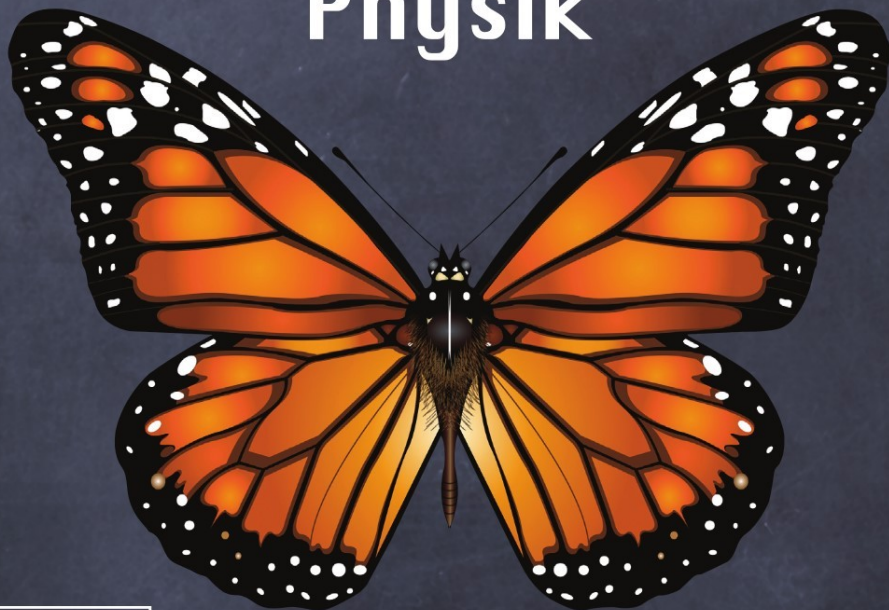


Physik



Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

Sachbuch

Joanne Baker

50 **schlüssel**
ideen

Joanne Baker

50 Schlüsselideen

Physik



Aus dem Englischen übersetzt von Bernhard Gerl

Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

Inhalt

Einleitung 3

MASSE IN BEWEGUNG

- 01 Das Mach'sche Prinzip 4
- 02 Newtons Bewegungsgesetze 8
- 03 Die Kepler'schen Gesetze 12
- 04 Newtons Gravitationsgesetz 16
- 05 Energieerhaltung 20
- 06 Einfache harmonische Schwingungen 24
- 07 Das Hooke'sche Gesetz 28
- 08 Die Zustandsgleichung des idealen Gases 32
- 09 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik 36
- 10 Der absolute Nullpunkt 40
- 11 Die Brown'sche Bewegung 44
- 12 Die Chaostheorie 48
- 13 Die Bernoulli-Gleichung 52

WELLEN, STROM UND LICHT

- 14 Newtons Farbtheorie 56
- 15 Das Huygens'sche Prinzip 60
- 16 Das Snellius'sche Gesetz 64
- 17 Die Bragg'sche Gleichung 68
- 18 Die Fraunhofer-Beugung 72
- 19 Der Doppler-Effekt 76
- 20 Das Ohm'sche Gesetz 80
- 21 Flemings Rechte-Hand-Regel 84
- 22 Die Maxwell'schen Gleichungen 88

QUANTENRÄTSEL

- 23 Das Planck'sche Strahlungsgesetz 92
- 24 Der photoelektrische Effekt 96
- 25 Die Schrödinger-Gleichung 100

- 26 Die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation 104
- 27 Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie 108
- 28 Schrödingers Katze 112
- 29 Das EPR-Paradoxon 116
- 30 Das Pauli-Prinzip 120
- 31 Supraleitung 124

ATOME UND TEILCHEN

- 32 Rutherfords Atommodell 128
- 33 Antimaterie 132
- 34 Kernspaltung 136
- 35 Kernfusion 140
- 36 Das Standardmodell 144
- 37 Die Feynman-Diagramme 148
- 38 Das Higgs-Boson 152
- 39 Die String-Theorie 156

RAUM UND ZEIT

- 40 Die Spezielle Relativitätstheorie 160
- 41 Die Allgemeine Relativitätstheorie 164
- 42 Schwarze Löcher 168
- 43 Das Olbers'sche Paradoxon 172
- 44 Die Hubble-Konstante 176
- 45 Der Urknall 180
- 46 Die Kosmische Inflation 184
- 47 Dunkle Materie 188
- 48 Die kosmologische Konstante 192
- 49 Das Fermi-Paradoxon 196
- 50 Das anthropische Prinzip 200

Glossar 204

Index 206

Einleitung

Als ich meinen Freunden von den Plänen zu diesem Buch erzählte, witzelten sie, über Physik müsse mal wohl vor allem eines wissen: dass sie schwer zu verstehen sei. Und trotzdem haben wir tagtäglich mit Physik zu tun! Wenn wir in einen Spiegel oder durch eine Brille schauen, begegnen uns die Gesetze der Optik. Wenn wir unseren Wecker stellen, messen wir die Zeit. Wenn wir einem Stadtplan folgen, bewegen wir uns im geometrischen Raum. Unsichtbare elektromagnetische Wellen verbinden unsere Handys. Doch Physik ist mehr als Technik: Physikalische Gesetze liegen der Bewegung des Mondes, den Farben des Regenbogens und der Härte von Diamanten zugrunde. Selbst das Blut in unseren Adern befolgt die Gesetze der Physik, der Wissenschaft von der materiellen Welt.

Die moderne Physik steckt voller Überraschungen. Die Quantenphysik stellte unsere Weltansicht auf den Kopf, indem sie die schiere Existenz der Dinge in Zweifel zog. Die Kosmologie befasst sich damit, was das Universum ist: Wo kommt es her – und wie sind wir hineingekommen? Ist unser Universum etwas ganz Außerordentliches, oder musste es zwangsläufig entstehen? Als Physiker ins Innere von Atomen blickten, entdeckten sie die verborgene Geisterwelt der Elementarteilchen. Ein Mahagonisch, mag er auch noch so solide aussehen, besteht hauptsächlich aus leerem Raum; seine Atome werden durch ein Gerüst aus Kräften an ihrem Platz gehalten. Die Physik, einst aus der Philosophie hervorgegangen, kehrt nun in gewisser Weise zurück zu ihren Wurzeln, indem sie uns die Welt aus neuen, unerwarteten Blickwinkeln zeigt, die über unsere Alltagserfahrung hinausreichen.

Natürlich aber ist Physik nicht nur ein Haufen phantasievoller Ideen, sondern eine Wissenschaft, die sich auf Tatsachen und Experimente gründet. Unablässig arbeiten die Forscher an der Verfeinerung der Formulierung physikalischer Gesetze, indem sie Fehler beheben und neue Ideen ergänzen – so, wie Software-Entwickler ihre Computerprogramme verbessern. Wenn sich genug Beweise angesammelt haben, kann sich die Richtung des Denkens auch einmal von Grund auf ändern; bis sich eine neue Lehrmeinung aber allgemein durchgesetzt hat, verstreicht manchmal viel Zeit. Mehr als eine Generation musste vergehen, bis Kopernikus' Idee, dass die Erde um die Sonne kreist, Akzeptanz fand. Heutzutage geht es schneller – die Grundzüge der Quantenphysik und Relativitätstheorie wurden immerhin innerhalb eines Jahrzehnts in das Gebäude der Physik integriert. Selbst die erfolgreichsten Gesetzmäßigkeiten aber stehen ständig auf dem Prüfstand der Wissenschaftler.

