Vorwort

Als vor über 60 Jahren Herbert A. Stuart das Manuskript zum *Kurzen Lehrbuch der Physik* schrieb, da legte er besonderen Wert auf eine anschauliche, geschlossene Darstellung, damit die einzelnen Abschnitte flüssig zu lesen waren. Es sollte ein Lehrbuch zum Verstehen der Zusammenhänge und kein Paukbuch sein, wie er auch später immer wieder betonte.

Diesen Charakter hat das Buch in allen Neuauflagen behalten, trotz der sehr zahlreichen Umarbeitungen, die durch die Weiterentwicklung der Wissenschaft in Stoffauswahl, Nomenklatur und auch Darstellungsweise notwendig waren. Es will dem Naturwissenschaftler im weitesten Sinne, der sich an der Hochschule im Nebenfach Physik Grundkenntnisse zu erwerben hat, klar überschaubar physikalische Methoden, Begriffsbildung und Gesetzmäßigkeiten vermitteln. Die Verbindung zu anderen Naturwissenschaften, Medizin und Technik stellen eingefügte Beispiele in Kleindruck her, der auch Ableitungen, Erweiterungen und Ausblicke auf neuere Ergebnisse enthält. Viele Hinweise und Querverbindungen sollen das Arbeiten „mit dem Buch“ erleichtern, sei es beim Rekapitulieren einzelner Teilgebiete, sei es beim gezielten Nachschlagen und Klären spezieller Fragen.

Bei der Neuauflage bin ich der freundlichen Anregung des Verlages gern gefolgt, Ziele und Bedeutung der Arbeiten zu skizzieren, die mit dem Nobelpreis 2001 ausgezeichnet wurden. Um die Ausführungen hierzu möglichst gut zu fundieren, waren Ergänzungen an mehreren Stellen notwendig, so bei tiefen Temperaturen, Kohärenz des Laser-Lichts und vor allem beim Welle-Korpuskel-Problem.

Darüber hinaus wurde das ganze Buch noch einmal gründlich durchgesehen, wobei einige Unebenheiten behoben und inzwischen überholte Beiträge gestrichen werden konnten. Etwas umgestaltet habe ich die Absätze über elektrolytische Überführungszahlen, Holographie, Photoelemente, kontrollierte Kernfusion und schließlich Lorentz-Kontraktion und Zeitdilatation.

Mainz, Juni 2002 — Gerhard Klages

2. Allgemeine Mechanik

2.1. Messen und Maßeinheiten

2.1.1 Basisgrößen. Jeder Zweig der Physik schafft sich seine speziellen Maßeinheiten, die den jeweiligen Problemen angepaßt sind. Eine Aufgabe der Mechanik ist es, die Lage und Lageveränderung von Körpern im Raume zu beschreiben. Um die Lage eines Punktes im Raume festzustellen, muß man diese in bezug auf ein Koordinatensystem angeben können. Wir benötigen daher als erstes ein Längenmaß. Verändert der Punkt seinen Ort, d. h. bewegt er sich, so geschieht dies innerhalb einer gewissen Zeit. Als zweites brauchen wir daher ein Zeitmaß. Schließlich muß noch der Körper selbst charakterisiert werden, etwa durch die Menge des in ihm vereinigten Stoffes, seine Masse. Für diese benötigen wir ebenfalls eine Maßeinheit (Abschn. 2.3.1).

Die drei Größen, Länge, Masse und Zeit, sind die *Basisgrößen* der Mechanik. Ihre Maßeinheiten nennt man *Basiseinheiten*. Diese und alle aus ihnen aufgebaute, sog. *abgeleitete Einheiten* für andere physikalische Größen werden als SI-*Einheiten* bezeichnet (Système international d'unités). Wenn nicht ausdrücklich anders vermerkt, sind bei der Anwendung physikalischer Gleichungen alle Größen immer in SI-Einheiten einzusetzen.

Überlegungen zum ,,Wesen“ von Länge, Zeit und Masse haben in der Physik keinen Platz. Diese Basisgrößen sind allein durch die Meßvorschriften definiert, nach denen sie durch den Vergleich mit Basiseinheiten gemessen werden. In welcher Weise dieser Meßvorgang experimentell realisiert wird, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen, ist eine Frage für sich.

2.1.2 Längen- und Winkelmessung. Als Basiseinheit für Längen hat man sich international auf das *Meter* geeinigt. Als Länge von 1 Meter (m) wurde ursprünglich der Abstand zweier Marken auf dem *Meterprototyp* festgelegt, einem in Paris aufbewahrten Maßstab aus Platin-Iridium.

Um den steigenden Anforderungen an Reproduzierbarkeit und Genauigkeit zu genügen, hat man bestimmt, wie viele Wellenlängen der orangeroten Spektrallinie von Krypton (Isotop 86) auf einen Meter entfallen. Fußend auf diesen Meßergebnissen galt seit 1960 international die Festlegung, daß das Meter das 1 650 763,73-fache der Wellenlänge dieser Spektrallinie im Vakuum ist. Die Zahl der angegebenen Ziffern möge ein Hinweis auf die heute erreichbare Genauigkeit von Längenmessungen sein. Zur Ausmessung einer Strecke in Wellenlängen dient der Interferenz-Komparator (Abschn. 7.4.1).

Noch genauer reproduzierbar ist die neue Festlegung des Meters von 1983. Danach ist 1 Meter die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Zeitspanne von

$$\frac{1}{299\,792\,458}\ \mathrm{s}$$

durchläuft, Sekunde (s) vgl. Abschn. 2.1.3. Der Betrag der Länge 1 m bleibt gegenüber der alten Festlegung praktisch ungeändert, vgl. auch Lichtgeschwindigkeit (Abschn. 7.1.3).

Je nach der Größenordnung der Länge, die man mißt und in der Einheit Meter angibt, entstehen sehr kleine oder sehr große Zahlenwerte. Da das für die Praxis unbequem ist, schuf man Untereinheiten, die sich jeweils um den Faktor $1000 = 10^3$ unterscheiden und mit einem SI-Vorsatz gesondert benannt werden. Die in der folgenden Tab. 2.1

Tabelle 2.1 Bruchteile und Vielfache von Einheiten (SI-Vorsätze)

Faktor	Name	Vorsatzzeichen		Weitere Beispiele
10^{-18}	1 Atto	a	meter	–
10^{-15}	1 Femto	f	meter	–
10^{-12}	1 Pico	p	meter	1 pf (Picofarad)
10^{-9}	1 Nano	n	meter	1 ns (Nanosekunde)
10^{-6}	1 Mikro	μ	meter	1 μA (Mikroampere)
10^{-3}	1 Milli	m	meter	1 mA (Milliampere)
10^{0}	1 –	–	meter	–
10^{3}	1 Kilo	k	meter	1 kV (Kilovolt)
10^{6}	1 Mega	M	meter	1 MW (Megawatt)
10^{9}	1 Giga	G	meter	1 GeV (Gigaelektronenvolt)
10^{12}	1 Tera	T	meter	1 TΩ (Teraohm)
10^{15}	1 Peta	P	meter	–
10^{18}	1 Exa	E	meter	–

verzeichneten Längeneinheiten passen sich atomaren bis astronomischen Abmessungen an. Die Skala der Vielfachen von Atto (10^{-18}) bis Exa (10^{18}) wird ganz allgemein bei den verschiedensten Größen gebraucht, s. die Beispiele der letzten Spalte.

