Lösungen

2 Die sieben SI-Einheiten

F2 Es gelten folgende Umrechnungen: 1 Zoll (oder auch Inch) sind 2,54 cm. Wenn dein Computermonitor eine Diagonale von 17 Zoll hat, dann sind das also 43,18 cm. Ein Fuß sind 30,48 cm. Ein Meter hat somit 3,28 Fuß oder 3 Fuß und 3 3⁄8 Zoll. Ein Yard sind 91,44 cm.

F3 Die Bezeichnung dpi bedeutet dots per inch, also wie viele Punkte pro Zoll (2,54 cm) ausgedruckt werden. 600 dpi bedeutet also, dass ein einzelner Punkt nur unglaubliche 0,042 3 mm groß ist.

F4 In Deutschland waren unter anderem Klafter (1,75 m bis 2,50 m), Elle (0,5 bis 0,8 m), Joch (3 300 bis 5 800 m^2), Eimer (64 bis 68 l) und Zentner (50 kg) üblich.

F5 144, also ein Dutzend Dutzend, nannte man ein Gros. Und dann gab es noch ein Schock (60, also 5 Dutzend) und ein Grosdutzend (120). Wie viele Dutzend sind 99? Blöd zu rechnen, hm?

F9 Unser Heimatplanet wird andauernd von Partikeln aus dem Weltall getroffen, von den winzigen Teilchen des Sonnenwindes bis hin zu Meteoriten. Man schätzt grob, dass pro Jahr allein etwa 40 000 Tonnen Material von Meteoriten auf die Erde niedergehen. Aber die Masse der Erde ist so groß, dass man davon überhaupt nichts merkt. Warum? Vergleiche einfach die Größenordnungen: Masse der Erde 10^{25} kg, Massenzunahme pro Jahr 10^4 kg. Selbst seit Bestehen der Erde (über 4 Milliarden Jahre) hat ihre Masse nur um 10^{14} kg zugenommen.

F10 Die Architektur eines PC baut auf dem Dualsystem auf und die Zahlen sind immer Potenzen von 2. Deshalb sind ein Kilobyte nicht 1 000, sondern 1 024 Byte, also 2^{10} Byte. Ein Megabyte sind 1 024 Kilobyte und somit 1024^2 oder 1 048 576 Byte, ein Gigabyte 1 073 741 824 Byte. Wenn man genau ist! Aber über den Daumen kommt man auch damit aus, dass 1 Gigabyte etwa 10^9 Byte sind. FLOP ist die Abkürzung für „Floating Point Operations per Second“, also Fließkomma-Operationen pro Sekunde. In Teraflops wird also die Rechengeschwindigkeit angegeben. Der schnellste Super-superrechner im Jahr 2019 hatte über 122 000 Teraflops, also über 122 Billiarden Rechenoperationen pro Sekunde.

F13

a) $3{,}7 \cdot 10^6$	b) $52 \cdot 10^9 = 5{,}2 \cdot 10^{10}$	c) $2 \cdot 10^5$
d) $12 \cdot 10^3 = 1{,}2 \cdot 10^4$	e) $2 \cdot 10^{-6}$	f) $7 \cdot 10^{-9}$
g) $7 \cdot 10^{-2}$	h) $3 \cdot 10^{-3}$	i) $5 \cdot 10^{-7}$ m
j) $6{,}37 \cdot 10^6$ m	k) $0{,}37 \cdot 10^9$ m	l) $0{,}3 \cdot 10^{-9}$ m

F16 Jeder Gegenstand dehnt sich aus, wenn er erwärmt wird. Bei Metall ist dieser Effekt besonders groß. Auf der anderen Seite ist aber Metall sehr robust. Das Problem ist, dass man bei der Längenmessung auf die Temperatur achten muss. Wird das Urmeter von 0 °C auf 20 °C erwärmt, verlängert es sich um 0,3 mm.

F17 Gibt es eine größte und eine kleinste Länge? Theoretisch zwar nicht, aber rein praktisch gibt es eine obere und untere Grenze. Die sinnvolle obere Grenze ergibt sich aus dem Durchmesser des sichtbaren Universums. Der liegt nach heutiger Ansicht bei etwa 10^{26} m. Wenn etwas noch länger wäre, dann könnte man das im sichtbaren Universum nicht unterbringen.
Am unteren Ende der Sinnhaftigkeit befindet sich mit 10^{-35} m die Planck-Länge. Jedes Objekt, das kleiner wäre als die Planck-Länge, hätte aufgrund der sogenannten Unschärferelation (siehe Big Bang 2) so viel Energie bzw. Masse, dass es zu einem Schwarzen Loch kollabieren würde, dessen Gravitation so hoch ist, dass nicht einmal Licht entweichen kann. Was kleiner ist, kann nicht gemessen werden. Und zwar nicht, weil unsere Technik zu schlecht ist, sondern weil die Naturgesetze das nicht zulassen.

F19 Die Gegenstände haben eine Dicke von 4,6 mm und von 15,5 mm.

F21 Aus dem Jahr 1983 stammte die auch noch ab 2019 gültige Definition für das Meter. Es wurde damals mit Hilfe der Zeit bestimmt, die das Licht für 1 m benötigt. Dadurch sind aber Meter und Lichtgeschwindigkeit untrennbar miteinander verknüpft. Messen der Lichtgeschwindigkeit ist sinnlos geworden, weil sich ja aus der Definition des Meters die Lichtgeschwindigkeit ohne Messung ausrechnen lässt: $c = s/t = 1\,\text{m}/(1/299\,792\,458)\,\text{s} = 299\,792\,458\,\text{m/s}$. Die Messung macht nur zum Eichen eines Geräts Sinn!

F23 Die Sonne dreht sich (natürlich scheinbar) in 24 Stunden einmal um die Erde, das sind also 360°. In einer Stunde dreht sie sich also um $360°/24 = 15°$.