In diesem Buch nehme ich Sie mit auf eine Reise durch die Welt der Physik. Wir machen Station bei Grundbegriffen wie Schwerkraft, Licht und Energie und erreichen schließlich auch modernste Gebiete wie Quantentheorie, Chaosforschung und Dunkle Energie. Ich hoffe, mein Buch verführt Sie, wie es ein guter Reiseführer sollte, dazu, auf eigene Faust noch mehr zu erkunden. Physik ist etwas Grundsätzliches in unserem Leben – aber außerdem macht sie *Spaß!*

01 Das Mach'sche Prinzip

Ein Kind, das auf einem Karussell herumwirbelt, wird von weit entfernten Sternen nach außen gezogen. Das ist das Mach'sche Prinzip: „Masse hier beeinflusst Trägheit dort.“ Durch die Gravitationskraft beeinflussen weit entfernte Objekte, wie sich Dinge in unserer Nähe voranbewegen und drehen. Aber warum ist das so? Und wie kann man überhaupt feststellen, ob sich etwas bewegt oder nicht?

Kennen Sie diese Situation? Sie sitzen in einem Zug, der in einem Bahnhof steht, und schauen aus dem Fenster. Plötzlich bemerken Sie, dass sich der Zug auf dem Nachbargleis bewegt. Einen Moment lang sind Sie verwirrt: Fährt Ihr Zug jetzt los, oder ist der andere gerade angekommen? Wie könnten Sie eigentlich mit Sicherheit feststellen, welcher Zug von beiden fährt und welcher steht?

Diese Frage beschäftigte im 19. Jahrhundert den österreichischen Philosophen und Physiker Ernst Mach, der damit in die Fußspuren seines großen Vorgängers Isaac Newton trat. Newton betrachtete – im Gegensatz zu Mach – den Raum als absoluten, unveränderlichen Hintergrund mit einem wie auf Millimeterpapier gezeichneten Koordinatensystem. Er verfolgte alle Bewegungen in Bezug zu diesem Raster. Mach war damit nicht einverstanden; stattdessen vertrat er die Ansicht, die Bewegung eines Objekts ließe sich nur relativ zu den Objekten seiner Umgebung begreifen. Was bedeutet denn Bewegung, wenn man sie nicht im Kontext der Umwelt betrachtet? In dieser Hinsicht kann Mach, von den Gedanken des Newton-Gegenspielers Gottfried Leibniz inspiriert, als Vorreiter Albert Einsteins gelten, der ebenfalls nur in der Relativbewegung einen Sinn sah. Mach argumentierte, ein Ball etwa bewege sich in Frankreich nicht anders als in Australien; der Ort des Koordinatensystems im Raum sei also irrelevant. Nur die Schwerkraft könne die Bewegung des Balls nachweislich beeinflussen: Auf dem Mond könnte die Bahnkurve durchaus

Zeitleiste

ca. **335** v. Chr.

Aristoteles stellt fest, dass es Kräfte sind, die Objekte in Bewegung setzen

1640 n Chr.

Galilei formuliert das Trägheitsprinzip

eine andere sein, denn dort wirke auf seine Masse eine geringere Gravitationskraft als auf der Erde.

Weil die Gravitation dafür sorgt, dass jedes Objekt im Universum jedes andere anzieht, „fühlt“ jeder Gegenstand durch diese Wechselwirkung die Anwesenheit aller anderen. Die Bewegung muss deshalb letztlich von der Verteilung der Materie (oder deren Masse) im Raum abhängen, nicht von den Eigenschaften des Raums an sich.

Masse Was genau ist Masse? Die Masse ist ein Maß dafür, wie viel Materie ein Objekt enthält. Die Masse eines Metallstücks ist gleich der Summe der Massen aller Atome, aus denen es besteht. Zwischen Masse und Gewicht besteht ein feiner Unterschied: Das Gewicht ist ein Maß für die Kraft, mit der die Gravitation eine Masse nach unten zieht. Ein Astronaut wiegt auf dem Mond weniger als auf der Erde, weil die Schwerkraft auf dem kleineren Mond geringer ist als auf der Erde, aber die Masse des Astronauten bleibt gleich – die Zahl der Atome, aus denen er besteht, hat sich schließlich nicht geändert. Albert Einstein wies die Äquivalenz von Masse und Energie nach. Masse kann vollständig in Energie umgewandelt werden; also ist Masse letztendlich nichts anderes als Energie.

» Der absolute Raum, der aufgrund seiner Natur ohne Beziehung zu irgendetwas außer ihm existiert, bleibt immer homogen und unbeweglich. «

Isaac Newton, 1687

Trägheit Die Trägheit ist ein Maß dafür, wie viel Mühe aufzuwenden ist, um eine Masse in Bewegung zu versetzen. Je größer die Trägheit eines Gegenstands ist, desto hartnäckiger widersetzt dieser sich der Bewegung. Selbst in der Schwerelosigkeit des Weltraums benötigt man viel Kraft, um ein Objekt mit einer großen Trägheit zu beschleunigen. Um einen riesigen Asteroiden, der sich auf Kollisionskurs mit der Erde befindet, aus der Bahn zu drängen, ist eine gewaltige Kraft aufzuwenden; diese Kraft kann ebenso gut von der plötzlichen (kurzzeitigen) Explosion einer Atombombe geliefert werden oder „sanfter“ über längere Zeit einwirken. Vergleichsweise winzige Triebwerke genügen hingegen, um ein kleines, wendiges, leichtes Raumschiff zu lenken.

Das Trägheitsprinzip wurde im 17. Jahrhundert von dem italienischen Astronomen Galileo Galilei eingeführt: Solange ein Objekt nicht beeinflusst wird, das heißt, keine Kräfte darauf wirken, ändert es seinen Bewegungszustand nicht. Falls es sich

1687

Newton veröffentlicht seine Gedanken zum „Eimer-Experiment“

1893

Mach veröffentlicht „Die Mechanik in ihrer Entwicklung“

1905

Einstein veröffentlicht seine Spezielle Relativitätstheorie

gerade bewegt, dann setzt es seine Bewegung in gleicher Richtung und mit gleicher Geschwindigkeit fort; falls es gerade ruht, bleibt es in Ruhe. Aus dieser grundsätzlichen Idee entwickelte Newton sein erstes Bewegungsgesetz.

Newtons Eimer Auf Newton geht auch der Begriff der Gravitation zurück. Er sah, dass Massen einander anziehen: Ein Apfel fällt vom Baum auf die Erde, weil er von deren Masse angezogen wird. Umgekehrt wird die Erde auch von der Masse des Apfels angezogen; allerdings würde es kaum gelingen, die winzige Verschiebung der ganzen Erde in Richtung des Apfels zu messen.

Newton bewies, dass die Gravitationskraft mit der Entfernung der beteiligten Objekte voneinander stark abnimmt. Deshalb fühlen wir die Anziehungskraft der Erde weit oben in der Atmosphäre deutlich weniger als auf der Erdoberfläche. Wie weit wir uns aber auch immer entfernen, die Gravitationskraft verschwindet niemals völlig, stets beeinflusst sie unsere Bewegung ein ganz kleines bisschen. In der Tat üben sämtliche Objekte im Universum Anziehungskräfte auf uns aus, die auf alle unsere Bewegungen wirken – mag der Einfluss auch größtenteils unmerklich sein.

