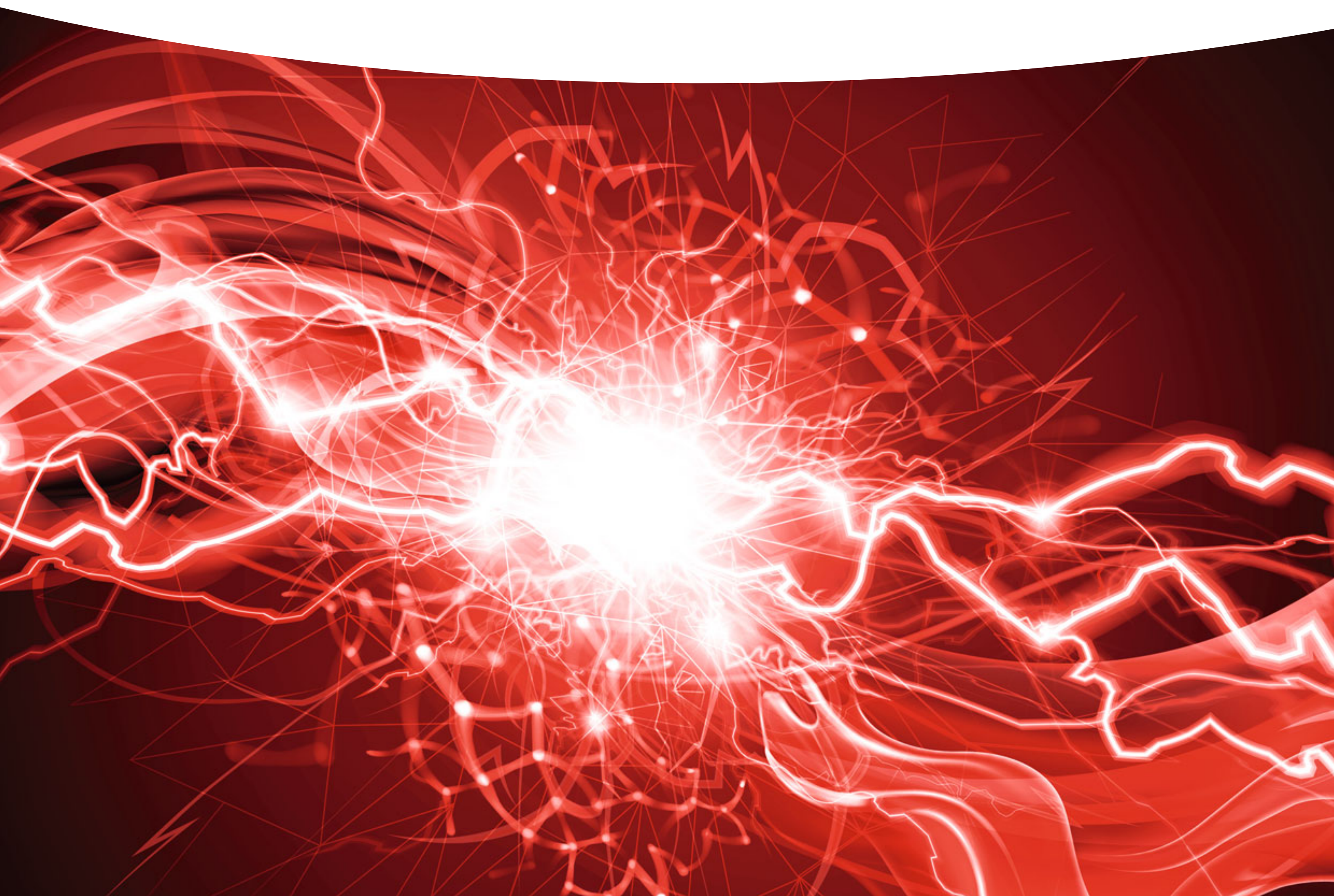
WILEY-VCH

David Halliday, Robert Resnick und Jearl Walker

Halliday Physik

Übersetzung herausgegeben von Stephan W. Koch

Dritte, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage



Halliday Physik

3. Auflage

Halliday Physik

David Halliday
University of Pittsburgh

Robert Resnick
Rensselaer Polytechnic Institute

Jearl Walker
Cleveland State University

Herausgeber der deutschen Übersetzung
Stephan W. Koch
Universität Marburg

Dritte, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

WILEY-VCH
Verlag GmbH & Co. KGaA

Die Autoren

David Halliday
University of Pittsburgh

Robert Resnick
Rensselaer Polytechnic Institute

Jearl Walker
Cleveland State University

Der Übersetzungsherausgeber

Stephan W. Koch
Philipps-Universität Marburg
Fachbereich Physik
Renthof 6
35032 Marburg

Die Übersetzer

Michael Bär, Wiesloch
Matthias Delbrück, Dossenheim

Titel der Orginalausgabe
Fundamentals of Physics / Extended 10th Edition

1. Auflage © 2003 Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA
2. Auflage © 2009 Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA

Titelbild
Adelevin/Stock-Illustration-ID: 480952174

3. Auflage 2018

Library of Congress Card No.:
applied for

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

Umschlaggestaltung Formgeber, Mannheim
Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig, Deutschland

Print ISBN 978-3-527-41356-0
ePDF ISBN 978-3-527-81259-2
ePub ISBN 978-3-527-81260-8
Mobi ISBN 978-3-527-81258-5
oBook ISBN 978-3-527-80576-1

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Vorwort zur deutschen Ausgabe

Diese dritte deutsche Auflage des Klassikers „Halliday Fundamentals of Physics“ enthält zahlreiche Neuerungen, die das Lehrbuch für Studentinnen und Studenten noch attraktiver machen.

Selbstverständlich deckt der „Halliday“ wie in den Vorauflagen den gesamten Stoff mehrsemestriger Einführungsvorlesungen ab und ist damit der unentbehrliche Begleiter für das gesamte Grundstudium der Physik.

Angefangen von den elementaren Konzepten der Bewegung von Massepunkten und einfachen Körpern, der Newtonschen Mechanik, den Grundlagen der Thermodynamik, der Physik elektrischer und magnetischer Felder und der Optik bis hin zu den Grundkonzepten der Quantenmechanik und der modernen Elementarteilchenphysik wird der Lehrstoff in didaktisch hervorragender Form präsentiert. Aufgrund der Erfahrungen in der Lehre wurden etliche Kapitel im Sinne besserer Verständlichkeit deutlich überarbeitet und erweitert, wobei die dankenswerten Vorschläge der Studierenden und Lehrenden speziell berücksichtigt wurden.

Dabei wurde der zugrundeliegende Ansatz des „Halliday“ beibehalten, der zu dessen großem Erfolg und Beliebtheit beigetragen hat: Die Physik wird stets in ihrer Bedeutung motiviert, mit vielen Beispielen illustriert und mit ausführlich im Text durchgerechneten Aufgaben verständlich gemacht. Wichtige physikalische Konzepte werden oft auf mehrere Arten präsentiert, wobei auf mögliche Verständnisprobleme besonders eingegangen wird, um typische Fallstricke zu vermeiden. Lösungsstrategien für Aufgaben nehmen einen ebenso wichtigen Platz ein wie Zusammenfassungen des präsentierten Materials in allen Kapiteln.

Um veränderten Lehr- und Lerngewohnheiten Rechnung zu tragen, wurden die Lerninhalte in der dritten Auflage modular organisiert, so dass nicht nur jedes Kapitel, sondern auch jede Lerneinheit explizit mit Lernzielen, Schlüsselideen und physikalischer Motivation beginnt.

Die quantitativ bedeutendsten Änderungen betreffen die Elemente, die das selbstständige Lernen unterstützen: zu den 300 detailliert vorgerechneten Beispielen kommen 250 Verständnisfragen, insgesamt 650 Fragen an den Kapitelenden – mit Antworten und Ergebnissen im Anhang – und mehr als 2500 Aufgaben. Wie auch in den Vorauflagen wurde Wert darauf gelegt, dass die Mehrzahl der Übungsaufgaben Konzepte illustriert und auf Argumente und Begründungen abzielt, nur ein kleiner Teil erfordert lediglich das Einsetzen von Zahlen in Formeln.

Die größte Neuerung ist das Arbeitsbuch, das erstmals *sämtliche* ausführliche Lösungen zu *allen* 2500 Aufgaben im Lehrbuch enthält. Bei schwierigeren Aufgaben hilft das SARA-Konzept, die Lösung zu entwickeln: Der „**S**tartpunkt“ verbalisiert das zugrundeliegende physikalische Problem, der „**A**nsatz“ formalisiert die Aufgabenstellung, die „**R**echnung“ illustriert den Rechenweg, und „**A**ufgepasst“ fasst die Schlussfolgerungen und den Lerneffekt zusammen.