Als Längeneinheiten sind zusätzlich noch gebräuchlich:

1 Dezimeter (dm)	$= 10^{-1}$ m
1 Zentimeter (em)	$= 10^{-2}$ m
1 Zoll (inch)	$= 25{,}4$ mm
1 Seemeile (sm)	$= 1852$ m .

Seit 1978 nicht mehr verwendet werden sollten

1 Angström – Einheit (Å)	$= 10^{-10}$ m
1 Fermi – Einheit (Fe)	$= 10^{-15}$ m .

In der Astrophysik sind folgende Einheiten üblich:

1 Lichtjahr (die vom Licht in einem Jahre zurückgelegte Strecke) $= 9{,}46 \cdot 10^{12}$ km.

1 Astronomische Einheit (A.U.), Länge der großen Halbachse der Erdbahn um die Sonne $= 1{,}496 \cdot 10^{8}$ km.

1 Parsec (pc), Entfernung, aus der die große Halbachse der Erdbahn unter dem Winkel von 1 Bogensekunde erscheint $= 38{,}857 \cdot 10^{12}$ km.

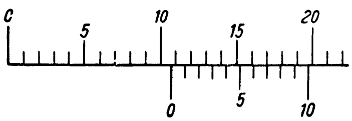

Abb. 2.1. Nonius

Zur praktischen Ausführung von Längenmessungen dienen neben Metallmaßstäben aller Art für kleinere Strecken Schieblehren, Schraubenmikrometer und Meßuhren.

Um Bruchteile von Skalenteilen abzulesen, z. B. die Zehntelmillimeter einer Millimetereinteilung auf der Schieblehre, bedient man sich des *Nonius*, dessen Nullstrich abzulesen ist. 10 Teile der Skala des Nonius entsprechen 9 Teilen der Hauptskala. In der Abb. 2.1 deckt sich der siebente Noniusstrich mit einem Strich der Hauptskala, es liegt also der Nullpunkt des Nonius um 7/10 rechts vom entsprechenden Hauptskalenstrich, also bei 10,7. Das ist der abzulesende Meßwert.

Bei *Mikrometerschrauben* und *Meßuhren* wird die Bewegung eines Fühlers, der die zu messende Länge zurücklegt und damit ausmißt, auf eine Kreisbewegung übertragen. Bewegt sich der Fühler um 0,01 mm, so kann sich eine Marke auf der Kreisscheibe z. B. um 1 mm verschieben, was auf einer Skala ohne Lupe gut abzulesen ist.

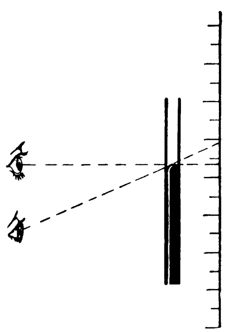

Abb. 2.2. Parallaxenfehler

Bei allen Skalenablesungen ist es sehr wichtig, den *Parallaxenfehler* zu vermeiden, der immer dann auftreten kann, wenn Maßstab und zu messender Gegenstand nicht in derselben Ebene liegen. Lesen wir z. B. ein Barometer ab, so erkennt man an Hand der Abb. 2.2, daß man nur dann den richtigen Wert erhält, wenn man senkrecht auf das Barometer blickt. Beim schrägen Visieren tritt eine scheinbare Verschiebung des Fadens gegen den Maßstab ein (*Parallaxe*), und man liest zu hoch oder zu tief ab. Diesen Fehler vermeidet man z. B. bei elektrischen Meßinstrumenten dadurch, daß man hinter der Skala und dem Zeiger einen Spiegel anbringt. Man liest dann ab, wenn der Zeiger und sein Spiegelbild sich decken, was nur bei senkrechter Blickrichtung der Fall ist.

Die *Flächenmessung* wird auf Längenmessungen zurückgeführt, wenn die Begrenzung der Flächen geometrisch einfach ist, wie beim Rechteck, Dreieck, Kreis, Ellipse u. dgl. Als *Flächeneinheit* benutzt man 1 m^2, die Fläche des Quadrates mit der Längeneinheit als Seite. Die Flächeneinheit ist eine *abgeleitete* Einheit, im Gegensatz zur Längeneinheit, die eine *Basiseinheit* ist.

Bekannte Flächeneinheiten sind:

1 Ar (a)	$= 10^2$ m^2
1 Hektar (ha)	$= 10^4$ m^2 .

Die *Raumeinheit* wird durch einen Würfel dargestellt, dessen Kantenlänge die Längeneinheit ist. SI-Einheit ist 1 Kubikmeter (m^3), gebräuchlich ist auch das Liter (l) $1\,\mathrm{l} = 10^{-3}\,\mathrm{m}^3 = 1\,\mathrm{dm}^3$.

Für die Messung eines *ebenen Winkels* benutzt man im täglichen Leben die Teilung des Kreisumfanges in 360°, wobei 1 Winkelgrad $=$ 60 Minuten ($1° = 60'$) und 1 Minute $=$ 60 Sekunden ($1' = 60''$) ist. Das Winkelmaß der Mathematik (SI) ist das von r unabhängige Verhältnis φ des Bogens b zum Radius r, s. Abb. 2.3 und Gl. (2.1). Nimmt man als Radius 1 m, so ist die in m gemessene Länge des Bogens zugleich ein Maß des Winkels, das sog. *Bogenmaß* oder *radiant* (rad). Als das Verhältnis zweier Längen kann man es als eine reine Zahl, also dimensionslos, ansehen (Abschn. 2.2.1b). Es ist aber auch üblich, das Einheitszeichen rad dafür einzusetzen; dieses wird aber für Größen, die vom Winkel abgeleitet sind, nie verwendet, vgl. Winkelgeschwindigkeit Abschn. 2.2.2 und Winkelbeschleunigung Abschn. 2.6.1.

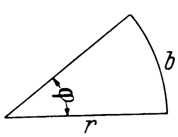

Abb. 2.3. Zum Bogenmaß des ebenen Winkels

Ein bestimmter Winkel im Gradmaß $\varphi°$ verhält sich zum vollen Kreisumfang, also zu 360°, wie die durch seine Schenkel ausgeschnittene Bogenlänge b zum vollen Kreisumfang $2r\pi$. Es ist also

$$\frac{\varphi°}{360°} = \frac{b}{2r\pi} = \frac{\varphi}{2\pi} \quad \text{oder}$$

$$\varphi = \frac{b}{r} = \frac{\varphi^\circ \pi}{180^\circ} \ . \tag{2.1}$$

Die Winkeleinheit im Bogenmaß, also $\varphi = 1$ rad macht dann in Winkelgrad $360^\circ/2\pi$ aus ($1\,\mathrm{rad} \mathrel{\hat{=}} 57{,}295^\circ = 57^\circ\,17'\,45''$). Ferner entspricht dem Bogen $\pi/2$ auf dem Einheitskreis 90° ($90^\circ \mathrel{\hat{=}} \pi/2\,\mathrm{rad}$).[1]

Für genauere Winkelmessungen wird der *Theodolit* gebraucht, im wesentlichen ein Fernrohr mit Fadenkreuz, das um eine Vertikalachse über einem horizontalen Teilkreis drehbar ist. Damit kann man den Winkel bestimmen, unter dem zwei entfernte Punkte vom Auge des Beobachters aus gesehen werden. Häufig ist der Theodolit auch zur Messung von Höhenwinkeln eingerichtet.