Newton versuchte, das Verhältnis zwischen Gegenständen und Bewegung zu verstehen. So stellte er sich einen Eimer Wasser vor, der, am Henkel gehalten, um die Längsachse gedreht wird. Solange Sie langsam drehen, passiert nicht viel; das Wasser bleibt still stehen. Drehen Sie aber schneller, dann dreht sich das Wasser mit – die Oberfläche bekommt in der Mitte eine Delle, weil die Flüssigkeit beginnt, an den Wänden emporzusteigen. Würde sie nicht von den Wänden zurückgehalten, dann würde sie nach außen weggeschleudert. Newton meinte nun, die Bewegung des Wassers ließe sich nur im festen Bezugssystem eines absoluten Raums verstehen: Um festzustellen, ob sich der Eimer dreht, müsste man nur auf die Wasseroberfläche schauen, an deren Form man die Wirkung der Kräfte erkennen könne.

Jahrhunderte später griff Mach dieses Gedankenexperiment wieder auf. Wenn der wassergefüllte Eimer der einzige Gegenstand im Universum wäre, woher sollte man dann wissen, ob es der Eimer ist, der rotiert, oder ob sich nicht vielmehr das Wasser in einem festgehaltenen Eimer bewegt? Hier kommt man nur weiter, wenn man dem Universum des Eimers ein Bezugsobjekt hinzufügt, zum Beispiel die Wand eines Zimmers oder auch einen weit entfernten Stern. Nur dann kann man klar entscheiden, ob sich der Eimer oder das Wasser relativ zu diesem Gegenstand dreht. Nicht anders lautet die Frage, wenn wir die Sonne und die Sterne am Himmel beobachten. Dreht sich die Erde, oder dreht sich das Sternenzelt? Woher können wir das wissen?

Mach und Leibniz zufolge ist Bewegung nur relativ zu einem äußeren Bezugsobjekt definiert; deshalb ist in einem Universum, das nur ein einziges Objekt enthält, auch der Begriff „Trägheit“ bedeutungslos. Gäbe es im Universum nichts als unse-

Ernst Mach 1838–1916

Außer für das Mach'sche Prinzip wurde der österreichische Physiker Ernst Mach bekannt für seine Arbeiten in der Optik, der Akustik und der Physiologie der Sinneswahrnehmung, für seine Beiträge zur Philosophie der Naturwissenschaft und vor allem für seine Forschungen zur Überschallgeschwindigkeit. 1877 veröffentlichte er einen wegweisenden Artikel, in dem er beschrieb, wie ein mit Überschallgeschwindigkeit fliegendes Projektil eine

Schockwelle erzeugt, die man sich wie die Bugwelle eines Schiffes vorstellen kann. Diese Schockwelle ist für den Überschallknall von Flugzeugen verantwortlich. Das Verhältnis der Geschwindigkeit eines Geschosses oder Flugzeugs zur Schallgeschwindigkeit im umgebenden Medium nennt man heute die Machzahl; Mach 2 bedeutet also doppelte Schallgeschwindigkeit.

ren Planeten, könnten wir nie feststellen, dass sich die Erde dreht. Weil es auch Sterne gibt, können wir zumindest aussagen, dass die Erde relativ zu ihnen rotiert.

Das Konzept der Absolut- und Relativbewegung, das im Mach'schen Prinzip ausgedrückt ist, inspirierte viele Physiker, insbesondere auch Albert Einstein (auf den der Begriff „Mach'sches Prinzip“ zurückgeht), der darauf seine Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie aufbaute. Dabei beantwortete er eine der Fragen, die Mach offen gelassen hatte: Wo sind die zusätzlichen Kräfte, die bei Rotation und Beschleunigung wirken müssten? Einstein zeigte, dass wir wirklich eine kleine Kraft spüren müssen, wenn das ganze Universum relativ zur Erde rotiert. Diese Kraft lässt unseren Planeten in einer bestimmten Weise „wackeln“.

Die Natur des Weltalls war Wissenschaftlern Jahrtausende lang ein Rätsel. Moderne Teilchenphysiker stellen sich das Universum als einen Hexenkessel subatomarer Teilchen vor, die ständig erzeugt und vernichtet werden. Vielleicht sind Masse, Trägheit und Bewegung am Ende nichts weiter als Erscheinungsformen einer blubbernden Quantensuppe.

02 Newtons Bewegungsgesetze

Isaac Newton gilt als einer der bedeutendsten, einflussreichsten, aber auch charakterlich schwierigsten Wissenschaftler aller Zeiten. Er war an der Einführung der Infinitesimalrechnung beteiligt, erklärte die Gravitation und fand heraus, aus welchen Farben weißes Licht besteht. Mit seinen berühmten drei Bewegungsgesetzen lässt sich begründen, dass die Flugbahn eines Golfballs gekrümmt ist, dass wir im Autositz bei einer Kurvenfahrt nach außen gedrückt werden und dass wir die Kraft fühlen, mit der ein Tennisschläger den Ball trifft.

Newton kannte noch keine Motorräder. Aber er fand die Gesetze, die den Steilwandshows von Stuntfahrern zugrunde liegen und auch erklären, warum Hallenrad-sportler ihre Runden auf ovalen Bahnen drehen, die in Kurven nach Innen abfallen.

Newton lebte im 17. Jahrhundert. Er gilt als einer der brilliantesten Köpfe der Naturwissenschaft und einer der wenigen Universalgelehrten überhaupt. Sein Forschergeist und seine unersättliche Neugier ließen ihn nicht ruhen, bis er einigen der scheinbar einfachsten, aber grundsätzlichen Zusammenhänge unserer Welt auf die Spur gekommen war: Warum ist die Wurfbahn eines Balls gekrümmt? Warum fallen die Dinge nach unten und nicht nach oben? Wie und warum bewegen sich die Planeten um die Sonne?

In den 1660er-Jahren, als mäßig erfolgreicher Student in Cambridge, begann Newton, die bedeutenden Werke der Mathematik zu lesen, die ihn so in ihren Bann zogen, dass er sich von Geschichte, Sprachen und Theologie ab- und der Physik zuwandte. Als die Pest in Cambridge ausbrach, musste er nach Hause zurückkehren. Während dieser unfreiwilligen Ferien unternahm er die ersten Schritte auf dem Weg zu seinen Bewegungsgesetzen.

Zeitleiste

ca. 350 v. Chr.

Aristoteles schlägt in *Physik* vor, dass Bewegungen von Veränderungen verursacht werden

1640 n. Chr.