F25 Die kürzeste sinnvolle Zeit ist die Planck-Zeit (siehe auch Frage 17). Es handelt sich dabei um die Zeit, die das Licht benötigt, um die Planck-Länge zurückzulegen, und sie liegt in der Größenordnung von 10^{-43} s. Die größte sinnvolle Zeit ist das Alter des Universums. Etwas Älteres kann es ja nicht geben! Das Alter des Universums liegt nach heutiger Ansicht bei 13,81 Milliarden Jahren, das sind etwa $4 \cdot 10^{17}$ Sekunden.

F26 – F27 Die Schwingungsdauer eines Fadenpendels ist von der Masse unabhängig und bei kleinen Auslenkungen auch von der Schwingungsweite. Vielleicht hast du auch herausbekommen, dass *t* von der Wurzel der Pendellänge abhängt, also vierfache Pendellänge, doppelte Schwingungsdauer. Die Gleichung, mit der man die Schwingungsdauer berechnen kann, lautet:

$$t = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

g ist die Erdbeschleunigung (siehe Kap. 5.4.1) und beträgt $9{,}81\,\text{m/s}^2$. Du willst ein Pendel, das in 2 Sekunden einmal hin und her schwingt. Für eine Halbschwingung ist das aber 1 Sekunde und deshalb nennt man es auch **Sekundenpendel**. Forme um:

$$l = \frac{g \cdot t^2}{4\pi^2} = 0{,}99396\,\text{m} \approx 99{,}4\,\text{cm}$$

Ein Sekundenpendel ist also knapp 1 m lang.

F28 Die Antwort ist a). Die Masse eines Gegenstandes bleibt immer gleich groß. Was sich ändern kann, ist das Gewicht. Das Gewicht der Astronauten ist am Mond etwa 1⁄6 von dem auf der Erde, aber die Masse ist gleich groß! Die Masse des Astronauten ist sogar dann immer noch gleich groß, wenn er schwerelos im All schwebt. Masse ist also unveränderlich.

F30 Das Volumen einer Kugel lässt sich mit $V = (4\pi \cdot r^3)/3$ berechnen und beträgt für eine Kugel mit dem Radius 1 m etwa 4,2 m^3. Da ein Kubikmeter Kork immerhin eine Masse von 120 – 550 kg hat, summiert sich das auf 504 – 2 310 kg!

F32 Der Tabelle kannst du entnehmen, dass Luft eine Masse von etwa 1,2 kg pro m^3 hat. Du musst also nur das Volumen des Physiksaals abschätzen. Ist er zum Beispiel 12 m lang, 6 m breit und 3,5 m hoch, dann ist sein Volumen 252 m^3 und die Luftmasse hat daher etwa 300 kg. Auch überraschend viel, oder?

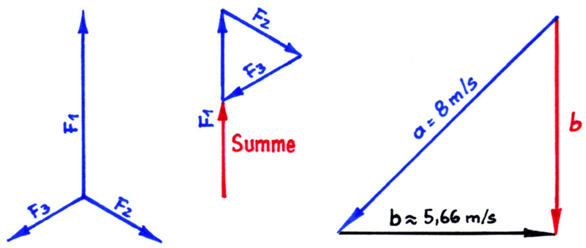
3 Tooltime

F14 Nur die Einheit Newton gehört zu einer vektoriellen Größe, der Kraft.

F15 Masse ist eine (richtungslose) Eigenschaft, die jeder Portion Materie innewohnt. Gewicht ist exakter gesprochen die Gewichtskraft (also eine vektorielle Größe), die entsteht, weil zwei Gegenstände, die Masse besitzen, sich gegenseitig anziehen.

F16 a) $a^2 = 16 + 9 = 25$, a ist also 5 Kästchen lang. b) siehe a). c) Originallänge 5 Kästchen. d) $9 + 16 = 25$, d ist also auch 5 Kästchen lang.

F17



F18 Siehe ab Kap. 5.4

F19 Siehe Kap. 3.1

F20 Du drehst dich so, dass der Regen von schräg hinten kommt und beginnst zu laufen. Dadurch bekommt der Regen aus deiner Sicht eine zusätzliche Horizontalkomponente (in der Abb. von links nach rechts). Wenn du so schnell läufst, dass der Regen aus deiner Sicht senkrecht fällt, dann herrschen Verhältnisse wie in der Abb. oben rechts dargestellt. Der Geschwindigkeitsvektor der Regentropfen im ruhenden System ist dann die Diagonale eines Quadrats und für die Laufgeschwindigkeit ergibt sich:

$$\frac{8\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{\sqrt{2}} \approx 5{,}66\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Wenn du in diesem Tempo läufst, dann kommt von dir aus gesehen der Regen genau von oben.

4 Gedachte Singularität

F5 Dieser Trick ist wirklich sehr verblüffend, aber mit Hilfe des KSP sofort zu verstehen. Das Besteck macht ja einen Knick und deshalb liegt der KSP etwa dort, wo sich die Spitze des Spießes befindet. Also innerhalb der Tischplatte. Und ein Gegenstand, dessen KSP sich auf der Tischplatte befindet, fällt eben nicht runter.

F12 Viele Fragen, eine Antwort: weil dann die potenzielle Energie ein Minimum hat.

F21 Jetzt wirst du dich wundern, aber die Balkenwaage geht bei den Federn hinauf. Warum? Diese haben eine viel geringere Dichte und verdrängen daher mehr Luft. Auch Luft erzeugt einen Auftrieb, wenn auch einen viel geringeren als Wasser. Die Federn bekommen mehr Auftrieb als das Eisen und daher sind sie in Summe leichter. Auf dem Mond (also ohne Luft) wäre der Balken natürlich waagrecht.

F22 Du musst dazu das Buch so über eine Ecke schieben, dass diese genau unter dem KSP liegt.

F23 Weil bei ihnen der KSP höher liegt.

F24 Im indifferenten Gleichgewicht.

