



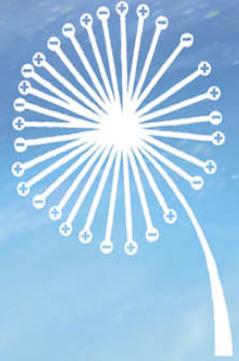
AUF DER
SUCHE
NACH DEM
ATOMAREN
KLEBER



ES LIEGT
GEOMETRIE
IM SUMMEN
DER SAITEN



HÄLT
OXFORD
AN DIESEM
ZUG?



DIE JAGD
NACH DEM
QUARK



DIE NATUR
IST ABSURD



BEWEGUNG
BLEIBT
ERHALTEN

DAS PHYSIK- BUCH



EINE NEUE
IDEE DER
REALITÄT



DIE KATZE IST
ZUGLEICH LEBENDIG
UND TOT

EINE
ENZYKLOPÄDIE
AUF EINEM
STECKNADELKOPF



WUNDERSAME
KRÄFTE

DIE HERRSCHAFT
MAGNETISCHER
KRÄFTE



INHALT

EINLEITUNG

MESSUNG UND BEWEGUNG

PHYSIK UND DIE ALLTAGSWELT

Der Mensch ist das Maß aller Dinge

Längen messen

Klug fragen können ist die halbe Weisheit

Die wissenschaftliche Methode

Alles ist Zahl

Die Sprache der Physik

Körper erfahren keinen Widerstand als durch die Luft

Der freie Fall

Eine neue Maschine zur Vervielfachung der Kraft

Druck

Bewegung bleibt erhalten

Der Impuls

Die wunderbarsten Erzeugnisse der mechanischen Künste

Zeit messen

Aktion und Reaktion

Die Bewegungsgesetze

Die Pfeiler des Weltensystems

Die Gravitationsgesetze

Überall hin und her

Harmonische Schwingungen

Die Kraft lässt sich nicht vernichten

Kinetische und potenzielle Energie

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden

Die Energieerhaltung

Ein neuer Ansatz der Mechanik

Energie und Bewegung

Wir müssen in den Himmel schauen, um Maße für die Erde zu bekommen

SI-Einheiten und Naturkonstanten



ENERGIE UND MATERIE

STOFFE UND WÄRME

Die Grundprinzipien des Universums

Modelle der Materie

Wie die Dehnung, so die Kraft

Dehnen und Strecken

Die kleinen Bausteine der Stoffe bewegen sich schnell

Fluide

Das Geheimnis des Feuers wird gelüftet

Wärme und ihre Übertragung

Das Federn der Luft

Die Gasgesetze

Die Energie des Universums ist konstant

Innere Energie und der erste Hauptsatz der Thermodynamik

Wärme kann Bewegung auslösen

Wärmekraftmaschinen

Die Entropie des Universums strebt immer einem Maximum zu

Die Entropie und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik

Die Flüssigkeit und ihr Dampf werden eins

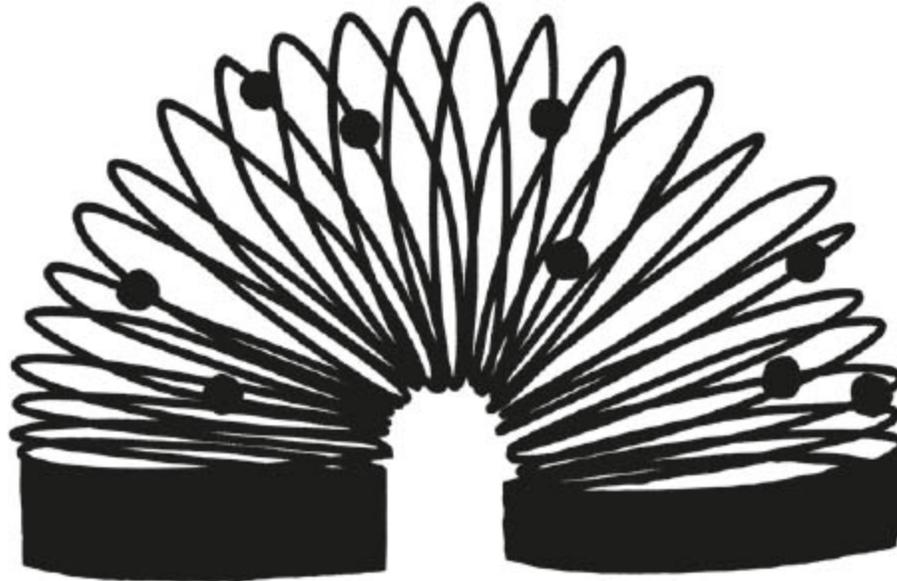
Zustandsänderungen und Bindungen

Stoßende Billardkugeln in einer Box

Die Entwicklung der statistischen Mechanik

Heiße schwarze Körper

Wärmestrahlung



ELEKTRIZITÄT UND MAGNETISMUS

ZWEI KRÄFTE WERDEN VEREINIGT

Wundersame Kräfte

Magnetismus

Die Anziehung durch Elektrizität

Die elektrische Ladung

Potenzielle Energie wird zu fühlbarer Bewegung

Elektrisches Potenzial

Elektrischer Strom fließt nur durch leitfähiges Material

Elektrischer Strom und Widerstand

Jedes Metall hat eine bestimmte Kraft

Magnetherstellung

Elektrizität in Bewegung

Die motorische Wirkung

Die Herrschaft magnetischer Kräfte

Induktion und Generatoreffekt

Das Licht selbst ist eine elektromagnetische Störung

Kraftfelder und Maxwell'sche Gleichungen

Der Mensch wird die Kraft der Sonne einfangen

Stromerzeugung

Ein kleiner Schritt in der Kontrolle der Natur

Elektronik

Tierische Elektrizität

Bioelektrizität

Eine völlig unerwartete wissenschaftliche Entdeckung

Datenspeicherung

Eine Enzyklopädie auf einem Stecknadelkopf

Nanoelektronik

Ein einzelner Pol, entweder Nord oder Süd

Magnetische Monopole



SCHALL UND LICHT

DIE EIGENSCHAFTEN DER WELLEN

Es liegt Geometrie im Summen der Saiten

Musik

Licht nimmt den schnellsten Weg

Reflexion und Brechung

Eine neue sichtbare Welt

Fernrohr und Mikroskop

Licht ist eine Welle

Welle oder Teilchen?