Galilei formuliert das Trägheitsprinzip

Newton's Bewegungsgesetze

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>1. Ein Körper verharrt in Ruhe oder geradlinig-gleichförmiger Bewegung, solange er nicht durch einwirkende Kräfte zur Änderung seines Zustands gezwungen wird.</p> <p>2. Die Änderung der Bewegung (die Beschleunigung), die eine gegebene Kraft an einem Kör-</p> | <p>per verursacht, ist proportional zur Stärke dieser Kraft ($F = m \cdot a$).</p> <p>3. Kräfte treten immer paarweise auf. Die von zwei Körpern aufeinander ausgeübten Kräfte sind gleich, aber entgegengesetzt gerichtet.</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Kräfte Zur Formulierung seines ersten Gesetzes borgte sich Newton Galileis Trägheitsprinzip. Das erste Gesetz besagt: Ein Körper verharrt in Ruhe oder gleichförmiger (und geradliniger) Bewegung, solange keine äußere Kraft auf ihn wirkt. Ein still liegender Ball fängt nicht von allein an zu rollen – und ein rollender Ball wird nur durch die Wirkung einer Kraft schneller oder langsamer. Die Kraft (zum Beispiel ein Stoß) bewirkt eine Beschleunigung, das heißt, eine zeitliche Änderung der Geschwindigkeit. (Physikalisch gesehen ist eine Verzögerung übrigens nichts anderes als eine Beschleunigung mit negativem Vorzeichen.)

Was sagt unsere Alltagserfahrung dazu? Stellen Sie sich vor, Sie schießen einen Hockeypuck über die spiegelglatte Eisfläche. Er gleitet sicher eine ziemlich lange Strecke, aber schließlich kommt er (scheinbar „von selbst“) zum Stehen. Die Kraft, die von außen auf ihn wirkt und ihn abbremst, stammt aus der Reibung mit der Eisfläche. Gibt es eine Situation, in der keine Reibung wirkt? Am nächsten kommt man dieser Vorstellung im Weltraum, doch selbst da gibt es äußere Kräfte, etwa die Gravitationskraft. Die Bedeutung des ersten Newton'schen Gesetzes liegt darin, dass es uns als Ausgangspunkt zum Verständnis von Kräften und Bewegungen dienen kann.

Beschleunigung Newtons zweites Gesetz setzt die Stärke der Kraft zur Beschleunigung in Beziehung, die sie einem Körper verleiht. Wie viel Kraft notwendig ist, um einen Körper zu beschleunigen, hängt direkt von seiner Masse ab. Schwere Gegenstände – genauer gesagt solche mit einer großen Trägheit – lassen sich nur mit entsprechend hohem Kraftaufwand in Bewegung setzen. Der Physiker gibt diesen Zusammenhang mit einer Formel an: Kraft gleich Masse mal Beschleunigung oder $F = m \cdot a$. Um also ein Auto in einer Minute von null auf 100 km/h zu beschleunigen, benötigt man eine Kraft F , die so groß ist wie die Masse m des Autos multipliziert mit der Beschleunigung a (der Zunahme der Geschwindigkeit,

1687

Newton veröffentlicht
seine *Principia*

1905

Einstein veröffentlicht seine
Spezielle Relativitätstheorie

100 km/h, pro Zeit, 1 min). Genauso gut gilt die Formel andersherum: Beschleunigung a ist gleich Kraft F geteilt durch Masse m . Für eine gegebene Beschleunigung ist demnach immer gleich viel Kraft pro Masseneinheit notwendig. Anders gesagt: Man braucht stets die gleiche Kraft, um eine Masse von einem Kilogramm zu beschleunigen, ganz gleich, ob diese Masse in einem kleinen Goldklumpen oder einem bauschigen Kopfkissen steckt. In diesem Zusammenhang ist auch ein berühmtes Gedankenexperiment von Galilei interessant: Eine Kanonenkugel und eine Feder werden gleichzeitig aus gleicher Höhe fallen gelassen. Welcher Gegenstand kommt eher auf der Erde an? Natürlich die Kugel, werden Sie antworten. Die Ursache dafür ist aber nur der größere Luftwiderstand, den die Feder durch ihre Form besitzt. Im luftleeren Raum wirkt auf die Kugel zwar eine größere beschleunigende Schwerkraft (da ihre Masse größer ist), aber eine entsprechend große Trägheit wirkt dieser Beschleunigung entgegen. Die beschleunigende Schwerkraft der Feder ist geringer, dafür aber auch die zu überwindende Trägheit. Deshalb treffen Kugel und Feder im Vakuum gleichzeitig auf den Boden. Die Astronauten von Apollo 15 haben es 1971 nachgeprüft: Sie zeigten, dass auf dem Mond, wo es keine bremsende Atmosphäre gibt, die Feder genauso schnell fällt wie ein schwerer Geologenhammer.

Aktion und Reaktion Newtons drittes Gesetz sagt aus, dass jede Kraft, die auf einen Körper wirkt, dort eine genauso große, entgegengesetzt gerichtete Gegenkraft erzeugt. Mit anderen Worten: Auf jede Aktion (*actio*) erfolgt eine (gleich große) Reaktion (*reactio*). Die Reaktion fühlt man zum Beispiel als Rückstoß. Denken Sie an einen Inlineskater, der einen anderen anschubst: Nach dem Stoß bewegen sich die beiden voneinander weg. Ein Schütze fühlt den Rückstoß der Waffe gegen seine Schulter. Die Rückstoßkraft ist genauso groß wie die Kraft, die der Inlineskater auf seinen Nachbarn ausübt oder mit der das Geschoss aus dem Lauf geschleudert wird. In Actionfilmen sieht man übrigens oft, wie das Opfer eines Schusswechsels beim Auftreffen der Kugel nach hinten geworfen wird. Das ist arg übertrieben – wäre die Kraft wirklich so groß, dann müsste umgekehrt auch der Schütze durch den Rückstoß seiner Waffe nach hinten umfallen! Wenn wir vom Boden abspringen, üben wir natürlich auch eine kleine, nach unten gerichtete Kraft auf die Erde aus. Weil die Erde so viel mehr Masse hat als ein Mensch, lässt sie das allerdings völlig ungeführt.

Ausgerüstet mit seinen drei Gesetzen, auch als Newton'sche Axiome bekannt, und der Gravitation konnte Newton so gut wie alle Bewegungsformen erklären, vom Fallen des Apfels bis zum Flug der Kanonenkugel. Hätte es damals schon Motorräder gegeben, hätte Newton sich ruhig auch an eine Steilwandfahrt wagen können. Hätten Sie auch genügend Vertrauen in die Arbeit des großen Gelehrten? Das erste Gesetz sagt, dass das Motorrad und sein Fahrer ohne äußere Kraft in gerader

Isaac Newton 1643–1727

Isaac Newton wurde als erster Wissenschaftler der britischen Royal Society zum Ritter geschlagen. Während er in der Schule als faul und un aufmerksam galt und in Cambridge zunächst kein herausragendes Talent bewies, blühte er plötzlich auf, als die Universität im Sommer 1665 nach dem Ausbruch der Pest zeitweise geschlossen wurde. Zu Hause in Lincolnshire beschäftigte er sich mit Mathematik, Physik und Astronomie und legte den Grundstein für die Infinitesimalrechnung. Er formulierte erste Fassungen seiner drei Bewegungsgesetze und leitete das quadratische Abstandsgesetz für die Gravitation her. Nach dieser bemerkenswert produktiven Phase wurde er 1669 mit nur 27 Jahren auf den Lucasischen Lehrstuhl für Mathematik berufen. Nun wandte er sich der Optik zu. Mithilfe eines Prismas fand er heraus, dass sich weißes Licht aus den Regenbogenfarben zusammensetzt – ein

Thema, über das er leidenschaftlich mit Robert Hooke und Christiaan Huygens stritt. Newton schrieb zwei große Abhandlungen, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (kurz die *Principia*) und *Opticks*. Im späteren Verlauf seiner Karriere engagierte sich Newton in der Politik. Er verteidigte die akademische Freiheit, als König James II. versuchte, sich in die Berufungsverfahren der Universitäten einzumischen, und wurde 1689 zum Vertreter der Universität Cambridge im britischen Parlament gewählt. Newtons Charakter war widersprüchlich: Einerseits stets auf Aufmerksamkeit bedacht, galt er andererseits als Eigenbrötler, der keine Kritik vertragen konnte. Er nutzte seine einflussreiche Position, um erbittert gegen seine wissenschaftlichen Feinde zu kämpfen, und blieb so bis zu seinem Tod ein problematischer Zeitgenosse.

