



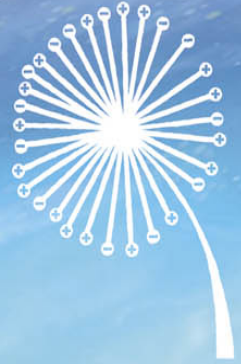
AUF DER  
SUCHE  
NACH DEM  
ATOMAREN  
KLEBER



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**

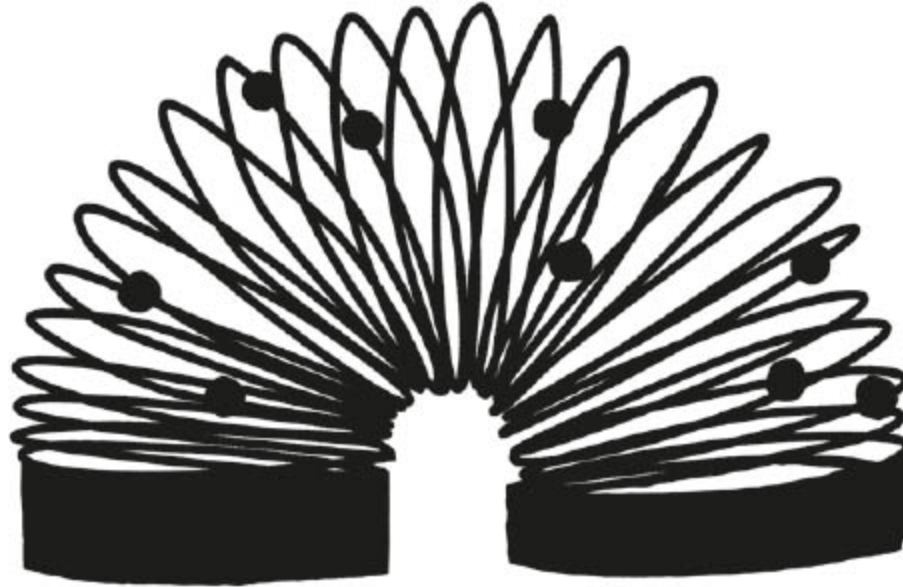
Zustandsänderungen und Bindungen

### **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**

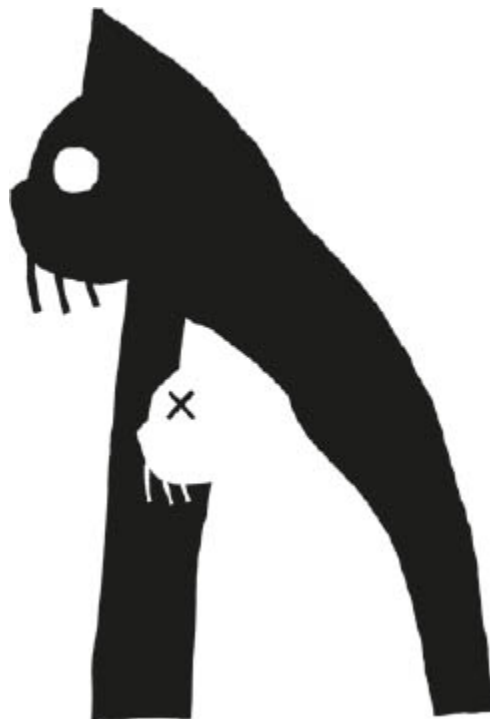
Quantenverschränkung

**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**

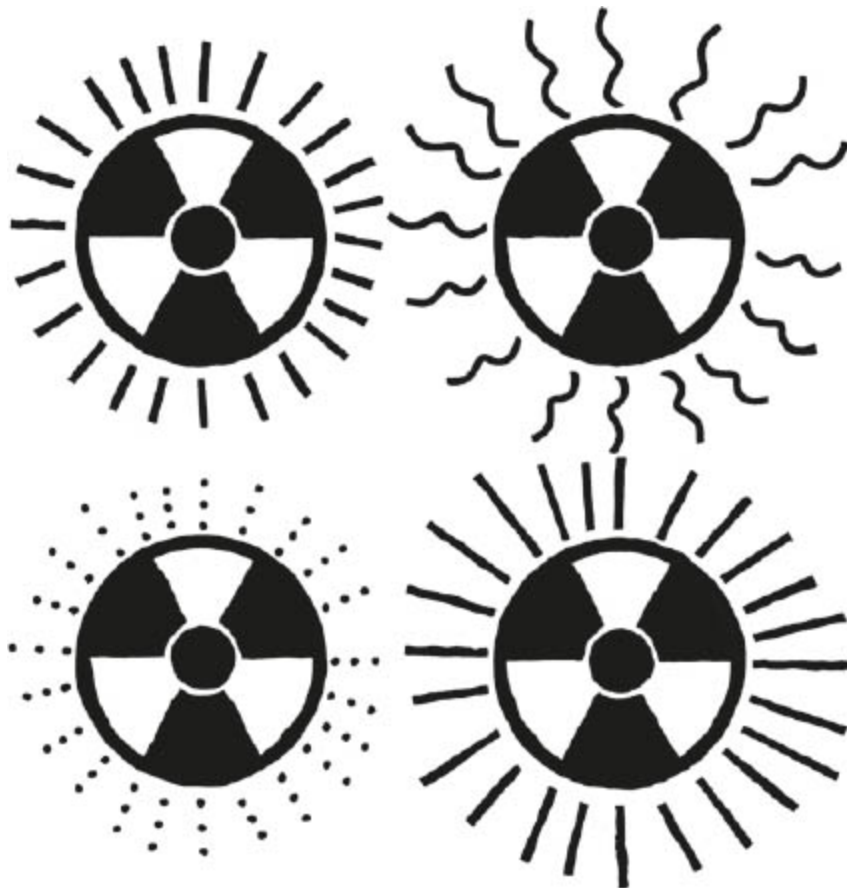
Das Higgs-Boson

**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 letters are fluid and connected, with a large initial "J" and "S".