Licht beugt sich nie in den Schatten

Beugung und Interferenz

Die Nord- und Südseite des Strahls

Polarisation

Die Trompeter und der Wellenzug

Doppler-Effekt und Rotverschiebung

Mysteriöse Wellen ..., die wir ... nicht sehen können

Elektromagnetische Wellen

Die Sprache der Spektren ist eine wirkliche Sphärenmusik

Licht aus dem Atom

Sehen mit Schall

Piezoelektrizität und Ultraschall

Ein großes fluktuierendes Echo

Über das Licht hinaus

DIE QUANTENWELT

UNSER UNSCHARFES UNIVERSUM

Die Lichtenergie ist diskontinuierlich im Raum verteilt

Energiequanten

Sie verhalten sich anders als alles, was man je gesehen hat

Teilchen und Wellen

Eine neue Idee der Realität

Quantenzahlen

Alles ist Welle

Matrizen und Wellen

Die Katze ist zugleich lebendig und tot

Die Heisenberg'sche Unschärferelation

Spukhafte Fernwirkung

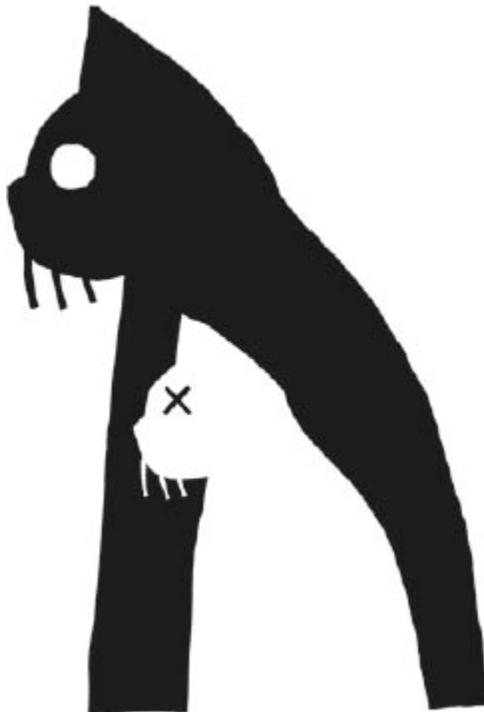
Quantenverschränkung

Das Juwel der Physik

Quantenfeldtheorie

Parallele Zusammenarbeit

Quantenanwendungen



KERN- UND TEILCHENPHYSIK

IM INNERN DES ATOMS

Materie ist nicht unendlich teilbar

Atomtheorie

Eine echte Transformation der Materie

Kernstrahlen

Der Aufbau der Materie

Der Atomkern

Die Bausteine der Atome

Subatomare Teilchen

Kleine Wolkenfetzen

Teilchen in der Nebelkammer

Gegensätze können explodieren

Antimaterie

Auf der Suche nach dem atomaren Kleber

Die starke Kraft

Schreckliche Mengen an Energie

Atombomben und Kernenergie

Ein Fenster zur Schöpfung

Teilchenbeschleuniger

Die Jagd nach dem Quark

Der Teilchenzoo und die Quarks

Identische Kernteilchen verhalten sich nicht immer gleich

Trägerteilchen

Die Natur ist absurd

Quantenelektrodynamik

Das Rätsel der verschwundenen Neutrinos

Neutrinos mit Masse

Ich glaube, wir haben es

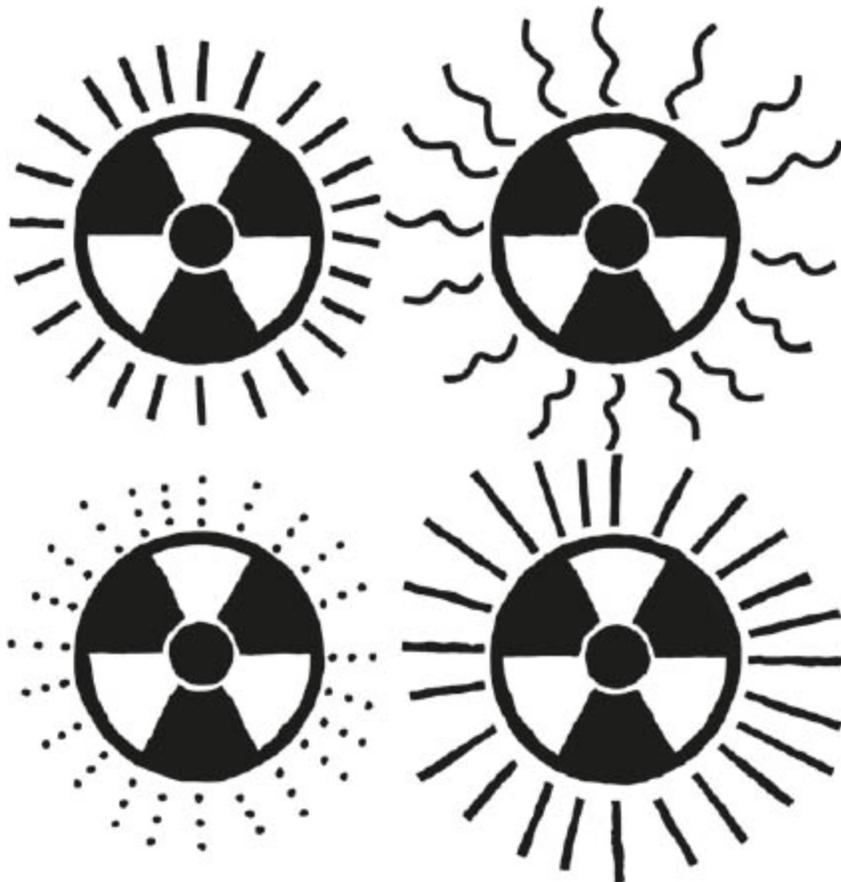
Das Higgs-Boson

Wo ist all die Antimaterie hin?

Materie-Antimaterie-Asymmetrie

Sterne werden geboren und sterben

Kernfusion in Sternen



RELATIVITÄTSTHEORIE UND DAS UNIVERSUM

UNSER PLATZ IM KOSMOS

Die Schleifen der Himmelskörper

Himmelsmechanik

Die Erde ist nicht der Mittelpunkt der Welt

Modelle des Universums

Keine wahre Zeit, keine wahre Länge

Von Galileis Relativitätsprinzip zur speziellen Relativitätstheorie

Die Sonne, wie sie vor acht Minuten war

Die Lichtgeschwindigkeit

Hält Oxford an diesem Zug?

Spezielle Relativitätstheorie

Eine Union von Raum und Zeit

Gekrümmte Raumzeit

Die Schwerkraft entspricht einer Beschleunigung

Das Äquivalenzprinzip

Warum ist der reisende Zwilling jünger?

Paradoxien der speziellen Relativitätstheorie

Die Entwicklung der Sterne

Masse und Energie

Wo die Raumzeit einfach endet

Schwarze Löcher und Wurmlöcher

Die Grenze des bekannten Universums

Entdeckung anderer Galaxien

Die Zukunft des Universums

Statisches oder expandierendes Universum?

