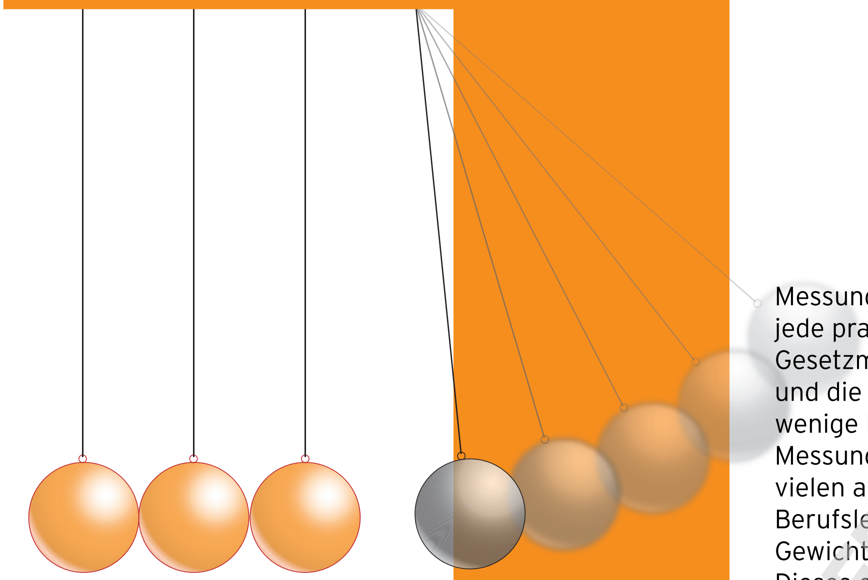

1

Messung und Maßeinheiten

Messungen und Maßeinheiten bilden die Grundlage für jede praktische Anwendung physikalischer Gesetzmäßigkeiten. Bereits ein Blick in Ihre Geldbörse und die Feststellung, dass sich darin mal wieder zu wenige Euros befinden, stellt genaugenommen eine Messung dar mit der Maßeinheit ‚Euro'. Aber auch bei vielen anderen Gelegenheiten in Alltag und Berufsleben werden Messungen von Zeit, Länge, Gewicht und vielem mehr durchgeführt.
Dieses einleitende Kapitel gibt eine kurze Übersicht über die gebräuchlichen Maßeinheiten, das internationale Einheitensystem und die Grundeinheiten.

1-1 Dinge messen

Die Physik beruht auf Messungen. Wir entdecken die Physik, indem wir lernen, die Größen zu messen, die in der Physik verwendet werden. Länge, Zeit, Masse, Temperatur, Druck und elektrischer Strom sind einige dieser Größen.

Wir messen jede physikalische Größe in ihren eigenen Einheiten, indem wir sie mit einem **Normal** vergleichen. Die **Einheit** ist ein besonderer Name, den wir den Messungen dieser Größe zuordnen – z. B. „Meter“ (oder m) für die Größe „Länge“. Das Normal entspricht genau 1,0 Einheiten der jeweiligen Größe. Wie Sie sehen werden, ist die Maßeinheit für die Länge, die exakt 1,0 m entspricht, durch die Entfernung gegeben, die das Licht im Vakuum während eines bestimmten Bruchteils einer Sekunde zurücklegt. Wir können eine Einheit und ihr Normal völlig beliebig festlegen. Wichtig ist jedoch, beides so zu wählen, dass Wissenschaftler auf der ganzen Welt unsere Definitionen als sinnvoll und praktisch anerkennen.

Haben wir erst einmal ein Normal gewählt, sagen wir für die Länge, so müssen wir jene Verfahren ausarbeiten, die es uns erlauben werden, jede beliebige Länge – sei es den Radius eines Wasserstoffatoms, den Radstand eines Skateboards oder die Entfernung eines Sterns – anhand dieses Normals auszudrücken. Lineale, die unser Längennormal annähernd nachbilden, bieten uns eine solche Möglichkeit der Längenmessung. Viele unserer Vergleiche sind jedoch indirekt: Mit einem Lineal können Sie natürlich weder den Radius eines Atoms noch die Entfernung eines Sterns messen.

Es gibt derart viele physikalische Größen, dass es schwer fällt, sie zu ordnen. Glücklicherweise sind sie nicht alle unabhängig. Eine Geschwindigkeit zum Beispiel wird durch den Quotienten einer Länge und einer Zeit gegeben. In internationaler Übereinkunft wählt man also eine kleine Anzahl von physikalischen Größen aus – wie z. B. Länge und Zeit – und weist ihnen allein Normale zu. Alle anderen physikalischen Größen werden anhand dieser Basisgrößen und ihrer Normale, der so genannten Basiseinheiten, definiert. So wird die Geschwindigkeit zum Beispiel durch die Basisgrößen Länge und Zeit sowie die dazugehörigen Basiseinheiten festgelegt.

Basiseinheiten müssen sowohl zugänglich als auch unveränderlich sein. Definieren wir die Maßeinheit für die Länge als die Entfernung zwischen der eigenen Nase und dem Zeigefinger des ausgestreckten Arms, so verfügen wir sicherlich über ein einfach zugängliches Normal – es wird sich jedoch von Person zu Person unterscheiden. Die Forderung nach Präzision in den Natur- und Ingenieurwissenschaften zwingt uns, der Unveränderbarkeit den Vorrang einzuräumen. Anschließend jedoch werden keine Mühen gescheut, die Basiseinheiten zu vervielfältigen, um sie denen, die sie brauchen, zugänglich zu machen.

