Es dauert seine Zeit, bis sich diese Theorie in der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts langsam herausbildet. Nach und nach gelingt es Physikern wie dem Briten Peter Higgs, dem überzeugten Atheisten Steven Weinberg, seinem muslimischen Freund und Kollegen Abdus Salam und vielen anderen, mithilfe von Eichsymmetrien und deren Brechung alle bekannten Teilchen und Kräfte – mit Ausnahme der Gravitation – unter einem großen gemeinsamen Dach zu vereinen, das den wenig spektakulären Namen *Standardmodell der Elementarteilchenphysik* trägt. Diese umfassende Theorie der Teilchen und ihrer Wechselwirkungen ist die absolute Krönung der modernen Physik und wurde unzählige Male im Experiment bestätigt. Auch ihr letzter noch fehlender Schlussstein – das berühmte Higgs-Teilchen – wurde im Jahr 2012 schließlich gefunden.

Symmetrien spielen in der modernen Physik also eine entscheidende Rolle. Da wir wissen, dass auch das überaus erfolgreiche Standardmodell noch nicht der Weisheit letzter Schluss sein kann, versuchen heutzutage Theoretiker in aller Welt, mithilfe von Symmetrien in Neuland vorzustoßen. Lassen sich die bekannten Eichsymmetrien im Rahmen sogenannter *Grand Unified Theories* (GUT) zusammenführen, sodass sich dadurch noch unbekannte Zusammenhänge eröffnen? Können wir Einsteins Symmetrie von Raum und Zeit zu einer *Supersymmetrie* erweitern? Und können wir auch die Gravitation mit den anderen Kräften im Rahmen der Quantentheorie vereinen und eine universelle *Theorie von Allem* finden, die die gesamte Physik unseres Universums umfasst?

Lassen Sie sich von den Menschen und ihren Ideen, denen Sie in diesem Buch begegnen werden, faszinieren. Begeben Sie sich auf eine Reise, die von der Antike bis zu den heutigen Grenzen des Wissens führt, und lernen Sie dabei die Vielfalt der physikalischen Erkenntnisse kennen, die diese

Menschen enthüllt haben und die deutlich machen: Symmetrien sind in der Tat mehr als nur schön!

An dieser Stelle möchte ich sehr herzlich Lisa Edelhäuser vom Springer Verlag danken, die – wie schon so oft zuvor – mit ihren Ideen und ihrer konstruktiven Kritik viel zum Gelingen dieses Buches beigetragen hat. Vielen Dank auch an Bettina Saglio vom Springer Verlag, die alle Schritte vom fertigen Buchmanuskript bis hin zum Druck mit viel Sorgfalt begleitet hat. Und ein besonderer Dank gilt meiner Familie, meiner Frau Karen und meinen Söhnen Kevin, Tim und Jan, die mit viel Geduld ertragen haben, wenn ich wieder einmal stundenlang in meiner Ecke in mein Manuskript versunken war oder ihnen enthusiastisch von meinen Ideen dazu erzählt habe – manchmal braucht ein Buchautor eben doch ein Live-Publikum.

Leverkusen  
Mai 2020

Jörg Resag

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Auf der Suche nach den Bewegungsgesetzen</b>	<b>1</b>
1.1	Von Aristoteles bis ins Mittelalter – die Suche nach dem Weg	2
1.2	Kopernikus, Kepler und das Ende der Kreise	13
1.3	Galilei und die Entdeckung der Trägheit	37
1.4	Der Durchbruch: Newtons Gesetze der Bewegung	50
<b>2</b>	<b>Symmetrie und Relativität: Noether, Maxwell, Einstein</b>	<b>71</b>
2.1	Von Émilie zu Emmy und dem Noether-Theorem	72
2.2	Dem Licht hinterher: Einsteins Spezielle Relativitätstheorie	96
2.3	Relativität, Gravitation und die Krümmung der Raumzeit	134
<b>3</b>	<b>Eichsymmetrie und die Geburt der Quantenmechanik</b>	<b>153</b>
3.1	Hermann Weyl: Uhren und Maßstäbe umeichen	155
3.2	Die Geburt der Quantenmechanik	170
3.3	Eichsymmetrie und Quantenwellen	185
<b>4</b>	<b>Quantensymmetrie</b>	<b>199</b>
4.1	Pauli und der Spin	200
4.2	Antimaterie: Rückwärts durch die Zeit	225
4.3	Lee, Yang, Wu und die gespiegelte Welt	241
4.4	Die fast perfekte Antiwelt	259

<b>5</b>	<b>Das Fundament verstehen: Von der Eichsymmetrie zum Standardmodell</b>	269
5.1	Spontan gebrochene Eichsymmetrie und das Higgs-Teilchen	270
5.2	Elektromagnetische und schwache Wechselwirkung vereinen	290
5.3	Quarks und die Eichsymmetrie der starken Wechselwirkung	308
5.4	Das Standardmodell der Teilchen und Kräfte bewährt sich	326
<b>6</b>	<b>Auf der Suche nach der neuen Physik</b>	337
6.1	Eichsymmetrie am Limit: die große vereinheitlichte Theorie (GUT)	338
6.2	Symmetrien werden super: SUSY	348
6.3	Quantengravitation, Stringtheorie und die Weltformel	359
6.4	Stringlandschaft und Multiversum	375
	<b>Glossar</b>	391
	<b>Quellen und Literatur</b>	407



# 1

## Auf der Suche nach den Bewegungsgesetzen

Die genaue Schärfe der Mathematik aber darf man nicht für alle Gegenstände fordern, sondern nur für die stofflosen. Darum passt diese Weise nicht für die Wissenschaft der Natur, denn alle Natur ist wohl mit Stoff verbunden.<sup>1</sup>

Dieses möglicherweise etwas überraschende Zitat stammt aus dem Werk *Metaphysik* des großen Philosophen Aristoteles, der vor über 2300 Jahren im antiken Griechenland lebte. Darin spricht Aristoteles der stofflichen Natur – damit meint er unsere irdische Welt – jede Form von Gesetzmäßigkeit ab, die sich mathematisch erfassen ließe. Nur die stofflose<sup>2</sup> Welt – das ist für ihn die perfekte Welt der Sonne und der Gestirne – ist demnach von mathematischen Gesetzen bestimmt, die die Gestirne ihre harmonischen Kreisbahnen am Himmel ziehen lassen.