F25 Egal in welche Position du das Rad drehst, es muss ruhig bleiben, wenn du es loslässt.

F26 Pendel und Schaukel stabil, Handstand, Radfahren und Seiltanzen labil, Stehaufmännchen stabil.

F28 Wenn man von der Seite schiebt, ist es im stabilen Gleichgewicht. Wenn man in Längsrichtung bei gelöster Handbremse schiebt, ist es im indifferenten Gleichgewicht, bei gezogener Handbremse im stabilen Gleichgewicht.

F29 Der Frosch muss durch Vorbringen der freien Beine den KSP über die Verbindungslinie bringen, damit er in ein neues stabiles Gleichgewicht kommt.

F30 Archimedes ließ einen Barren aus reinem Gold mit gleicher Masse wie die Krone anfertigen, tauchte dann beide Gegenstände in einen randvollen Behälter und maß die übergelaufene Wassermenge. Bei der Krone lief mehr Wasser über, sie hatte also eine geringere Dichte und konnte daher nicht nur aus Gold bestehen.

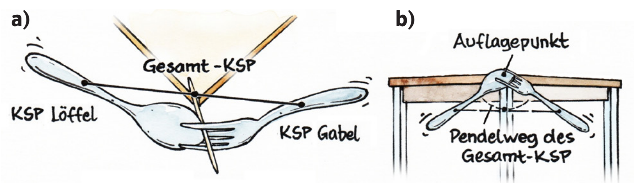
F31 Die Summen sind 1,938, 1,998 und 2 bzw. 2,283, 2,929 und 4,499. Die erste Reihe strebt sehr schnell dem Wert 2 zu, die zweite Reihe hat keinen Grenzwert. Probier zum Beispiel einmal 1000 Glieder aus! Deshalb kann man mit dem Bücherstapel in Abb. 4.5 beliebig große Überhänge erzeugen – wenn man genügend Bücher hat!

F32 Antwort b ist richtig. Besonders offensichtlich wird das zum Beispiel bei der Wippe. Auf der linken Seite befindet sich eindeutig mehr Masse als rechts (Abb. 4.4), aber die Drehmomente sind genau gleich groß und entgegengesetzt gerichtet (Abb. 10.21).

F33 Von vorne oder hinten gesehen im labilen Gleichgewicht, von der Seite gesehen im indifferenten.

F34 Obwohl der Turm eine ziemliche Schieflage zu haben scheint: Das Lot des KSP zeigt ganz klar in die Standfläche. Der Turm befindet sich also im stabilen Gleichgewicht.

F35 Von oben gesehen befindet sich der gemeinsame KSP gerade noch innerhalb der Tischplatte (a). Von der Seite betrachtet befindet sich der KSP unterhalb des Auflagepunkts (b). Wenn du das Besteck antippst, dann hebt sich der Schwerpunkt. Das ganze Ding befindet sich also überraschenderweise noch dazu im stabilen Gleichgewicht.



F36 Um den Effekt zu verstehen, musst du vorab zwei Dinge wissen:
1. Die Gleitreibungskraft ist geringer als die Haftreibungskraft.
2. Je näher ein Finger dem KSP kommt, desto größer wird der Anteil der Gewichtskraft, den er tragen muss.
Nun ist es so: Zuerst wird der Finger zu rutschen beginnen, der sich weiter vom KSP entfernt befindet. Wenn er dem KSP näher kommt, steigt die Kraft, mit der der Stiel auf den Finger drückt und somit auch die Reibung. Irgendwann wird die Reibung so groß, dass der Finger haften bleibt und der andere zu rutschen beginnt. Dieses Wechselspiel geht so lange, bis sich die Finger unter dem KSP treffen.

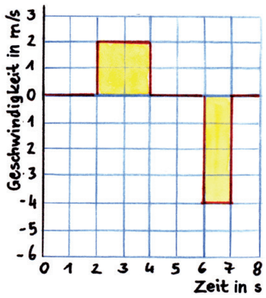
F37 a3, b2 und c2

F38 Achtung, nur der KSP beschreibt eine Flugparabel! Wo sich dieser im oder am Körper befindet, entscheidet die Anordnung der Gliedmaßen. Durch den extremen Spagat schafft es die Tänzerin, ihren KSP weiter nach oben im Rumpf zu verschieben, wodurch die Flugbewegung flacher erscheint.

5 Geradlinige Bewegungen

F7 Es ist völlig egal, in welche Richtung der Stock geworfen wird. Die gelaufene Strecke hängt nur von der Laufgeschwindigkeit des Hundes ab. Wenn er mit 15 km/h eine Stunde läuft, dann legt er 15 km zurück.

F10 Wenn die Flächen oberhalb und unterhalb der *x*-Achse in einem *s*-*v*-Diagramm gleich groß sind, dann steht das Objekt nachher wieder an derselben Stelle. In diesem Fall befinden sich oberhalb und unterhalb jeweils 4 Kästchen.



F21 Die Antwort lässt sich auch mit Hilfe einer Gleichung zeigen. In der Gleichung für die Geschwindigkeit musst du nur die Zeit als s/v hinschreiben. Der Weg hin und zurück ist gleich groß, daher ist ein Wegstück $s/2$. Die Geschwindigkeiten hinauf und hinunter sind unabhängig (v_1 und v_2).

$$v = \frac{s}{t} = \frac{s}{\frac{s/2}{v_1} + \frac{s/2}{v_1}}$$

Wenn du jetzt 30 km/h einsetzt, siehst du, dass du auf etwa 15 km/h im Schnitt kommst:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{20\,\text{km}}{\frac{10\,\text{km}}{10\,\text{km/h}} + \frac{10\,\text{km}}{30\,\text{km/h}}} \approx 15\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Nur wenn die Geschwindigkeit zurück unendlich groß ist, ergeben sich im Schnitt 20 km/h:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{20\,\text{km}}{\frac{10\,\text{km}}{10\,\text{km/h}} + \frac{10\,\text{km}}{\infty\,\text{km/h}}} = \frac{20\,\text{km}}{\frac{10\,\text{km}}{10\,\text{km/h}} + 0} \approx 15\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$$