1-2 Das internationale Einheitensystem SI

Im Jahr 1971 wählte man auf der 14. Generalkonferenz für Maße und Gewichte (General Conference on Weights and Measures) sieben Basisgrößen aus, welche die Grundlage des Internationalen Einheitensystems bilden. Dieses wird seinem französischen Namen nach (Système International d‘Unités) mit SI abgekürzt und ist allgemein als „metrisches System“ bekannt. In Tab. 1-1 sind die Einheiten dreier dieser Basisgrößen – Länge, Masse und Zeit – aufgeführt, die wir in den ersten Kapiteln dieses Buchs benutzen werden. Diese Einheiten wurden so definiert, dass sie einem „menschlichen Maßstab“ entsprechen.

TABELLE 1-1:
Einige SI-Basiseinheiten

Größe	Einheitenname	Zeichen
Länge	Meter	m
Zeit	Sekunde	s
Masse	Kilogramm	kg

Zahlreiche abgeleitete Einheiten des SI-Systems werden anhand dieser Basiseinheiten definiert. Die SI-Einheit für die Leistung zum Beispiel – das **Watt** (Symbol: W) – wird durch die Basiseinheiten der Masse, der Länge und der Zeit gegeben. Demzufolge gilt, wie Sie in Kap. 7 sehen werden:

$$1\,\text{Watt} = 1\,\text{W} = 1\,\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3, \tag{1-1}$$

wobei die letzte Einheitenkombination als „Kilogramm mal Quadratmeter pro Sekunde hoch drei“ gelesen wird.

Um die sehr großen und sehr kleinen Größen ausdrücken zu können, denen wir in der Physik begegnen, benutzen wir die Exponentialdarstellung, die auf Zehnerpotenzen beruht. In dieser Schreibweise ist:

$$3\,560\,000\,000\,\text{m} = 3{,}56 \cdot 10^9\,\text{m} \tag{1-2}$$

und

$$0{,}000\,000\,492\,\text{s} = 4{,}92 \cdot 10^{-7}\,\text{s}. \tag{1-3}$$

Am Computer wird die Exponentialdarstellung oft noch weiter verkürzt, in diesem Fall zu 3,56 E9 und 4,92 E − 7, wobei E für „Exponent der Zahl Zehn" steht. Noch kürzer ist die Darstellung auf manchen Taschenrechnern, die E durch ein Leerzeichen ersetzen.

Um den Umgang mit sehr großen oder sehr kleinen Messwerten noch weiter zu vereinfachen, benutzen wir die in Tab. 1-2 aufgelisteten Vorsilben. Wie Sie sehen, wird jedes Präfix wie ein Faktor gebraucht, der einer bestimmten Potenz der Zahl Zehn entspricht. Einer SI-Einheit eine solche Vorsilbe anzufügen, entspricht einer Multiplikation mit dem entsprechenden Faktor. Eine bestimmte elektrische Leistung können wir also schreiben als

$$1{,}27 \cdot 10^9\,\text{Watt} = 1{,}27\,\text{Gigawatt} = 1{,}27\,\text{GW} \tag{1-4}$$

oder ein bestimmtes Zeitintervall als

$$2{,}35 \cdot 10^{-9}\,\text{s} = 2{,}35\,\text{Nanosekunden} = 2{,}35\,\text{ns}. \tag{1-5}$$

Einige Vorsilben, wie sie zum Beispiel in „Millimeter", „Zentimeter", „Kilogramm" und „Megabyte" benutzt werden, sind Ihnen wahrscheinlich geläufig.

TABELLE 1-2:
Präfixe für SI-Einheiten

Faktor	Präfix[a]	Zeichen
10^{24}	Yotta	Y
10^{21}	Zetta-	Z
10^{18}	Exa-	E
10^{15}	Peta-	P
10^{12}	Tera-	T
$\mathbf{10^{9}}$	**Giga-**	**G**
$\mathbf{10^{6}}$	**Mega-**	**M**
$\mathbf{10^{3}}$	**Kilo-**	**k**
10^{2}	Hekto-	h
10^{1}	Deka-	da
10^{-1}	Dezi-	d
$\mathbf{10^{-2}}$	**Zenti-**	**c**
$\mathbf{10^{-3}}$	**Milli-**	**m**
$\mathbf{10^{-6}}$	**Mikro-**	μ
$\mathbf{10^{-9}}$	**Nano-**	**n**
$\mathbf{10^{-12}}$	**Piko-**	**p**
10^{-15}	Femto-	f
10^{-18}	Atto-	a
10^{-21}	Zepto-	z
10^{-24}	Yocto-	y

[a] Die am häufigsten verwendeten Vorsilben sind fett gedruckt.

1-3 Einheiten umwandeln

Oft müssen wir die Einheiten wechseln, in denen eine physikalische Größe ausgedrückt wird. Dies tun wir, indem wir sie über eine Kette von Faktoren ineinander umrechnen. Dabei multiplizieren wir die ursprüngliche Messung mit einem **Umrechnungsfaktor** (einem Quotient aus Maßeinheiten, der gleich eins ist). Da 1 min und 60 s zum Beispiel das gleiche Zeitintervall bezeichnen, haben wir:

$$\frac{1\,\text{min}}{60\,\text{s}} = 1 \quad \text{und} \quad \frac{60\,\text{s}}{1\,\text{min}} = 1.$$

Die Quotienten $(1\,\text{min})/(60\,\text{s})$ und $(60\,\text{s})/(1\,\text{min})$ lassen sich also als Umrechnungsfaktoren verwenden. Dies ist wohlgemerkt nicht das Gleiche, wie $1/60 = 1$ oder $60 = 1$ zu schreiben; Zahl und Einheit müssen gleichzeitig umgeformt werden.