Der *räumliche Winkel* Ω ist das Verhältnis der Flächen von Kugelkappe zum Quadrat des Kugelradius. Der volle Raumwinkel beträgt danach 4π. Die abgeleitete SI-Einheit des räumlichen Winkels ist der *Steradiant* (sr), s. auch Abschn. 7.5.4.

2.1.3 Basiseinheit von Zeit und Masse. Der Zeitbegriff ist aus der Erfahrung abgeleitet. Wenn ein Bewegungsvorgang, z. B. der Ablauf einer Sanduhr oder das Hin- und Herschwingen eines Pendels unter gleichen Bedingungen wiederholt abläuft, so postuliert man, daß er zu seinem Ablauf gleiche Zeit braucht. Um ein Zeitmaß zu gewinnen, müssen wir also einen möglichst ungestörten, immer wiederkehrenden sog. *periodischen* Vorgang heranziehen. Als solcher diente ursprünglich die Drehung der Erde um ihre Achse. Diese Drehung erkennen wir am scheinbaren Lauf der Fixsterne. In der Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Höchstständen oder Meridiandurchgängen des gleichen Fixsternes hat sich die Erde gerade einmal um ihre Achse gedreht. Diese Zeitspanne nennen wir *Sterntag*. Im täglichen Leben richten wir uns nun nicht nach dem Lauf der Sterne, sondern nach dem der Sonne. Infolge des Umlaufs der Erde um die Sonne stimmt der Sonnentag aber nicht mit dem Sterntage überein. So wählte man als praktische Zeiteinheit die Zeit, die im Jahresmittel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Höchstständen der Sonne verstreicht, den *sog. mittleren* Sonnentag (d). Er wird in 24 Stunden (h) oder in 1440 Minuten (min) oder in 86400 Sekunden (s) eingeteilt. Die *Sekunde* ist die zweite SI-Basiseinheit.

Um von Änderungen und Schwankungen in der Erdrotation frei zu werden, wird seit 1967 diese Basiseinheit definiert durch ein Vielfaches der Periodendauer einer monochromatischen elektromagnetischen Welle. Gewählt wurde dazu das Nuklid ^{133}Cs mit einer Übergangsfrequenz bei Mikrowellen, von der 9 192 631 770 Schwingungen oder Periodendauern 1 Sekunde ausmachen. – Die praktische Reproduzierbarkeit der Zeiteinheit mit einer Atomuhr ist etwa 10^{-12}.

Alle unsere Zeitmesser, Uhren genannt, enthalten ein Element, in welchem ein periodischer Vorgang abläuft und dessen Perioden gezählt werden. Dies kann z. B. ein Pendel sein, eine Spiralfeder (Unruhe), ein schwingender Kristall (Quarzuhr) oder ein in bestimmter Weise angeregter Schwingungsvorgang von Atomen oder Molekülen (Atomuhr).

Die *Masse* ist ein Maß für den Materieinhalt eines Körpers (Abschn. 2.3.1 und 2.3.2). Ihre Basiseinheit ist das *Kilogramm* (kg), das ist die Masse des Internationalen Kilogrammprototyps, eines in Paris aufbewahrten Körpers aus Platin-Iridium. Sie sollte möglichst genau gleich der Masse von $1000\,\mathrm{cm}^3$ Wasser bei 4° C sein (über diese Bezugstemperatur vgl. Abschn. 5.1.3).

Eine Tonne (1 t) sind 1000 kg oder 1 Mg (Megagramm).

Aufgaben

2.1.1 Bei der Höhenmessung in Abb. 2.2 ist das Auge 33 cm von der Skala entfernt, während die Flüssigkeitssäule 3 cm vor ihr steht. Wie groß ist der Meßfehler Δh, wenn das Auge 2 cm zu tief steht?

2.1.2 Wieviel m^3 sind $2\,\mathrm{mm}^3$?

2.1.3 Man gebe den Winkel $5\pi/6$ rad in Grad an.

2.2. Bewegungslehre (Kinematik)

Nachdem wir in Abschn. 2.1 mit der Festlegung der Einheiten für die Basisgrößen Län-

---

[1] Das Dachzeichen $\hat{=}$ ist dabei „entspricht“ zu lesen.

ge und Zeit die Voraussetzung geschaffen haben, Bewegungen von Körpern zu beschreiben, wollen wir solche näher untersuchen. Ausdrücklich klammern wir zunächst die Frage nach der Ursache einer Bewegung aus. Diese Frage werden wir in Abschn. 2.3 behandeln. Ferner beschränken wir uns auf Körper, deren Abmessungen gegenüber den von ihnen zurückgelegten Wegstrecken sehr klein sind. Wir sprechen dabei von einem *Massenpunkt*, über die genaue Definition vgl. auch Abschn. 2.5.4. Zunächst geht es darum, die zur Beschreibung der Bewegung eines Massenpunktes geeigneten physikalischen Größen festzulegen, ihre Eigenschaften zu erläutern und mit ihnen die Gesetze für einfache Bewegungsformen aufzustellen.

2.2.1 Geschwindigkeit. Wir nehmen zunächst an, daß der Körper auf einer *geraden* Bahn sich gleichförmig bewegt, d. h. zum Zurücklegen gleicher Strecken immer die gleiche Zeit braucht. Das Verhältnis des zurückgelegten Weges s zu der dazu benötigten Zeit t nennen wir die *Geschwindigkeit* v des Körpers

$$v = \frac{s}{t} \,. \tag{2.2a}$$

Statt des ganzen Weges, vom Anfang der Bewegung gemessen, können wir auch jedes beliebige Teilstück des Weges $s_2 - s_1 = \Delta s$ und die dazu benötigte Zeitspanne $t_2 - t_1 = \Delta t$ verwenden. Bei einer gleichförmigen Bewegung ergibt sich stets derselbe Wert für die Geschwindigkeit

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \,. \tag{2.2b}$$

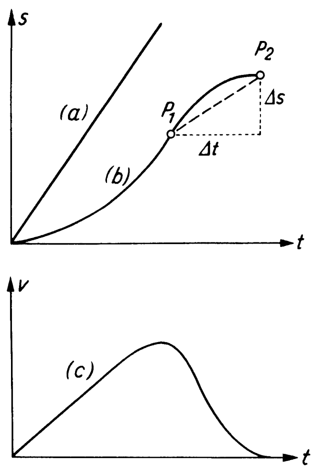

Abb. 2.4. Weg-Zeit-Gesetz für gleichmäßige (***a***) und ungleichmäßige (***b***) Bewegung. (***c***) Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz zu Kurve (***b***)

Um das zu veranschaulichen, zeichnen wir das sog. *Weg-Zeit-Diagramm*. Bei einer gleichförmigen Bewegung ergibt sich einfach die Gerade $s = vt$. Ihre Steigung $\Delta s/\Delta t$ ist überall gleich und gibt die gleichbleibende Geschwindigkeit an (s. Abb. 2.4a). Für geradlinig ungleichförmige Bewegungen dagegen wird das Weg-Zeit-Diagramm eine gekrümmte Kurve, und die *mittlere* Geschwindigkeit $\Delta s/\Delta t$ während einer ausgewählten Zeitspanne Δt ist die Steigung der Sekanten durch die zugehörigen beiden Diagramm-Punkte P_1 und P_2 (s. Abb. 2.4b).