Das kosmische Ei, das im Moment der Entstehung explodiert

Der Urknall

Es gibt nicht nur sichtbare Materie

Dunkle Materie

Ein unbekannter Bestandteil dominiert das Universum

Dunkle Energie

Fäden in einem Wandteppich

Die Stringtheorie

Kräuselungen der Raumzeit

Gravitationswellen

WEITERE PHYSIKER

GLOSSAR

ZITATNACHWEIS

DANK

VORWORT

Ich habe mich als kleiner Junge in die Physik verliebt, als ich entdeckte, dass sie die besten Antworten auf viele der Fragen gab, die ich über die Welt um mich herum hatte – wie ein Magnet funktioniert, ob der Weltraum ewig weitergeht, warum Regenbögen entstehen und woher wir wissen, wie das Innere eines Atoms oder das Innere eines Sterns aussieht. Mir wurde auch klar, dass ich mit Physik einige der tieferen Fragen, die mir im Kopf herumschwirrten, in den Griff bekommen konnte, etwa: Was ist eigentlich Zeit? Wie ist es, in ein Schwarzes Loch zu fallen? Wie hat das Universum begonnen, und wie könnte es enden?

Jetzt, Jahrzehnte später, habe ich Antworten auf einige meiner Fragen, aber ich suche immer noch Antworten auf neue Fragen. Wie Sie sehen, ist die Physik lebendig. Obwohl es vieles gibt, was wir heute zu den Naturgesetzen sicher wissen, und obwohl wir mit diesem Wissen weltverändernde Technologien entwickelt haben, gibt es noch etliches, was wir nicht wissen. Das macht für mich die Physik zum Spannendsten überhaupt. Tatsächlich frage ich mich manchmal, warum nicht jeder so verliebt in die Physik ist wie ich.

Aber ein Thema lebendig zu machen, dieses Gefühl des Staunens zu vermitteln, das erfordert viel mehr als nur einen Berg trockener Fakten. Um zu erklären, wie unsere Welt funktioniert, müssen wir Geschichten erzählen. Wir müssen uns klar werden, wie wir zu dem gekommen sind, was wir über das Universum wissen; wir müssen die Entdeckerfreude der vielen großen Wissenschaftler erleben, die als Erste die Geheimnisse der Natur entschlüsselt haben. Der Weg zu unserem heutigen Weltverständnis kann genauso wichtig und erfreulich sein wie das Wissen selbst.

Aus diesem Grund hat mich schon immer die Geschichte der Physik fasziniert. Es ist schade, dass wir in der Schule oft nicht erfahren, wie Konzepte und Ideen in der Wissenschaft entstanden sind. Es wird von uns erwartet, dass wir sie fraglos akzeptieren. Aber so ist die Physik nicht, so ist die gesamte Wissenschaft nicht. Wir fragen uns, wie die Welt funktioniert, und wir entwickeln Theorien und Hypothesen. Gleichzeitig machen wir Beobachtungen und führen Experimente durch, revidieren und verbessern das, was wir wissen. Oft liegen wir daneben oder entdecken erst nach Jahren, dass eine bestimmte Beschreibung oder Theorie falsch ist oder sich der Realität höchstens annähert. Und manchmal gibt es schockierende neue Entdeckungen, die uns zwingen, unsere Sicht völlig zu verändern.