Da sich eine Größe nicht verändert, wenn man sie mit der Einheit Eins multipliziert, können wir solche Umrechnungsfaktoren immer dann verwenden, wenn es uns nützlich erscheint. Bei der Umwandlung von einer Einheit in die andere benutzen wir diese Faktoren, um störende Einheiten zu beseitigen. Um zum Beispiel 2 min in Sekunden umzurechnen, schreiben wir:

$$2\,\text{min} = (2\,\text{min})(1) = (2\,\cancel{\text{min}})\left(\frac{60\,\text{s}}{1\,\cancel{\text{min}}}\right) = 120\,\text{s}. \tag{1-6}$$

Sollten Sie einen Umrechnungsfaktor einführen und feststellen, dass die störenden Einheiten nicht aufgehoben werden, so bilden Sie das Inverse des Faktors und versuchen Sie es erneut. Bei solchen Konversionen folgen die Einheiten den gleichen Rechenregeln wie Variablen und Zahlen.

In Anhang C und auf der vorderen Umschlaginnenseite finden Sie eine Reihe von Umrechnungsfaktoren zwischen SI-Einheiten und anderen Einheitensystemen, u. a. auch Nicht-SI-Einheiten, wie sie in den USA noch benutzt werden. Die Umrechnungsfaktoren sind hier jedoch nicht als Quotient, sondern in der Form „1 min = 60 s" dargestellt. Die folgende Beispielaufgabe zeigt, wie solche Quotienten aufgestellt werden.

BEISPIELAUFGABE 1-1

Als Pheidippides im Jahr 490 v. Chr. von Marathon nach Athen lief, um die Nachricht vom Sieg der Griechen über die Perser zu überbringen, legte er die Strecke wahrscheinlich mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 23 Riden pro Stunde (Riden/h) zurück.

Das Ride ist eine alte griechische Längeneinheit, ebenso wie das Stadion und das Plethron: 1 Ride war definiert als 4 Stadien, 1 Stadion wiederum bestand aus 6 Plethren. In modernen Einheiten ausgedrückt entspricht 1 Plethron 30,8 m.

FRAGE: Wie schnell lief Pheidippides in Kilometern pro Sekunde (km/s)?

LÖSUNG: Die wichtigste Idee bei der Umrechnung von einer Einheit in die andere besteht darin, die Umrechnungsfaktoren als Quotienten zu schreiben, mit deren Hilfe sich unerwünschte Einheiten herauskürzen lassen. Dementsprechend schreiben wir hier:

$$\begin{aligned}23\,\text{Riden/h} &= \left(23\,\frac{\cancel{\text{Riden}}}{\cancel{\text{h}}}\right)\left(\frac{4\,\cancel{\text{Stadien}}}{1\,\cancel{\text{Ride}}}\right)\left(\frac{6\,\cancel{\text{Plethren}}}{1\,\cancel{\text{Stadium}}}\right)\\ &\quad\cdot\left(\frac{30{,}8\,\cancel{\text{m}}}{1\,\cancel{\text{Plethron}}}\right)\left(\frac{1\,\text{km}}{1000\,\cancel{\text{m}}}\right)\left(\frac{1\,\cancel{\text{h}}}{3600\,\text{s}}\right)\\ &= 4{,}7227\cdot 10^{-3}\,\text{km/s} \approx 4{,}7\cdot 10^{-3}\,\text{km/s}.\end{aligned}$$

BEISPIELAUFGABE 1-2

Der Cran ist eine britische Volumeneinheit für frisch gefangene Heringe: 1 Cran = 170,474 Liter (l) Fisch, was etwa 750 Heringen entspricht. Um die Zollkontrollen in Saudi-Arabien zu passieren, muss eine Schiffsladung von 1255 Crans in Kubik-Covidos deklariert werden. Ein Covido ist eine arabische Längeneinheit, bei der 1 Covido = 48,26 cm entspricht.

FRAGE: Welcher Wert muss für die Schiffsladung angegeben werden?

LÖSUNG: 1 l entspricht laut Anhang C 1000 cm^3. Ein Schlüsselgedanke hilft uns weiter: Um Kubikzentimeter in Kubik-Covidos umzurechnen, müssen wir den Konversionsquotienten zwischen Zentimetern und Covidos zur dritten Potenz nehmen. Damit schreiben wir die folgende Umrechnungskette:

$$\begin{aligned}1255\,\text{Cran} &= (1255\,\text{Cran})\left(\frac{170{,}474\,\text{l}}{1\,\text{Cran}}\right)\left(\frac{1000\,\text{cm}^3}{1\,\text{l}}\right)\left(\frac{1\,\text{Covido}}{48{,}26\,\text{cm}}\right)^3\\ &= 1{,}903\cdot 10^3\,\text{Covidos}^3.\end{aligned}$$