Diese Vorstellung war noch bis ins späte Mittelalter hinein weit verbreitet. Kein Wunder, denn die Form der Naturgesetze ist für uns Menschen auf der Erde nur sehr schwer erkennbar. Zu viele Einflüsse wirken zugleich auf jeden Gegenstand ein und lassen unsere irdische Welt chaotisch und unvorhersehbar erscheinen. Ein fallendes Laubblatt taumelt auf seinem Weg nach unten wie zufällig hin und her, und selbst der scheinbar so einfache Flug einer abgeschossenen Kanonenkugel ist nicht leicht zu erfassen und zu verstehen. Wie sieht die Flugbahn der Kugel genau aus? Wieso fliegt die Kugel

---

<sup>1</sup>Aristoteles: *Metaphysik* 995a 14–17.

<sup>2</sup>Gemeint ist, dass für Aristoteles die Welt der Sonne und Gestirne nicht aus denselben gewöhnlichen Stoffen bestehen kann wie unsere irdische Welt; mehr dazu später im Kapitel.

überhaupt? Was treibt sie voran? Und warum fällt sie schließlich doch zu Boden?

Die Welt des Himmels mit den klar sichtbaren Bewegungen der Gestirne scheint dagegen strengen mathematischen Gesetzmäßigkeiten zu folgen. In der Annahme, die Erde sei der Mittelpunkt der Welt, erstellten unsere Vorfahren immer komplexere Modelle mit vielfach ineinander geschachtelten Kreisbewegungen, um die Positionen der Planeten am Himmel zu beschreiben. Das funktionierte ziemlich gut, aber besonders schön war es nicht. Der Durchbruch gelang erst, als Nikolaus Kopernikus im sechzehnten Jahrhundert die Sonne ins Zentrum der Welt rückte und Johannes Kepler schließlich die Ellipsenform der Planetenbahnen erkannte. Der physikalische Ursprung dieser Bewegungen blieb Kepler dagegen noch verborgen.

Dass sich nicht nur der Himmel, sondern auch unsere irdische Welt mathematisch beschreiben lässt, entdeckte Keplers italienischer Zeitgenosse Galileo Galilei. Dabei stellte er eine berühmt gewordene Frage: Bemerkt man unter Deck eines fahrenden Schiffes überhaupt etwas davon, wenn das Schiff gleichmäßig über die ruhige See dahingleitet? Spürt man, ob das Schiff fährt oder nicht, wenn man nicht nach draußen sehen kann?

Das war ein völlig neuer Gedanke, auf den man erst einmal kommen muss! Erst diese wegweisende Symmetrieüberlegung, wie man sie heutzutage nennt, schuf letztlich die Basis, auf der Isaac Newton und andere aufbauen konnten, um die universellen Gesetze aller Bewegungen zu erkennen – nicht nur im Himmel, sondern auch auf unserer Erde.

## 1.1 Von Aristoteles bis ins Mittelalter – die Suche nach dem Weg

Aristoteles, von dem unser obiges Zitat über die Anwendbarkeit der Mathematik stammt, wurde im Jahr 384 v. Chr. in der griechischen Stadt Stageira im Nordosten Griechenlands geboren. Seine Familie war eng mit den Herrschern im damals aufstrebenden Königreich Makedonien verbunden – sein Vater war Leibarzt des makedonischen Königs. Der entsprechende Wohlstand der Familie ermöglichte es ihm, als junger Mann nach Athen zu gehen, dem intellektuellen Zentrum des antiken Griechenlands. Dort wurde er an der Akademie des berühmten Philosophen Platon aufgenommen, an der er 20 Jahre lang blieb – zunächst als Schüler und später selbst als Lehrer. Es muss eine großartige Zeit voller intellektueller

Anregungen für den jungen Aristoteles gewesen sein, der sich bald selbst zu einem großen Philosophen entwickelte. Seine Ideen, auf die wir gleich noch eingehen werden, sollten das Denken der Menschen für nahezu zwei Jahrtausende entscheidend mitbestimmen.

Als sein berühmter Lehrer Platon schließlich starb, ging diese prägende Zeit für Aristoteles zu Ende. Nicht er, sondern ein Neffe Platons wurde zu dessen Nachfolger als Leiter der Akademie bestimmt. Aristoteles dürfte wohl ziemlich enttäuscht darüber gewesen sein. Außerdem wurde es für ihn in Athen langsam ungemütlich, denn den Athenern waren die engen Verbindungen seiner Familie mit dem immer bedrohlicher wirkenden Makedonien ein Dorn im Auge. Hatte man da womöglich einen Feind in den eigenen Reihen? Aristoteles bekam es mit der Angst zu tun, verließ Athen und begab sich für mehrere Jahre auf Reisen durch Kleinasien und Griechenland.

Schließlich zahlten sich seine guten Beziehungen nach Makedonien wieder aus. Im Alter von rund 40 Jahren folgte er der Einladung des makedonischen Königs Philipp II., seinen damals dreizehnjährigen Sohn Alexander zu unterrichten. Er wird wohl nicht gehnt haben, zu welcher bedeutender Persönlichkeit Alexander, den man später „den Großen“ nannte, heranwachsen würde. Mit gerade einmal 20 Jahren folgte er seinem Vater auf den makedonischen Thron und schickte sich an, sein bis nach Indien reichendes Weltreich zu erobern. Aristoteles, der mittlerweile 50 Jahre alt geworden war, hatte seine Aufgabe als Lehrer erfüllt und brauchte eine neue Beschäftigung.