Marburg, Frühjahr 2017

Stephan W. Koch

Zum Aufbau des Buches

Die vorliegende deutsche Ausgabe übernimmt die meisten der erfolgreichen Stilelemente der englischsprachigen Originalausgabe. Der Text wird in großzügigem Layout präsentiert, wobei wichtige Lösungsstrategien, Beispielaufgaben, Merksätze und Formeln besonders hervorgehoben sind.

- **Kapiteleinstieg**
  Jedes Kapitel beginnt mit der expliziten Aufführung von Lernzielen, Schlüsselideen und physikalischer Motivation, in den Unterabschnitten werden diese Lernziele und Schlüsselideen weiter konkretisiert.

- **Kontrollfragen**
  An diesen Haltepunkten im Textfluss werden Fragen gestellt, die Studierende anhand des vorangegangenen Textabschnitts oder der Beispielaufgabe zu lösen in der Lage sein sollten. Ist dies nicht der Fall, wird empfohlen, den Stoff vor dem Weiterlesen zu wiederholen. Die Antworten auf alle Kontrollfragen sind am Ende des Buchs zusammengestellt.

- **Beispielaufgaben**
  Diese durchgerechneten Aufgaben helfen Studierenden, den gelernten Stoff zu organisieren und zu festigen sowie ihre Fähigkeit zur Lösung von Problemen zu entwickeln. Die Lösungswege werden schrittweise erklärt. Dabei wird oft von speziell hervorgehobenen Lösungsideen ausgegangen, die zur Bewältigung der Aufgabe herangezogen werden müssen.

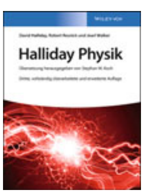
- **Lösungsstrategien**
  Insbesondere Studienanfängern geben diese kurzen Abschnitte Hinweise zum Herangehen an Probleme und zum Vermeiden häufiger Fehler.

- **Matheboxen**
  In die deutsche Ausgabe wurden ergänzend zum Original Matheboxen eingeführt, in denen in knapper Form der mathematische Hintergrund einiger wichtiger Gleichungen oder deren Lösungen präsentiert wird.

- **Zusammenfassungen**
  Am Ende jedes Kapitels wird dessen Inhalt in knapper, übersichtlicher Form zusammengefasst. Das Lesen dieser Übersicht kann und soll das Studium des Kapitels jedoch nicht ersetzen.

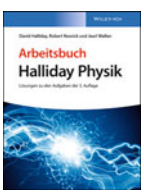
- **Fragen**
  Ähnlich wie bei den Kontrollfragen sind zur Beantwortung der Fragen weniger Berechnungen als vielmehr Argumente erwünscht. Die Antworten auf einen Großteil der Fragen sind am Ende des Buchs zusammengestellt.

- **Aufgaben**
  Die insgesamt rund 2500 Übungsaufgaben unterschiedlichen Schwierigkeitsgrads helfen dabei, das Gelernte zu festigen, auf unbekannte Sachverhalte zu übertragen und sich auf Klausuren und Prüfungen vorzubereiten. Dabei ist nur in wenigen Fällen das reine Einsetzen von Zahlen in Formeln gefragt, vielmehr stehen Konzepte, Begründungen und Argumente im Vordergrund. Zu allen Aufgaben finden sich ausführliche Lösungen im begleitenden Arbeitsbuch.

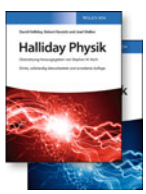


Halliday Physik

Halliday/Resnick/Walker
3. Auflage 2018
1635 Seiten
Hardcover
ISBN: 978-3-527-41356-0



Arbeitsbuch Halliday Physik
Lösungen zu den Aufgaben
Halliday/Resnick/Walker
3. Auflage 2018
789 Seiten
Softcover
ISBN: 978-3-527-41357-7



Halliday Physik
Deluxe

Halliday/Resnick/Walker
3. Auflage 2018
2424 Seiten
ISBN: 978-3-527-41358-4

Inhaltsverzeichnis

8 Potenzielle Energie und Energieerhaltung

9 Systeme von Teilchen

10 Die Rotation ausgedehnter Körper

11 Rollbewegung, Drehmoment und Drehimpuls

12 Gleichgewicht und Elastizität

13 Gravitation

14 Fluide

15 Schwingungen

1 Messung und Maßeinheiten

1.1 Grundsätzliches zu Messungen

Lernziele
Nach dem Durcharbeiten dieses Abschnitts sollten Sie in der Lage sein, …

- die SI-Basiseinheiten anzugeben,
- die am häufigsten verwendeten Präfixe für SI-Einheiten zu benennen,
- Einheiten (vorerst für Längen, Flächen und Volumina) ineinander umzurechnen,
- zu erläutern, dass und wie der Meter über die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum definiert ist.

Schlüsselideen
- Die Physik beruht auf der Messung von physikalischen Größen. Bestimmte physikalische Größen wurden als Basisgrößen (z. B. Länge, Zeit und Masse) ausgewählt, die jeweils durch Bezug auf einen Standard definiert sind und eine Maßeinheit (z. B. Meter, Sekunde und Kilogramm) festlegen. Andere physikalische Größen werden durch Rückgriff auf die Basisgrößen und deren Standards und Einheiten definiert.
- In diesem Buch wird überwiegend das Internationale Einheitensystem (SI) verwendet. In den ersten drei Kapiteln nutzen wir die drei in Tab. 1.1 aufgeführten physikalischen Größen. Für diese Basisgrößen wurden durch internationale Übereinkunft Standards festgelegt, die gleichermaßen praxisgerecht und unveränderlich sind.
  Diese Standards sind die Grundlage aller physikalischen Messungen sowohl der Basisgrößen als auch der von ihnen abgeleiteten Größen. Um die Schreibweise zu vereinfachen, werden meist die wissenschaftliche Notation und die in Tab. 1.2 angegebenen Präfixe verwendet.
- Die Umrechnung von Einheiten erfolgt durch Multiplikation der Originaldaten mit aus Zahlenwerten und Einheiten bestehenden Umrechnungsfaktoren, wobei die Einheiten wie algebraische Größen behandelt werden. Dieser Prozess wird durchgeführt, bis nur noch die gewünschten Einheiten übrigbleiben.

Physikalische Motivation
Die Natur- und Ingenieurwissenschaften beruhen auf Messungen und Vergleichen von Messungen. Wir brauchen daher Regeln dafür, wie Dinge zu messen und miteinander zu vergleichen sind, sowie Experimente, die die Einheiten für diese Messungen und Vergleiche festlegen. Eines der Ziele der Physik (und der Ingenieurwissenschaften) ist es, diese Experimente zu entwickeln und durchzuführen.

Beispielsweise bemühen sich Physiker, extrem genaue Uhren zu bauen, mit deren Hilfe die Länge von Zeitabschnitten sehr präzise gemessen werden kann. Man mag sich fragen, ob diese Genauigkeit wirklich nötig ist und ob sie den erforderlichen Aufwand rechtfertigen kann. Ein Beispiel, in dem sich die hohe Genauigkeit ganz praktisch auszahlt, ist das Global Positioning System (GPS), ohne das wir uns heute keine Navigation mehr vorstellen können und das ohne solche hochgenauen Zeitmessungen völlig nutzlos wäre.

Halliday Physik, 3. Auflage. David Halliday et al.

1.1.1 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, als die Entfernung definiert, 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 schwerfällt, sie zu ordnen. Glücklicherweise sind sie nicht alle unabhängig. Eine Geschwindigkeit zum Beispiel wird durch den Quotienten einer Länge und einer Zeit angegeben. 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 und bei Heranwachsenden sogar von Tag zu Tag ändern! 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.