LÖSUNGSSTRATEGIEN

➔ STRATEGIE 1: SIGNIFIKANTE STELLEN UND DEZIMALSTELLEN

Wenn Sie die Antwort zur Beispielaufgabe 1-1 berechnen, ohne dass Ihr Taschenrechner automatisch abrundet, zeigt das Gerät die Zahl $4{,}722\,666\,666\,67\cdot 10^{-3}$ an. Die Genauigkeit, die diese Zahl auf den ersten Blick ausdrückt, ist in Wirklichkeit bedeutungslos. Wir haben die Antwort hier auf $4{,}7\cdot 10^{-3}$ km/s gerundet, damit es nicht so wirkt, als sei der errechnete Wert genauer als die vorgegebenen Daten. Die gegebene Geschwindigkeit von 23 Riden/h besteht aus zwei Ziffern, **signifikante Stellen** oder **gültige Stellen** genannt. Wir haben die Antwort also auf zwei signifikante Stellen gerundet. In diesem Buch werden Endergebnisse von Rechnungen oft so gerundet, dass sie der kleinsten Anzahl von signifikanten Stellen in den vorgegebenen Daten entsprechen. (Manchmal jedoch bleibt eine zusätzliche signifikante Stelle bestehen.) Wenn von den Ziffern, die wegfallen sollen, die am weitesten links stehende Ziffer gleich 5 oder mehr ist, so wird die letzte verbleibende Ziffer aufgerundet; andernfalls bleibt sie so, wie sie ist. Die Zahl 11,3516 zum Beispiel wird bei drei signifikanten Stellen auf 11,4 gerundet, während 11,3279 auf drei signifikante Stellen gerundet 11,3 ergibt. (Die Antworten auf die Beispielaufgaben werden in diesem Buch üblicherweise mit dem Symbol = angegeben anstatt mit ≈, auch wenn die Zahlen gerundet wurden.)

Wenn in einer Aufgabe Zahlen wie 3,15 oder $3{,}15\cdot 10^3$ angegeben werden, so ist die Anzahl der signifikanten Stellen klar zu erkennen. Wie steht es jedoch mit der Zahl 3000? Ist diese Zahl nur auf eine signifikante Stelle genau bekannt, könnte man sie also in der Form $3\cdot 10^3$ schreiben? Oder sind tatsächlich bis zu vier signifikante Stellen bekannt, so dass man sie als $3{,}000\cdot 10^3$ schreiben könnte? In diesem Buch gehen wir davon aus, dass bei vorgegebenen Zahlen wie 3000 alle Nullen signifikant sind – Sie sollten sich jedoch anderweitig nicht unbedingt darauf verlassen.

1-4 Länge

Im Jahr 1792 stellte die neugeborene französische Republik ein neues System der Maße und Gewichte auf. Eckstein dieses Systems war das Meter, das als ein Zehnmillionstel der Entfernung zwischen dem Nordpol und dem Äquator definiert war. Aus praktischen Gründen wurde dieses erdgebundene Normal später aufgegeben. Das Meter entsprach nun dem Abstand zwischen zwei dünnen Linien, die an jedem Ende eines Platin-Iridium-Stabs eingraviert waren – das **Urmeter**, das im Internationalen Büro für Maße und Gewichte bei Paris aufbewahrt wurde. Genaue Kopien dieses Stabs schickte man an messtechnische Institute in aller Welt. Anhand dieser **sekundären Normale** wurden wiederum weitere, besser zugängliche Normale angefertigt, sodass schließlich jedes Messinstrument seine Aussagekraft über eine komplizierte Kette von Vergleichen von dem Urmeter ableitete.

Nach und nach wurde in der modernen Wissenschaft und Technologie der Ruf nach einem präziseren Normal als dem Abstand zwischen zwei feinen Einkerbungen auf einer Metallstange laut. Im Jahr 1960 nahm man deshalb ein neues Normal für das Meter an, das auf der Wellenlänge von Licht beruht. Genauer gesagt wurde das Normal für das Meter neu definiert als die 1 650 763,73fache Wellenlänge eines bestimmten orangeroten Lichts, das von Krypton-86-Atomen in einer Gasentladungsröhre ausgesendet wird (Krypton-86 ist ein besonderes Isotop, d. h. eine besondere Sorte von Krypton). Diese eigentümliche Anzahl von Wellenlängen wurde so gewählt, dass das neue Normal dem alten Urmeter möglichst nahe kam.

1983 erreichte das Bedürfnis nach höherer Genauigkeit einen Punkt, wo selbst der Krypton-86-Standard nicht mehr ausreichte. In diesem Jahr tat man einen gewagten Schritt: Das Meter wurde als die Entfernung umdefiniert, die das Licht in einem vorgegebenen Zeitintervall zurücklegt. In den Worten der 17. Generalkonferenz für Maße und Gewichte ausgedrückt:

▶▶ Das Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von (1/299 792 458) Sekunden durchläuft.

Das Zeitintervall wählte man so, dass die Lichtgeschwindigkeit c exakt gleich

$$c = 299\,792\,458\ \mathrm{m/s}$$

ist. Da die Messungen der Lichtgeschwindigkeit in der Zwischenzeit äußerst präzise geworden waren, machte es mehr Sinn, die Lichtgeschwindigkeit als eine fest definierte Größe anzunehmen und sie zur Neudefinition des Meters heranzuziehen.

In Tab. 1-3 ist eine weite Spanne von Längen aufgeführt – von der Ausdehnung des Universums bis hin zu einigen sehr kleinen Objekten.