Ein schönes Beispiel dafür, das ich selbst erlebt habe, war 1998 die Entdeckung, dass sich das Universum immer schneller ausdehnt, was zu der Idee der sogenannten Dunklen Energie führt. Noch vor Kurzem galt dies als ein völliges Rätsel. Was war das für ein unsichtbares Feld, das den Raum gegen die Anziehungskraft der Schwerkraft ausdehnte? Erst allmählich erfahren wir, dass es sich dabei wohl um etwas handelt, das man Vakuumenergie nennt. Sie fragen sich vielleicht, wie eine geänderte Bezeichnung (von »Dunkler Energie« zu »Vakuumenergie«) einen Fortschritt darstellen kann. Aber das Konzept der Vakuumenergie ist nicht neu. Einstein hatte es vor hundert Jahren aufgebracht, aber später änderte er seine Meinung, als er glaubte, einen Fehler gemacht zu haben, und nannte es seine »größte Eselei«. Es sind Geschichten wie diese, die für mich die Physik so spannend machen.

Und deswegen ist *Das Physik-Buch* auch so unterhaltsam. Jedes Thema wird mit der Einführung von Schlüsselfiguren, mit faszinierenden Anekdoten und einer Zeitleiste der Ideenentwicklung zugänglich und lesbar gemacht. Dies zeigt nicht nur ehrlicher, wie die Wissenschaft voranschreitet, es ist auch ein guter Weg, das Thema mit Leben zu füllen.

Ich hoffe, das Buch gefällt Ihnen ebenso gut wie mir.

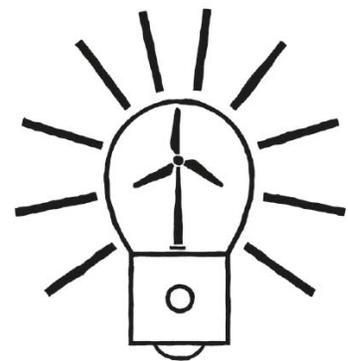
A handwritten signature in black ink, reading "J. S. Al-Khalili". The signature is written in a cursive style with a large, looped initial "J".

Jim Al-Khalili

EINLEITUNG

Wir Menschen nehmen unsere Umgebung in besonderem Maße wahr. Um in der Evolution stärkeren und schnelleren Raubtieren zu entgehen, mussten wir das Verhalten unserer Umwelt vorhersehen. Mittels Sprache konnten wir unseren Erfahrungsschatz über Generationen weitergeben, und die kognitiven Fähigkeiten sowie der Werkzeuggebrauch brachten unsere Art an die Spitze der Nahrungskette.

Vor rund 60 000 Jahren haben wir uns von Afrika aus über die Welt verbreitet und konnten durch Einfallsreichtum auch in unwirtlichen Gegenden überleben. Unsere Vorfahren entwickelten Techniken, um genügend Nahrung für sich und ihre Nächsten anzubauen, und siedelten sich in Gemeinschaften an.



Experimentelle Verfahren

Die frühen Gesellschaften sahen in unzusammenhängenden Ereignissen eine tiefere Bedeutung, fanden Muster, die es nicht gab, und erklärten sie anhand von Mythen. Sie entwickelten aber auch neue Werkzeuge und Arbeitsmethoden, für die man das Wissen über innere

Zusammenhänge der Welt benötigte, etwa die Jahreszeiten oder das jährliche Nilhochwasser, um Ressourcen zu erschließen. In manchen Regionen der Erde herrschte längere Zeit Frieden. Dort konnten einige Menschen es sich leisten, über unseren Platz im Universum nachzudenken. Erst die Griechen, dann die Römer versuchten die Welt anhand der Muster, die sie in der Natur erkannten, zu deuten. Thales von Milet, Sokrates, Platon, Aristoteles und andere verwarfen die übernatürlichen Erklärungen; sie suchten rationale Antworten – und begannen zu experimentieren.

Mit dem Untergang des Römischen Reiches gingen viele dieser Ideen für das Abendland verloren. Doch in der arabischen Welt und in Indien erblühten sie neu. Gelehrte dort fragten und experimentierten weiter. Man erfand die Sprache der Mathematik, um dieses neu gewonnene Wissen zu überliefern. Ibn al-Haitham und Ibn Sahl waren nur zwei dieser arabischen Gelehrten im 10. und 11. Jahrhundert, ihre Entdeckungen zu Optik und Astronomie fanden jedoch außerhalb der islamischen Welt jahrhundertlang keine Beachtung.