Linie mit konstanter Geschwindigkeit weiterfahren wollen. Um das Motorrad aber auf der gekrümmten Bahn des Steilwandzylinders zu halten, benötigt man nach dem zweiten Gesetz eine Kraft, die ständig die Richtung ändert. In diesem Fall wird sie von der Bahn durch die Räder übertragen; sie ist gleich der Masse des Motorrads samt Fahrer, multipliziert mit der (Zentral-)Beschleunigung. Das dritte Gesetz erklärt den Druck, den das Motorrad durch die Gegenkraft auf die Fahrbahn ausübt. Dieser Druck „klebt“ die Räder an die steile Wand. Wenn das Motorrad schnell genug fährt (die Zentralbeschleunigung hoch genug ist), kann sich der Stuntfahrer sogar an eine senkrechte Wand wagen.

Auch heute muss man eigentlich nur Newtons Gesetze kennen, um die Kräfte zu beschreiben, die auf ein Fahrzeug wirken, das um eine Kurve fährt oder – Gott bewahre! – aus der Kurve getragen wird. Die Gesetze versagen erst, wenn sich ein Objekt fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegt oder wenn es extrem leicht ist. In diesen Fällen übernehmen Relativitätstheorie und Quantenmechanik die Regie.

03 Die Kepler'schen Gesetze

Johannes Kepler suchte überall nach Mustern. Die genaue Betrachtung astronomischer Tabellen, die die scheinbaren Schleifenbewegungen des Planeten Mars am Himmel dokumentierten, führte ihn zu drei Gesetzen der Planetenbewegung. Kepler beschrieb die elliptischen Bahnkurven der Planeten auf ihrem Weg um die Sonne und erklärte, warum sich die Himmelskörper umso langsamer bewegen, je weiter sie von der Sonne entfernt sind. Keplers Gesetze revolutionierten nicht nur die Astronomie, sondern bildeten auch die Grundlage für Newtons Gravitationsgesetz.

Sonnennahe Planeten kreisen schneller um ihr Zentralgestirn als sonnenferne. Merkur benötigt für einen Umlauf nur 80 Erdentage. Würde Jupiter sich mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen, hätte er einen Umlauf in 3,5 Erdenjahren geschafft;

in Wirklichkeit braucht er dazu aber zwölf Jahre. Von Zeit zu Zeit überholen die Planeten einander. Wenn die Erde gerade an einem Planeten vorbeizieht, scheint es uns, als würde dieser rückwärts laufen. Zu Keplers Lebzeiten konnte man sich diese rückläufigen Bewegungen nicht erklären. Seine Lösung dieses Rätsels brachte Kepler auf den Weg zu den drei Gesetzen der Planetenbewegung.

Plötzlich wurde mir bewusst, dass diese winzige, herrlich blaue Erde die Erde war. Ich hob meinen Daumen und schloss ein Auge, und mein Daumen verdeckte den ganzen Planeten. Ich fühlte mich nicht wie ein Riese. Ich fühlte mich sehr, sehr klein.

Neil Armstrong, *1930

Polyeder Der deutsche Mathematiker Johannes Kepler suchte nach Mustern in der Natur. Er lebte im späten 16. und frühen 17. Jahrhundert, zu einer Zeit also, als man die Astrologie mit großer Ernsthaftigkeit betrieb und die Astronomie als physikalische Wissenschaft noch in den Kinderschuhen steckte. Religiöse und geistliche Aspekte spielten bei der Untersuchung der Natur

Zeitleiste

ca. 580 v. Chr.

Pythagoras postuliert, dass die Planeten in ideal-symmetrischen kristallinen Sphären umlaufen

ca. 150 n. Chr.

Ptolemäus zeichnet Rückwärtsbewegungen auf und schlägt vor, dass sich die Planeten auf Epizyklen bewegen

Johannes Kepler 1571–1630

Johannes Kepler liebte die Astronomie schon als Kind. Bereits vor seinem zehnten Geburtstag verzeichnete er das Erscheinen eines Kometen und eine Mondfinsternis in seinem Tagebuch. Während er in Graz lehrte, entwickelte Kepler eine kosmologische Theorie, die er in seiner Arbeit *Mysterium Cosmographicum* („Weltgeheimnis“) veröffentlichte. Später assistierte er dem dänischen Astronomen Tycho Brahe, der vor den Toren Prags ein Observatorium aufbaute, und wurde 1601 dessen Nachfolger als Kaiserlicher Mathematiker. Hier erarbeitete Kepler Horoskope für

den Kaiser und analysierte Brahes Sammlungen astronomischer Daten. Seine Theorie der Planetenbahnen sowie seine ersten beiden Gesetze der Planetenbewegung veröffentlichte er 1609 in *Astronomia Nova*. 1615 wurde Keplers Mutter, eine Kräuterheilerin, unter dem Verdacht der Hexerei eingesperrt. Erst 1620 erreichte der Sohn nach langen Mühen ihre Freilassung. Trotzdem arbeitete er weiter; sein drittes Gesetz der Planetenbewegung schrieb er 1619 in *Harmonices Mundi libri V* („Weltharmonik“) nieder.

keine geringere Rolle als Beobachtungen. Als Mystiker, der glaubte, dass dem Universum eine perfekte geometrische Struktur zugrunde liegen müsse, strebte Kepler sein Leben lang danach, die entsprechenden hochsymmetrischen Muster in den Gebilden der Natur zu entdecken.

Ein Jahrhundert vor Kepler hatte der polnische Astronom Nikolaus Kopernikus öffentlich den Gedanken geäußert, die Sonne sei der Mittelpunkt des Universums und werde von der Erde umkreist – nicht anders herum. Vor Kopernikus wiederum galt allgemein das Weltbild des griechischen Philosophen Ptolemäus, der sich vorstellte, Sonne und Sterne umkreisten die Erde, befestigt an kristallinen Kugelschalen. Kopernikus wagte zu seinen Lebzeiten kaum, mit seinen radikalen Ideen an die Öffentlichkeit zu treten, aus begründeter Angst, sie könnten das Missfallen der katholischen Kirche erregen. So wurde sein großes Werk über die Planetenbewegungen erst ein Jahr vor seinem Tod unter Mithilfe von Freunden publiziert. Es verursachte einige Aufregung, dass Kopernikus die Erde aus dem Mittelpunkt der Welt rückte, denn daraus folgt unmittelbar, dass die Menschen nicht die wichtigsten Wesen des Universums sein müssen, wie es das anthropozentrische Weltbild der Kirche propagierte.