TABELLE 1-3:

Einige ungefähre Längen

Gemessene Größe	Länge in Metern
Entfernung der ältesten Galaxien	$2 \cdot 10^{26}$
Entfernung der Andromeda-Galaxie	$2 \cdot 10^{22}$
Entfernung des nächstgelegenen Sterns (Proxima Centauri)	$4 \cdot 10^{16}$
Entfernung von Pluto	$6 \cdot 10^{12}$
Erdradius	$6 \cdot 10^{6}$
Höhe des Mount Everest	$9 \cdot 10^{3}$
Dicke dieser Seite	$1 \cdot 10^{-4}$
Länge eines typischen Virusmoleküls	$1 \cdot 10^{-8}$
Radius eines Wasserstoffatoms	$5 \cdot 10^{-11}$
Radius eines Protons	$1 \cdot 10^{-15}$

LÖSUNGSSTRATEGIEN

➔ STRATEGIE 2: GRÖSSENORDNUNGEN

Die Größenordnung einer Zahl ist die Zehnerpotenz, die man angibt, wenn die Zahl in der Exponentialdarstellung ausgedrückt wird. Ist zum Beispiel $A = 2{,}3 \cdot 10^4$ und $B = 7{,}8 \cdot 10^4$, dann ist die Größenordnung von A und B gleich 4.

Oft schätzen Ingenieure und Wissenschaftler das Ergebnis einer Rechnung auf die nächste Größenordnung ab. In unserem Beispiel ist die nächste Größenordnung 4 für A und 5 für B. Solche Abschätzungen führt man oft dann durch, wenn für die Rechnung detaillierte oder präzise Daten benötigt werden, die unbekannt oder nicht leicht zu erhalten sind. Die Beispielaufgabe 1-3 zeigt dies anschaulich.

BEISPIELAUFGABE 1-3

Das größte Bindfadenknäuel der Welt besitzt einen Radius von etwa 2 m.

FRAGE: Wie groß ist die Gesamtlänge L des Bindfadens in dem Knäuel, auf die nächste Größenordnung genau angegeben?

LÖSUNG: Wir könnten das Knäuel natürlich auseinander nehmen und die Gesamtlänge L messen, doch das wäre überaus mühevoll und würde denjenigen, der das Knäuel aufgewickelt hat, sehr unglücklich machen. Eine zentrale Idee ist hier, die für die Rechnung benötigten Größen abzuschätzen, da wir das Ergebnis nur auf die nächste Größenordnung genau benötigen.

Nehmen wir an, das Knäuel sei rund mit einem Radius von $R = 2$ m. Der Bindfaden in diesem Knäuel ist nicht dicht gepackt, d. h. es gibt unzählige Lücken zwischen benachbarten Abschnitten des Fadens. Um diesen Lücken Rechnung zu tragen, lassen Sie uns die Querschnittsfläche des Fadens etwas überschätzen: Wir nehmen an, der Querschnitt sei quadratisch, mit einer Kantenlänge $d = 4$ mm. Mit einer Querschnittsfläche von d^2 und der Länge L füllt der Bindfaden also ein Gesamtvolumen von

$$V = (\text{Querschnittsfläche})(\text{Länge}) = d^2 L.$$

Dies ist ungefähr gleich dem Volumen des Knäuels, das durch $(4/3)\pi R^3$ gegeben wird. Dies wiederum ist ungefähr gleich $4R^3$, da π etwa 3 ist. Wir haben also:

$$d^2 L = 4R^3$$

oder

$$L = \frac{4R^3}{d^2} = \frac{4(2\,\text{m})^3}{(4 \cdot 10^{-3}\,\text{m})^2}$$
$$= 2 \cdot 10^6\,\text{m} \approx 10^6\,\text{m} = 10^3\,\text{km}.$$

(Beachten Sie, dass Sie keinen Taschenrechner für solche vereinfachten Rechnungen brauchen.) Auf die nächste Größenordnung genau enthält das Knäuel also ungefähr 1000 km Bindfaden!

1-5 Zeit

Die Zeit hat zwei Seiten. Für alltägliche und einige wissenschaftliche Zwecke möchten wir die Tageszeit kennen, um Ereignisse in einer zeitlichen Reihenfolge anordnen zu können. In vielen wissenschaftlichen Arbeiten wollen wir wissen, wie lange ein Ereignis dauert. Jedes Zeitnormal muss also in der Lage sein, zwei Fragen zu beantworten: „Wann ist es passiert?“ und „Über welche Zeitdauer fand das Ereignis statt?“. Tabelle 1-4 zeigt einige Beispiele für Zeitintervalle.

Jedes sich wiederholende Phänomen ist ein mögliches Zeitnormal. Die Erdumdrehung, welche die Länge eines Tages bestimmt, wurde über Jahrhunderte hinweg als ein solches benutzt; Abb. 1-1 zeigt ein Beispiel einer neuartigen Uhr, die auf dieser Umdrehung beruht. Eine Quarzuhr, in der ein Quarzring zu kontinuierlichen Vibrationen

TABELLE 1-4:
Einige ungefähre Zeitintervalle

Gemessene Größe	Dauer in Sekunden
Lebensdauer eines Protons (vorhergesagt)	$1 \cdot 10^{39}$
Alter des Universums	$5 \cdot 10^{17}$
Alter der Pyramide von Cheops	$1 \cdot 10^{11}$
Menschliche Lebenserwartung	$2 \cdot 10^{9}$
Dauer eines Tages	$9 \cdot 10^{4}$
Zeit zwischen zwei Herzschlägen beim Menschen	$8 \cdot 10^{-1}$
Lebensdauer des Myons	$2 \cdot 10^{-6}$
Kürzester im Labor erzeugter Lichtpuls	$6 \cdot 10^{-15}$
Lebensdauer des instabilsten Teilchens	$1 \cdot 10^{-23}$
Planck-Zeit[a]	$1 \cdot 10^{-43}$

[a] Das ist die früheste Zeit nach dem Urknall, zu der die physikalischen Gesetze in der Form, wie wir sie heute kennen, angewendet werden können.