Eine Ära der neuen Ideen

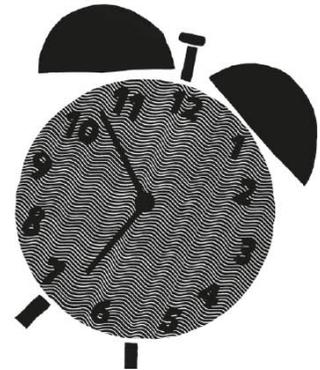
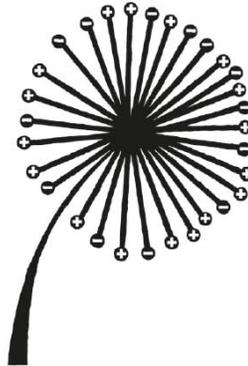
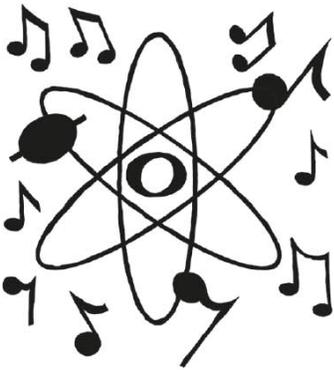
Auf globalen Handels- und Entdeckungsreisen wurden auch Ideen ausgetauscht. Händler und Seefahrer brachten Bücher, Geschichten und technische Wunderwerke von Ost nach West. Die Gedankenwelt aus diesem Kulturreichtum ließ Europa das Mittelalter überwinden und führte es in ein neues Zeitalter der Aufklärung, die Renaissance. Eine Revolution unserer Weltsicht begann, als die Vorstellungen der Alten überarbeitet wurden oder aus der Mode gerieten. Sie wurden ersetzt durch neue Ideen über unsere Stellung im Universum. Eine neue Generation von Experimentatoren wollte der Natur ihre Geheimnisse entlocken. In Italien und Polen stellten Kopernikus und Galileo Ideen infrage, die für zwei Jahrtausende als sakrosankt gegolten hatten – und wurden dafür verfolgt.

Im 17. Jahrhundert dann bildeten die Bewegungsgesetze von Isaac Newton die Grundlage der klassischen Physik, die für über zwei Jahrhunderte unangefochten blieb. Das Verständnis der Bewegungen

erlaubte die Konstruktion von Maschinen, die Energie in vielerlei Form für die Arbeit nutzbar machten. Am bedeutendsten waren Wasserräder und Dampfmaschinen – sie leiteten die industrielle Revolution ein.

»Wer die Werke der Wissenschaft studiert, muss ... die Prüfungen und Erklärungen genauestens untersuchen.«

Ibn al-Haitham



Die Entwicklung der Physik

Im 19. Jahrhundert wurden die Ergebnisse der Experimente von einem internationalen Forschernetz nachvollzogen und überprüft. Die Forscher teilten ihre Erkenntnisse in Aufsätzen und erklärten die beobachteten Muster in der Sprache der Mathematik. Andere entwarfen Modelle zur Erklärung der empirischen Zusammenhänge. Die Modelle machten Vorhersagen zum Verhalten der Natur, und diese wurden von neuen Experimentatoren überprüft. Stellten sich die Vorhersagen als korrekt heraus, dann hielt man das Modell für ein Gesetz, dem die Natur zu gehorchen schien. Der französische Physiker Sadi Carnot und andere untersuchten den Zusammenhang von Wärme

und Energie – sie begründeten damit das neue Gebiet der Thermodynamik. Die Gleichungen des britischen Physikers James Clerk Maxwell beschrieben den engen Zusammenhang von Elektrizität und Magnetismus als Elektromagnetismus.

Um 1900 schien es, als sei alles in der Physik bekannt und es seien nur noch ein paar Lücken zu stopfen. Doch im ersten Jahrzehnt des neuen Jahrhunderts erschütterte eine Reihe von Entdeckungen die wissenschaftliche Welt, stellte frühere Gewissheiten infrage und gebar die moderne Physik. Max Planck enthüllte die Welt der Quantenphysik. Albert Einstein entwickelte die Relativitätstheorie. Andere entdeckten den Aufbau des Atoms und erkannten die Rolle noch kleinerer, subatomarer Teilchen. Damit legten sie die Grundlagen der Teilchenphysik. Die neuen Entdeckungen waren jedoch nicht auf den Mikrokosmos beschränkt – fortschrittliche Teleskope erschlossen die Erkundung des Alls.

Binnen weniger Generationen lebte die Menschheit nicht mehr im Zentrum des Universums, sondern auf einem Staubkorn am Rand einer von Milliarden Galaxien. Wir hatten nicht nur ins Innere der Materie geschaut und die innewohnende Energie freigesetzt, sondern auch die Weiten des Alls mit dem Licht von kurz nach dem Urknall erkundet.

»Man kann nur in Ehrfurcht nachdenken über die Geheimnisse der Ewigkeit, des Lebens und des großartigen Aufbaus der Realität.«

Albert Einstein

Die Physik hat sich mit der Zeit als Wissenschaft entwickelt. Mit jeder neuen Entdeckung verzweigt sie sich mehr und öffnet neue

Horizonte. Die Hauptgebiete liegen heute an den Rändern unserer Welt, auf Skalen der Galaxien und unterhalb der Atome. Die moderne Physik hat Anwendungen in vielen anderen Gebieten, darunter neue Technologien, Chemie, Biologie und Astronomie. Dieses Buch stellt die wichtigsten Ideen der Physik vor; es beginnt mit dem Alltag und der Antike, geht dann über die klassische Physik bis zur Welt des Allerkleinsten und endet mit den unendlichen Weiten des Alls. ■

MESSUNG UND BEWEGUNG

PHYSIK UND DIE ALLTAGSWELT

3000 V. CHR.

Die Ägypter **messen Strecken und Ackerflächen** mit der **Elle**.

3. JH. V. CHR.

Der griechische Philosoph Euklid schreibt die *Elemente*, eines der **wichtigsten Bücher über Geometrie und Mathematik**.

1543

Der polnische Astronom Nikolaus Kopernikus schreibt *De Revolutionibus orbium coelestium* (*Über die Drehungen der himmlischen Sphären*). Damit beginnt die **wissenschaftliche Revolution**.

1656

Der niederländische Physiker Christiaan Huygens **erfindet die Pendeluhr**, die erstmals die genaue Messung von Bewegungen erlaubt.

4. JH. V. CHR.

Aristoteles entwirft die **wissenschaftliche Methode**: Man schließt aus Beobachtungen (»Induktion«) und verallgemeinert sie (»Deduktion«).