F24 Wie schnell bewegen sich deine Füße, wenn du mit 5 m/s läufst? Du denkst dir vielleicht, dass das eine ganz blöde Frage ist, schließlich kommen diese ja gemeinsam mit dir im Ziel an. Klar, die Durchschnittsgeschwindigkeit ist gleich groß! Wie ist es aber mit der Momentangeschwindigkeit?
Du darfst nicht vergessen, dass dein Fuß beim Schritt ja eine ganz schöne Zeit lang am Boden steht (Stützphase). In dieser Zeit ist die Momentangeschwindigkeit null. Das muss der Fuß natürlich aufholen. Schließlich muss die Durchschnittsgeschwindigkeit des Fußes so groß sein wie die deines KSP. Deshalb bewegt sich der Fuß beim Vorschwung für kurze Zeit mehr als doppelt so schnell wie der Gesamt-KSP.

F30 Die Lichtgeschwindigkeit ist immer gleich groß, egal welche Bewegung man ausführt. Deshalb messen die Laster auch dieselbe Geschwindigkeit. Würden sie unterschiedliche Geschwindigkeiten messen, dann wäre die Relativitätstheorie falsch.

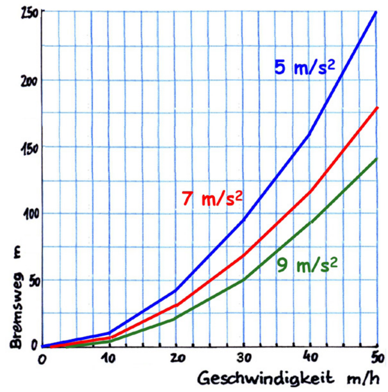
F31 $v = s/t$, daher gilt $t = s/v$. Das Ergebnis ist in Sekunden gerechnet und muss erst umgerechnet werden. Für die Werte aus der Tabelle ergeben sich dann für Frauen rund 2 h und 16 Minuten und für Männer 2 h und 5 Minuten.

F32 Der Erdumfang beträgt etwa $40 \cdot 10^6$ m und das Licht hat $3 \cdot 10^8$ m/s. Das macht also ziemlich genau 7,5 Umrundungen pro Sekunde. Sehr flott!

F33 Die Beschleunigung sagt aus, um wie viel Meter pro Sekunde sich die Geschwindigkeit pro Sekunde ändert.

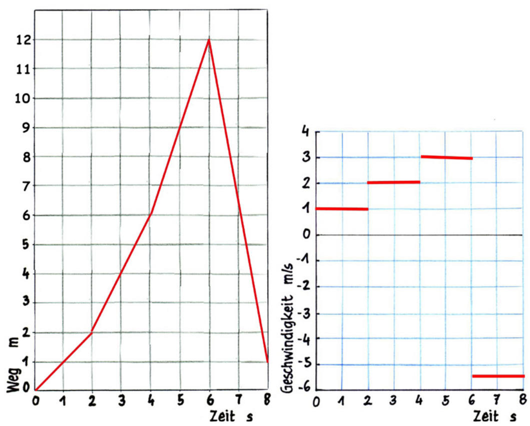
F34 Die Gleichung für die Falltiefe ist $s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$. Für die Beschleunigung a musst du in diesem Fall eben 3,72 m/s² einsetzen. Das ergibt für die ersten 6 Sekunden folgende Falltiefen: 1,86 m, 7,44 m, 16,74 m, 29,76 m, 46,5 m und 66,96 m. Die Fallbeschleunigung beträgt etwa ⅓ der Erde, daher ist auch die Falltiefe pro Zeit nur ⅓ des Werts auf der Erde.

F35



F36 Sportwagen haben natürlich sehr gute Bremsverzögerungen. Nehmen wir einmal 10 m/s², das ist das Doppelte des gesetzlich vorgeschriebenen Wertes. Nun musst du $s = v^2/2a$ umformen und kommst auf $v = \sqrt{2a \cdot s}$, macht also etwa 75 m/s oder 270 km/h. Der Fahrer hat also eindeutig gelogen. Bei 150 km/h oder etwa 42 m/s dürfte der Bremsweg bei einem Sportwagen nur etwa 88 m betragen. Rechne nach!

F37



F39 Der Schall hat – temperaturabhängig – eine Geschwindigkeit von etwa 340 m/s. Für einen Meter benötigt der Schall daher 1/340 s oder rund 3/1000 s. Wäre der Starter z. B. 3 m weg, würde der Sprinter das Signal um 1/100 s verzögert wahrnehmen, wäre er 10 m weg, wäre die Verzögerung bereits rund 3/100 s. Das kann bereits über Sieg oder Niederlage entscheiden.

F40 Die Gleichsetzung von Luftwiderstandskraft und Gewicht und die Auflösung nach v ergibt

$$v = \sqrt{\frac{2m \cdot g}{c_w \cdot \varrho \cdot A}}$$ (→ **INFO** Luftwiderstandskraft, Kap. 5.5)

Nehmen wir für die Masse von Mary Poppins 50 kg an. Schätzen wir für den Schirmdurchmesser grob 0,8 m ab und nehmen vereinfacht eine Kreisfläche an. Das ergibt eine Schirmfläche von 0,5 m². Bei einem c_w-Wert von 1,3 erhält man eine „Schwebegeschwindigkeit" von 34 m/s oder knapp rund 122 km/h. Mary Poppins würde – zumindest ohne Zauberkraft – ziemlich unsanft aufschlagen!

6 Zusammengesetzte Bewegungen

F7 Nach dem Unabhängigkeitsprinzip ist es völlig egal, welche zusätzliche Horizontalbewegung der Stein hat. Es ist also genauso wie in Frage 14 in Kap. 5.4.2. Der Stein fliegt 45 m hoch.