Abb. 1-1
Als das metrische System 1792 vorgeschlagen wurde, sollte die Stunde derart neu definiert werden, dass ein Zehn-Stunden-Tag entsteht. Die Idee konnte sich jedoch nicht durchsetzen. Der Hersteller dieser Zehn-Stunden-Uhr fügte umsichtigerweise ein kleines Zifferblatt mit den herkömmlichen zwölf Stunden hinzu. Zeigen beide Zifferblätter die gleiche Uhrzeit an?

angeregt wird, kann anhand astronomischer Beobachtungen auf die Erdumdrehung geeicht und damit zur Messung von Zeitintervallen im Labor herangezogen werden. Diese Eichung lässt sich jedoch nicht mit der für moderne wissenschaftliche und ingenieurwissenschaftliche Technologien erforderlichen Genauigkeit durchführen.

Um dem Bedarf nach einem genaueren Zeitnormal gerecht zu werden, entwickelte man die Atomuhren. In Deutschland ist die Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB für die Zeitfestsetzung und die Verbreitung der Zeitsignale zuständig. Die PTB betreibt dazu in Braunschweig mehrere Cäsiumatomuhren. Die Zeitsignale werden über den Zeitsignal- und Normalfrequenzsender DCF77 bei Aschaffenburg auf 77,5 kHz verbreitet; mit diesen Signalen lässt sich eine Funkuhr auf besser als 1 ms mit den Atomuhren in Übereinstimmung halten. Die Zeitsignale sind außerdem über das Telefonnetz und das Internet abrufbar; die Genauigkeit der Übereinstimmung mit den Atomuhren ist durch die unkalkulierbaren Übertragungswege im Internet etwas schlechter, aber garantiert besser als 0,1 s. (Um eine Uhr an Ihrem bestimmten Aufenthaltsort äußerst genau zu stellen, müssten Sie die Zeit berücksichtigen, die diese Signale brauchen, um zu Ihnen zu gelangen.)

Abbildung 1-2 zeigt, wie sich die Länge eines Tages auf der Erde im Vergleich mit einer Cäsiumatomuhr über einen Zeitraum von vier Jahren hinweg verändert. Die in Abb. 1-2 aufgeführten Variationen sind saisonal bedingt und wiederholen sich. Deshalb verdächtigen wir im Fall einer Abweichung zwischen den Zeitmessungen von Erde und Atom eher die rotierende Erde. Die Veränderungen gehen wahrscheinlich

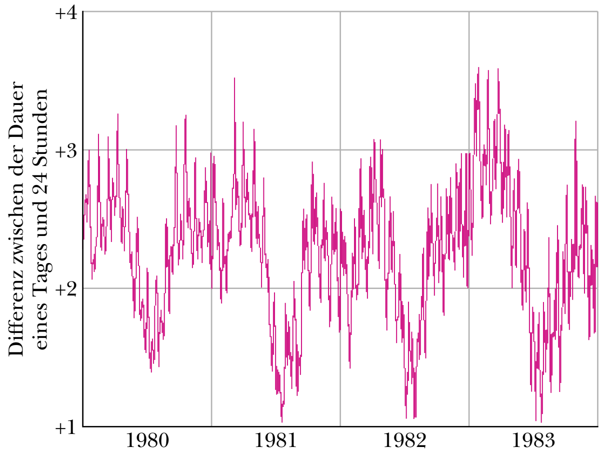

Abb. 1-2
Veränderungen der Dauer eines Tages über vier Jahre hinweg. Beachten Sie, dass die gesamte vertikale Skala nur 3 ms beträgt (1 Millisekunde = 0,001 s).

auf Gezeiteneffekte zurück, die durch den Mond verursacht werden, sowie auf großflächige Winde.

Die 13. Generalkonferenz für Maße und Gewichte nahm 1967 als Zeitnormal eine Standardsekunde an, deren Definition auf einer Cäsiumuhr beruht:

Eine Sekunde ist die Dauer von 9 192 631 770 Schwingungen des Lichts (einer bestimmten Wellenlänge), das ein Cäsium-133-Atom aussendet.

Atomuhren gehen so beständig, dass zwei Cäsiumuhren im Prinzip 6000 Jahre laufen müssten, bevor sich ihre Angaben um mehr als 1 s unterscheiden. Doch selbst eine solche Genauigkeit verblasst gegenüber der jener Uhren, die derzeit entwickelt werden und die eine Genauigkeit von 1 in 10^{18} erreichen könnten – d. h. 1 s in $1 \cdot 10^{18}$ s (etwa $3 \cdot 10^{10}$ Jahren).

BEISPIELAUFGABE 1-4 *

Stellen Sie sich vor, Sie liegen am Strand und sehen zu, wie die Sonne über dem ruhigen Ozean untergeht. Sie starten eine Stoppuhr in genau dem Moment, in dem der oberste Teil der Sonne verschwindet. Dann stehen Sie auf und erhöhen damit die Höhe Ihrer Augen um $h = 1{,}70$ m. Sie halten die Stoppuhr in dem Moment an, in dem der oberste Teil der Sonne ein zweites Mal untergeht.