1.1.2 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 auch als „metrisches System“ bekannt. In Tab. 1.1 sind die Einheiten dreier dieser Basisgrößen – Länge, Masse und Zeit – aufgeführt, mit denen wir uns in den ersten Kapiteln dieses Buchs beschäftigen 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. Es gilt nämlich, wie Sie in Kapitel 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 so oft begegnen, benutzen wir die Exponentialdarstellung, die auf Zehnerpotenzen beruht. In dieser Schreibweise sind

$$3\,560\,000\,000\ \mathrm{m} = 3{,}56 \cdot 10^9\ \mathrm{m} \tag{1.2}$$

und

$$0{,}000\,000\,492\ \mathrm{s} = 4{,}92 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{s}\,. \tag{1.3}$$

Am Computer wird die Exponentialdarstellung oft noch weiter verkürzt, in diesem Fall zu „3,56 E9“ bzw. „4,92 E–7“, wobei das E für „Exponent der Zahl Zehn“ steht. Noch kürzer ist die Darstellung auf manchen Taschenrechnern, die das 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 Vorsätze. Wie Sie sehen, wird jedes Präfix wie ein Faktor gebraucht, der einer bestimmten, meist durch drei teilbaren Potenz der Zahl Zehn entspricht. Einer SI-Einheit einen solchen Vorsatz anzufügen, entspricht einer Multiplikation mit dem entsprechenden Faktor. Eine bestimmte elektrische Leistung können wir also schreiben als

$$1{,}27 \cdot 10^9\ \text{Watt} = 1{,}27\ \text{Gigawatt} = 1{,}27\ \mathrm{GW} \tag{1.4}$$

oder ein bestimmtes Zeitintervall als

$$2{,}35 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{s} = 2{,}35\ \text{Nanosekunden} = 2{,}35\ \mathrm{ns}\,. \tag{1.5}$$

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

TABELLE 1.2:
Präfixe für SI-Einheiten.[a)]

Faktor	Präfix	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}	Yokto	y

a) Die am häufigsten verwendeten Vorsätze sind fett gedruckt.

1.1.3 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 Quotienten aus Maßeinheiten, der gleich eins ist). Da 1 min und 60 s zum Beispiel das gleiche Zeitintervall bezeichnen, haben wir:

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

Die Quotienten (1 min)/(60 s) und (60 s)/(1 min) lassen sich also als Umrechnungsfaktoren verwenden. Dies ist wohlgemerkt nicht das Gleiche, wie $1/60 = 1$ oder $60 = 1$ zu schreiben (was offenkundig falsch ist!); 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:

$$2\ \mathrm{min} = (2\ \mathrm{min})(1) = (2\ \cancel{\mathrm{min}})\left(\frac{60\ \mathrm{s}}{1\ \cancel{\mathrm{min}}}\right) = 120\ \mathrm{s}\,. \tag{1.6}$$

Sollten Sie einen Umrechnungsfaktor einführen und feststellen, dass die störenden Einheiten nicht aufgehoben werden, so bilden Sie den Kehrwert 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, unter anderem auch Nicht-SI-Einheiten, wie sie etwa in den USA noch benutzt werden. Die Umrechnungsfaktoren sind hier jedoch nicht als Quotient, sondern in der Form „1 min = 60 s“ dargestellt.

LÖSUNGSSTRATEGIEN

Strategie 1: Signifikante Stellen und Dezimalstellen Wenn Sie die Umrechnungen der beschriebenen Art mit dem Taschenrechner ausführen, ohne dass Ihr Taschenrechner automatisch abrundet, zeigt das Gerät Zahlen wie z. B. $4{,}722\,666\,666\,67 \cdot 10^{-3}$ an. Die Genauigkeit, die diese Zahl auf den ersten Blick ausdrückt, ist in Wirklichkeit bedeutungslos. Die Genauigkeit, mit der eine Antwort sinnvollerweise angegeben werden kann, ergibt sich aus der Genauigkeit der vorgegebenen Daten. Eine aufgrund einer Messung angegebene Geschwindigkeit von 23 km/h besteht aus zwei Ziffern, in diesem Zusammenhang signifikante Stellen oder gültige Stellen genannt. Wenn alle Parameter in einer Aufgabenstellung in dieser Weise mit zwei signifikanten Stellen angegeben sind, müssen wir auch die Antwort auf zwei signifikante Stellen runden. 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 in der Regel 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.

1.1.4 Länge

Im Jahr 1792 stellte die neugeborene französische Republik ein neues System der Maße und Gewichte auf. Eckstein dieses Systems war der Meter, der als ein Zehnmillionstel der Entfernung zwischen dem Nordpol und dem Äquator definiert war. Aus praktischen Gründen wurde dieses erdgebundene Normal später aufgegeben. Der Meter entsprach nun dem Abstand zwischen zwei dünnen Linien, die an jedem Ende eines Platin-Iridium-Stabs eingraviert waren – des **Urmeters**, 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 den Meter an, das auf der Wellenlänge von Licht beruht. Genauer gesagt wurde das Normal für den Meter neu definiert als die 1 650 763,73-fache 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 des Edelgases Krypton). Diese eigentümliche Anzahl von Wellenlängen wurde so gewählt, dass das neue Normal dem alten Urmeter möglichst nahekommt.

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: Der 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:

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

Das Zeitintervall wählte man also 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, ergab 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 äußerst kleinen Objekten.

TABELLE 1.3:
Einige ungefähre Längen.

Gemessene Größe	Länge in Metern
Entfernung der Andromeda-Galaxie	$2 \cdot 10^{22}$
Entfernung des nächstgelegenen Sterns (Proxima Centauri)	$4 \cdot 10^{16}$
Entfernung zum Zwergplaneten 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 jeweils 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 etwa dann durch, wenn für die Rechnung detaillierte oder präzise Daten benötigt werden, die jedoch leider unbekannt oder nicht leicht zu erhalten sind. Die Beispielaufgabe 1.1 zeigt dies anschaulich.

BEISPIELAUFGABE 1.1

Das größte Bindfadenknäuel der Welt besitzt einen Radius von etwa 2 m. Wie groß ist die Gesamtlänge L des Bindfadens in dem Knäuel, auf die nächste Größenordnung genau angegeben?

LÖSUNG: Wir könnten das Knäuel natürlich auseinandernehmen 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

TABELLE 1.4: Einige ungefähre Zeitintervalle.

Gemessene Größe	Dauer in Sekunden
Lebensdauer eines Protons	mindestens $1 \cdot 10^{39}$
Alter des Universums	$4 \cdot 10^{17}$
Alter der Pyramide von Cheops	$1 \cdot 10^{11}$
menschliche Lebenserwartung	$2{,}5 \cdot 10^{9}$
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	$1 \cdot 10^{-18}$
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.

Gesamtvolumen von

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

Dies ist ungefähr gleich dem Volumen des Knäuels, das durch den Ausdruck $(4/3)\pi R^3$ gegeben ist. 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!

1.2 Zeit

Lernziele

Nach dem Durcharbeiten dieses Abschnitts sollten Sie in der Lage sein, …

- verschiedene Zeiteinheiten ineinander umzurechnen und
- verschiedene Maße für die Zeit einzusetzen, beispielsweise für Bewegungen oder Zeiten, wie sie von Uhren angezeigt werden.

Schlüsselideen

- Die Sekunde ist über die Schwingungen des Lichts definiert, das von einer bestimmten Atomsorte (^{133}Cs) unter definierten Bedingungen ausgesandt wird. Genaue Zeitsignale werden weltweit über Radiosignale verbreitet, die in Normungslaboratorien an genaue Atomuhren gekoppelt sind.

1.2.1 Die zwei Seiten der 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 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.

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 Zifferblatt mit zweimal zwölf Stunden (= 24 Stunden = ein Tag) hinzu (Quelle: Cormullion/CC-SA 3.0). Zeigen beide Zifferblätter die gleiche Uhrzeit an?

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

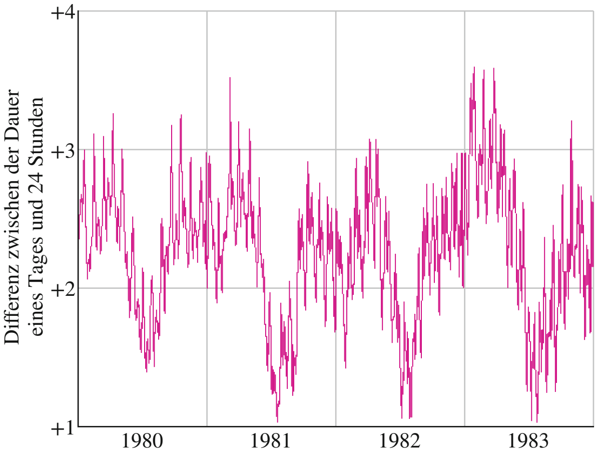


Abb. 1.2
Veränderungen der Dauer eines Tages über vier Jahre hinweg. Beachten Sie, dass die gesamte vertikale Skala nur 3 ms beträgt (1 Millisekunde = 0,001 s).