1543

Kopernikus vertritt die Ansicht, dass die Planeten um die Sonne kreisen

1576

Tycho Brahe dokumentiert die Positionen der Planeten

1609

Kepler entdeckt, dass sich die Planeten auf elliptischen Umlaufbahnen bewegen

1687

Newton erklärt Keplers Gesetze mit seinem Gravitationsgesetz

Wir sind nur eine fortschrittliche Art von Affen auf einem unbedeutenden Planeten eines durchschnittlichen Sterns. Doch wir können das Universum verstehen. Das macht uns zu etwas ganz Besonderem.

Stephen Hawking, 1989

Kepler übernahm das heliozentrische System des Kopernikus, ging aber zunächst noch von kreisförmigen Planetenbahnen aus. Er stellte sich dazu ein System ineinander geschachtelter regelmäßiger Polyeder mit steigender Flächenzahl (Tetraeder, Würfel, Oktaeder und so weiter) vor, in die jeweils Kugeln einbeschrieben waren. Der Abstand dieser Kugeln folgt mathematischen Gesetzmäßigkeiten. Auf diesen Kugeln sollten die kreisrunden Planetenbahnen verlaufen. Der Gedanke, dass die Naturgesetze grundlegenden geometrischen Verhältnissen folgen, wurzelt schon in der griechischen Antike.

Auch der Begriff „Planet“ stammt aus dem Griechischen und heißt „Wanderer“. Weil die Planeten des Sonnensystems der Erde viel näher sind als die Sterne, scheinen sie über das Firmament zu wandern. Nacht für Nacht folgen sie ihrer Bahn. Hin und wieder jedoch machen sie scheinbar kehrt. Solche Rückwärtsschleifen sah man zu Keplers Zeit als schlechtes Omen an. Im Kontext des Ptolemäischen (geozentrischen) Weltsystems war dieses Verhalten unerklärbar. Die Astronomen behalfen sich mit „Epizyklen“, kleinen Zusatzschleifen, die sie den Bahnkurven hinzufügten, aber die Ergebnisse waren alles andere als befriedigend. Kopernikus' heliozentrisches System kam mit weniger Epizyklen aus, konnte die Bewegungen aber auch nicht detailgenau erklären.

Auf der Suche nach einem Modell für die Umlaufbahnen, das zu seinen geometrischen Vorstellungen passte, nutzte Kepler die genauesten verfügbaren Informationen: die von Tycho Brahe akribisch notierten, in aufwendigen Tabellen dokumentierten Daten der Bahnbewegung von Himmelskörpern. In diesen Zahlenkolonnen entdeckte Kepler die Muster, die ihn zu seinen drei Gesetzen führten.

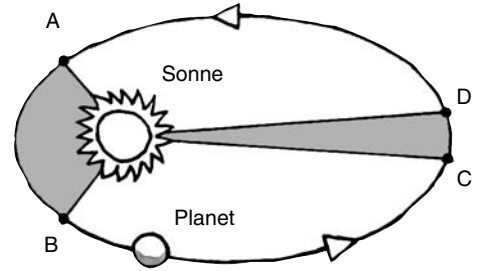
Der Durchbruch gelang ihm dabei mit der entscheidenden Idee zur Erklärung der Rückwärtsbewegung des Mars: Die beobachteten Schleifen würden zu elliptischen anstelle von kreisförmigen Bahnen passen. Ironischerweise zeigte Kepler damit, dass die Natur nicht auf ideal-harmonischen, vollkommenen Formen beruhte. So

Die Kepler'schen Gesetze

1. Die Umlaufbahnen der Planeten sind Ellipsen. Der Schwerpunkt des Systems, die Sonne, liegt in einem der Brennpunkte der Ellipse.
2. Die Verbindungslinie zwischen einem Planeten und der Sonne überstreicht in gleichen Zeiträumen gleiche Flächen.
3. Die Umlaufzeiten hängen von der Größe der Ellipse ab. Das Quadrat der Umlaufzeit ist proportional zur dritten Potenz der Länge der großen Halbachse.

glücklich Kepler wohl über seinen Erfolg war, so enttäuscht muss er von der Erkenntnis gewesen sein, dass sich seine Philosophie der reinen Geometrie als falsch erwiesen hatte.

Planetenbahnen Keplers erstes Gesetz besagt, dass sich die Planeten auf elliptischen Bahnen bewegen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht. Das zweite Gesetz beschreibt, wie schnell ein Planet auf seiner Umlaufbahn unterwegs ist: Die Verbindungslinie des Planeten zur Sonne überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen. So ein Flächensegment können Sie sich vorstellen wie ein Tortenstück – es ist das Dreieck zwischen der Sonne, der Anfangs- und der Endposition des Planeten (A und B oder C und D). Wenn die Fläche dieses Tortenstücks für gleiche Zeiträume gleich groß sein soll, muss der Planet eine längere Strecke zurücklegen (sich also schneller bewegen), wenn er der Sonne näher ist. Keplers zweites Gesetz verbindet also die Bahngeschwindigkeit der Planeten mit ihrer Entfernung zur Sonne. Was Kepler noch nicht wusste, ist, dass die Gravitation der Sonne die Planeten in der Nähe der Sonnenmasse stärker beschleunigt als weiter entfernt.



Keplers drittes Gesetz schließlich gibt die Umlaufzeiten für unterschiedlich große Ellipsen an. Es sagt aus, dass das Quadrat der Umlaufzeit jeweils umgekehrt proportional zur dritten Potenz der Länge der großen Halbachse der Ellipse ist. Je größer die Ellipse ist (je weiter außen im Sonnensystem ein Planet liegt), desto länger dauert es, bis ein Umlauf vollendet ist. Ein Planet, der doppelt so weit von der Sonne entfernt wäre wie die Erde, würde achtmal so lange für einen Umlauf brauchen. Der sonnennahe Mars benötigt fast zwei Erdenjahre für einen Umlauf, Saturn braucht 29 und der Neptun, der äußerste Planet des Sonnensystems, sogar 165 Jahre.


Mit seinen drei Gesetzen konnte Kepler die Umlaufbahnen unserer vertrauten Planeten beschreiben. Genauso gelten die Gesetze aber für alle anderen Objekte, die einander umkreisen, für Kometen, Asteroiden und Monde in unserem Sonnensystem, für Planeten anderer Sterne und sogar für künstliche Erdtrabanten. Kepler ist es gelungen, seine Gesetze geometrisch zu formulieren. Warum sie so und nicht anders lauteten, konnte er jedoch nicht erklären. Nach wie vor vermutete er ein harmonisches Grundmuster aller Natur. Erst Newton konnte aus den Kepler'schen Gesetzen eine universelle Theorie der Gravitation schmieden.

» Die Himmel hab ich gemessen, jetzt mess ich die Schatten der Erde. Himmelwärts strebte der Geist, des Körpers Schatten ruht hier. «
Inscription auf Keplers Grabstein, 1630

04 Newtons Gravitationsgesetz

Mit einem gewaltigen Sprung verknüpfte Isaac Newton Himmel und Erde, indem er die Bewegungen einer Kanonenkugel oder eines Apfels, der vom Baum fällt, mit den Bewegungen von Himmelskörpern in Zusammenhang brachte. Sein Gravitationsgesetz gehört bis heute zu den grundlegenden Gesetzen der Physik, weil es das Verhalten von Körpern in vielen Situationen korrekt beschreibt. Wie Newton herausfand, sorgt die Gravitation dafür, dass Körper einander anziehen. Die Stärke dieser Kraft fällt mit dem Quadrat des Abstands der Körper.