1361

Der französische Philosoph und Theologe Nikolaus von Oresme wendet erstmals **mathematische Konzepte** auf naturwissenschaftliche Erscheinungen an.

1603

Galileo Galilei zeigt, dass Kugeln auf einer schiefen Ebene ungeachtet ihrer Masse **gleich beschleunigt** werden.

1668

Der englische Pfarrer John Wallis weist darauf hin, dass der **Impuls** (Produkt von Masse und Geschwindigkeit) bei Stößen **erhalten bleibt**.

1687

Isaac Newton revolutioniert mit den *Principia* unser **Verständnis, wie Körper sich im Himmel und auf der Erde bewegen**.

1752

Die Kreisgesetze des Schweizers Leonhard Euler definieren den **linearen Impuls** und die Änderung des **Drehimpulses**.

1845

Versuche des britischen Physikers James Joule zeigen, dass man bei der Umwandlung von Energie in eine andere Form **keine Energie gewinnt oder verliert**.

1663

Nach dem Gesetz des französischen Physikers Blaise Pascal verteilt sich der **Druck** in einer **Flüssigkeit in einem Gefäß** gleichmäßig.

1670

Der französische Astronom und Mathematiker Gabriel Mouton schlägt ein **dezimal unterteiltes Einheitensystem** vor.

1740

Die französische Mathematikerin Émilie du Châtelet berechnet die **kinetische Energie** von bewegten Körpern.

1788

Die **Gleichungen** des französischen Physikers Joseph-Louis Lagrange vereinfachen die **Berechnung von Bewegungen**.

2019

Die **Einheiten** des SI werden neu definiert und **hängen nur noch von Naturkonstanten** ab.

Unsere Überlebensinstinkte haben dazu geführt, dass wir uns ständig vergleichen. Die ursprünglichen Instinkte im uralten Kampf ums Überleben – den richtigen Partner für die Fortpflanzung zu finden und genug Nahrung für die Familie zu beschaffen – entwickelten sich mit der Zeit zu modernen Äquivalenten wie Reichtum und Macht. Immerfort müssen wir uns, andere und die Welt vergleichen und messen. Einige dieser Maße sind interpretativ wie Persönlichkeitsmerkmale und Gefühle. Andere sind absolut – etwa Körpergröße, Gewicht und Alter.

Seit der Antike ist Reichtum für viele Menschen ein Maß für den Erfolg. Um Geld anzuhäufen, wurde weltweit Handel betrieben. Händler kauften Waren billig an einem Ort, um sie woanders, wo diese knapp waren, teurer wieder zu verkaufen. Mit zunehmendem Handel begannen ihn die lokalen Herrscher zu besteuern und führten Standardpreise ein. Daher brauchte man nun Einheitsmaße, um ein Vergleichen zu ermöglichen.

Die Sprache für Messungen

Als ihnen klar wurde, dass die Erfahrungen jedes Einzelnen relativ sind, erdachten die alten Ägypter Methoden, um ohne inhaltliche Verzerrungen zu kommunizieren. Sie entwickelten so das erste Maßsystem. Mit der ägyptischen Elle war es den Baumeistern möglich, Bauten zu errichten, die für Jahrtausende unerreicht blieben, und den Bauern, ihre Felder so zu bestellen, dass die wachsende Bevölkerung versorgt wurde. Als die ganze damalige bekannte Welt

mit dem antiken Ägypten handelte, entstand die Idee einer gemeinsamen Sprache für Messungen.

Die wissenschaftliche Revolution (1543–1700) zeigte erneut den Bedarf für solche Maßsysteme auf. Für die Forscher waren sie Hilfsmittel, um die Natur zu verstehen. Sie entwarfen kontrollierte Umgebungen, in denen sie prüfen konnten, wie verschiedenes Verhalten zusammenhing – sie führten Versuche durch. Die ersten Experimente befassten sich mit Bewegungen alltäglicher Gegenstände und hatten Bezug zum Alltagsleben. Die Forscher entdeckten bestimmte Muster in Bewegungen. Diese Muster wurden verewigt mithilfe der Sprache der Mathematik, einem Erbe der Antike und in der islamischen Welt für Jahrhunderte weiterentwickelt. Die Mathematik ermöglichte es, Versuchsergebnisse eindeutig zu beschreiben und weiterzugeben sowie Vorhersagen daraus mit neuen Versuchen zu überprüfen. Mit dieser gemeinsamen Sprache und den Maßen schritt die Wissenschaft voran. Die ersten Forscher entdeckten Verbindungen zwischen Entfernung, Zeit und Geschwindigkeit und legten ihre eigene, von anderen wiederhol- und überprüfbare Erklärung für Naturphänomene vor.

Bewegung messen

Die wissenschaftlichen Theorien entwickelten sich rasch weiter, und mit ihnen änderte sich die Sprache der Mathematik. Bei der Formulierung seiner Bewegungsgesetze erfand der englische Physiker Isaac Newton die Infinitesimalrechnung, mit der man auch zeitliche Entwicklungen eines Systems beschreiben konnte, nicht nur einzelne Schnappschüsse. Um die Beschleunigung fallender Körper und die Natur der Wärme zu erklären, tauchte auch die bis dahin unbekannte Größe Energie auf. Damit ließ sich unsere Welt nicht mehr nur durch Strecken, Zeit und Masse beschreiben, man brauchte neue Maße zur Bestimmung der Energie.