F12 Je leichter ein Gegenstand, desto mehr wirkt sich der Luftwiderstand aus. Schlagbälle haben um 80 g, sind also viel schwerer als Tennisbälle. Sie werden durch die Luft daher nicht so stark gebremst.

F13 Der Turm ist 80 m hoch. Der Stein fliegt 35 m weit.

F14 5 cm, 20 cm und 45 cm

F15 Das Paket muss bei c abgeworfen werden. Das Paket befindet sich immer genau unter dem Flugzeug! Für eine Person am Boden beschreibt es eine Flugparabel wie bei einem horizontalen Wurf.

F16 Selbst wenn es ein Superholz gäbe, könnte man mit diesem Bogen nicht schneller schießen. Eine höhere Abfluggeschwindigkeit bedeutet, dass der Bogen mehr Kraft erzeugt. Legolas könnte den Bogen daher gar nicht mehr spannen.

F17 Die Anlaufgeschwindigkeit und somit auch Absprunggeschwindigkeit beim Weltrekord kann man mit 10,2 m/s abschätzen (siehe Legende Abb. 6.17). Weil der Absprung unter 20° erfolgt, ist die x-Komponente der Geschwindigkeit $v_x = \cos(20°) \cdot v \approx 9{,}6\,\mathrm{m/s}$. Für 8,95 m braucht man mit dieser Geschwindigkeit 0,93 s, also eine knappe Sekunde.

F18 Du musst dir zunächst die Fallzeit ausrechnen. Aus der Gleichung $s = ½ \cdot g \cdot t^2$ folgt $t = \sqrt{2s/g}$ (siehe Kap. 5.4.1). Bei einer Falltiefe von 33 m beträgt die Fallzeit (bei $g = 9{,}81\,\mathrm{m/s^2}$) somit 2,59 s. Die Abwurfgeschwindigkeit ist daher 55 m/s : 2,59 s = 21,24 m/s.

F19 Im Prinzip ist diese Frage wie F12, nur etwas anders gestellt. Je leichter ein Gegenstand ist, desto gravierender wirkt sich der Luftwiderstand aus. Mit einem Watteball wirfst du bloß wenige Meter weit. Aus diesem Grund sind Schlagbälle ja auch schwerer als normale Tennisbälle, weil sie dann weiter fliegen.

F20 Beim neuen Speer liegt der KSP weiter vorne, wodurch die Spitze schneller nach unten kippt. Das ist bei Abb. 6.23 a der Fall. In b siehst du die Flugbahn des alten Speers.

7 Newton mal drei

F2 Wenn du schnell ziehst, dann reißt die Schnur aufgrund der trägen Masse des Gegenstandes unten. Wenn du langsam ziehst, dann wirkt auf die Schnur unten nur die Zugkraft, auf die oben aber die Zugkraft und das Gewicht des Gegenstandes. Deshalb reißt die Schnur oben.

F14 Nehmen wir an, dass der Tisch eine Masse von 20 kg hat. Was wiegt dann die Erde (bzw. der Tisch)? Erde und Tisch ziehen einander mit derselben Kraft an, die durch das Newton'sche Gravitationsgesetz beschrieben wird:

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{20 \cdot 6 \cdot 10^{24}}{(6{,}37 \cdot 10^6)^2}\,\mathrm{N} \approx 197\,\mathrm{N}$$

Es überrascht nicht, dass ziemlich dasselbe rauskommt wie mit der Gleichung $F_G = m \cdot g$. Die kleinen Abweichungen ergeben sich, wenn man g bzw. r für einen bestimmten Ort nicht völlig exakt kennt.

F17 Bei ABS wird der Druck im Bremssystem elektronisch gesteuert automatisch herabgesetzt, wenn die Räder blockieren. Dadurch liegt Haftreibung vor und keine Gleitreibung und der Bremsweg wird kürzer. Durch ABS wird aber nicht nur der Bremsweg etwas kürzer, sondern man kann auch lenken und dem Hindernis trotz Bremsung ausweichen.

F24 Durch die träge Masse des Autos könnte das Seil abreißen.

F25 Die Zeit, die das Auto benötigt, ist $t = v/a = 2{,}78\,\mathrm{s}$! Daraus folgt:

$$s = \frac{a}{2} \cdot t^2 = 38{,}6\,\mathrm{m}$$

F26 Das Raumschiff muss eine Gegenkraft erzeugen, die sein Gewicht kompensiert. Es müssten also monströse Düsen da sein. Nur einfach schweben geht nicht!

F27 Die Masse in der Gleichung $F = m \cdot a$ bezieht sich auf die Kugel, die gestoßen wird, und nicht auf den Kugelstoßer.

F28 Jede Masse kann durch ihren Gesamtschwerpunkt (KSP) ersetzt werden. Wenn sich die rechte Masse aufbläht, dann bleibt der KSP aber an derselben Stelle. Und nur auf den Abstand der verschiedenen KSP kommt es im Newton'schen Gravitationsgesetz an. Also bleibt die Kraft gleich groß.

F29 Sie würde anzeigen, wie stark du und die Waage einander anziehen. Die gegenseitige Anziehungskraft wäre aber extrem gering und würde in der Größenordnung von 10^{-8} N liegen (zum Gravitationsgesetz siehe Kap. 11).

F30 Der Bremsweg ergibt sich durch die Gleichung $s = v^2/(2a)$ (siehe Kap. 5.4.2). Es gilt also $s \sim 1/a$. Die Gleichung für die Kraft lautet allgemein $F = m \cdot a$ (siehe Kap. 7.3). Die Reibungskraft ergibt sich aus $F_R = \mu \cdot F_N = \mu \cdot m \cdot g$. Die Reibungskraft ist jene Kraft, die das Auto abbremst. Daher gilt $F = m \cdot a = \mu \cdot m \cdot g$. Daraus folgt $a \sim \mu$ und daher $s \sim 1/\mu$.