FRAGE: Wenn laut Stoppuhr eine Zeit von $t = 11{,}1$ s vergangen ist, wie groß ist dann der Radius der Erde?

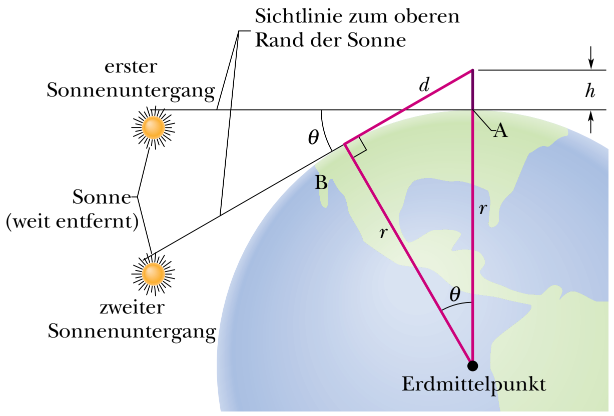

Abb. 1-3 Die Linie zwischen Ihren Augen und dem obersten Teil der sinkenden Sonne rotiert um einen Winkel θ, wenn Sie im Punkt A aufstehen und die Höhe Ihrer Augen damit um h vergrößern. (Der Winkel θ und der Abstand h sind hier der Übersichtlichkeit wegen vergrößert dargestellt.)

LÖSUNG: Ein zentraler Gedanke ist hier, dass die Linie zwischen Ihren Augen und dem obersten Teil der Sonne in dem Moment, in dem die Sonne verschwindet, tangential zur Erdoberfläche verläuft. Zwei solche Linien sind in Abb. 1-3 eingezeichnet. Solange Sie liegen, befinden sich Ihre Augen am Punkt A; wenn Sie aufstehen, erhöht sich der Ausgangspunkt Ihrer Sichtlinie um h. In diesem Fall bildet die Linie zwischen Ihren Augen und dem obersten Teil der Sonne eine Tangente zur Erdoberfläche im Punkt B. Sei d der Abstand zwischen Punkt B und dem Ort, an dem sich Ihre Augen befinden, wenn Sie stehen. Zeichnen Sie die Radien r wie in Abb. 1-3 gezeigt. Nach dem Satz des Pythagoras erhalten wir dann:

$$d^2 + r^2 = (r + h)^2 = r^2 + 2rh + h^2$$

oder

$$d^2 = 2rh + h^2. \tag{1-7}$$

Weil die Höhe h so viel kleiner ist als der Erdradius r, ist der Ausdruck h^2 gegenüber $2rh$ vernachlässigbar gering. Damit wird Gl. 1-7 zu

$$d^2 = 2rh. \tag{1-8}$$

In Abb. 1-3 ist der Winkel θ zwischen den beiden Radien, die zu den Punkten A und B gehören, gleichzeitig der Winkel, um den sich die Sonne während der gemessenen

* Nach „Doubling your Sunsets, or How Anyone Can Measure the Earth's Size with a Wristwatch and Meter Stick" von Dennis Rawlins, *American Journal of Physics*, Februar 1979, Bd. 47, S. 126–128. Diese Technik funktioniert am besten am Äquator.

Zeitdauer von $t = 11{,}1$ s um die Erde fortbewegt. Im Laufe eines ganzen Tages, d. h. etwa 24 h, bewegt sich die Sonne um einen Winkel von 360° um die Erde. Damit gilt

$$\frac{\theta}{360°} = \frac{t}{24\,\text{h}}.$$

Mit $t = 11{,}1$ s ergibt dies

$$\theta = \frac{(360°)(11{,}1\,\text{s})}{(24\,\text{h})(60\,\text{min/h/})(60\,\text{s/min})} = 0{,}04625°.$$

Aus Abb. 1-3 können wir wiederum erkennen, dass $d = r\tan\theta$. Ersetzen wir d in Gl. 1-8 durch diesen Ausdruck, so erhalten wir:

$$r^2\tan^2\theta = 2rh$$

oder

$$r = \frac{2h}{\tan^2\theta}.$$

Setzt man nun $\theta = 0{,}046\,25°$ und $h = 1{,}70$ m ein, so finden wir:

$$r = \frac{(2)(1{,}70\,\text{m})}{\tan^2 0{,}046\,25°} = 5{,}22\cdot 10^6\,\text{m},$$

was weniger als 20 % von dem allgemein anerkannten Wert ($6{,}37\cdot 10^6$ m) für den (mittleren) Erdradius abweicht.

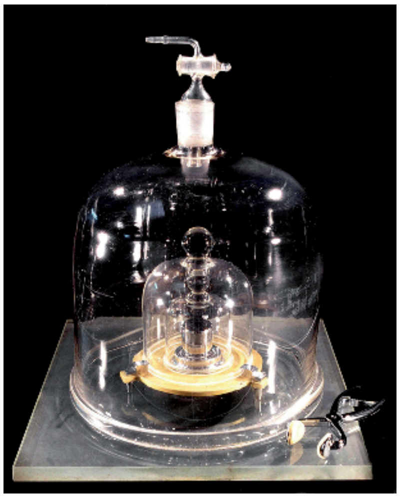

Abb. 1-4
Das internationale Massennormal ist ein Platin-Iridium-Zylinder mit einem Durchmesser und einer Höhe von 3,9 cm, dem eine Masse von 1 kg zugeordnet wurde.