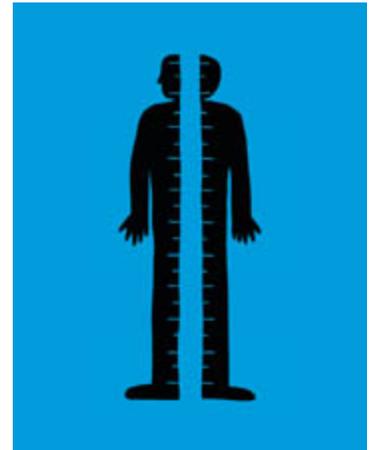
Forscher brauchen Maße zur Weitergabe ihrer Versuchsergebnisse. Maße sind die eindeutige Sprache, mit der Forscher Ergebnisse interpretieren und Versuche wiederholen können, um zu prüfen, ob

ihre Schlüsse korrekt sind. Heute wird das Internationale Einheitensystem (SI, nach der französischen Bezeichnung *Système International*) verwendet. Der Wert eines jeden Maßes und seine Beziehung zur Welt um uns ist von einer internationalen Gruppe von Forschern, den Metrologen, genau definiert.

Dieses erste Kapitel schildert die ersten Jahre der Wissenschaft, die wir heute Physik nennen, die Art und Weise ihres Vorgehens mittels Experimenten und wie die Versuchsergebnisse weltweit diskutiert werden. Von den fallenden Körpern, mit denen der italienische Forscher Galileo Galilei die Beschleunigung untersuchte, bis zu den schwingenden Pendeln, die den Weg zur exakten Zeitmessung bereiteten, ist dies die Geschichte, wie Forscher Strecken, Zeit, Energie und Bewegung gemessen haben und damit unser Verständnis der Welt revolutionierten. ■

DER MENSCH IST DAS MASS ALLER DINGE

LÄNGEN MESSEN



IM KONTEXT

SCHLÜSSELKULTUR

Altes Ägypten

FRÜHER

um 3500 v. Chr. In Mesopotamien gibt es ein System zur Messung der Feldergröße.

um 3100 v. Chr. In Ägypten nutzt man Schnüre mit regelmäßig geknüpften Knoten zum Messen der Felder und zur Bauüberwachung.

SPÄTER

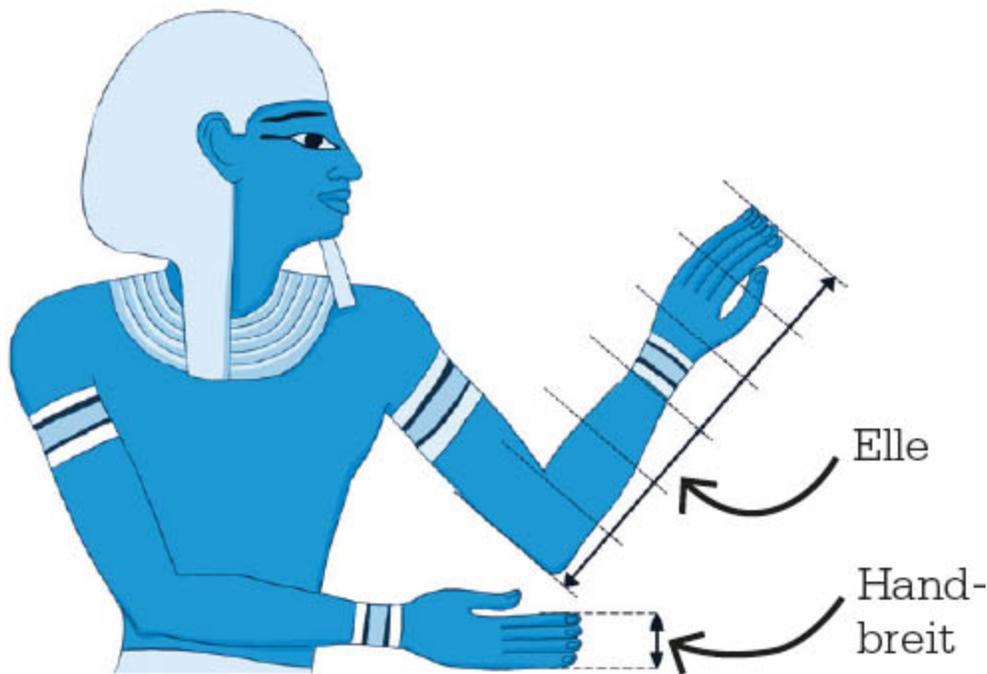
1585 Der Niederländer Simon Stevin schlägt ein dezimales Maßsystem vor.

1799 Die französische Regierung führt den Meter ein.

1875 Mit der Meterkonvention führen 17 Staaten ein konsistentes Einheitensystem ein.

1960 Auf der 11. Generalkonferenz zu Massen und Gewicht wird das metrische System zum Internationalen Einheitensystem (SI, Französisch *Système International*).

Als der Mensch begann, komplexe Bauwerke aufzubauen, brauchte er die Möglichkeit, Längen und Höhen zu messen. Die ersten Messgeräte waren wohl einfache Holzstecken mit Kerben; allerdings gab es keine verbindliche Längeneinheit. Als erste Einheit verbreitete sich im 4. und 3. Jahrtausend v. Chr. unter den Völkern in Ägypten, Mesopotamien und dem Indus die Elle. Sie bezeichnet die Länge vom Ellbogen bis zur Spitze des ausgestreckten Mittelfingers. Natürlich ist diese Länge nicht bei jedem Menschen gleich lang, sie war also nur näherungsweise festgelegt.