Gerne wollte er nach Athen zurückkehren, und es gelang ihm tatsächlich, denn dort hatte man sich mittlerweile mit den siegreichen Makedoniern arrangiert. Allerdings ging er nicht mehr an seine alte Akademie zurück, sondern lehrte und forschte an einem öffentlichen Gymnasium, dem Lykeion. Hier blieb er 12 Jahre lang, bis sich sein Glück erneut wendete – Alexander der Große war mit nur 32 Jahren in Babylon gestorben und sein gerade erst erobertes Weltreich begann zu zerfallen. Auch in Athen regte sich nun wieder zunehmend Widerstand gegen die bis dahin übermächtigen Makedonier. Wie schon Jahre zuvor wurde Aristoteles erneut mit wachsendem Misstrauen betrachtet und musste fürchten, dass ihn die Athener verfolgen und womöglich zum Tode verurteilen würden. So war es auch einst Platons Lehrmeister Sokrates ergangen, der rund 75 Jahre zuvor von den Athenern gezwungen worden war, den giftigen Schierlingsbecher zu trinken und in den Tod zu gehen. Das sollte Aristoteles nicht passieren. Er floh und starb bald darauf im Jahr 322 v. Chr. im Alter von 63 Jahren.

Sein umfangreiches Vermächtnis hat ihn bis in die heutige Zeit hinein überdauert. Auch wenn viele seiner Schriften über die Jahrtausende verloren gegangen sind, so sind doch viele Werke erhalten geblieben. Sie zeigen, dass es kaum ein Gebiet gab, mit dem sich Aristoteles nicht beschäftigte. Er dachte über Redekunst und Ethik ebenso nach wie über Staatsführung und Politik. Er entwarf ein System der Logik, interessierte sich für die Natur, sammelte alle Arten von Pflanzen und Tieren und versuchte, sie in eine Systematik einzuordnen. Und er dachte auch über die Welt als Ganzes nach und über die Gesetze, die ihrem Aufbau zugrunde liegen.

### **Platons ideale Welt der Ideen**

An Platons Akademie hatte Aristoteles zunächst die Philosophie seines großen Lehrmeisters kennengelernt, die bis zum heutigen Tag unser westliches Denken stark beeinflusst. Immer wenn wir in diesem Buch auf Begriffe wie die „göttliche Harmonie der Gestirne“, den „absoluten Raum“ und die „wahre Zeit“ oder auch später die „perfekte größtmögliche Symmetrie“ stoßen, sollten wir uns an Platon zurückerinnern, der in der Antike den Grundstein für diese Art zu denken gelegt hat.

Platon ging davon aus, dass es jenseits unserer unbeständigen irdischen Welt, die wir mit unseren Sinnen wahrnehmen können, eine ideale metaphysische Welt geben müsse, die er *Welt der Ideen* nannte. Dort befänden sich die perfekten Urformen aller Dinge, die wir in unserer normalen Welt nur noch gleichsam als unvollkommene Abbilder vorfinden. Das ist es, was Platon mit dem Wort *Idee* meint – das perfekte Urbild wie beispielsweise „das Schöne an sich“ oder „das Gerechte an sich“, aber auch beispielsweise „den perfekten Kreis“, den wir in der realen Welt niemals in perfekter Form realisieren können. Ideen sind die „Dinge an sich“, die das „wahre Wesen der Dinge“ repräsentieren.

Die Ideenwelt mit all ihren ewig bestehenden Urbildern liegt für Platon hinter unserer erfahrbaren Welt und kann mit unseren Sinnen nicht erfasst werden. Wir sehen nur die verwaschenen Schatten der idealen „Dinge an sich“. Dennoch können wir in diesen Schatten die idealen Urbilder wiedererkennen, weil unsere Seele nach Platon bereits vor unserer Geburt diese Urbilder in der Ideenwelt geschaut hat und sich nun wieder an sie zurückerinnert. Wir erkennen einen auf ein Stück Papier gemalten Kreis also deshalb, weil wir den idealen mathematischen Kreis vor unserer Geburt schon einmal gesehen haben.

Was ist von Platons Ideenwelt zu halten? Aristoteles empfand die Ansichten Platons jedenfalls als zu abgehoben. Der italienische Künstler Raffael hat dies in seinem berühmten Fresko *Die Schule von Athen* vor gut



**Abb. 1.1** Platon (links) und Aristoteles (rechts), Detailansicht aus Raffaels Fresko *Die Schule von Athen* (1510–1511). (© akg-images/picture alliance)

500 Jahren sehr schön zum Ausdruck gebracht (Abb. 1.1). Platon zeigt auf diesem Bild gen Himmel, während Aristoteles die flache Hand nach unten richtet.

Aristoteles glaubte nicht an die perfekte Ideenwelt Platons. Er ging vielmehr davon aus, dass unser Geist vollkommen leer sei, wenn wir als Babys auf diese Welt kommen. Ein Neugeborenes hat keine Ahnung, was ein Kreis oder ein Pferd ist, denn es hat noch nie so etwas gesehen – auch nicht in der perfekten Ideenwelt. Erst die Sinneseindrücke und Erfahrungen, die wir im

Laufe der Zeit sammeln, formen nach und nach in uns ein Bild der Wirklichkeit und lassen in uns ein Verständnis dafür entstehen, was ein Kreis oder ein Pferd ist. Damit ist Aristoteles sehr nahe an der heutigen Sichtweise, nach der sich die neuronalen Verschaltungen in unserem Gehirn erst nach und nach ausbilden. So müssen wir das Sehen als Baby tatsächlich erst nach und nach lernen – wir müssen unser neuronales Netz im Gehirn darauf trainieren.

Es ist immer wieder gut, sich diese Diskussion über die „Dinge an sich“ ins Gedächtnis zu rufen, wenn wir uns an die Erforschung der Naturgesetze machen. Wir werden sehen, wie sich nach und nach immer schärfere physikalische Begriffe formen lassen, die so ungemein nützlich sein werden, dass wir sie schon bald für ein „Ding an sich“ halten könnten. So werden wir beispielsweise auf den Begriff der Kraft stoßen und lernen, wie Kräfte die Bewegungen der Planeten ebenso lenken wie den Flug einer Kanonenkugel oder das Taumeln eines herabfallenden Blattes. Gibt es also Kräfte „in echt“? Sind sie ein „Ding an sich“?