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 eine Cäsiumuhr eine relative Genauigkeit von etwa 1 zu 10^{14} erreicht, sie würde also Millionen Jahre laufen, bevor sie um eine Sekunde „falsch geht". Die genauesten Atomuhren, schaffen sogar eine Genauigkeit von 1 in 10^{18} – d. h. eine Abweichung von einer Sekunde in $1 \cdot 10^{18}$ s (etwa $3 \cdot 10^{10}$ Jahren).

1.3 Masse

Lernziele

Nach dem Durcharbeiten dieses Abschnitts sollten Sie in der Lage sein, …

- verschiedene Einheiten der Masse ineinander umzurechnen und
- für homogen verteilte Massen eine Beziehung zwischen Dichte, Volumen und Masse anzugeben.

Schlüsselideen

- Das Kilogramm ist durch einen Standardkörper aus Platin-Iridium definiert, der in der Nähe von Paris aufbewahrt wird. Für Messungen auf atomaren Maßstäben wird meist die atomare Masseneinheit u verwendet, die als die Masse eines ^{12}C-Atoms definiert ist.
- Die Dichte ρ eines Materials ist gleich seiner Masse dividiert durch sein Volumen:

$$\rho = \frac{m}{V} .$$

Abb. 1.3
Im Bild wird eine Replik des internationalen Massennormals gezeigt (Quelle: Japs 88/CC-BY-SA-3.0). Es ist ein Platin-Iridium-Zylinder mit einem Durchmesser und einer Höhe von 3,9 cm, dem eine Masse von 1 kg zugeordnet wurde.

1.3.1 Das Urkilogramm

Das SI-Normal für die Masse ist ein Platin-Iridium-Zylinder (Abb. 1.3), 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:

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	$7 \cdot 10^{-10}$
Penicillinmolekül	$5 \cdot 10^{-17}$
Uranatom	$4 \cdot 10^{-25}$
Proton	$2 \cdot 10^{-27}$
Elektron	$9 \cdot 10^{-31}$

1.3.2 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:

$$1\,\mathrm{u} = 1{,}660\,539\,040 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg} \tag{1.7}$$

mit einer Unsicherheit von ± 20 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 zuverlässiges Mittel, diese Genauigkeit auf allgemein übliche Masseneinheiten wie das Kilogramm auszudehnen.

1.3.3 Dichte

Wie wir in Kapitel 14 genauer untersuchen werden, ist die Dichte ρ (griechisches kleines rho) das Verhältnis aus Masse und Volumen, oder anders ausgedrückt die auf die Volumeneinheit bezogene Masse:

$$\rho = \frac{m}{V} . \tag{1.8}$$

Dichten werden in der Regel in Kilogramm pro Kubikmeter oder Gramm pro Kubikzentimeter angegeben. Die Dichte von Wasser ($1{,}00\,\mathrm{g/cm^3}$) wird häufig zum Vergleich herangezogen. Frisch gefallener Schnee besitzt etwa 1/10 dieser Dichte, Platin etwa das 21-Fache.

BEISPIELAUFGABE 1.2

Ein schweres Objekt kann bei einem Erdbeben im Boden versinken, wenn die Erschütterung eine so genannte Bodenverflüssigung bewirkt, bei der die Teilchen im Boden nur eine sehr geringe Reibung erfahren, wenn sie übereinander gleiten – die Erde wird dann praktisch zu Treibsand. Die Möglichkeit einer solchen „Verflüssigung" kann für sandige Böden mithilfe der *Porenzahl* e einer Bodenprobe angegeben werden:

$$e = \frac{V_{\text{Hohlräume}}}{V_{\text{Teilchen}}} \,. \tag{1.9}$$

Hierbei ist V_{Teilchen} das Gesamtvolumen der Sandkörner in der Probe und $V_{\text{Hohlräume}}$ das freie Volumen zwischen den Körnern (das Volumen der Hohlräume). Wenn e einen kritischen Wert von 0,80 überschreitet, kann während eines Erdbebens eine Bodenverflüssigung eintreten. Wie groß ist die zugehörige Dichte ρ_{Sand} des Sandes? Festes Siliciumdioxid (der Hauptbestandteil von Sand) hat eine Dichte von $\rho_{SiO_2} = 2{,}600 \cdot 10^3\,\text{kg/m}^3$.

LÖSUNGSIDEE: Die Dichte ρ_{Sand} des Sandes in einer Probe ist seine auf die Volumeneinheit bezogene Masse, also das Verhältnis aus der Gesamtmasse m_{Sand} der Probe und ihrem Gesamtvolumen V_{gesamt}:

$$\rho_{\text{Sand}} = \frac{m_{\text{Sand}}}{V_{\text{gesamt}}} \,. \tag{1.10}$$

RECHNUNG: Das Volumen V_{gesamt} einer Probe ist

$$V_{\text{gesamt}} = V_{\text{Hohlräume}} + V_{\text{Teilchen}} \,.$$

Wir setzen nun $V_{\text{Hohlräume}}$ aus Gl. 1.9 ein und lösen nach V_{Teilchen} auf:

$$V_{\text{Teilchen}} = \frac{V_{\text{gesamt}}}{1+e} \,. \tag{1.11}$$

Nach Gl. 1.8 ist die Gesamtmasse m des Sandes das Produkt der Dichte von Siliciumdioxid und des Gesamtvolumens der Sandkörner:

$$m_{\text{Sand}} = \rho_{SiO_2} V_{\text{Teilchen}} \,. \tag{1.12}$$

Wenn wir diesem Ausdruck in Gl. 1.10 einsetzen und anschließend V_{Teilchen} aus Gl. 1.11 substituieren, erhalten wir

$$\rho_{\text{Sand}} = \frac{\rho_{SiO_2}}{V_{\text{gesamt}}} \frac{V_{\text{gesamt}}}{1+e} = \frac{\rho_{SiO_2}}{1+e} \,. \tag{1.13}$$

Nun setzen wir $\rho_{SiO_2} = 2{,}600 \cdot 10^3\,\text{kg/m}^3$ und den kritischen Wert $e = 0{,}80$ ein und finden so, dass die Bodenverflüssigung eintritt, wenn die Dichte des Sandes einen Wert

$$\rho_{\text{Sand, krit.}} = \frac{2{,}600 \cdot 10^3\,\text{kg/m}^3}{1{,}80} = 1{,}40 \cdot 10^3\,\text{kg/m}^3$$

unterschreitet. In einer solchen Bodenverflüssigung kann ein Gebäude um mehrere Meter absacken.

1.4 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) verwendet. Die in Tab. 1.1 dargestellten drei physikalischen Größen finden in den ersten Kapiteln Verwendung. In internationaler Übereinkunft wurden 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 Vorsätze aus Tab. 1.2 erlauben es, die Schreibweise von Messergebnissen 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. Anschließend werden die Einheiten genau wie algebraische Größen so lange gekürzt, bis nur noch die erwünschten Einheiten übrig bleiben.

Länge Die Einheit der Länge – der 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.

Die Einheit der Masse – das Kilogramm – wird über einen bestimmten Platin-Iridium-Prototyp 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.

1.5 Aufgaben

1.1 Der Mikrometer (1 µm) wird manchmal auch „Mikron" genannt. (a) Wie viele Mikron bzw. Mikrometer sind in 1,0 km enthalten? (b) Welchem Bruchteil eines Zentimeters entspricht 1,0 µm? (c) Wie viele Mikrometer stecken in 1,0 Yard (1 yd = 0,9144 m)?

1.2 In den 1920er Jahren wurden in den USA zwei Arten von Barrel-Einheiten verwendet. Der Apfel-Barrel besaß ein gesetzlich festgelegtes Volumen von 7056 Kubik-Inch (1 Inch = 1 in = 2,540 cm), der Cranberry-Barrel war 5826 Kubik-Inch groß. Wenn ein Händler nun 20 Cranberry-Barrel an Waren an einen Kunden verkauft, der der Meinung ist, er bekomme Apfel-Barrel, wie hoch ist dann die Abweichung der Warenladung in Litern?

1.3 Auf einer bestimmten englischen Wiese findet ein Pferderennen über 4,0 Furlongs statt. Wie lang ist die Rennstrecke in den alten englischen Einheiten (a) Rods und (b) Chains? (1 Furlong = 201,1 Rod = 5,0292 m und 1 Chain = 20,117 m)

1.4 Die Abstände in diesem Buch wurden hauptsächlich in Punkt und Pica gesetzt: 12 Punkt = 1 Pica und 6 Pica = 1 Inch. Wenn eine Abbildung auf den Korrekturabzügen um 0,80 cm versetzt ist, wie groß ist diese Abweichung dann (a) in Punkt und (b) in Pica?