Angeblich brachte ein Apfel, der von einem Baum fiel, Newton auf den Gedanken der Schwerkraft. Ob es sich tatsächlich so zutrug, wissen wir nicht. Auf jeden Fall aber dachte Newton von den irdischen weiter zu den himmlischen Bewegungen, als er sein Gravitationsgesetz entwickelte.

Die Gravitation ist eine Angewohnheit, die man nur schwer ablegen kann. 

Terry Pratchett, 1992

Newton erkannte, dass eine beschleunigende Kraft die Gegenstände auf den Boden zieht (► Kapitel 2): Äpfel fallen vom Baum. Doch was würde passieren, wenn der Baum sehr, sehr hoch wäre? Wenn seine Krone den Mond erreichte? Warum fällt der Mond nicht zur Erde wie ein Apfel?

Alles fällt nach unten Newton suchte die Antwort zunächst in seinen Bewegungsgleichungen, die Kräfte, Masse und Beschleunigung zueinander in Beziehung setzten. Eine Kugel, die von einer Kanone abgeschossen wird, legt eine bestimmte Strecke zurück, bevor sie zu Boden fällt. Je höher die Geschwindigkeit ist, mit der sie das Kanonenrohr verlässt, umso weiter fliegt sie. Was passiert nun, wenn man eine Kugel mit solcher Gewalt abfeuert, dass die Krümmung ihrer langgestreckten Bahn der Krümmung der Erdoberfläche folgt? Wohin fällt sie dann? Newton erkannte, dass die Kugel in diesem Fall auf eine kreisförmige

Zeitleiste

ca. 350 v. Chr.

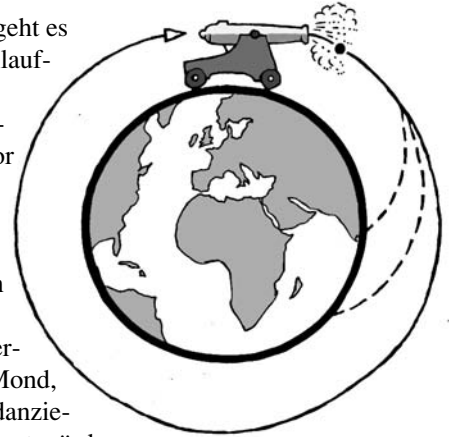
Aristoteles erörtert, warum Objekte fallen

1609 n. Chr.

Kepler entdeckt die Gesetze der Umlaufbahnen der Planeten

ge Umlaufbahn um die Erde gezwungen würde. Genauso ergeht es heute Fernsehsatelliten, die sich auf einer stationären Erdumlaufbahn befinden, aber (hoffentlich) nie zu Boden fallen.

Sicher haben Sie schon einmal gesehen, wie ein Hammerwerfer eine Kugel an einem Seil um sich herumwirbelt, bevor er sie loslässt. Die Zugkraft des (von der Hand gehaltenen) Seils bewirkt, dass sich die Kugel auf einer Kreisbahn bewegt. Lässt der Hammerwerfer los, verschwindet diese Zugkraft und der Hammer fliegt in gerader Linie davon. Ähnlich ist es bei Newtons Kanonenkugel: Ohne die zum Erdmittelpunkt gerichtete Kraft, die das Geschoss in Richtung Erdoberfläche zieht, würde es sich ins All davonmachen. Auch der Mond, folgerte Newton, müsse durch die unsichtbaren Seile der Erdanziehungskraft auf seiner Bahn um die Erde gehalten werden; sonst würde auch er einfach davonfliegen.



Das quadratische Abstandsgesetz Newton versuchte nun, seine Hypothese durch Berechnungen zu untermauern. Nach einem Briefwechsel mit Robert Hooke zeigte er, dass die Stärke der Anziehungskraft mit dem Quadrat des Abstands der beiden beteiligten Körper abnimmt. Wächst der Abstand zweier Körper auf das Doppelte, dann sinkt die Anziehungskraft auf ein Viertel. Ein Planet, der dreimal so weit von der Sonne entfernt ist wie zum Beispiel die Erde, erfährt nur noch ein Neuntel der Gravitationskraft unseres Zentralgestirns.

Newtons Gravitationsgesetz mit seiner umgekehrten quadratischen Abhängigkeit erklärte in nur einer Gleichung die Umlaufbahnen der Planeten, die Johannes Kepler in seinen drei Gesetzen beschrieben hatte (► Kapitel 3). Newtons Gesetz zufolge bewegen sich die Planeten auf ihren elliptischen Bahnen in Sonnennähe schneller, weil sie dort eine stärkere Anziehungskraft spüren, die sie beschleunigt. Sobald sich ihr Abstand von der Sonne wieder vergrößert, sinkt allmählich ihre Geschwindigkeit. Mit diesem Handstreich fasste Newton alle Vorläuferarbeiten in einer einzigen Theorie zusammen.

» **Jeder Gegenstand im Universum zieht jeden anderen mit einer Kraft an, die entlang der Verbindungslinie der Schwerpunkte beider Objekte gerichtet ist. Die Stärke der Kraft ist proportional zu den Massen der Objekte und umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstands.** ◀

Isaac Newton, 1687

1640

Galilei formuliert das Prinzip der Trägheit

1687

Newton veröffentlicht seine *Principia*

1905

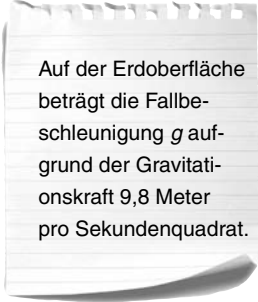
Einstein veröffentlicht die Spezielle Relativitätstheorie

1915

Einstein veröffentlicht die Allgemeine Relativitätstheorie

Eine universelle Formel Kühn verallgemeinernd vertrat Newton dann die Ansicht, seine Theorie gelte für sämtliche Körper im ganzen Universum. Jeder Körper übe entsprechend seiner Masse eine Anziehungskraft auf alle anderen Körper aus, deren Stärke mit dem Quadrat des Abstands falle. Weil aber die Gravitationskraft sehr schwach ist, beobachten wir diesen Effekt nur bei sehr massereichen Körpern wie der Erde, der Sonne und den Planeten.

Wenn wir jedoch ganz genau hinschauen, können wir selbst an der Erdoberfläche winzige lokale Differenzen der Gravitationskraft nachweisen, die durch Dichteunterschiede von Gebirgen und Gesteinsmassen hervorgerufen werden. Auf diese Weise helfen Gravitationsmessgeräte bei der Kartierung von Landschaften und geben Aufschluss über die Zusammensetzung der Erdkruste. Archäologen spüren anhand winziger Änderungen der Gravitation vergrabene Siedlungen auf. Gravitationsmessgeräte an Bord von Satelliten liefern Daten für die Dokumentation der (abschmelzenden) Eiskappen der Pole und für den Nachweis von Veränderungen in der Erdkruste infolge schwerer Beben.



Auf der Erdoberfläche beträgt die Fallbeschleunigung g aufgrund der Gravitationskraft 9,8 Meter pro Sekundenquadrat.