Nun ja – wie wir später noch sehen werden, löst sich der Begriff der Kraft komplett auf und wird bedeutungslos, sobald wir in die Quantenwelt der Atome und Teilchen vorstoßen. Es gibt also in der Natur keine „Kraft an sich“. Alle physikalischen Begriffe sind Näherungen – Idealisierungen, die im Rahmen bestimmter physikalischer Theorien so nützlich sein können, dass wir sie oft für real halten – und in einem gewissen Sinn sind sie das auch.<sup>3</sup> Das sollten wir im Hinterkopf behalten, wenn beispielsweise später in diesem Kapitel der große Gelehrte Isaac Newton von einer „absoluten, wahren und mathematischen Zeit“ und einem „absoluten Raum“ spricht. Wir sollten nicht überrascht sein, wenn diese und andere scheinbar sicher geglaubten physikalischen Begriffe im Lauf der Zeit ihre Bedeutung verändern, relativiert werden und sogar komplett durch neue, grundlegendere Begriffe ersetzt werden.

Könnte es sein, dass wir irgendwann auf die absolut fundamentalen Begriffe stoßen, die dem „wahren innersten Wesen der Natur“ entsprechen? Hat Platon zumindest in diesem Sinn Recht, wenn er von einer „idealen Welt“ spricht? Gibt es so etwas wie die universelle Weltformel, die die fundamentalste Ebene der Natur beschreibt?

Wir werden dieser Frage in diesem Buch nachgehen und dabei immer tiefer in die Geheimnisse der Natur eintauchen. Dabei werden wir beobachten, wie sich die verwendeten Begriffe und Zusammenhänge immer

---

<sup>3</sup>siehe z. B. Feynman Vorlesungen über Physik, Band I, Kap. 12-1.

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum.



Abb. 1.2 Himmelsphären nach Sacrobosco, aus Peter Apian, *Cosmographia*, 1539. (Quelle: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ptolemaicssystem-small.png?uselang=de>)

weiter von den Dingen entfernen, zu denen wir einen direkten anschaulichen Zugang haben. Je weiter wir vordringen, umso abstrakter und mühsamer wird es werden. Aber davon ahnten die Gelehrten im antiken Griechenland – und insbesondere Aristoteles – natürlich noch nichts.

### Die physikalische Welt des Aristoteles

Als sich Aristoteles vor über 2300 Jahren fragte, wie unsere Welt aussieht und funktioniert, hielt es noch für unmöglich, unsere chaotisch erscheinende Erde mit der Präzision der Mathematik zu beschreiben – diese war allein den Sternen und Planeten vorbehalten, die in den himmlischen Sphären, in deren Zentrum die kugelförmige Erde liegen sollte, ihre perfekten Kreisbahnen um die Erde ziehen sollten (Abb. 1.2).

Es mag vielleicht überraschend klingen, dass Aristoteles keineswegs an eine flache Erde glaubte. Wie die meisten gebildeten Griechen wusste er,

dass unsere Erde keine Scheibe, sondern eine Kugel ist. Er selbst gab dafür mehrere Beweise an. Beispielsweise sehen wir bei einer Mondfinsternis immer einen kreisförmigen Schatten der Erde auf der hellen Mondoberfläche – nur eine Kugel wirft immer einen kreisförmigen Schatten, egal wie sie gerade ausgerichtet ist. Außerdem wussten schon die Seefahrer der Antike, dass weiter im Süden die Sternbilder höher über dem Horizont stehen. Genau mit dieser Methode konnten sie bestimmen, wie weit südlich sie sich gerade befanden.

Seit der Antike wurde die Kugelgestalt der Erde zumindest in gebildeten Kreisen zu keiner Zeit mehr in Zweifel gezogen. Da gerät man schon ins Grübeln, wenn in unserer modernen Welt die Ansicht, die Erde sei flach, offenbar gerade eine gewisse Renaissance erlebt – suchen Sie mal im Internet nach *Flat Earth*. Sie werden überrascht sein!

Wie schon ein Jahrhundert zuvor der griechische Philosoph Empedokles, von dem diese Idee stammt, ging auch Aristoteles davon aus, dass alle irdische Materie aus den vier Elementen Erde, Wasser, Feuer und Luft besteht. Diese vier Elemente haben alle ihren „natürlichen Platz“ in der Welt und ordnen sich entsprechend an: die Erde zuunterst, also möglichst nahe am Zentrum der Welt, darüber das Wasser, darüber wiederum die Luft, und ganz oben – aber noch unterhalb der Mondsphäre – das Feuer, das ja bekanntlich in der Luft nach oben steigt. Über dem Feuer befindet sich laut Aristoteles dann eine ganz andere Welt, die mit den vier irdischen Elementen nichts mehr zu tun hat. Diese Welt der Sterne und Planeten besteht aus dem masselosen ewigen Element Äther, der für alle Zeiten gleichförmig um das Zentrum der Welt kreist.

Damit ergibt sich in ganz natürlicher Weise der Aufbau der Welt, den wir in Abb. 1.2 sehen: Im Zentrum des Universums befindet sich die Erdkugel, auf deren Oberfläche sich die Ozeane, Flüsse und Seen befinden. Die Luft hüllt diese Erde ein und wird ihrerseits von der Sphäre des Feuers und der Mondsphäre umschlossen, über der sich dann die Sphären der Planeten einschließlich der Sonne und schließlich die Sphäre der Fixsterne befinden.

Dieses Bild der Erdkugel und der Himmelsphären macht auf den ersten Blick einen wunderbar harmonischen Eindruck. Doch die physikalischen Gesetze, die Aristoteles diesem Bild zugrunde legte, lassen diese Harmonie und Einfachheit vermissen. Sie unterscheiden zwischen verschiedenen Ursachen für Bewegungen und fordern für Himmel und Erde unterschiedliche Regeln. Dabei entsprechen sie im Wesentlichen dem, was wir als „gesunden Menschenverstand“ bezeichnen würden, und bleiben zugleich seltsam wackelig. In Bezug auf Bewegungen sagen sie im Wesentlichen Folgendes:

- Alles, was sich bewegt, muss durch etwas bewegt werden. Entweder bewegt es sich aufgrund seines eigenen Willens (bei Lebewesen), oder es wird von etwas bewegt (von einer äußeren Ursache wie beispielsweise einem Ochsen, die einen Karren zieht), oder es strebt möglichst geradlinig seinem natürlichen Ort entgegen und kommt dort zum Stillstand (innere natürliche Ursache). So streben die Elemente Erde und Wasser nach unten zu ihrem natürlichen Ort, dem Mittelpunkt der Erdkugel und damit dem Zentrum der Welt, wobei der natürliche Ort des Wassers über dem der Erde liegt. Die beiden Elemente Feuer und Luft streben dagegen nach oben, weg vom Mittelpunkt der Erde, wobei der natürliche Ort des Feuers über der Luft und unterhalb der Mondsphäre liegt.
- Das fünfte Element, der masselose und unveränderliche Äther, aus dem auch die Sterne und Planeten gemacht sind, kreist von Natur aus oberhalb der Mondsphäre für alle Zeiten gleichförmig um das Zentrum der Welt.