Als *Momentgeschwindigkeit* bezeichnen wir die Steigung der Tangenten im ausgewählten Kurvenpunkt (Zeitpunkt). Das bedeutet, mathematisch formuliert, die Ableitung des Weges nach der Zeit oder den Differentialquotienten

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \,. \tag{2.2c}$$

Die Momentangeschwindigkeit hängt bei Abb. 2.4b von der Zeit ab, das zugehörige Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm zeigt Abb. 2.4c. Unsere Festlegungen bei konstanter Geschwindigkeit sind selbstverständlich in der allgemeinen Formulierung als Spezialfall enthalten.

Der Begriff der Geschwindigkeit gibt uns Gelegenheit, einige grundlegende Eigenschaften physikalischer Begriffe zu erläutern:

a) Die Definition muß stets die Meßvorschrift enthalten. Dies ist bei der Geschwindigkeit der Fall. $v = \Delta s/\Delta t$ bedeutet in Worten: Man messe Weg und Zeitspanne und bilde das Verhältnis. Man mache sich diese Grundforderung an eine physikalische Definition stets klar. An einer Definition ist zwar nichts zu „verstehen", dennoch ist es wichtig, ihre Zweckmäßigkeit zu prüfen. – Völlig unabhängig davon ist die Frage, wie eine Größe im Experiment oder in der Praxis mit der notwendigen Genauigkeit zweckmäßig bestimmt wird. Das geschieht gerade bei der Geschwindigkeit meist auf andere Weise, z. B. mit Hilfe eines Tachometers im Auto, das primär die momentane Drehzahl eines Rades mißt.

b) Während das Meter und die Sekunde Basiseinheiten darstellen, begegnen wir hier bei der Geschwindigkeit, wie schon bei der Fläche, einer abgeleiteten Einheit. Zu jeder Definitions- oder Größengleichung gehört eine Einheitengleichung. Für „Einheit der Geschwindigkeit" z. B. wollen wir $[v]$ schreiben, und damit ergibt sich die zugehörige Einheitengleichung:

$$[v] = \frac{[s]}{[t]} = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\,. \tag{2.2d}$$

Die Geschwindigkeit wird also in der Einheit m/s angegeben. Man sagt auch, daß eine physikalische Größe stets das Produkt von Maßzahl und Einheit ist. In der Praxis verwendet man auch andere Einheiten, wie km/h (nicht Stundenkilometer!).

c) Die Geschwindigkeit ist eine Größe, die zu ihrer vollständigen Bestimmung außer der Maßzahl und der Einheit noch einer weiteren Angabe bedarf, nämlich der ihrer Richtung im Raum. Solche Größen, zu deren Festlegung noch die Richtung angegeben werden muß, heißen *gerichtete Größen* oder *Vektoren*; Beispiele dafür sind Kräfte, Wegstrecken, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Im Gegensatz dazu bezeichnet man Größen ohne Richtung als *Skalare*; zu ihnen gehören z. B. Masse, Wärmemenge, Energie usw. Vektoren lassen sich durch geradlinige *Pfeile* darstellen, deren *Länge* den *Betrag* (Zahlenwert) und deren *Richtung* diejenige des Vektors angibt (vgl. das Beispiel der Geschwindigkeiten in Abb. 2.5).

Vektorgrößen kann man nicht, wie z. B. Massen, *algebraisch* addieren, sondern nur *geometrisch*. Wir betrachten als Beispiel ein Boot, das mit der Geschwindigkeit v_1 schräg über einen Fluß mit der Strömungsgeschwindigkeit v_2 fährt, s. Abb. 2.5. Ohne die Strömung würde das Boot in einer Sekunde von *1* nach *2* kommen. Infolge der Strömung wird es um das Stück *2*→*3* abgetrieben, gelangt also in Wirklichkeit in einer Sekunde nach *3*. Seine wirkliche oder *resultierende* Geschwindigkeit ist dabei durch die Diagonale v eines Parallelogramms bestimmt, dessen Seiten von den Teilgeschwindigkeiten oder Komponenten v_1 und v_2 gebildet werden. (*Parallelogrammsatz*). Diese Art von Addition heißt *geometrisch*.

Um sie von der algebraischen klar zu unterscheiden, benutzen wir gegebenenfalls für Vektorgrößen fette Buchstaben oder setzen einen Pfeil dazu, vgl. Abb. 2.5, und stellen die obige geometrische Addition der Geschwindigkeiten durch die Vektorgleichung $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_1 + \boldsymbol{v}_2$ dar. Wenn alle Vektoren in einer Gleichung dieselbe Richtung haben und wenn es nur um ihre Beträge geht, werden wir der Einfachheit halber auf den Fettdruck verzichten, z.B. (2.2b).

Der Endpunkt ist unabhängig davon, ob das Boot die Bewegungen in beliebiger Reihenfolge *einzeln nacheinander oder gleichzeitig* ausführt. Immer gelangt es von *1* nach *3*. Ganz allgemein gilt: *Gleichzeitig verlaufende Bewegungen stören sich gegenseitig nicht und addieren sich geometrisch* (sog. *ungestörte Überlagerung oder Superposition von Bewegungen*).

In derselben Weise können wir auch Beschleunigungen, Kräfte usw. zusammensetzen (Abschn. 2.2.2 ff.).

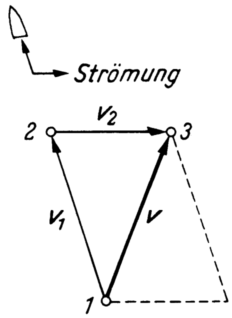

Abb. 2.5. Geometrische Addition von Geschwindigkeiten (Vektoraddition $v_1 + v_2 = v$)

2.2.2 Beschleunigung Bei jeder *ungleichförmigen* Bewegung hat die Meßgröße $\bar{v} = \Delta s/\Delta t$ nur die Bedeutung einer *mittleren* Geschwindigkeit über die Wegstrecke Δs oder während der Zeitspanne Δt. Die momentane Geschwindigkeit ändert sich längs der Bahn. Wir sprechen auch von einer *beschleunigten* Bewegung und nennen den Quotienten aus Geschwindigkeitsänderung und der dafür benötigten Zeit Beschleunigung $\boldsymbol{a}$ (acceleratio)

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt}\,. \tag{2.3}$$

Die Einheit von $\boldsymbol{a}$ ist m/s^2. Sie ist ebenso wie die Geschwindigkeit ein Vektor, der die Richtung der Geschwindigkeitsänderung hat.

Bei einer krummlinigen Bahn ändern sich im allgemeinen sowohl der Betrag der Geschwindigkeit, die Bahngeschwindigkeit v. als auch die Richtung der Geschwindigkeit. Die gesamte Geschwindigkeitsänderung Δv können wir in zwei Anteile (Komponenten) zerlegen: Δv_{B} ändert nur den Betrag der Geschwindigkeit, Δv_r, nur deren Richtung, s. Abb. 2.6.

Im folgenden betrachten wir die Wirkung dieser beiden Komponenten getrennt als zwei Grenzfälle.