1-6 Masse

Das Urkilogramm

Das SI-Normal für die Masse ist ein Platin-Iridium-Zylinder (Abb. 1-4), der im Internationalen Büro für Maße und Gewichte bei Paris aufbewahrt wird und dem in internationaler Übereinkunft eine Masse von einem Kilogramm zugeordnet wurde. Genaue Kopien wurden an die messtechnischen Institute in anderen Ländern versandt, sodass sich das Gewicht anderer Körper bestimmen lässt, indem man sie mit einer solchen Kopie vergleicht. Tabelle 1-5 führt – in Kilogramm ausgedrückt – einige Massen auf, die sich über 83 Größenordnungen erstrecken.

TABELLE 1-5:
Einige ungefähre Massen

Objekt	Masse in Kilogramm
Bekanntes Universum	$1\cdot 10^{53}$
Unsere Galaxis	$2\cdot 10^{41}$
Sonne	$2\cdot 10^{30}$
Mond	$7\cdot 10^{22}$
Asteroid Eros	$5\cdot 10^{15}$
Kleiner Berg	$1\cdot 10^{12}$
Ozeandampfer	$7\cdot 10^{7}$
Elefant	$5\cdot 10^{3}$
Weintraube	$3\cdot 10^{-3}$
Staubkorn	$7\cdot 10^{-10}$
Penizillinmolekül	$5\cdot 10^{-17}$
Uranatom	$4\cdot 10^{-25}$
Proton	$2\cdot 10^{-27}$
Elektron	$9\cdot 10^{-31}$

Ein zweites Massennormal

Die Massen von Atomen lassen sich untereinander genauer vergleichen als mit dem Urkilogramm. Deshalb hat man ein zweites Normal für die Masse eingeführt: Es handelt sich um das Kohlenstoff-12-Atom, dem in internationaler Übereinkunft eine Masse von 12 **atomaren Masseneinheiten** (u) zugewiesen wurde. Die beiden Einheiten sind über folgende Beziehung miteinander verknüpft:

$$1\,\text{u} = 1{,}6605402\cdot 10^{-27}\,\text{kg} \tag{1-9}$$

mit einer Unsicherheit von ±10 in den letzten zwei Dezimalstellen. Die Wissenschaftler können die Masse anderer Atome relativ zur Masse von Kohlenstoff-12 mit hinreichender Genauigkeit experimentell bestimmen. Was uns bisher allerdings noch fehlt, ist ein zuverlässiger Mittel, diese Genauigkeit auf allgemein übliche Masseneinheiten wie das Kilogramm auszudehnen.

ZUSAMMENFASSUNG

Messungen in der Physik. Die Physik beruht auf Messungen von physikalischen Größen. Einige dieser physikalischen Größen (wie Länge, Zeit und Masse) wurden als **Basisgrößen** ausgewählt. Jede von ihnen wurde anhand eines **Normals** definiert, jeder wurde eine entsprechende **Einheit** zugeordnet (wie Meter, Sekunde und Kilogramm). Andere physikalische Größen werden anhand dieser Basisgrößen und ihrer Normale und Einheiten definiert.

SI-Einheiten. In diesem Buch wird das Internationale Einheitensystem (SI) beschrieben. Die in Tab. 1-1 dargestellten drei physikalischen Größen finden in den ersten Kapiteln Verwendung. In internationaler Übereinkunft wurde für diese Basisgrößen Normale aufgestellt, die sowohl zugänglich als auch unveränderlich sind. Die entsprechenden Maßeinheiten werden für alle physikalischen Messungen benutzt, sowohl für die Basisgrößen als auch für die aus ihnen abgeleiteten Größen. Die Exponentialdarstellung und die Vorsilben aus Tab. 1-2 erlauben es, die Schreibweise der Messungen in vielen Fällen zu vereinfachen.

Einheiten umformen. Um Einheiten aus einem System in ein anderes umzurechnen (z. B. von Meilen pro Stunde in Kilometer pro Sekunde), bietet es sich an, die Einheiten über eine Kette von Umrechnungsfaktoren ineinander umzuwandeln. Dabei werden die ursprünglichen Daten nacheinander mit Umrechnungsfaktoren multipliziert, die gleich eins sind, und die Einheiten genau wie algebraische Größen so lange gekürzt, bis nur noch die erwünschten Einheiten übrig bleiben.

Länge. Die Einheit der Länge – das Meter – ist definiert als die Entfernung, die das Licht in einem präzise festgelegten Zeitintervall zurücklegt.

Zeit. Die Einheit der Zeit – die Sekunde – wurde früher auf die Erdumdrehung bezogen definiert. Heutzutage wird sie anhand der Schwingungen von Licht festgelegt, das von einer atomaren Quelle ausgesandt wird (Cäsium-133). Weltweit werden über Radiosignale genaue Zeitsignale versendet, die mit Atomuhren in den messtechnischen Instituten gekoppelt sind.

Masse. Die Einheit der Masse – das Kilogramm – wird über einen bestimmten Platin-Iridium-Prototypen definiert, der bei Paris in Frankreich aufbewahrt wird. Für Messungen auf atomarer Skala verwendet man üblicherweise die atomare Masseneinheit, die anhand des Kohlenstoff-12-Atoms definiert ist.