### **Fallende Objekte, das Vakuum und ein Widerspruch**

Schaut man sich diese Gesetze genauer an, so beschreiben sie im Grunde nur das, was wir auf der Erde beobachten, ohne wirklich etwas zu erklären. Ein Stein fällt nach unten, weil er an seinen natürlichen Ort gelangen will – das erklärt im Grunde gar nichts. Es entspringt dem Bedürfnis danach, dass jede Bewegung irgendeinen Grund braucht, und genau das ist der zentrale Irrtum an diesem physikalischen System. Doch dieser Irrtum ist sehr schwierig zu erkennen, und so bildeten die Gesetze von Aristoteles bis weit ins Mittelalter hinein das Fundament der Physik und verhinderten den weiteren Fortschritt.

Allerdings fielen immer wieder Probleme mit diesen Gesetzen auf. Nach und nach wurde deutlich: irgendetwas konnte mit dieser Physik nicht stimmen.

Ein Problem betraf die Bewegung fallender Objekte. Da Aristoteles davon ausging, dass jede Bewegung eine Ursache haben müsse, folgerte er daraus, dass die Bewegung umso schneller erfolgen würde, je stärker die Ursache ist. Je schwerer also ein Objekt ist, umso schneller sollte es fallen. Tatsächlich fällt beispielsweise eine Kastanie schneller herab als ein leichtes Kastanienblatt – die Beobachtung scheint also die Ansicht von Aristoteles zu bestätigen. An gewisse mathematische Gesetzmäßigkeiten in unserer irdischen Welt glaubte also auch Aristoteles.

Erkennen Sie die Schwierigkeit bei dieser Argumentation? Es ist eigentlich ganz einfach: Was geschieht, wenn wir die Kastanie und das Blatt fest zusammenkleben? Eigentlich müsste doch das leichte Blatt dann den Fall

der schwereren Kastanie etwas abbremsen, da es ja nicht so schnell mitfallen möchte wie die Kastanie. Zusammen bilden Blatt und Kastanie aber ein schwereres Objekt, das dann auch schneller fallen sollte als die Kastanie allein. Ein Widerspruch!

Übrigens war auch Aristoteles klar, dass der Luftwiderstand den Fall abbremst, doch er zog daraus nicht die richtigen Schlüsse. Er berücksichtigte nur, dass ein dichtes Medium wie Wasser den Fall stärker bremst als Luft. Insgesamt behauptete Aristoteles also, dass ein Objekt umso schneller fällt, je schwerer es ist und je dünner das umgebende Medium ist. Daraus leitete er eine interessante Schlussfolgerung ab: Wenn ein Körper umso schneller fällt, je dünner das umgebende Medium ist, dann müsste er im Vakuum, wo jedes Medium fehlt, unendlich schnell fallen. Das kam für Aristoteles nicht infrage, sodass er daraus schloss, dass es ein Vakuum nicht geben könne: „Die Natur verabscheut die Leere!“

Man sieht, dass Aristoteles das Konzept der Trägheit noch nicht kannte, das ja in Wahrheit unendliche Geschwindigkeiten verhindert. Deshalb musste immer ein Medium da sein, das die Bewegung bremst.

Aristoteles fand noch weitere Gründe dafür, warum die Natur das Vakuum verabscheut. Wenn man beispielsweise mit einem Strohhalm ein Glas Wasser trinken möchte und dabei die Luft aus dem Strohhalm saugt, so steigt das Wasser nur deshalb im Strohhalm nach oben, weil ansonsten ein Vakuum entstünde, was die Natur nicht zulässt. Nur deshalb kann man im Strohhalm Wasser von seinem natürlichen Ort weg nach oben saugen. Warum die Natur das Vakuum nicht zulässt, konnte Aristoteles aber nicht weiter begründen – es war einfach notwendig, damit das gesamte Regelsystem funktionierte. Den Begriff des Luftdrucks kannte man in der Antike noch nicht, auch wenn Aristoteles schon vermutete, dass Luft etwas wiegt.

Nun gab es in der Antike durchaus auch andere Ansichten darüber, ob ein Vakuum existieren könne. So gab es die Schule der Atomisten, die von den griechischen Philosophen Leukipp und seinem Schüler Demokrit im fünften Jahrhundert vor Christus gegründet worden war. Die Atomisten gingen davon aus, dass alle Materie aus unteilbaren Atomen bestünde, zwischen denen sich nichts als leerer Raum befindet. Damit lagen sie goldrichtig, wie wir heute wissen. Aber die atomistische Lehre konnte sich nicht wirklich durchsetzen, während die Werke von Aristoteles eine weite Verbreitung fanden. Was Platon und Aristoteles gesagt hatten, galt im Mittelalter als nahezu unangreifbares Gesetz.

## Die Theorie vom Impetus

Ein weiteres Problem mit der Physik von Aristoteles fällt auf, wenn man den Flug von Pfeilen und anderen Geschossen beschreiben möchte. Besonders relevant wurde dies, als in der Welt des vierzehnten Jahrhunderts Feuerwaffen immer wichtiger wurden. Man musste möglichst gut abschätzen, wie weit eine Kanone schießen konnte, um den Feind von den Mauern der eigenen Festung fern zu halten, bevor er diese mit seinen Kanonen zerstören konnte. Wo würde eine abgeschossene Kanonenkugel landen, und wie flog sie durch die Luft?