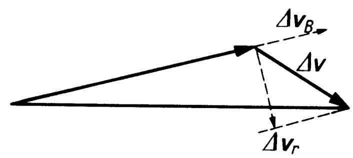

Abb. 2.6. Zerlegung der Geschwindigkeitsänderung auf einer krummlinigen Bahn

1. Verläuft die Bewegung *geradlinig*, so bleibt die Richtung der Geschwindigkeit erhalten, es ändert sich nur die Bahngeschwin-

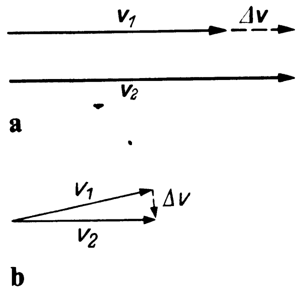

Abb. 2.7. (**a**) Reine Bahnbeschleunigung; (**b**) Reine Radialbeschleunigung

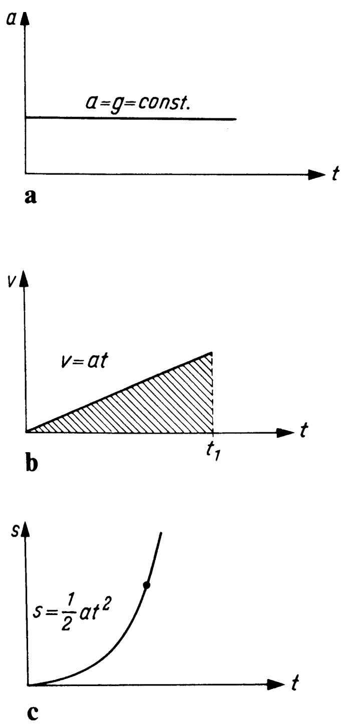

Abb. 2.8. Verlauf von a, v und s als Funktion von t für die geradlinige Bewegung mit konstanter Beschleunigung, $v_0 = 0$

digkeit v. Abb. 2.7a. Die Beschleunigung hat stets die Richtung der Geschwindigkeit. Beim Abbremsen muß sie ihr entgegen gerichtet sein, Bremsung ist negative Beschleunigung.

Bei fester Bahnrichtung können wir uns darauf beschränken, allein die Beträge von Geschwindigkeit und Beschleunigung zu betrachten. Dann ist die Beschleunigung, mathematisch formuliert, die erste Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit und diese wiederum die erste Ableitung des Weges nach der Zeit, also

$$a = \frac{dv}{dt}; \quad v = \frac{ds}{dt} \tag{2.4}$$

mithin

$$a = \frac{d}{dt}\left(\frac{ds}{dt}\right) = \frac{d^2s}{dt^2} . \tag{2.5}$$

Dieser Zusammenhang gibt uns die Möglichkeit, bei bekannter Beschleunigung den zeitlichen Verlauf der Bewegung eines Körpers auf einer Geraden durch Integration zu berechnen.

Speziell für den Fall einer konstanten Beschleunigung erhalten wir

$$v = \int_0^t a dt = at + \text{const} . \tag{2.6}$$

Die bei der Integration auftretende Konstante ermittelt man aus den sog. Anfangsbedingungen. Zur Zeit $t = 0$, wenn die Beschleunigung beginnt, habe der Körper bereits die Geschwindigkeit v_0, so daß const $= v_0$ gilt. Wir erhalten also für den zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit

$$v = v_0 + at . \tag{2.7}$$

Das gleiche Verfahren können wir noch einmal auf unsere Gleichung für die Geschwindigkeit anwenden um den seit Beginn der Bewegung zurückgelegten Weg zu berechnen:

$$s = v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2 . \tag{2.8}$$

Dies ist die vollständige Beschreibung der Bewegung eines punktförmigen Körpers auf einer Geraden unter dem Einflußeiner konstanten Beschleunigung.

In der Natur ist ein wichtiges Beispiel für die geradlinige Bewegung mit konstanter Beschleunigung der *freie* Fall, der schon von *Galilei*[2] untersucht wurde. Alle Körper, schwere oder leichte, fallen im luftleeren Raum nahe der Erdoberfläche gleich schnell. In Luft kann die Reibung die Fallbewegung von leichten Körpern erheblich hemmen. Die Beschleunigung beim freien Fall oder die *Erdbeschleunigung g* beträgt in unseren Breiten fast 10 m/s^2 (9,81 m/s^2).

Für den freien Fall formulieren wir nach den allgemeineren Ableitungen oben das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz

$$v = gt \tag{2.9}$$

und das Weg-Zeit-Gesetz s

$$s = \tfrac{1}{2}gt^2 . \tag{2.10}$$

Weiter errechnet sich aus beiden $v = \sqrt{2gs}$. Dabei ist zu beachten, daß in diesen Gleichungen die Zeit t vom Beginn des Fallens aus der Ruhe zählt. – Das Weg-Zeit-Gesetz läßt sich auch graphisch ableiten. Dem Vorgang bei der Integration entsprechend, ist der Weg s_1 in der Zeit t_1 gleich der schraffierten Fläche unter der Geschwindigkeit-Zeit-Kurve (Abb. 2.8b) $s_1 = (gt_1)t_1/2$. Dieses Verfahren bleibt auch anwendbar bei Bewegungen mit nicht konstanter Bahnbeschleunigung, d. h. gekrümmtem Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm.

Eine konstante Beschleunigung a bestimmt man praktisch, indem Gesamtweg s und Zeit t gemessen und $a = 2s/t^2$ berechnet wird. Die Definitionsgleichung selbst $a = dv/dt$ ist für genaue Messungen ungeeignet.

2. Ändert sich dagegen nur die Richtung der Geschwindigkeit, so steht die Geschwindigkeitsänderung zu jedem Zeitpunkt senkrecht zur Bahngeschwindigkeit ($\Delta v \perp v$). Wir sprechen von einer reinen *Radialbeschleunigung*, s. Abb. 2.7b. Dieser wichtige Sonderfall liegt vor, wenn eine *Kreisbahn*

[2] *Galilei, Galileo*, 1564 – 1642, der Begründer der Bewegungslehre, ist der erste Naturforscher, der seine Beobachtungen mathematisch formulierte.

mit konstanter Bahngeschwindigkeit durchlaufen wird, s. Abb. 2.9.

Die momentane Bewegung des Masse-Punktes können wir entweder durch seine Bahngeschwindigkeit v (Abschn. 2.2.1) oder durch seine *Winkelgeschwindigkeit* $\omega = d\varphi/dt$ (griechischer Buchstabe Omega) beschreiben. Dreht sich der Fahrstrahl vom Kreismittelpunkt zum Massenpunkt um den Winkel $\Delta\varphi$, s. Abb. 2.9, so verschiebt sich der Bahnpunkt um das Bogenstück $r\Delta\varphi$, so daß wir für die Bahngeschwindigkeit

$$v = f\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = r\omega \quad \text{oder} \quad \omega = \frac{v}{r} \tag{2.11}$$

erhalten.

Bei der *gleichförmigen Kreisbewegung* wird für ν Umläufe in der Sekunde (griechischer Buchstabe nü) die Bahngeschwindigkeit

$$v = 2\pi r\nu\ . \tag{2.12}$$

ν nennen wir die Frequenz oder die Drehzahl. Die SI-Einheit der Frequenz ist $1\,\mathrm{s}^{-1} = 1\,\mathrm{Hertz}$ (1 Hz). Die Dauer eines Umlaufes heißt die *Umlaufzeit* oder die *Periodendauer* $T = 1/\nu$. Für die Winkelgeschwindigkeit erhalten wir daher

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}\ . \tag{2.13}$$

ω, also das 2πfache der Frequenz, nennt man auch die *Kreisfrequenz*. Ihre Einheit ist $1\,\mathrm{s}^{-1}$, nicht 1 rad/s.