1.5 Die Erde entspricht in guter Näherung einer Kugel mit einem Radius von $6{,}37 \cdot 10^6$ m. Wie groß sind (a) ihr Umfang in Kilometern, (b) ihre Oberfläche in Quadratkilometern und (c) ihr Volumen in Kubikkilometern?

1.6 Wie ein altes Manuskript verrät, verfügte ein Großgrundbesitzer zu Zeiten König Arthurs über 3,00 Acres für den Ackerbau und 25,0 Perches mal 4,00 Perches für die Viehzucht. Wie groß war die Gesamtfläche (a) in der alten Einheit Roods bzw. (b) in modernen Quadratmetern? 1 Acre entspricht einer Fläche von 40 Perches mal 4 Perches, 1 Rood ist gleich 40 Perches mal 1 Perch und 1 Perch entspricht 16,5 Feet (1 ft = 0,3048 m).

1.7 Die Antarktis besitzt (grob genähert) die Form eines Halbkreises mit einem Radius von 2000 km (Abb. 1.A7). Im Mittel ist die Eisschicht, die sie bedeckt, 3000 m dick. Wie viele Kubikzentimeter Eis enthält die Antarktis? (Vernachlässigen Sie die Erdkrümmung.)

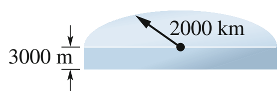


Abb. 1.A7

1.8 Ein Puppenhaus entspricht einem echten Haus im Maßstab 1 : 12 (d. h., jede Länge des Puppenhauses ist 1/12-mal so groß wie die des echten Hauses), ein Miniaturhaus (ein Puppenhaus für die Bewohner des Puppenhauses) entspricht einem echten Haus im Maßstab 1 : 144. Nehmen Sie an, das echte Haus (Abb. 1.A8) sei 20 m lang, 12 m tief und 6,0 m hoch. Das Dach besitzt eine Standardneigung mit einer Höhe von 3,0 m und senkrechten, dreieckigen Flächen an den Enden. Welches Volumen besitzen (a) das Puppenhaus und (b) das Miniaturhaus in Kubikmetern?

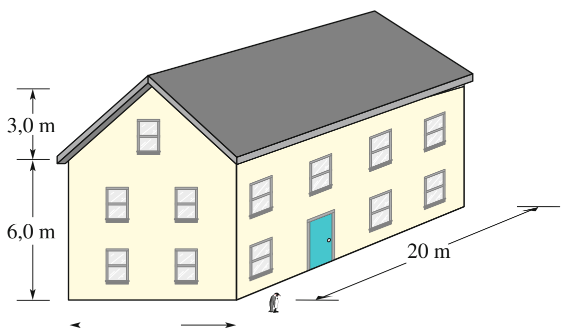


Abb. 1.A8

1.9 Hydrologen in den USA benutzen oft den Acre-foot als Volumeneinheit für Wasser. Dieser ist definiert als das Volumen an Wasser, das 1 Acre Land 1 Foot tief bedeckt. Bei einem heftigen Gewitter sind über einer Stadt mit einer Gesamtfläche von 26 km^2 in 30 min 2,0 Inches Regen niedergegangen. Wie viel Wasser fiel in Acre-foot gemessen auf die Stadt?

1.10 Der Physiker Enrico Fermi wies einmal darauf hin, dass die übliche Zeitdauer einer Vorlesung (50 min) etwa einem Mikrojahrhundert (μJhd) entspricht. (a) Wie lange dauert ein Mikrojahrhundert in Minuten? (b) Benutzen Sie

$$\text{Unterschied in Prozent} = \left(\frac{\text{genauer Wert} - \text{Abschätzung}}{\text{genauer Wert}}\right) \cdot 100\,,$$

um die Differenz von Fermis Abschätzung zum tatsächlichen Wert in Prozent anzugeben.

1.11 Drücken Sie die Lichtgeschwindigkeit ($3{,}0 \cdot 10^8$ m/s) in (a) Foot pro Nanosekunde und (b) Millimeter pro Pikosekunde aus.

1.12 In der Mikrophysik benutzt man ab und zu die Einheit Shake. Ein Shake entspricht 10^{-8} s. (a) Enthält eine Sekunde mehr Shakes als es Sekunden in einem Jahr gibt? (b) Die Menschheit existiert seit etwa 10^6 Jahren, das Universum dagegen ist etwa 10^{10} Jahre alt. Setzt man das Alter des Universums als einen „Universumstag“, seit wie vielen „Universumssekunden“ existiert dann die Menschheit?

1.13 In einem Labor werden fünf Uhren getestet. Eine Woche lang wird an aufeinanderfolgenden Tagen genau um 12 Uhr mittags – laut offiziellem Zeitsignal – die Uhrzeit abgelesen (siehe Tabelle). Ordnen Sie die Uhren danach, wie gut sie die Zeit messen – von der besten zur schlechtesten. Begründen Sie Ihre Wahl.

	Sonntag	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag
A	12:36:40	12:36:56	12:37:12	12:37:27	12:37:44	12:37:59	12:38:14
B	11:59:59	12:00:02	11:59:57	12:00:07	12:00:02	11:59:56	12:00:03
C	15:50:45	15:50:45	15:52:41	15:53:39	15:54:37	15:55:35	15:56:33
D	12:03:59	12:02:52	12:01:45	12:00:38	11:59:31	11:58:24	11:57:17
E	12:03:59	12:02:49	12:01:54	12:01:52	12:01:32	12:01:22	12:01:12

1.14 Drei Digitaluhren (A, B und C) laufen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und zeigen zudem null nicht gleichzeitig an. Abbildung 1.A14 zeigt vier Momente, in denen die Uhren paarweise gleichzeitig abgelesen werden.

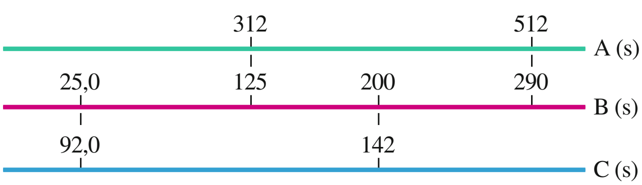


Abb. 1.A14

(Beim ersten Mal z. B. zeigt B 25,0 s an, C dagegen 92,0 s.) Wenn zwei Ereignisse laut Uhr A 600 s auseinanderliegen, wie weit liegen sie (a) laut Uhr B und (b) laut Uhr C auseinander? (c) Wenn Uhr A 400 s anzeigt, wie lautet die Anzeige auf Uhr B? (d) Wenn Uhr C 15,0 s anzeigt, was zeigt dann Uhr B an? (Nehmen Sie negative Werte für Zeiten an, die vor null liegen.)

1.15 Die astronomische Einheit (AE) entspricht der mittleren Entfernung zwischen der Erde und der Sonne, also ungefähr $1{,}50 \cdot 10^8$ km. Die Lichtgeschwindigkeit beträgt $3{,}0 \cdot 10^8$ m/s. Drücken Sie die Lichtgeschwindigkeit in astronomischen Einheiten pro Minute aus.

1.16 Bis 1883 besaß jede Stadt in den USA ihre eigene lokale Zeit. Heutzutage stellen Reisende ihre Uhren nur dann neu, wenn der Zeitunterschied 1,0 h beträgt. Wie viele Längengrade weit müssen Sie im Mittel reisen, bis Sie Ihre Uhr um 1,0 h umstellen müssen? (Tipp: Die Erde dreht sich in 24 h um 360°.)

1.17 Berechnen Sie unter der Annahme, dass sich die Dauer eines Tages pro Jahrhundert um 0,0010 s erhöht, den Gesamteffekt nach 20 Jahrhunderten. (Historische Beobachtungsdaten von Sonnenfinsternissen deuten auf ein solches Verlangsamen der Erdrotation hin.)

1.18 Zeitnormale werden heutzutage anhand von Atomuhren festgelegt. Ein viel versprechendes zweites Normal beruht auf Pulsaren, d. h. rotierenden Neutronensternen (äußerst kompakte Sterne, die im Wesentlichen aus Neutronen bestehen). Einige rotieren mit sehr stabiler Geschwindigkeit und senden dabei einen Strahl von Radiowellen aus, der die Erde – wie der Lichtstrahl eines Leuchtturms – bei jeder Umdrehung einmal überstreicht. Ein Beispiel ist der Pulsar PSR 1937+21. Er dreht sich in 1,557 806 448 872 75(3) ms einmal um sich selbst, wobei die eingeklammerte Ziffer 3 die Unsicherheit in der letzten Dezimalstelle angibt. (a) Wie oft dreht sich PSR 1937+21 in 7,00 Tagen um sich selbst? (b) Wie viel Zeit benötigt der Pulsar für eine Million Umdrehungen und (c) wie hoch ist dabei die Unsicherheit?