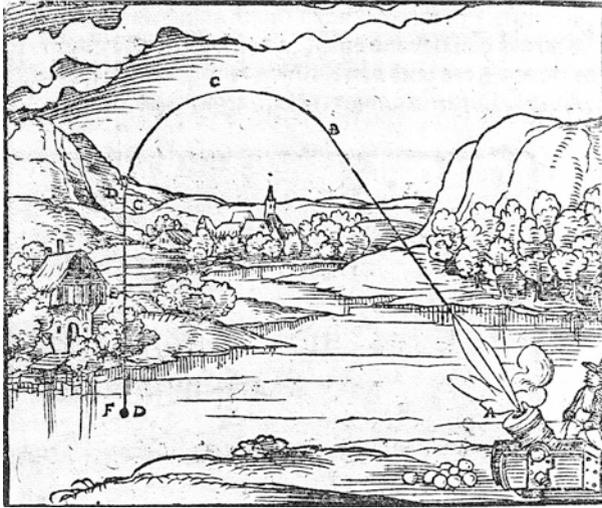
Das Hauptproblem war, warum die Kugel überhaupt flog. Was trieb sie vorwärts, wenn sie das Kanonenrohr erst einmal verlassen hatte? Nach den Gesetzen von Aristoteles musste es ja irgendetwas geben, das ihre Bewegung aufrecht erhielt: Alles, was sich bewegt, muss durch etwas bewegt werden!

Eigentlich kam dafür nur die Luft infrage, denn kein anderes Medium berührt die fliegende Kugel, und ein solches berührendes Medium war nach Aristoteles zwingend erforderlich. Könnten es vielleicht Luftwirbel sein, die sich hinter der Kugel bilden und diese vorwärts treiben? Tatsächlich entwickelte schon Platon notgedrungen solche Vorstellungen, obwohl doch eigentlich klar war, dass die Luft eher bremsen sollte – schließlich tat sie das bei einer senkrecht fallenden Kastanie ja auch.

Letzten Endes sah man dann doch ein, dass Luftwirbel nicht die richtige Erklärung sein konnten. Also kam man auf eine ganz neue Idee: Wie wäre es, wenn die Ursache für die Bewegung in der Kugel selbst stecken würde? Wenn sie der Kugel beim Abschuss gewissermaßen eingepflanzt worden ist? Eine Art innere Kraft, die die Bewegung aufrecht erhält?

Der französische Philosoph Johannes (Jean) Buridan prägte im vierzehnten Jahrhundert den Begriff *Impetus* für diese innere Kraft. Der beim Abschuss eingeprägte Impetus soll dabei proportional zur Geschwindigkeit und zur Masse der Kugel anwachsen – eine schnellere bzw. schwerere Kanonenkugel würde also mehr Impetus beinhalten als eine leichtere oder langsamere. Solange die Kanonenkugel Impetus besitzt und von diesem vorwärts getrieben wird, fliegt sie laut Buridan immer weiter geradeaus. Der Luftwiderstand zehrt jedoch den gespeicherten Impetus nach und nach auf und lässt die Kugel immer langsamer werden, da der innere Antrieb immer schwächer wird. Zu guter Letzt ist dann aller Impetus verbraucht und die Kugel fällt – ggf. nach einem kleinen Bogen – senkrecht nach unten in Richtung ihres natürlichen Ortes (Abb. 1.3).

Hatte Buridan damit womöglich bereits den modernen Begriff des Impulses entdeckt? Schließlich hängt der Impetus genauso von Masse und Geschwindigkeit ab, wie dies auch für den Impuls gilt. Doch es gibt einen



**Abb. 1.3** So stellte man sich die Flugbahn einer Kanonenkugel nach der Impetustheorie vor. (Quelle: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Buridan-impetus.jpg>)

wichtigen Unterschied: Der Impuls wird in der modernen Physik nicht als Ursache für die Bewegung angesehen – er gehört vielmehr zur Bewegung dazu und besitzt bestimmte Erhaltungseigenschaften, beispielsweise wenn Körper zusammenstoßen. Der Impetus wird bei Buridan dagegen wie eine Kraft verstanden, die den Körper vorantreibt, nur dass diese Kraft nach dem Abschuss der Kugel nicht mehr von außen kommt, sondern von innen. Damit bleibt Buridan der Ideenwelt von Aristoteles eng verbunden.

Den Unterschied zur modernen Sichtweise erkennt man auch daran, dass nach der Impetustheorie die Kugel erst dann zu fallen beginnt, wenn der eingeprägte Impetus ganz oder zumindest nahezu verbraucht ist. In Wirklichkeit beginnt sie aber bereits unmittelbar nach dem Abschuss zu fallen – erst langsam und dann immer schneller. Fast dreihundert Jahre sollten noch ins Land gehen, bis der Italiener Galileo Galilei dies erkennen und damit in der Lage sein würde, die wirkliche Flugbahn einer Kanonenkugel zu bestimmen.

Um die kreisförmige Bewegung der Himmelskörper zu erklären, schlug Buridan übrigens vor, dass der Impetus nicht nur linear, sondern auch kreisförmig wirken könne. Wenn also einem Planeten einst ein kreisförmiger Impetus eingeprägt wurde, und wenn es keinerlei Widerstand gäbe, dann würde er ewig seine Kreisbahn um die Erde ziehen. Das erinnert schon sehr

an den Begriff der Trägheit, dem wir bei Galilei wiederbegegnen werden. Aber die zugehörige Gedankenwelt war noch eine andere.

Es ist interessant, dass sogar Aristoteles bereits über Bewegungen nachdachte, die immer weitergehen und niemals aufhören. Im absolut leeren Raum, so argumentierte er, gäbe es nichts, was ein einmal in Bewegung gesetztes Objekt zum Stehen bringen könnte, denn jeder Ort wäre gleichwertig – warum sollte es dann eher hier als dort anhalten? Also müsse das Objekt entweder ruhen oder sich bis ins Unbegrenzte weiterbewegen, wenn nichts Stärkeres es daran hindert.