Der Massepunkt bewegt sich auf der Kreisbahn gleichmäßig, aber trotzdem ist die Bewegung beschleunigt, weil die Richtung der Geschwindigkeit sich laufend ändert. In jedem Bahnpunkt liegt der Vektor v in Richtung der Tangente an die Bahnkurve. Die Beschleunigung steht senkrecht auf der Bahn, zeigt also zum Kreismittelpunkt. Sie heißt daher auch *Zentripetalbeschleunigung* $\boldsymbol{a}_r$. Ihr Betrag ist durch $a_r = \omega^2 r = v^2/r$ gegeben.

Beweis: Die Geschwindigkeiten zu Beginn und am Ende einer Zeitspanne Δt, v_1 und v_2, unterscheiden sich nur in ihrer Richtung, und zwar um den Winkel $\Delta\varphi$ bzw. um die Zusatzgeschwindigkeit Δv. Es gilt, s. Abb. 2.9:

$$\Delta v = v\Delta\varphi\ ;$$

$$a_r = \lim_{(\Delta t\to 0)} \frac{\Delta v}{\Delta t} = v\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = v\omega = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r\ . \tag{2.14}$$

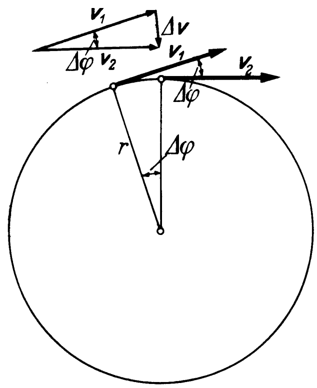

Abb. 2.9. Radialbeschleunigung auf der Kreisbahn

Aufgaben

2.2.1 Ein Auto mit der Geschwindigkeit 100 km/h kommt nach einem Bremsweg von 20 m zum Stillstand. Wie groß ist die mittlere Beschleunigung verglichen mit der Erdbeschleunigung?

2.2.2 Welche Zeit benötigt das Auto in Aufgabe 2.2.1 für den Bremsweg?

2.2.3 Um in eine Nebenstraße einzubiegen, fährt ein Radfahrer in 3 s das Viertel eines Kreises von 10 m Durchmesser. Wie groß sind Bahngeschwindigkeit und Zentripetalbeschleunigung?

2.3. Bewegung unter dem Einfluß von Kräften (Dynamik)

Bei unseren bisherigen Betrachtungen haben wir die Frage nach der Ursache einer Bewegung außer acht gelassen, also reine Kinematik betrieben. Stellen wir diese Frage nach der Ursache, so stoßen wir auf einen wichtigen neuen Begriff, nämlich die Kraft, und müssen uns mit der dritten Basisgröße näher beschäftigen, der Masse, s. auch Abschn. 2.1.3. Wir knüpfen zunächst an einige Erfahrungstatsachen an. Werfen wir einen Ball, setzen wir einen Wagen in Bewegung oder halten wir einen rollenden Wagen auf, so müssen wir unsere Muskelkraft dabei einsetzen. Von einem Kraftaufwand sprechen wir ferner, wenn wir einen Gummiball oder eine Feder mit der Hand zusammendrücken, also an einem Körper eine *Formänderung* hervorrufen. Dieser aus unserem Muskelgefühl stammende Begriff „Kraft“ ist recht verschwommen. Für physikalische quantitative Beobachtungen müssen wir ihn wieder durch eine Meßvorschrift definieren.

Zunächst stellen wir fest, daß wir Kräfte zwar nach ihrer Herkunft *benennen*, z. B. Muskelkräfte, elastische Kräfte, Schwerkräfte, elektrische, magnetische Kräfte usw.

Ihre Größe messen können wir jedoch ausschließlich durch ihre Wirkungen. Im Bereich der Mechanik sind dies:

1. Änderung des Bewegungszustandes, d. h. der Geschwindigkeit eines Körpers, also Beschleunigung, *dynamische* Wirkung einer Kraft.

2. Formänderung eines Körpers, elastische Deformation, sog. *statische* Wirkung einer Kraft. Beide Wirkungen werden wir heranziehen, um ein Maß für die Kraft zu erhalten.

2.3.1 Träge Masse und Kraft Den Widerstand eines Körpers gegen Änderungen seines Bewegungszustandes bezeichnen wir als *Trägheit*. Wir sprechen von seiner *trägen Masse*. Präzisieren wir unsere diesbezüglichen Erfahrungen, so können wir sagen: *Ein Körper, der sich völlig selbst überlassen ist, verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung (Newtonsches*[3] *Trägheitsprinzip).*

Es ist schwierig, den Trägheitssatz im Laboratorium unmittelbar an der Erfahrung quantitativ zu prüfen, da wir dort einen Körper allen äußeren Einflüssen, insbesondere der Reibung, nicht ganz entziehen können. So wird z. B. die Geschwindigkeit einer auf einer horizontalen Fläche rollenden Kugel durch die Reibung vermindert, aber um so weniger, je glatter die Kugel und die Oberfläche sind. Alle aus dem Trägheitssatz als idealem Grenzfall gezogenen Schlußfolgerungen sind aber mit der Erfahrung in Übereinstimmung. – Durch eine neuere technische Entwicklung ist es in der Luftkissenbahn gelungen, die Reibung ganz beträchtlich herabzusetzen.

Zur quantitativen Untersuchung des Zusammenhanges zwischen der wirkenden Kraft und der Beschleunigung a, die sie einem Körper der Masse m erteilt, benutzen wir am besten die Schwerkraft (Abschn. 2.3.2). In Abb. 2.10 zieht ein kleines Gewicht G an einer Schnur über eine Rolle einen beladenen Wagen. Wir messen die Laufzeiten t für unterschiedliche Laufwege s des Wagens und finden eine Proportionalität von s mit

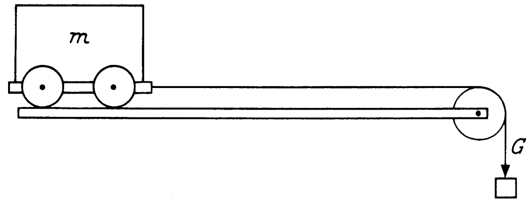

Abb. 2.10. Gleichmäßig beschleunigte Bewegung durch Gewicht G

t^2. Nach der Beziehung $a = 2s/t^2$ der gleichmäßig beschleunigten Bewegung (Abschn. 2.2.2) folgt daraus, daß der Wagen eine zeitlich konstante Beschleunigung erfährt, die sich aus s und t bestimmen läßt. Zwei zusammengekoppelte Wagen, die also den doppelten Materieinhalt, d. h. die doppelte Masse, haben als einer allein, erhalten bei gleicher Antriebskraft (G) nur die halbe Beschleunigung. Andererseits beobachtet man bei einem einzigen Wagen und der Schwerkraft von zwei gleichen kleinen Gewichten eine Beschleunigung, die doppelt so groß ist wie bei nur einem Gewichtsstück.

Wir folgen widerspruchslos diesen Erfahrungen, wenn wir die Kraft $\boldsymbol{F}$ (force) durch die Meßvorschrift

$$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a} \tag{2.15}$$

festlegen, sie also aus ihrer Wirkung bei der Beschleunigung $\boldsymbol{a}$ eines Korpers der Masse m definieren. Diese Beziehung wird auch als *dynamisches Grundgesetz* bezeichnet.