1.19 Die Erde besitzt eine Masse von $5{,}98 \cdot 10^{24}$ kg. Die Masse der Atome, aus denen die Erde besteht, ist im Mittel gleich 40 u. Wie viele Atome enthält die Erde?

1.20 Ein Kubikzentimeter Gold besitzt eine Masse von 19,32 g. Als duktilstes Metall lässt sich Gold in hauchdünne Blättchen pressen oder zu extrem langen Fasern ziehen. (a) Wenn 1,000 Unze (1 oz) Gold mit einer Masse von 27,63 g zu einem 1,000 μm dicken Blatt geformt werden, welche Fläche hat dann das Blatt? (b) Wenn das Gold stattdessen in die Länge gezogen wird und eine zylindrische Faser mit einem Radius von 2,500 μm bildet, wie lang ist dann diese Faser?

1.21 (a) Berechnen Sie unter der Annahme, dass jeder Kubikzentimeter Wasser eine Masse von genau 1 g besitzt, die Masse eines Kubikmeters Wasser in Kilogramm. (b) Nehmen Sie an, dass es 10,0 h dauert, einen Behälter mit 5700 m^3 Wasser zu entleeren. Mit welchem Massenstrom, in Kilogramm pro Sekunde gemessen, fließt das Wasser aus dem Behälter heraus?

1.22 Welche Masse an Wasser ging in Aufgabe 1.9 während des Gewitters über der Stadt nieder? Ein Kubikmeter Wasser hat eine Masse von 10^3 kg.

1.23 Ein Kubikzentimeter Eisen besitzt eine Masse von 7,87 g. Die Masse eines Eisenatoms ist $9{,}27 \cdot 10^{-26}$ kg. Nehmen Sie an, die Atome seien kugelförmig und dicht gepackt. (a) Wie groß ist das Volumen eines Eisenatoms? (b) Welcher Abstand liegt zwischen den Mittelpunkten von benachbarten Atomen?

1.24 Der feine Sand von kalifornischen Stränden besteht in guter Näherung aus Kugeln aus Siliciumdioxid mit einem mittleren Durchmesser von 50 µm. Ein fester Würfel aus Siliciumdioxid mit einem Volumen von 1,00 m^3 besitzt eine Masse von 2600 kg. Welche Masse an Sandkörnern besitzt eine Gesamtoberfläche (die Gesamtfläche von allen einzelnen Kugeln), die der Oberfläche eines Würfels von 1 m Kantenlänge entspricht?

1.25 Die Harvard-Brücke, die das Massachusetts Institute of Technology MIT mit den Gebäuden der Studentenverbindungen auf dem anderen Ufer des Charles River verbindet, ist 364,4 Smoot und ein Ear lang. Die Einheit Smoot geht auf Oliver Reed Smoot zurück, Absolvent von 1962, der Länge um Länge über die Brücke getragen bzw. geschleift wurde, während andere „Füchse“ der Verbindung Lambda Chi Alpha die Brücke mit Farbe in Teilstücke von jeweils einem Smoot Länge unterteilten. Die Markierungen werden seitdem alle zwei Jahre von den Füchsen der Verbindung nachgezogen, üblicherweise zu Stauzeiten, damit die Polizei nicht so leicht eingreifen kann. (Wahrscheinlich waren die Polizisten zunächst verstimmt, weil der Smoot keine SI-Basiseinheit ist, doch sie scheinen sich in der Zwischenzeit mit dieser Einheit angefreundet zu haben.) Abbildung 1.A25 zeigt drei parallele Wege, gemessen in Smoot (S), Willie (W) und Zelda (Z). Wie lang sind 50,0 Smoot in (a) Willie und (b) Zelda?

Abb. 1.A25

1.26 Miss Muffet besitzt einen Vorrat von 11 Tuffet Gerste. Das Volumen eines Tuffets entspricht 2 Peck bzw. 0,50 Bushel; dabei ist 1 britischer Imperial Bushel = 36,3687 Liter (L). Wie groß ist Miss Muffets Vorrat in (a) Peck, (b) Bushel und (c) Liter?

1.27 Die Stufen eines Standardtreppenhauses sind 19 cm hoch und 23 cm tief. Untersuchungen deuten allerdings darauf hin, dass die Treppen für den Abstieg sicherer wären, wenn die Stufen stattdessen 28 cm tief wären. Ein bestimmtes Treppenhaus ist insgesamt 4,57 m hoch. Wie viel weiter würde das Fußende der Treppe in den Raum hineinragen, wenn die Tiefe der einzelnen Stufen derart vergrößert würde?

1.28 Ein Beispiel für den Gegensatz von Alt und Neu sowie von Groß und Klein: Im alten ländlichen England gab 1 Hide (zwischen 100 und 120 Acres) die Fläche Land an, die eine Familie benötigte, um sich mit einem einzigen Pflug ein Jahr lang ernähren zu können. (1 Acre entspricht einer Fläche von 4047 m^2.) Dementsprechend war 1 Wapentake die Fläche Land, die benötigt wurde, um 100 solche Familien zu ernähren. In der Quantenphysik misst man die Querschnittsfläche eines Kerns – definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen diese Fläche trifft und dabei absorbiert wird – in Barn, wobei 1 Barn gleich $1 \cdot 10^{-28}$ m^2 ist. Was ist das Verhältnis von 25 Wapentake zu 11 Barn? *Anmerkung:* Wenn ein Kern vom Standpunkt des Kernphysikers aus betrachtet „groß“ ist, so lässt er sich mit einem Teilchen ebenso leicht treffen wie ein Scheunentor (engl.: barn) mit einer Gewehrkugel.

2 Geradlinige Bewegung

2.1 Ort, Verschiebung und mittlere Geschwindigkeit

Lernziele

Nach dem Durcharbeiten dieses Abschnitts sollten Sie in der Lage sein, …

- zu verstehen, dass man ein ausgedehntes Objekt als (punktförmiges) Teilchen behandeln kann, sofern sich alle seine Bestandteile mit derselben Geschwindigkeit in dieselbe Richtung bewegen (dieses Kapitel behandelt die Bewegung derartiger Objekte),
- den Ort eines Teilchens als Position bezüglich einer maßstäblichen Achse (z. B. einer x-Achse) anzugeben,
- die Beziehung zwischen der Verschiebung eines Teilchens und seinem Ort vor und nach der Verschiebung anzugeben,
- die Beziehung zwischen der mittleren Geschwindigkeit eines Teilchens, seiner Verschiebung und der dabei verstrichenen Zeit anzugeben,
- die Beziehung zwischen der Effektivgeschwindigkeit eines Teilchens, der gesamten von ihm zurückgelegten Entfernung und der dafür benötigten Zeit anzugeben,
- aus der Auftragung des Ortes eines Teilchens gegen die Zeit seine mittlere Geschwindigkeit in einem beliebigen Zeitintervall zu ermitteln.

Schlüsselideen

- Der Ort x eines Teilchens bezüglich einer x-Achse gibt die Position des Teilchens relativ zum Nullpunkt (oder Ursprung) dieser Achse an.
- Dieser Ort kann positiv oder negativ sein, je nachdem, auf welcher Seite des Ursprungs sich das Teilchen befindet. Wenn es sich direkt am Ursprung befindet, ist der Ort null. Die positive Seite einer Achse ist die Richtung zunehmend positiver Zahlen; die Gegenrichtung ist die negative Seite der Achse.
- Die Verschiebung Δx eines Teilchens beschreibt eine Veränderung seiner Position:

$$\Delta x = x_2 - x_1 \,.$$

- Die Verschiebung ist eine Vektorgröße. Sie ist positiv, wenn sich das Teilchen in die positive Richtung der x-Achse bewegt hat, und negativ, wenn es sich in die negative Richtung bewegt hat.
- Wenn ein Teilchen sich während eines Zeitintervalls $\Delta t = t_2 - t_1$ von einem Ort x_1 zu einem Ort x_2 bewegt, so ist seine mittlere bzw. gemittelte Geschwindigkeit – oder auch Durchschnittsgeschwindigkeit – während dieser Zeit

$$v_{\text{gem}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \,.$$

- Das Vorzeichen von v_{gem} zeigt die Richtung der Bewegung an (v_{gem} ist also eine Vektorgröße). Die mittlere Geschwindigkeit hängt nicht von der Entfernung ab, die das Teilchen tatsächlich zurücklegt, sondern nur von seinen Positionen am Anfang und am Ende des betrachteten Zeitintervalls.