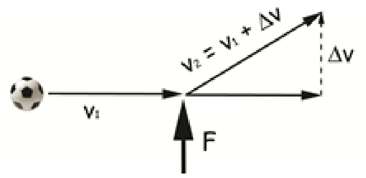
F31 Der erste Gang übersetzt zu sehr „auf Kraft" und dadurch können die Räder leichter durchdrehen als im zweiten.

F32 Das Türscharnier soll eine möglichst geringe Reibung haben, damit es nicht knarrt. Der Bogen soll eine große Reibung haben, damit er die Saite auslenken und in Schwingung versetzen kann. Ein eingefetteter Bogen könnte keinen Ton erzeugen.

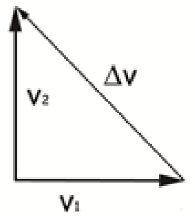
F33 Der Simulator funktioniert nur wegen der Ununterscheidbarkeit von träger und schwerer Masse. Will man etwa die Beschleunigung des Flugzeugs beim Start simulieren, dann wird die Spitze gehoben sowie das Heck gesenkt, und du wirst in den Sitz gedrückt. Deshalb kann man auch maximal 1 g Beschleunigung simulieren.

F34 Die Kraft wirkt in y-Richtung und kann daher die Geschwindigkeit in x-Richtung nicht beeinflussen. Man könnte in diesem Fall auch so schreiben: $F = m \cdot a_y = m \cdot (\Delta v_y/\Delta t)$. Die Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung bleibt erhalten. Es kommt aber ein

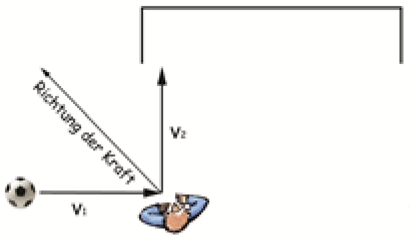
Δv in y-Richtung dazu. Der Geschwindigkeitsvektor wird daher gedreht und länger:



F35 a) Man könnte vorschnell meinen, dass der Stoß genau in Richtung Tor erfolgen muss. Dann würde aber die Bahn des Balles nur etwas abgelenkt, ähnlich wie in F34. In welche Richtung muss aber die Kraft zeigen? Überlegen wir zuerst, wie groß die Geschwindigkeitsänderung Δv ist. Weil v_1 und v_2 gleich groß sind, entspricht Δv der Diagonalen des Quadrats, das diese beiden Vektoren aufspannen:



Der Vektor der Geschwindigkeitsänderung zeigt also unter 45° nach links. Die Kraft muss daher in dieselbe Richtung zeigen. Warum? Das zweite Grundgesetz besagt $F = m \cdot a$. a ist wiederum $\Delta v/\Delta t$. Daher ist $F = m \cdot \Delta v/\Delta t$ und $F \sim \Delta v$. Die Kraft zeigt also immer in dieselbe Richtung wie die Geschwindigkeitsänderung:



b) Δv ist $v_1 \cdot \sqrt{2} = 28{,}28\,\text{m/s}$. Die Geschwindigkeitsänderung ist also größer als die Geschwindigkeit selbst. Die Beschleunigung $a = \Delta v/\Delta t = 4713\,\text{m/s}^2$. Aus $F = m \cdot a$ folgt für die Kraft 2121 N. Das ist also damit zu vergleichen, dass für 6 ms die Gewichtskraft einer Masse von rund 212 kg auf dem Kopf lastet. Nicht schlecht!

F36 Kraft und Gegenkraft aus dem 3. Newton'schen Grundgesetz greifen immer an *unterschiedlichen* Körpern an. Die Taste drückt mit derselben Kraft auf dich wie du auf die Taste, aber das spielt für ihre Bewegung keine Rolle.

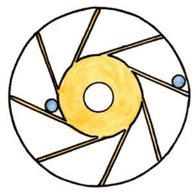
F37 Münchhausen kann sich natürlich nicht samt Pferd am Schopf aus dem Sumpf ziehen. Die Kraft der Hand wirkt zwar auf den Schopf, dieser übt aber eine Gegenkraft auf die Hand aus, welche aber auch zum Körper des Barons Münchhausen gehört. Betrachtet man also den Gesamtkörper, so halten sich die Kräfte die Waage. Man spricht in diesem Fall auch von *inneren Kräften*. Eine Bewegungsänderung ist jedoch nur durch *äußere Kräfte* möglich.

8 Arbeit und Energie

F10 Wenn ein Ball nach dem Aufprall höher springt, als er vorher war, dann wäre Energie gewonnen worden. Der Wirkungsgrad müsste dann mehr als 100 % betragen, was nicht möglich ist. Mit dem Ball könnte man ein Perpetuum mobile bauen. Bewegungsenergie wird in potenzielle Energie (maximal bei a und e) über den Umweg Spannenergie (in c) umgewandelt, dabei geht immer ein Teil als thermische Energie an die Umgebung.

F14 Auch hier müsste Energie aus dem Nichts erzeugt werden, was der Erfahrung des Energieerhaltungssatzes widerspricht.

F15 Betrachten wir zunächst nur die beiden Kugeln, die sich auf Höhe der Drehachse befinden (siehe Abb.). Es ist klar, dass sich in diesem Fall das Rad im Uhrzeigersinn dreht. Es ist wie bei einer Wippe, bei der eine Person weiter draußen sitzt.
Es gibt aber noch einen zweiten Effekt, den du sicher vom Karussell kennst. Wenn du dich hinauslehnst, dann sinkt die Geschwindigkeit; wenn du dich hineinlehnst, dann steigt sie (das hat mit der Erhaltung des Drehimpulses zu tun, mehr in Kap. 10.4). Durch das Hinausrollen der rechten Kugel sinkt daher die Drehgeschwindigkeit. Das „Übergewicht" der rechten Kugel und das gleichzeitige Abbremsen durch das Hinausrollen sind zwei gegenläufige Effekte, die einander aufheben.