Als Einheit für die Kraft ergibt sich daraus kg m/s^2. Sie wird *Newton*, abgekürzt N, genannt, d. h. die Kraft 1 N erteilt der Masse von 1 kg die Beschleunigung 1 m/s^2. Die früher übliche Einheit 1 dyn $= 10^{-5}$ N wird nicht mehr benutzt.

Unberührt durch diese Kraftdefinition bleibt die Möglichkeit, Kräfte durch Vergleich untereinander auch statisch zu messen, was in der Praxis ganz überwiegend geschieht (Abschn. 2.3.2).

2.3.2 Schwere Masse und Gewicht Jeder Körper wird von der Erde angezogen. Diese Eigenschaft macht sich nicht nur beim Fallen

[3] *Isaak Newton*, 1643 – 1727, Entdecker der allgemeinen Gravitation, stellte die Grundgesetze der Mechanik auf.

eines Körpers bemerkbar, sondern auch durch die Druckkraft, die ein ruhender Körper auf seine Unterlage ausübt. Wir sprechen von seiner *Schwere*. Lege ich eine Kugel auf die Hand, so muß ich eine bestimmte Muskelkraft aufwenden, um die von der Erde ausgeübte *Schwerkraft* zu kompensieren. Diese Kraft, die eine Kugel auf die Hand oder auf eine ruhende Waagschale ausübt, nennen wir ihre *Gewichtskraft* oder kurz ihr *Gewicht* G[4], vgl. auch Abb. 2.10. Zieht man die Hand weg, so führt die Kugel eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung, die freie Fallbewegung aus. Auch dabei gilt das dynamische Grundgesetz $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$. Speziell beim freien Fall ist die Kraft gleich dem Gewicht ($F = G$), und die Beschleunigung ist unabhängig von der trägen Masse der Kugel an einem Ort der Erde stets dieselbe, nämlich die Erdbeschleunigung g (Abschn. 2.2.2). Damit ergibt sich für das Gewicht die wichtige Beziehung

$$G = mg \,. \tag{2.16}$$

Die Materie besitzt danach zwei Grundeigenschaften, sie ist sowohl träge als auch schwer. Wir brauchen aber nicht zwischen der trägen und der schweren Masse eines Körpers zu unterscheiden. Wollte man eine besondere schwere Masse einführen, so wäre sie der trägen proportional, und es ist daher zweckmäßig, den Proportionalitätsfaktor gleich 1 zu setzen.

Daß Gewichtskraft und träge Masse bei allen Körpern im gleichen Verhältnis stehen, ist nicht von vornherein selbstverständlich. Es wäre durchaus denkbar, daß die Erde Körper gleicher träger Masse, aber aus verschiedenem Stoff auch verschieden stark anzieht, so wie etwa ein Magnet eisenhaltige Körper bevorzugt anzieht. Das Experiment des freien Falls schließt aber diese Möglichkeit aus.

Bei den Messungen zu Abb. 2.10 muß man, ganz exakt, auch die träge Masse des Gewichtstückes m_G beachten, die ebenfalls mit beschleunigt wird. Die beobachtete Beschleunigung a ergibt sich daher aus der Beziehung $m_G g = (m + m_G)a$.

[4] In der Umgangssprache wird das materielle *Gewichtstück* meist auch abkürzend als Gewicht bezeichnet. Wo Verwechslung möglich ist, sollte man G daher besser Gewichtskraft nennen.

Man kann das Gewicht zum *statischen* Vergleich von Kräften benutzen. Davon wird in der Technik und im täglichen Leben sehr häufig unmittelbar Gebrauch gemacht, oder das Gewicht dient zur Kalibrierung von anderen Kraftmessern (Dynamometer). Als solche werden wir am einfachsten Schraubenfedern verwenden. Ihre unmittelbar ablesbare elastische Verlängerung x ist der wirkenden Kraft F proportional: $F = Dx$ (Abschn. 4.1.1). D ist die Federkonstante. Wenn eine Kraft die Feder so weit dehnt wie ein angehängtes Gewichtsstück der Masse 1 kg, so hat sie gerade die Größe 9,81 Newton, vgl. dazu Abb. 4.2.

Für sehr exakte Messungen muß man dabei beachten, daß die Erdbeschleunigung g und damit auch das Gewicht eines Körpers sich mit der geographischen Breite etwas ändern. Wegen der Zentrifugalkräfte auf der rotierenden Erde und infolge der Erdabplattung ist die Erdbeschleunigung am Äquator um etwa $0,5\%$ kleiner als in der Nähe der Pole. Wir rechnen stets mit dem praktischen Mittelwert $g = 9{,}81\ \mathrm{m/s2}$.

Dann hat also ein Körper von 1 kg Masse das Gewicht 9,81 N; oder $1\ \mathrm{N} = 1\ \mathrm{kg\,m/s^2}$ ist gerade das Gewicht eines Körpers der Masse 0,102 kg. Das vermittelt uns eine anschauliche Vorstellung von dieser SI-Einheit für die Kraft.

Physik und Technik benutzten früher in der Mechanik verschiedene Maßsysteme, die auf drei Basiseinheiten aufgebaut sind und von denen alle übrigen Einheiten abgeleitet werden. In der Physik wählt man, wie besprochen, als dritte Basiseinheit die Masse, und zwar das Kilogramm, SI-Einheit. – Im sog. *technischen Maßsystem* durfte bis Anfang 1978 außer Meter und Sekunde als dritte Basiseinheit das *Kilopond (kp)* für die Kraft verwendet werden. 1 kp ist die Kraft, mit der die Erde den Kilogrammprototyp unter 45° geographischer Breite und in Meereshöhe anzieht, was zahlenmäßig festzulegen war als

$$1\ \mathrm{kp} = 9{,}806\,65\ \mathrm{N} \,. \tag{2.17}$$

2.3.3 Wechselwirkungssatz, Impuls Kräfte zwischen zwei Körpern treten immer paar-

Lösungen der Aufgaben

Die Zahlen sind größtenteils auf 1% gerundet.
Wenn kein Irrtum möglich, steht die Maßeinheit meist nur beim Endergebnis.

Kapitel 1

1.1 $V = 4\pi r^3/3$, rel. Fehler von r^3: $3 \cdot 0{,}4_6\% = 1{,}3_8\%$. Rel. Fehler von m: $0{,}6_0\%$. Daraus rel. Fehler von $\varrho = m/V$: $(1{,}3_8 + 0{,}6_0)\% \approx 2\%$. Ergebnis $\varrho = 2{,}47 \pm 0{,}05\,\mathrm{g/cm^3}$.

1.2 a) $\sqrt{817} = \pm 28{,}6$;
b) $\sqrt{790{,}4/10} = \pm 8{,}8_9$;
analog c) $\pm 3{,}6_4$;
d) $0{,}7_5$.

1.3 a) Einfache Mittelung $\overline{\varphi} = 11{,}0°$.
Nach (1.3) mit $n - 1 = 9$: $s_1 = \sqrt{2}° = 1{,}4_1°$.
Nach (1.4) $s_{10} = s_1/\sqrt{10} = 0,45° \approx 0{,}5°$.
b) Nein, nur die Differenz zwischen zwei verschiedenen Winkellagen, z. B. bei Drehung der Polarisationsebene, s. Abschn. 7.4.8.