Damals im 17. Jahrhundert fasste Newton all seine Ideen über die Gravitation in einem Buch zusammen, den *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, kurz die *Principia* genannt. Das 1687 erschienene Werk gilt noch heute als Meilenstein der Naturwissenschaft. Newtons universelles Gravitationsgesetz erklärt die Bewegungen nicht nur von Planeten und Monden, sondern auch von Geschossen, Pendeln und Äpfeln. Es erklärt die Umlaufbahnen von Kometen, die Entstehung der Gezeiten und das Taumeln der Erdachse. Die *Principia* begründeten Newtons Ruf als einer der bedeutendsten Naturwissenschaftler aller Zeiten.

Die Entdeckung des Neptun

Newtons Gravitationsgesetz verdanken wir die Entdeckung des Planeten Neptun. Im frühen 19. Jahrhundert fielen den Astronomen Unregelmäßigkeiten in der Bahn des Uranus auf – es sah aus, als ob ein anderer schwerer Körper die Bahnkurve störte. Auf der Grundlage von Newtons Gesetz entstanden verschiedene Hypothesen, bis 1846 tatsächlich nahe der vorhergesagten Position ein neuer Planet entdeckt und nach dem griechischen Gott der Meere „Neptun“ genannt wurde. Britische und französische Astro-

nomen stritten darüber, wem die Ehre der Entdeckung gebührte, Johan Couch Adams oder Urbain Le Verrier. Die Masse des Neptun ist 17-mal so groß wie die der Erde; der Gasriese hat einen festen Kern mit einer dichten Atmosphäre aus Wasserstoff, Helium, Ammoniak und Methan. Die blaue Farbe von Neptuns Wolken wird vom Methan verursacht. Auf dem Neptun toben die stärksten Stürme des ganzen Sonnensystems mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 2500 Kilometern pro Stunde.

Gezeiten

Die Entstehung der Gezeiten der Weltmeere erklärt Newton in den *Principia*: Der Mond „zieht“ durch seine Gravitation an der Seite der Erde, der er zugewandt ist. Das macht sich in den verformbaren Wassermassen viel stärker bemerkbar als an der festen Kruste; die durch die Wasseroberfläche gebildete Form wird auseinandergezogen, und an gegenüberliegenden Seiten der Erdkugel entstehen Flutberge, die vom Mond in 24 Stunden einmal um den Planeten herumgezogen werden. Jeweils nach zwölf Stunden ist der höchste Wasserstand erreicht (Flut), zwischen zwei Fluten steht das Wasser niedrig (Ebbe). Obwohl die schwerere Sonne ei-

ne stärkere Anziehungskraft auf die Erde ausübt als der kleine Mond, hat der Mond einen stärkeren Einfluss auf die Gezeiten, weil er der Erde näher ist. Das ist eine Folge des quadratischen Abstandsgesetzes: Der Gravitationsunterschied („Gradient“) zwischen zu- und abgewandter Seite ist im Falle des Mondes wesentlich deutlicher als im Fall der weit entfernten Sonne. Bei Voll- oder Neumond liegen Erde, Mond und Sonne auf einer Linie, was zu besonders hohen Gezeiten, den Springfluten, führt. Bei Halbmond, wenn die Himmelskörper in einem 90-Grad-Winkel zueinander stehen, gibt es nur schwache Gezeiten (Nipptiden).

Jahrhunderte lang hielt man Newtons Gravitationsgesetz für universell gültig. Auch heute ist es für die grundsätzliche Beschreibung der Bewegung von Körpern durchaus brauchbar. Aber die Forschung steht nicht still; im 20. Jahrhundert schließlich wurde das Gravitationsgesetz weiterentwickelt, insbesondere von Einstein durch die Allgemeine Relativitätstheorie. Newtons Gravitation leistet gute Dienste, wenn es um Objekte geht, die wir sehen – um Alltagsgegenstände, aber auch um Planeten, Kometen und Asteroiden im Sonnensystem, die genügend weit von der Sonne entfernt sind, dass die Anziehungskraft relativ gering ist. Während Newtons Gesetz ausreichte, um die Position des Planeten Neptun vorherzusagen, der 1846 jenseits der Uranusbahn an der vorhergesagten Stelle gefunden wurde, ließ sich die Umlaufbahn des sonnennahen Merkur nur mit Physik beschreiben, die über Newton hinausgeht. Ist die Gravitationskraft sehr groß – in der Nähe der Sonne, anderer Sterne oder gar Schwarzer Löcher –, muss man die Relativitätstheorie zur Hilfe nehmen.

» **Es heißt, Einwände gegen die Globalisierung vorzubringen sei wie gegen die Gravitationsgesetze anzukämpfen.** ◀

Kofi Annan, * 1938

05 Energieerhaltung

Energie bedeutet Leben, Bewegung, Veränderung. Sie begegnet uns in vielerlei Gestalt, etwa einer Änderung der Höhe oder Geschwindigkeit, in sich ausbreitenden elektromagnetischen Wellen oder im Schwingen von Atomen, wodurch Wärme entsteht. Mag die Energie auch äußerst wandelbar sein, ihre Gesamtmenge ist immer gleich: Energie kann nicht erschaffen oder vernichtet werden.

Energie ist unser elementares Antriebsmittel: Wer „keine Energie“ hat, sitzt müde in der Ecke, wer „vor Energie übersprudelt“, springt fröhlich herum. Aber was ist Energie eigentlich? Der Treibstoff unseres Körpers sind Chemikalien, bei deren „Verbrennung“, der Umwandlung in andere Moleküle, Energie freigesetzt wird, die uns wärmt und unsere Muskeln versorgt. Welche Energie aber lässt einen Abfahrtsläufer die Piste hinuntersausen oder eine Glühlampe leuchten? Sind tatsächlich alle Energieformen im Grunde gleich?

Da die Energie in so vielen verschiedenen Formen auftritt, ist sie schwer zu definieren. Noch immer wissen die Physiker eigentlich nicht genau, was Energie ist, obwohl sie bemerkenswert gut erklären können, was Energie tut und wie man sie beherrscht. Energie ist eine Eigenschaft der Materie und des Raumes, eine Art Treibstoff mit der Fähigkeit, etwas zu schaffen, zu bewegen oder zu verändern. Die Naturphilosophen und sogar die griechischen Denker hatten bereits eine vage Vorstellung von Energie als einer Art lebenspendender Kraft oder Essenz, die den Dingen Leben verleiht. An diesen Gedanken halten wir uns noch heute.

Energieumwandlung Dass Energie von einer Form in eine andere umgewandelt werden kann, fiel zuerst Galileo Galilei auf. Er beobachtete ein hin- und herschwingendes Pendel und sah, dass die Pendelscheibe Höhe gegen Vorwärtsbewegung eintauscht und dass genau diese Bewegung das Pendel wieder nach oben bringt, bevor es umkehrt und alles von vorn beginnt. An ihrem höchsten Punkt hält die Scheibe in der Bewegung inne; wenn sie durch den tiefsten Punkt geht, bewegt sie sich am schnellsten.

Zeitleiste

ca. 600 v. Chr.

Thales von Milet erkennt, dass Stoffe ihre Form ändern

1638 n. Chr.

Galilei beobachtet das Wechselspiel von kinetischer und potenzieller Energie an einem Pendel

1676

Leibniz formuliert den Energieaustausch mathematisch und nennt Energie *vis viva*