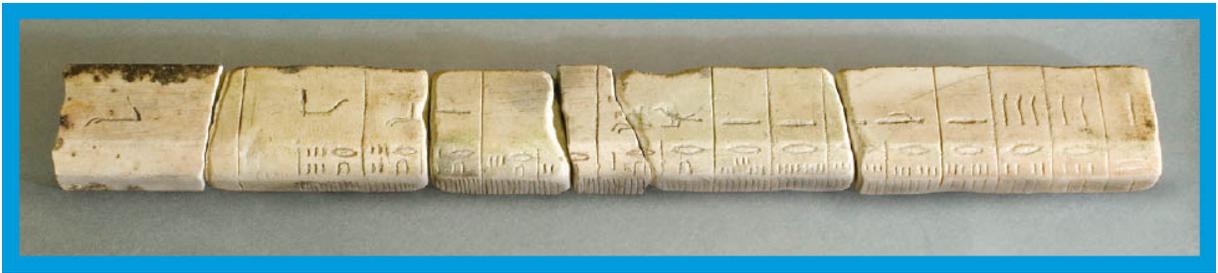
Die ägyptische Königliche Elle war so lang wie der Unterarm zwischen Ellbogen und Spitze des Mittelfingers. Die Elle wurde in 28 *Djeba* (Finger) unterteilt, daneben gab es eine Reihe weiterer Zwischenmaße wie *Scheseb* (Handbreit) und *Amem* (Faust).

Königliche Maße

Als Architekten und Baumeister von erstaunlichen Bauwerken brauchten die alten Ägypter eine verbindliche Längeneinheit. Die Königliche Elle (*Meh*) des Alten Reichs im antiken Ägypten ist die erste standardisierte Elle der Welt. Sie war seit 2700 v. Chr. in Gebrauch und

maß 523–529 mm, unterteilt in 28 *Djeba* (Finger), die jeweils einen Finger breit (19 mm) waren.

Bei archäologischen Grabungen in den Pyramiden hat man Ellenstäbe aus Holz, Schiefer, Basalt und Bronze gefunden, die als Maßstäbe für Handwerker und Architekten genutzt wurden. Die Cheops-Pyramide bei Gizeh, in deren Grabkammer man einen Ellenstab gefunden hat, war 280 Ellen hoch und hatte eine Grundfläche von 440 Ellen im Quadrat. Die Ägypter unterteilten die Elle in *Scheseb* (Handbreit, 4 *Djeba*), *Amem* (Faust, 6 *Djeba*), *Pedj-scherer* und *Pedj-aa* (Kleine und Große Spanne, 12 bzw. 14 *Djeba*) und *Djeser* (Vier Handbreit, 16 *Djeba*). Das *Chet* (100 Ellen, etwa 52,4 m) wurde zur Feldmessung, das *Iteru* (Königliche Meile, 20 000 Ellen bzw. 10,5 km) für Langstrecken verwendet.



Ellenstäbe wie dieses Exemplar aus der 18. Dynastie im alten Ägypten (14. Jh. v. Chr.) dienten dazu, im ganzen Reich einheitliche Messungen zu gewährleisten.

Im ganzen Nahen Osten waren Ellen verschiedener Länge gebräuchlich. Die Assyrer entwickelten sie um 700 v. Chr., die hebräische Bibel verweist an zahlreichen Stellen auf Ellen, besonders im Buch Exodus (2. Buch Mose) bei der Konstruktion der Stiftshütte, der »Wohnung« für die Zehn Gebote. Die alten Griechen hatten ihre eigene, 24-fach unterteilte Elle und als Streckenmaß das *Stadion* entsprechend 300 Ellen. Im 3. Jahrhundert v. Chr. schätzte der griechische Gelehrte Eratosthenes (um 276–194 v. Chr.) den Erdumfang mit 250 000 Stadien ab, später verbesserte er seinen Wert auf 252 000 Stadien. Auch die Römer übernahmen die Elle, zusammen mit Zoll (die Daumenbreite eines Mannes), Fuß und Meile. Die

Römische Meile hatte 1000 Schritt (*mille passus*), jeder 5 Römische Fuß lang. Durch die Expansion des Römischen Reiches ab dem 3. Jahrhundert v. Chr. verbreiteten sich diese Einheiten in großen Teilen Westasiens und Europas, einschließlich England, wo Königin Elizabeth I. 1593 die Meile mit 5280 Fuß neu definierte.

»Du sollst auch Bretter machen zu der Wohnung von Akazienholz, die stehen sollen. Zehn Ellen lang soll ein Brett sein und anderthalb Ellen breit«

Exodus (2. Buch Mose) 26, 15–16

Luther-Bibel 1912

Metrische Einheiten

1585 schlug der flämische Physiker Simon Stevin in seinem Traktat *De Thiende (Das Zehntel)* ein dezimales Maßsystem vor und sagte, dass es sich irgendwann weithin durchsetzen würde. Gut zwei Jahrhunderte später begann ein Komitee der französischen Akademie der Wissenschaften mit der Arbeit an dem metrischen System. Es definierte den Meter als zehnmillionstel Teil des Abstands vom Erdäquator zum Nordpol. 1799 übernahm Frankreich als erstes Land dieses System.

Weltweit verbindlich wurde das System erst 1960 mit dem Internationalen Einheitensystem (Système International, SI) mit dem Meter als Grundeinheit der Längen. 1 Meter (m) sind demnach 1000 Millimeter (mm) oder 100 Zentimeter (cm), und 1000 m sind 1 Kilometer (km). ■

»Eine Meile sind acht Furlong (»Furchen«), jeder Furlong sind vierzig Pole (»Ruten«), und jeder Pole sechzehneinhalb Foot (»Fuß«).«

Königin Elizabeth I.