Im Grunde stellte Aristoteles damit schon fast eine Symmetrieüberlegung im modernen Sinn an: Weil im leeren Raum alle Orte gleichwertig sind, weiß das Objekt nicht, wo es anhalten soll, und bewegt sich deshalb immer weiter.<sup>4</sup> Einem ganz ähnlichen Argument werden wir später wiederbegegnen. Allerdings war für Aristoteles eine solche immer weiter geradeaus laufende Bewegung ohne jeden Antrieb undenkbar. Also folgerte er erneut, dass es den leeren Raum nicht geben könne. Schade, dass er nicht stattdessen zu dem Schluss kam, dass eine ewig weitergehende geradlinige Bewegung durchaus möglich ist. Es ist eben sehr schwierig, einmal gefasste Vorurteile wieder loszuwerden – auch in der Wissenschaft. Aber mal ehrlich – weder Sie noch ich wären in unserer von Reibung dominierten Welt wohl jemals von alleine auf die Idee gekommen, dass es eine ewig weitergehende Bewegung geben kann. Das widerspricht schlicht sämtlichen Erfahrungen, die wir tagtäglich machen.

## 1.2 Kopernikus, Kepler und das Ende der Kreise

Die Erfindung des Buchdrucks durch Johannes Gutenberg um etwa 1450 läutete in Europa eine Zeit des Wandels ein. Nicht nur die Bibel, sondern auch viele andere Texte des Glaubens, der Politik und des Wissen konnten nun vervielfältigt und in kurzer Zeit verbreitet werden. Die Gesellschaft begann, sich durch das Medium *Buch* ganz neu zu vernetzen.

Es war eine Zeit der Veränderungen, in der viele Strukturen des Mittelalters sich abschwächten oder sogar in Auflösung begriffen waren. Das Mittelalter ging zu Ende – die Neuzeit hatte begonnen. Die Macht der katholischen Kirche, die das Leben der Menschen in Mittel- und West-

---

<sup>4</sup>Aristoteles: *Physik*, Buch IV, Abschn. 8, z. B. unter <http://classics.mit.edu/Aristotle/physics.4.iv.html>.

europa über viele Jahrhunderte hinweg dominiert hatte, begann zu bröckeln. Als Martin Luther im Jahr 1517 seine 95 Thesen am Hauptportal der Schlosskirche in Wittenberg anschlug, begannen sich die aufgestauten Spannungen zu entladen – er hatte ohne es zu ahnen die Reformation ausgelöst. Ohne den Buchdruck, durch den seine Thesen in kurzer Zeit weit verbreitet werden konnten, wäre diese einschneidende Entwicklung nur schwer vorstellbar gewesen. Technische Erfindungen haben einen großen Einfluss auf gesellschaftliche Entwicklungen, wie uns die aktuell im Gang befindliche Digitale Revolution eindrucksvoll vor Augen führt.

### **Neue Kontinente und Ozeane**

Als der Buchdruck erfunden wurde, stand auch das Wissen über unsere Erde am Beginn eines tief greifenden Umbruchs. Seit im Jahr 1453 die Osmanen Konstantinopel erobert hatten, waren die wichtigen Handelswege nach Indien und China weitgehend blockiert oder unwirtschaftlich geworden. Also versuchte man, über den Seeweg direkt nach Indien zu gelangen. Und man wusste, dass man dafür im Süden irgendwie Afrika umrunden musste – ein weiter und beschwerlicher Weg.

Der genuesische Seefahrer Christoph Kolumbus hatte da eine andere Idee: Wie wäre es, einfach über den Atlantik hinweg immer weiter nach Westen zu fahren und so gewissermaßen „hinten herum“ nach Indien zu gelangen? Dass die Erde eine Kugel ist, wurde schon seit der Antike kaum noch infrage gestellt, und sogar die katholische Kirche hegte hier keine Zweifel – es schien also möglich. Bereits Aristoteles hatte vermutet, dass man von Gibraltar aus innerhalb weniger Tage den Atlantik überqueren und Asien erreichen könne. Damit hatte er allerdings – ebenso wie Kolumbus – die Größe der Erdkugel deutlich unterschätzt.

Im Auftrag Spaniens stach Kolumbus also gen Westen in See und stieß tatsächlich nach langer und gefahrvoller Fahrt am 12. Oktober 1492 auf Land. Doch es war nicht Indien, das er erreicht hatte, auch wenn er das bis an sein Lebensende glaubte. Kolumbus war vielmehr auf den Bahamas gelandet und hatte damit Amerika entdeckt.

Als immer mehr Beobachtungen dafür sprachen, dass es sich bei Kolumbus' Entdeckung nicht um Indien handeln konnte, wurden auch wieder andere Wege dorthin versucht. Im Jahr 1498 – also nur sechs Jahre später – schaffte es der portugiesische Seefahrer Vasco da Gama tatsächlich, die Südspitze Afrikas zu umschiffen und über den indischen Ozean bis nach Indien zu gelangen.

Im Jahr 1513 wurde dann endgültig klar, dass Kolumbus tatsächlich nicht nach Indien vorgestoßen war. Der Spanier Vasco Núñez de Balboa schlug

sich nämlich zusammen mit 190 Mann durch den unwegsamen Dschungel Panamas, denn er hatte von den einheimischen Indianerstämmen gehört, es gäbe auf der anderen Seite einen weiteren Ozean. Der Weg durch die tropische Hitze, durch unbekannte Flüsse und Sümpfe mitten durch feindliches Indianergebiet war mörderisch und kostete viele Menschenleben. Nach über drei Wochen erreichten sie schließlich die andere Küste und Núñez de Balboa erblickte als erster Europäer den größten Ozean der Erde: den *Pazifik*. „Hinter den abfallenden Bergen, den waldig und grün niedersinkenden Hügeln, liegt endlos eine riesige, metallenen spiegelnde Scheibe, das Meer, das Meer, das neue, das unbekannte, das bisher nur geträumte und nie gesehene, das sagenhafte, seit Jahren und Jahren von Kolumbus und allen seinen Nachfahren vergebens gesuchte Meer, dessen Wellen Amerika, Indien und China umspülen.“ So beschreibt Stefan Zweig diesen Augenblick in seinem Buch *Sternstunden der Menschheit*. Jenseits des Atlantiks gab es auf der anderen Seite Amerikas also einen weiteren, riesigen Ozean. Die Welt war offenbar größer, als Kolumbus es geahnt hatte. Dieser erlebte die Entdeckung des Pazifiks übrigens nicht mehr – er war sieben Jahre zuvor im Alter von nur 55 Jahren verstorben.