Kapitel 2

2.1.1 Strahlensatz mit Längen in cm:
$\Delta h/2 = 3/(33-3)$: $\Delta h = 0{,}2\,\mathrm{cm}$.

2.1.2 $2 \cdot 10^9\,\mathrm{mm^3}$.

2.1.3 Nach (2.1) $\varphi° = 180 \cdot 5/6 = 150°$.

2.2.1 In (2.7) $v = 0$ gesetzt, ergibt umgeformt $t = -v_0/a$. Dies in (2.8) eingesetzt, führt zu $a = -v_0^2/2s$ (Bremsung!). Mit $v = 100\,\mathrm{km/h} = 27{,}7_8\mathrm{m/s}$: $a = -19{,}3\,\mathrm{m/s^2} = -1,97 \cdot g$.

2.2.2 Nach Aufgabe 2.2.1: $t = -v_0/a = 1{,}44\,\mathrm{s}$.

2.2.3 Der Viertelkreis beträgt als Weg $s = 2\pi \cdot 5/4 = 7{,}85\,\mathrm{m}$, also $v = s/t = 2{,}62\,\mathrm{m/s}$. Nach (2.14) $a_r = v^2/r = 1{,}37\,\mathrm{m/s^2}$.

2.3.1 a nach unten, F_T nach oben.

2.3.2 Mit (2.15) $m_G g = (m + m_G)a$:
$a = g/4 = 2{,}45\,\mathrm{m/s^2}$. Mit $v^2 = 2as$ (s. Aufgabe 2.2.1) und $s = 0{,}5\,\mathrm{m}$ folgt $v = 1{,}57\,\mathrm{m/s}$.

2.3.3 $m_G g s = (m + m_G)v^2/2$.

2.3.4 Mit (2.26) und (2.27) wird für $l = \Delta x$: $mv^2/2 = D\Delta x^2/2$, also $\Delta x = v\sqrt{m/D}$. Das ergibt mit $D = 3000\,\mathrm{N/m}$: $\Delta x = 0{,}207\,\mathrm{m}$.

2.3.5 Nach (2.22) beträgt die gefragte Zeit $t = W/P$. Darin sind $W = mv^2/2 = 1{,}6 \cdot 10^5\,\mathrm{J}$ und $P = 50\,000\,\mathrm{W}$, also $t = 3{,}2\,\mathrm{s}$.

2.4.1 Mit $s = v_0 t$ und $t = \sqrt{2h/g}$ (aus (2.10) umgeformt) ergibt sich $s = v_0\sqrt{2h/g} = 1{,}60\,\mathrm{m}$.

2.4.2 Die Erde hat: Radius $r = 6{,}366 \cdot 10^6\,\mathrm{m}$, Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi/86\,400\,\mathrm{s^{-1}}$. Damit Zentrifugalbeschleunigung $a_r = r\omega^2 = 0{,}0337\,\mathrm{m/s^2}$, vgl. (2.14).

2.4.3 Bezogen auf die Erde gar nicht.

2.4.4 Senkrechte Komponente: Atom 1 überträgt seine ganze Geschwindigkeit v_0 an Atom 2, vgl. (2.32) mit $m_1 = m_2$, das außerdem noch die horizontale Komponente v_0 hat und behält. Atom 2 fliegt also nach dem Stoß, um 45° von seiner alten Bahn abgelenkt, mit der Bahngeschwindigkeit $\sqrt{2} \cdot v_0$ weiter (Vektor-Addition der Geschwindigkeiten), während Atom 1 ruht.

2.4.5 In beiden Fällen $v' = 0$, die Verformungsarbeit an einer Kugel ist gleich.

2.5.1 $4 \cdot \sin 30\,\mathrm{Nm} = 2\,\mathrm{Nm}$.

2.5.1 Der Schwerpunkt muß von $0{,}05\,\mathrm{m}$ Höhe auf $\sqrt{0,05^2 + 0,04^2} = 0,\ 064\,\mathrm{m}$ gehoben werden. Die Differenz als Weg multipliziert mit der Gewichtskraft F ergibt die Arbeit $0{,}28\,\mathrm{J}$.

2.5.3 $0{,}319\,\mathrm{J}$, nur geringfügig größer.

2.5.4 Bezogen auf den Erdboden bewegt sich das Boot um die Strecke s, der Mann um $s - 2$ (alle Längen in m). Also nach (2.37): $300 \cdot s = 75 \cdot (2 - s)$, bzw. $s = 0{,}40\,\mathrm{m}$.

2.6.1 Aus dem Winkel-Zeit-Gesetz (2.39b) folgt $a = 2\varphi/t^2$; der zurückgelegte Winkel beträgt $\varphi = 5 \cdot 2\pi$. Also $\alpha = \pi/20\,\mathrm{s^{-2}} = 0{,}157\,\mathrm{s^{-2}}$.

2.6.2 Bei Drehung um den Kugeldurchmesser: $I_0 = 2mr^2/5 = 3{,}2\,\mathrm{kg\,m^2}$. Bei Drehung um eine Tangente: nach Steiner $I = I_0 + mr^2 = 11{,}2\,\mathrm{kg\,m^2}$.

2.6.3 Der konstant bleibende Drehimpuls, vgl. (2.42), beträgt $L = 125\,\mathrm{kg\,m^2/s}$. Nach Ausstrecken der Hanteln hat sich das Trägheitsmoment erhöht auf $(25 + 30 \cdot 0{,}9^2) = 49{,}3\,\mathrm{kg\,m^2}$; also ist die neue Winkelgeschwindigkeit ($L = \mathrm{const.}$): $\omega = 125/49{,}3\,\mathrm{s^{-1}} = 2{,}53_5\,\mathrm{s^{-1}}$.

2.6.4 $E_{\mathrm{rot}} = I\omega^2/2$. Arme ausgestreckt: $E_{\mathrm{rot}} = 158{,}4\,\mathrm{J}$; Arme angezogen: $F_{\mathrm{rot}} = 312{,}5\,\mathrm{J}$. Differenz $154{,}1\,\mathrm{J}$. Die Versuchsperson leistet Arbeit gegen die Zentrifugalkräfte, die auf die Hanteln nach außen wirken.

2.6.5 Die Präzessionsgeschwindigkeit ist dem äußeren Drehmoment $M = M_0 \sin\vartheta$ proportional. Sie geht also auch mit $\sin\vartheta$.

2.7.1 Auf der Kreisbahn mit dem Radius r um den Erdmittelpunkt hat der Satellit nach (2.14) die Zentripetalbeschleunigung $r\omega^2$, und die Erdbeschleunigung ist dort $g(r_e/r)^2$, vgl. (2.43); $r_e = 6{,}366 \cdot 10^6\,\mathrm{m}$ ist der Erdradius. Für die Erdumdrehung gilt $\omega = 2\pi/86\,400\,\mathrm{s^{-1}}$. Man setzt beide Beschleunigungen gleich und formt am besten um in $(r/r_e)^3 = g/r_e\omega^2$. Das führt auf $r/r_e = 6,63$ oder den gesuchten Abstand von der Erdoberfläche $5{,}63 \cdot r_e = 35\,800\,\mathrm{km}$.

Kapitel 3

3.1.1 $1{,}293\,\mathrm{kg}$.

3.1.2 23% der Masse von $1\,\mathrm{m^3}$ Luft sind $297{,}4\,\mathrm{g}$. O_2 hat die Molmasse $32\,\mathrm{g/mol}$. Also ist die Stoffmengenkonzentration $9{,}29\,\mathrm{mol/m^3}$.