Halliday Physik, 3. Auflage. David Halliday et al.

- In der Auftragung von x gegen t ist die mittlere Geschwindigkeit in einem Zeitintervall Δt die Steigung der geraden Linie, die die beiden Enden des Intervalls miteinander verbindet.
- Die Effektivgeschwindigkeit v_{eff} eines Teilchens im Zeitintervall Δt hängt von der in diesem Intervall tatsächlich zurückgelegten Strecke ab:

$$v_{\text{eff}} = \frac{\text{zurückgelegte Strecke}}{\Delta t} .$$

Physikalische Motivation

Eines der Ziele der Physik ist, die Bewegung von Objekten zu beschreiben – z. B. wie schnell sie sich bewegen oder welche Entfernung sie in einer bestimmten Zeit zurücklegen. Die Konstrukteure von Rennautos sind an diesem Aspekt der Physik besonders interessiert, weil diese Zusammenhänge letztlich über Sieg oder Niederlage im Rennen entscheiden. Geologen verwenden diesen Teil der Physik, um die Bewegungen von tektonischen Platten zu messen und zu versuchen, daraus Erdbeben vorherzusagen. Mediziner brauchen diese physikalischen Zusammenhänge, um aus der beobachteten Strömung des Blutes in einem Patienten den Teilverschluss einer Arterie zu diagnostizieren, und Autofahrer nutzen sie, um zu bremsen, wenn ihr Radarwarner piepst. Natürlich gibt es noch unzählige weitere Beispiele. In diesem Kapitel untersuchen wir die Grundlagen der Physik von Bewegungen, in denen sich ein Objekt (ein Rennwagen, eine tektonische Platte, rote Blutkörperchen …) entlang einer einzigen Achse bewegt. Eine solche Bewegung wird *eindimensionale Bewegung* genannt.

2.1.1 Bewegung

Die Erde – und alles auf ihr – bewegt sich. Selbst scheinbar regungslose Dinge, wie z. B. eine Straße, bewegen sich mit der Erddrehung, der Umlaufbahn der Erde um die Sonne, der Umlaufbahn des Sonnensystems um das Zentrum der Milchstraße und der Bewegung der Galaxis relativ zu anderen Galaxien. Die Klassifizierung und der Vergleich von Bewegungen – **Kinematik** genannt – können manchmal eine große Herausforderung darstellen. Was genau messen wir dabei und wie werden die Vergleiche gezogen?

Bevor wir versuchen, diese Fragen zu beantworten, werden wir einige allgemeine Eigenschaften einer ganz bestimmten Art von Bewegung studieren. Diese wird durch drei Bedingungen eingeschränkt:

1. Die Bewegung erfolgt nur entlang einer geraden Linie. Diese Linie kann senkrecht (wie bei einem fallenden Stein), waagerecht (wie bei einem Auto auf einer geraden Straße) oder schräg verlaufen, aber sie muss eine Gerade sein.
2. Bewegung wird durch Kräfte („ziehen“ und „schieben“) verursacht – diese werden jedoch erst in Kapitel 5 behandelt. In dem vorliegenden Kapitel werden wir nur die Bewegung an sich sowie Veränderungen dieser Bewegung untersuchen. Wird das bewegte Objekt schneller oder langsamer, hält es an oder wechselt es die Richtung? Welche Rolle spielt die Zeit bei der Veränderung der Bewegung?
3. Das bewegte Objekt ist entweder ein **Teilchen**, d. h. ein punktförmiges Gebilde wie z. B. ein Elektron, oder ein Objekt, das sich wie ein Teilchen bewegt (derart, dass all seine Teile sich mit exakt derselben Geschwindigkeit in dieselbe Richtung bewegen). Ein Kind, das seinen Körper ganz steif macht und auf dem Spielplatz eine gerade Rutsche hinunterrutscht, bewegt sich wie ein Teilchen; ein vom Wind durch die Wüste getriebener, rollender Steppenläufer dagegen nicht, da sich verschiedene Punkte in seinem Inneren in verschiedene Richtungen bewegen.

2.1.2 Ort und Verschiebung

Den Ort eines Teilchens zu bestimmen bedeutet, seine Position in Bezug auf einen bestimmten Referenzpunkt festzulegen, oftmals in Bezug auf den Ursprung (oder

Nullpunkt) einer Achse, wie der x-Achse in Abb. 2.1. Die **positive Richtung** der Achse ist die Richtung ansteigender Zahlen (Koordinaten), die in Abb. 2.1 nach rechts zeigt. Die entgegengesetzte Richtung wird als **negative Richtung** bezeichnet.

Ein Teilchen befindet sich z. B. am Ort $x = 5$ m, d. h., es befindet sich 5 m in positiver Richtung vom Ursprung entfernt. Läge es bei $x = -5$ m, so befände es sich genauso weit vom Ursprung entfernt, allerdings in der entgegengesetzten Richtung. Auf der Achse liegt eine Koordinate von -5 m weiter links – also zu kleineren Zahlen hin – als eine von -1 m, und beide Koordinaten befinden sich weiter links als eine Koordinate von $+5$ m. Das Pluszeichen einer Koordinate muss man nicht ausschreiben, das Minuszeichen dagegen muss immer aufgeführt werden.

Ein Wechsel von einem Ort x_1 zu einem anderen Ort x_2 wird eine **Verschiebung** Δx genannt, wobei

$$\Delta x = x_2 - x_1 \,. \tag{2.1}$$

(Das Symbol Δ, der griechische Großbuchstabe Delta, steht für eine Veränderung einer Größe, also die Differenz von Endwert und Anfangswert dieser Größe.) Wenn für die Ortsangaben x_1 und x_2 Zahlenwerte eingesetzt werden, so ergibt eine Verschiebung in die positive Richtung (nach rechts in Abb. 2.1) immer einen positiven Wert, eine Verschiebung in die entgegengesetzte Richtung (nach links in der Abbildung) einen negativen Wert. Bewegt sich das Teilchen beispielsweise von $x_1 = 5$ m nach $x_2 = 12$ m, dann ist $\Delta x = (12\,\text{m}) - (5\,\text{m}) = +7$ m. Der positive Wert gibt an, dass die Bewegung in die positive Richtung erfolgt. Kehrt das Teilchen dann zu $x = 5$ m zurück, so ist die Verschiebung für die ganze Bewegung gleich null. Die tatsächliche Anzahl von Metern, die auf der gesamten Strecke zurückgelegt wurde, ist irrelevant. Verschiebungen berücksichtigen nur den Anfangs- und den Endpunkt einer Bewegung.

Auch bei einer Verschiebung muss ein Pluszeichen nicht aufgeführt werden, ein Minuszeichen dagegen immer. Ignorieren wir das Vorzeichen (und damit die Richtung) einer Verschiebung, so erhalten wir den **Betrag** (oder **Absolutbetrag**) der Verschiebung. Im vorangehenden Beispiel ist der Betrag von Δx gleich 7 m.

Eine Verschiebung ist ein Beispiel für eine **Vektorgröße**, d. h., eine Größe, die sowohl über eine Richtung als auch über einen Betrag verfügt. Vektoren werden uns in Kapitel 3 eingehender beschäftigen, doch an dieser Stelle genügt die Feststellung, dass eine Verschiebung zwei Eigenschaften besitzt: (1) Ihr *Betrag* ist der Abstand (wie z. B. eine Zahl von Metern) zwischen Anfangs- und Endpunkt. (2) Die *Richtung* der Verschiebung zwischen Anfangs- und Endpunkt wird einfach mit einem Plus- oder Minuszeichen angegeben, falls die Bewegung nur entlang einer einzigen Achse erfolgt.

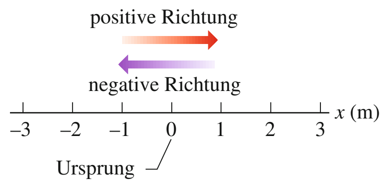


Abb. 2.1
Der Ort bzw. die Position eines Teilchens lässt sich anhand einer Achse bestimmen, die in Einheiten der Länge gekennzeichnet ist (hier in Metern) und sich unendlich weit in entgegengesetzte Richtungen erstreckt. Die Achsenbeschriftung – hier x – befindet sich immer auf der positiven Seite des Ursprungs.