F25 Wenn der Läufer beschleunigt, dann verwandelt er seine chemische Energie in kinetische Energie. Es geht aber praktisch keine Energie in den Boden, weil die Erde so träge ist. Wenn der Schwimmer aber eine Handvoll Wasser einen Meter rückwärts drückt, bewegt sich sein Körper um viel weniger als einen Meter vorwärts, weil die Masse des bewegten Wassers sehr viel geringer ist als die Masse des Schwimmers. Der Schwimmer steckt also viel mehr Energie in das Wasser als in sich selbst. Und eben daher kann ein schlechter Läufer schneller vorwärts kommen als ein hervorragender Schwimmer.

F26 Natürlich nicht. Das Hin- und Herpendeln wird letztlich durch das Verdunsten des Wassers erzeugt, und die Energie dazu kommt in letzter Konsequenz von der Sonne. Die Energie bleibt immer erhalten. Siehe dazu auch Kap. 18, F38.

F27 Man denkt zunächst einmal an 14 m/s. Es addieren sich aber nicht die Geschwindigkeiten, sondern die Energien. Rechnen wir in Energieeinheiten (die Masse spielt keine Rolle): Die kinetische Energie wächst mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Durch das Hinunterfahren gewinnt er also 8 m/s oder 64 Energieeinheiten. Kommt er im zweiten Fall schon mit 6 m/s zur Kuppe, hat er zusätzliche 36 Energieeinheiten. Am Fuße des Hügels besitzt er dann $36 + 64 = 100$ Energieeinheiten. Die richtige Antwort ist daher 10 m/s.

F28 Das Pendel kommt rechts oben nicht zum Stillstand, sondern hat kinetische Energie. Deshalb kann es nicht auf dieselbe Höhe schwingen.

F29 Du kannst so rechnen: Bei 80 m fällt der Stein 4 Sekunden lang. Weil die Geschwindigkeit pro Sekunde um 10 m/s zunimmt, muss er am Ende 40 m/s haben. Oder du setzt in die Gleichung $v = 2 \cdot g \cdot h$ ein, da kommt ebenfalls 40 m/s heraus.

F30 Wenn für eine Feder das Hooke'sche Gesetz gilt, dann ist die Federkraft proportional zur Auslenkung der Feder aus der Ruhelage. Es gilt: $F = D \cdot s$, dabei ist D die Federhärte bzw. Federkonstante. (Für die mechanische Energiezufuhr (bzw. verrichtete Arbeit) gilt aber nicht $\Delta E = F \cdot s$, da die Kraft nicht konstant ist.) Nimm an, du benutzt ein über die Strecke s auf und ab schwingendes Federpendel. Im oberen Umkehrpunkt OU hat es nur Lageenergie:

$E_{pot} = E_{OU} = m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot s$

Im unteren Umkehrpunkt UU hat es nur noch Spannenergie:

$E_{Sp} = E_{UU}$

Wenn sich die gesamte potenzielle Energie in Spannenergie umgewandelt hat, gilt für sie: $E_{Sp} = m \cdot g \cdot s$
Diesen Term drücken wir jetzt mit D und s aus. Hängen wir den Pendelkörper an die Feder, so sinkt er bis zur Gleichgewichtslage ab. Unter dem Einfluss der Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ verlängert sich die Feder um die Strecke s_0 und es gilt:

$D = F_G/s_0 = m \cdot g/s_0$ bzw. $m \cdot g = D \cdot s_0$

Lassen wir dagegen den Pendelkörper im oberen Umkehrpunkt los, schwingt er bis zum unteren durch. Dieser ist doppelt so weit entfernt vom oberen Umkehrpunkt entfernt wie die Gleichgewichtslage:

$s = 2 \cdot s_0$

Mit diesen Gleichungen erhalten wir für

$E_{Sp} = m \cdot g \cdot s = D \cdot s_0 \cdot s = D \cdot \frac{s}{2} \cdot s = ½ \cdot D \cdot s^2$

Oder schnell über das Diagramm:
Im s-F-Diagramm ist die Energie gerade die Fläche unter dem Graphen. Da $F = D \cdot s$, ist der Graph von F eine Ursprungsgerade mit Steigung D, die Fläche unter der Gerade ist also ein Dreieck mit Grundlinie s und Höhe $F(s) = D \cdot s$. Die Fläche $A = ½ \cdot$ Grundlinie $\cdot$ Höhe. Somit ist
$W = ½ \cdot s \cdot D \cdot s = ½ \cdot D \cdot s^2$

F31 Ein Perpetuum mobile hätte einen Wirkungsgrad von über 100 %, weil die Nettoenergie größer wäre als die Bruttoenergie.

F32 100 W sind 100 J/s. Das sind 6 kJ/min und 360 kJ/h. Das ist aber die Nettoenergie. Der Bruttoumsatz ist 5-mal so groß, also 1800 kJ. In diesem Tempo müsstest du rund 17 h fahren, um 1 kg Fett abzunehmen.

F33 Der Gesamthöhenunterschied pro Tag beträgt 30 m und im Jahr somit 10 950 m. Die Nettohubarbeit W_H ist daher $m \cdot g \cdot h =$ 8 213 kJ. Weil der Wirkungsgrad 20 % beträgt, macht die Bruttoarbeit 41 065 kJ aus, das ist der Brennwert von 1 kg Fett.

F34 900 000 t oder $9 \cdot 10^5$ t sind $9 \cdot 10^8$ kg. Die Hubarbeit ist also $9 \cdot 10^9$ J oder $9 \cdot 10^6$ kJ. Magneto muss daher $9 \cdot 10^6$ kJ/2 000 kJ = 4 500 Big Macs zu sich nehmen, um den Energieabfluss auszugleichen! In der Praxis sind es sogar etwa viermal so viel, weil generell nur etwa ein Viertel der chemischen Energie in mechanische Energie umgewandelt werden kann. Der Rest verpufft sofort als Wärme. Brückenheben macht Bärenhunger!