Dass man auch den neu entdeckten Ozean überqueren und so die gesamte Welt umrunden konnte, bewies bald darauf der portugiesische Seefahrer Ferdinand Magellan. Am 10. August 1519 stach er mit fünf Schiffen und rund 250 Seeleuten in See, überquerte den Atlantik, umrundete die Südspitze Südamerikas und überwand die Weiten des Pazifiks. Auf den Philippinen traf ihn dann ein tragisches Schicksal: Beim Versuch, die Eingeborenen der spanischen Herrschaft zu unterwerfen und zum Christentum zu bekehren, wurde er von ihnen angegriffen und getötet. Nur eines seiner fünf Schiffe mit gerade einmal 18 Mann schaffte es schließlich über den Indischen Ozean und die Südspitze Afrikas wieder bis nach Hause nach Sevilla, wo es am 6. September 1522 ankam – mehr als drei Jahre, nachdem sie von dort zu ihrer todbringenden Reise aufgebrochen waren. Sie hatten tatsächlich die Welt umrundet, aber auch einen hohen Preis dafür bezahlt.

Innerhalb von nur 30 Jahren hatte sich damit das Bild unserer Erde entscheidend gewandelt. Ein neuer Kontinent und ein riesiger Ozean waren entdeckt worden. Immer neue Expeditionen wurden unternommen, um das Bild der Erde zu vervollständigen, die neuen Länder in Besitz zu nehmen und wirtschaftlich auszubeuten. Neue Handelswege entstanden, während manche alten Handelswege langsam an Bedeutung verloren.

## Die Sonne im Zentrum der Welt: Kopernikus

Es ist wohl kein Zufall, dass sich nicht nur unser Bild der Erde, sondern auch unsere Vorstellung vom Kosmos in dieser stürmischen Zeit ändern sollte. Die uralte Vorstellung von Aristoteles mit der Erde im Zentrum der Welt, umgeben von den Sphären der Planeten, der Sonne und der Sterne, hatte mittlerweile ordentlich Staub angesetzt. Wie sollte man beispielsweise damit verstehen, warum die Planeten keineswegs eine gleichmäßige Kreisbahn am Himmel beschreiben, sondern immer wieder in Schleifen relativ zu den Fixsternen rückwärts laufen? Und warum entfernen sich Merkur und Venus am Himmel nie allzu weit von der Sonne, sondern pendeln relativ zur Sonne hin und her?

Diese Mängel waren auch in der Antike wohlbekannt. Der griechische Philosoph Claudius Ptolemäus hatte daher im zweiten Jahrhundert nach Christus das Bild von Aristoteles verfeinert und für die Planeten zusätzliche kleine Kreisbewegungen – sogenannte Epizykel – gefordert, die sich mit den großen Kreisbewegungen der Planeten um die Erde überlagern. Aus einer streng kreisförmigen Bahn wurde somit eine verschnörkelte Kreisbahn. So konnte Ptolemäus die merkwürdigen Schleifen der Planetenbahnen am Fixsternhimmel zumindest einigermaßen beschreiben. Im Lauf der Zeit kamen dann immer mehr Epizykel hinzu, um die Genauigkeit zu verbessern. Schöner wurde das Ptolemäische Weltbild dadurch nicht unbedingt. Es schien aber keine gute Alternative zu geben, wenn man die Erde im Zentrum der Welt belassen wollte, und so blieb dieses Bild bis in die frühe Neuzeit hinein die dominante Vorstellung vom Kosmos.

Würde man anstelle der Erde die Sonne ins Zentrum rücken, umkreist von den Planeten einschließlich der Erde, so würden sich die merkwürdigen Schleifenbahnen der Planeten wie von selbst ergeben. Wenn sich beispielsweise Erde und Mars auf derselben Seite der Sonne befinden, so eilt die schnellere Erde dem Mars voraus, und der Mars bleibt vor dem Hintergrund der Sterne scheinbar zurück. Wenn sich die Erde dann nach einigen Monaten auf der anderen Seite der Sonne befindet, so kehrt sich die Bewegungsrichtung des Mars aus Sicht der Erde scheinbar um. Und Venus und Merkur können sich nur deshalb am Himmel nicht allzu weit von der Sonne entfernen, weil sie die Sonne auf engeren Umlaufbahnen umkreisen als die Erde – sie sind einfach näher an der Sonne dran.

Schon im antiken Griechenland entstanden erste Vorstellungen in diese Richtung, beispielsweise bei Aristarchos von Samos im dritten vorchristlichen Jahrhundert. Aber diese Ideen konnten sich nicht durchsetzen und gerieten bald wieder in Vergessenheit. Es erschien einfach zu merkwürdig,



**Abb. 1.4** Nikolaus Kopernikus (1473–1543). (Quelle: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kopernikus,\\_Nikolaus\\_-\\_Reußner\\_1578\\_Portrait1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kopernikus,_Nikolaus_-_Reußner_1578_Portrait1.jpg))

dass wir mitsamt der Erde um die Sonne rasen sollen, ohne dass wir davon auch nur das Geringste spüren.

Auch im späten Mittelalter gab es immer wieder vereinzelte Überlegungen, ob die Erde wirklich unbewegt im Zentrum der Welt ruht. Doch erst der Domherr, Astronom und Arzt Nikolaus Kopernikus (Abb. 1.4) griff die Idee eines sonnenzentrierten Weltbilds im frühen sechzehnten Jahrhundert wieder ernsthaft auf und arbeitete sie im Detail aus.

Kopernikus wurde im Jahr 1473 in der Hansestadt Thorn (heute polnisch Toruń) als Sohn wohlhabender Eltern geboren. Als er zehn Jahre alt war, starb sein Vater. Doch Kopernikus hatte Glück, denn sein Onkel, Bischof Lucas Watzenrode, kümmerte sich um seine Ausbildung und ermöglichte ihm das Studium des damals üblichen klassischen Fächerkanons in Krakau – es war genau die Zeit, in der Kolumbus in Amerika an Land ging. Danach ging Kopernikus für mehrere Jahre nach Italien, wo er neben Jura