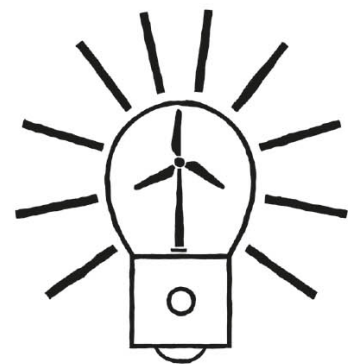
**Jim Al-Khalili**

# 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**

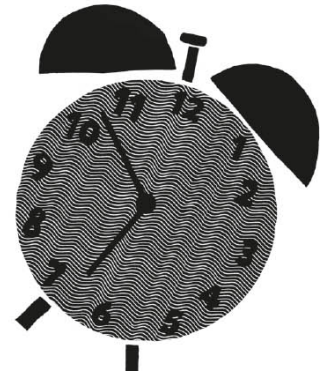
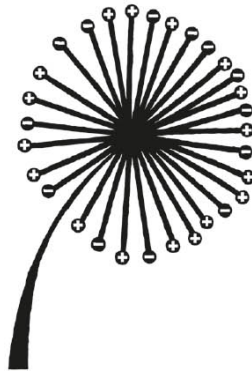
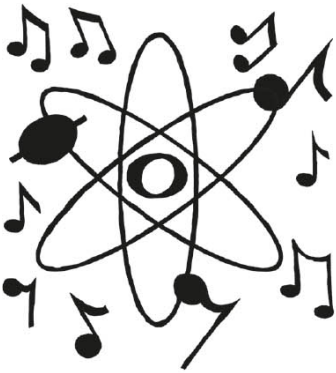
Auf globalen Handels- und Entdeckungsreisen wurden auch Ideen ausgetauscht. Händler und Seefahrer brachten Bücher, Geschichten und technische Wunderwerke von Ost nach West. Die Gedankenwelt aus diesem Kulturreichtum ließ Europa das Mittelalter überwinden und führte es in ein neues Zeitalter der Aufklärung, 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

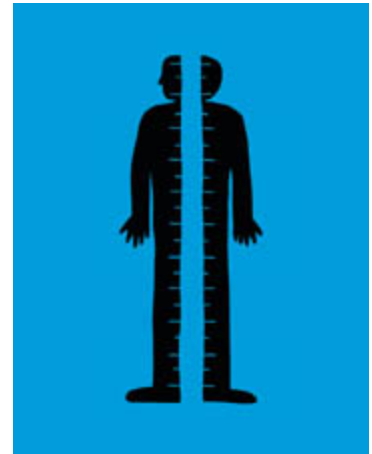


ihre Schlüsse korrekt sind. Heute wird das Internationale Einheitensystem (SI, nach der französischen Bezeichnung *Système International*) verwendet. Der Wert eines jeden Maßes und seine Beziehung zur Welt um uns ist von einer internationalen Gruppe von Forschern, den Metrologen, genau definiert.

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

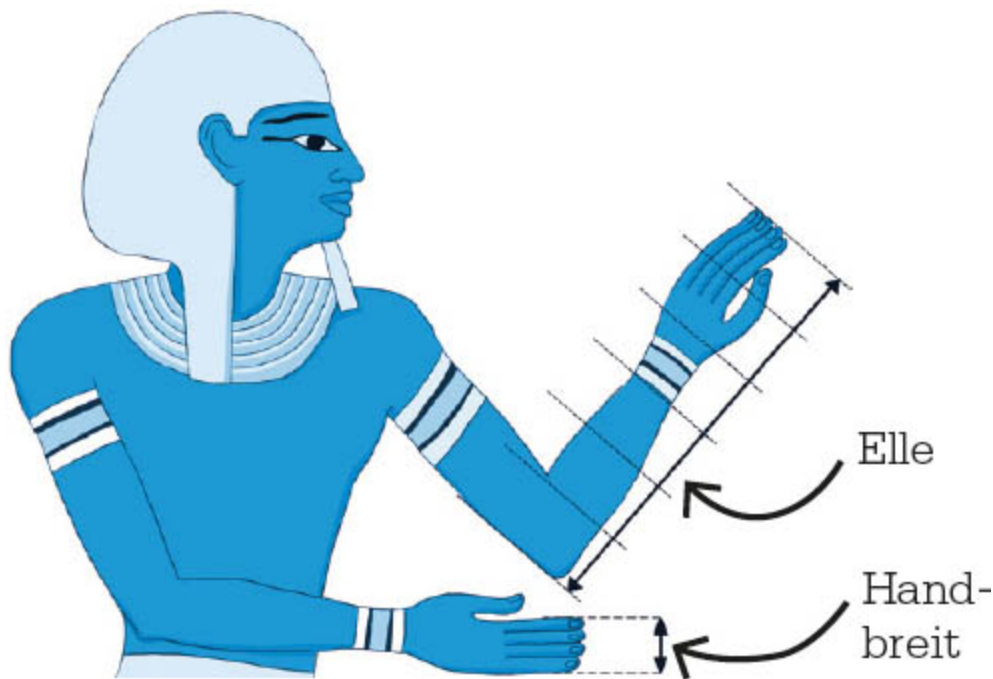
**1585** Der Niederländer Simon Stevin schlägt ein dezimales Maßsystem vor.

**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.**