Was an dieser Stelle folgt, ist die erste einer Vielzahl von „Kontrollfragen", die Ihnen in diesem Buch begegnen werden. Sie bestehen aus einer oder mehreren Fragen, deren Beantwortung gewisse Argumentationsketten oder Kopfrechnungen erfordert und die Ihnen die Möglichkeit geben, Ihr Verständnis rasch zu überprüfen. Die Antworten finden Sie am Schluss dieses Buchs.

KONTROLLFRAGE 1

Hier sind drei Paare von Anfangs- und Endpunkten einer Bewegung gegeben, die entlang einer x-Achse erfolgt. Welche Paare ergeben eine negative Verschiebung: (a) -3 m, 5 m; (b) -3 m, -7 m; (c) 7 m, -3 m?

2.1.3 Durchschnittsgeschwindigkeit

Die Position eines Teilchens lässt sich auf kompakte Weise anhand der Ort-Zeit-Kurve $x(t)$ beschreiben. Dabei wird der Ort x als Funktion der Zeit t aufgetragen. (Dabei steht der Ausdruck „$x(t)$" für „x als Funktion von t", *nicht* für das Produkt x mal t.) Abb. 2.2 zeigt als einfaches Beispiel die Ortsfunktion $x(t)$ eines ruhenden Gürteltiers (das wir wie ein Teilchen behandeln) bei $x = -2$ m.

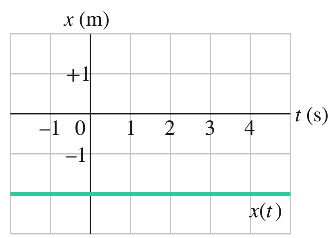


Abb. 2.2
Die Kurve $x(t)$ für ein Gürteltier, das sich unbewegt bei $x = -2$ m aufhält. Für alle Zeiten t ist der Wert von x gleich -2 m.

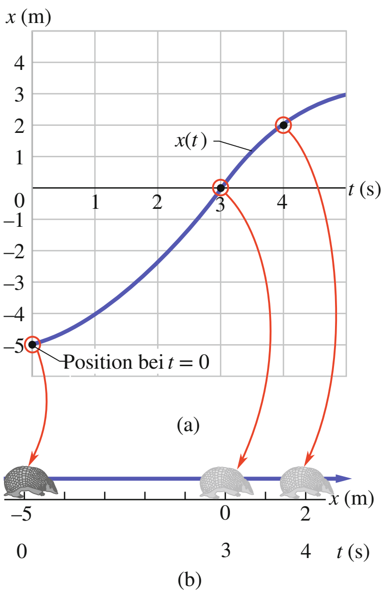


Abb. 2.3
(a) Die $x(t)$-Kurve eines sich bewegenden Gürteltiers. (b) Die Bahn, die dieser Kurve entspricht. Die Skala unterhalb der x-Achse gibt die Zeiten an, zu denen das Gürteltier bestimmte Werte von x erreicht.

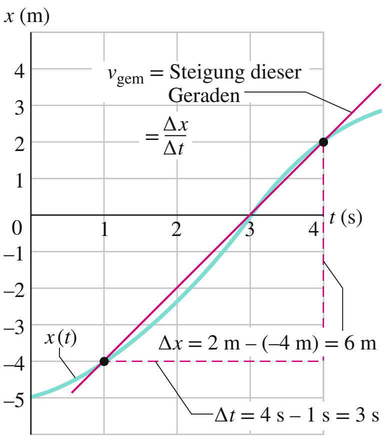


Abb. 2.4
Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen $t = 1\,\mathrm{s}$ und $t = 4\,\mathrm{s}$: Die Durchschnittsgeschwindigkeit entspricht der Steigung der Geraden, welche die Punkte verbindet, die diesen Zeiten auf der $x(t)$-Kurve entsprechen.

Abb. 2.3a ist interessanter, da sich das Gürteltier hier bewegt. Das Tier wird offensichtlich zum ersten Mal zum Zeitpunkt $t = 0$ gesichtet, als es sich am Ort $x = -5\,\mathrm{m}$ befindet. Es bewegt sich bis $x = 0$, überquert diesen Punkt bei $t = 3\,\mathrm{s}$ und strebt dann nach immer größer werdenden positiven Werten von x.

Abb. 2.3b zeigt die tatsächliche geradlinige Bewegung des Gürteltiers. Sie entspricht dem, was Sie in etwa sehen würden. Die Kurve in Abb. 2.3a ist abstrakter und weiter von dem entfernt, was Sie beobachten würden, doch sie enthält mehr Information. Sie macht auch deutlich, wie schnell sich das Gürteltier bewegt.

Tatsächlich hängt der Ausdruck „wie schnell" mit mehreren Größen zusammen. Eine von ihnen ist die **Durchschnittsgeschwindigkeit** oder **mittlere Geschwindigkeit** v_{gem}. Sie wird durch das Verhältnis der Verschiebung Δx, die in einem bestimmten Zeitintervall Δt stattfindet, zu diesem Zeitintervall gegeben:

$$v_{gem} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \,. \tag{2.2}$$

Diese Schreibweise bedeutet, dass die Position zum Zeitpunkt t_1 gleich x_1 ist und entsprechend zum Zeitpunkt t_2 gleich x_2. Eine gebräuchliche Einheit für v_{gem} ist Meter pro Sekunde (m/s oder $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$). In den Aufgaben werden Ihnen eventuell auch andere Einheiten begegnen, diese haben jedoch immer die Form Länge/Zeit.

Wird x gegen t aufgetragen, so ist v_{gem} durch die **Steigung** der Geraden gegeben, welche zwei bestimmte Punkte der Kurve $x(t)$ verbindet: Einer dieser Punkte entspricht x_2 und t_2, der andere x_1 und t_1. Genau wie eine Verschiebung besitzt auch v_{gem} einen Betrag und eine Richtung – es ist ebenfalls eine Vektorgröße. Der Betrag von v_{gem} entspricht dem Betrag der Steigung der Geraden. Ist v_{gem} (und damit die Steigung der Geraden) positiv, so steigt die Gerade nach rechts hin an; ist v_{gem} negativ (negative Steigung), so verläuft die Gerade von links oben nach rechts unten. Die Durchschnittsgeschwindigkeit v_{gem} besitzt immer das gleiche Vorzeichen wie die Verschiebung Δx, da Δt in Gl. 2.2 immer positiv ist.

Abb. 2.4 zeigt, wie man v_{gem} im Falle des Gürteltiers aus Abb. 2.3 für das Zeitintervall zwischen $t = 1\,\mathrm{s}$ und $t = 4\,\mathrm{s}$ ermitteln kann. Dazu zeichnen wir die Gerade, die den Punkt auf der Bahnkurve am Anfang des Zeitintervalls mit demjenigen am Ende des Zeitintervalls verbindet. Dann ermitteln wir die Steigung $\Delta x/\Delta t$ der Geraden. Für das gegebene Zeitintervall ist die Durchschnittsgeschwindigkeit damit:

$$v_{gem} = \frac{6\,\mathrm{m}}{3\,\mathrm{s}} = 2\,\mathrm{m/s} \,.$$

„Wie schnell" sich ein Teilchen bewegt, lässt sich auch durch die in einem Zeitintervall insgesamt zurückgelegte Entfernung (z. B. die zurückgelegte Anzahl von Metern), unabhängig von der Richtung ausdrücken:

$$v_{eff} = \frac{\text{gesamte Entfernung}}{\Delta t} \,. \tag{2.3}$$

Diese Größe, die wir auch als **Effektivgeschwindigkeit** bezeichnen können, besitzt kein Vorzeichen, da die insgesamt zurückgelegte Entfernung keine Angaben über die Richtung der Bewegung macht. Manchmal entspricht die Effektivgeschwindigkeit v_{eff} (bis auf das Vorzeichen) der Durchschnittsgeschwindigkeit v_{gem}. Wie in der Beispielaufgabe 2.1 gezeigt wird, können sich die beiden Größen allerdings deutlich voneinander unterscheiden, wenn ein Objekt auf seinem Weg umkehrt.

BEISPIELAUFGABE 2.1

Sie fahren in einem heruntergekommenen Kleinlastwagen mit 70 km/h 8,4 km weit eine gerade Straße entlang, bevor ihrem Fahrzeug das Benzin ausgeht und es anhält. Während der nächsten 30 min legen Sie bis zur Tankstelle auf der gleichen Straße weitere 2,0 km zu Fuß zurück.

(a) Wie groß ist Ihre Verschiebung insgesamt, gemessen vom Anfang Ihrer Fahrt bis zu Ihrer Ankunft an der Tankstelle?