F35 10 000 kJ sind 10^7 J. Der Tag hat 86 400 Sekunden. Watt sind Joule pro Sekunde. Die Leistung des Menschen beträgt daher rund 116 W. Das ist mit der Leistung eines PC vergleichbar. Von einer Kilowattstunde (kWh) spricht man, wenn ein Gerät mit einer Leistung von 1 Kilowatt (1 000 W) eine Stunde lang in Betrieb ist. 1 kWh sind daher $3{,}6 \cdot 10^6$ J. Der Tagesbedarf von 10 000 kJ = 10^7 J entspricht daher über den Daumen 3 kWh. Eine kWh kostet so um die 30 Cent. Würde man einen Menschen mit Strom betreiben, würde das nur etwa 1 Euro kosten.

9 Impuls

F4 Ein Gegenstand allein kann seine Geschwindigkeit nicht ändern. Die Erde bewegt sich dabei unmerklich in die Gegenrichtung. Der Gesamt-KSP Teller-Erde bleibt bei diesem Vorgang an derselben Stelle. Der horizontale Impuls ist vor dem Aufprall null. Die Summe der horizontalen Einzelimpulse p_1 bis p_5 nach dem Aufprall muss daher ebenfalls null sein.

F8 Es geht nur die Energie verloren, die in der Normalkomponente steckt (E_n). Allgemein gilt für den Energieverlust in Abhängigkeit vom Aufprallwinkel:

$v_n = v \sin\alpha \quad \Rightarrow \quad \frac{E_n}{E} = \left(\frac{v_n}{v}\right)^2 = (\sin\alpha)^2$

F12 Die Gummikugel wird den Pflock eher umwerfen! Wenn du eine Tonkugel gegen eine unbewegliche Wand wirfst, dann ist die Geschwindigkeitsänderung $\Delta v = v' - v = 0 - v = -v$. Wenn du einen Flummi gegen die Wand wirfst, dann kehrt sich die Geschwindigkeit um und die Geschwindigkeitsänderung ist $\Delta v = v' - v = (-v) - v = -2v$.
Δv und somit auch Δp sind im zweiten Fall also doppelt so groß. Weil sich der Pflock bewegt, ist der Effekt geringer als Faktor 2. Trotzdem überträgt die elastische Kugel mehr Impuls und wirft den Pflock daher leichter um.

v v' Δv	→ • ←	plastisch
v v' Δv	→ ← ⟵	elastisch

F13 Das Gewicht erhält durch den freien Fall einen Impuls von

$p = m \cdot v = m \cdot \sqrt{2g \cdot h} \approx 4{,}5\,\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

Wenn es weich fällt und der Stoßvorgang 0,5 Sekunden dauert, dann entsteht (zusätzlich zum Gewicht von 10 N) eine Kraft von 9 N. Fällt es aber hart, etwa auf einen Steinboden, und der Stoßvorgang dauert nur 10^{-2} Sekunden, dann entstehen 450 N!

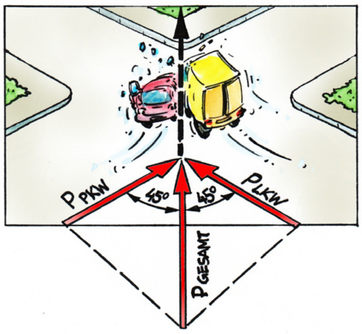
F15 Wenn eine Fliege die Luft mit den Flügeln nach unten drückt, erfährt sie nach dem Wechselwirkungsgesetz eine gleich große Gegenkraft nach oben. Wenn diese Gegenkraft und die Gewichtskraft gleich groß sind, dann bleibt die Fliege an derselben Stelle. Die Luft strömt nach unten, bekommt also einen Impuls. Am Boden wird die Luft wieder abgebremst. Der Impuls sinkt wieder auf null ab und erzeugt einen Kraftstoß. Die entstehende Kraft ist so groß wie das Gewicht der Fliege.

F17 Berechnen wir zuerst den Impuls der Patrone: $m \cdot v =$ 0,02 kg · 900 m/s = 18 kg · m/s. Um die Kraft berechnen zu können, braucht man die Abschussdauer. Wir nehmen vereinfacht an, dass die Kugel gleichförmig beschleunigt. Die Durchschnittsgeschwindigkeit ist daher 450 m/s. $v = s/t$ und daher ist $t = s/v$. Deshalb benötigt die Patrone für 0,5 m $1{,}1 \cdot 10^{-3}$ s. $F = \Delta p/\Delta t$. Auf den Schützen wirken daher beachtliche 16 200 N! Das entspricht dem Gewicht einer Limousine. Allerdings wirkt die Kraft aber extrem kurz. Wenn der Schütze eine Masse von 75 kg hat, dann bekommt er eine Geschwindigkeit $\Delta v = \Delta p/m = 0{,}24$ m/s in die Gegenrichtung. Also fest hinstellen!

F18 Der rollende Wagen hat nur einen horizontalen Impuls, der Regen nur einen vertikalen. Daher kann der Regen den Impuls des Wagens nicht beeinflussen. Es erhöht sich jedoch mit der Zeit die Masse, und nach dem Impulserhaltungssatz muss sich die Wagengeschwindigkeit dadurch verringern.

Das ausfließende Wasser kann keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit des Wagens haben, weil es ja hier keine Wechselwirkung gibt. Das Wasser stößt sich ja nicht ab. Die Geschwindigkeit muss daher gleich bleiben. Gleiche Geschwindigkeit und kleinere Masse bedeuten kleineren Impuls. Der Impuls wird letztlich auf die Erde übertragen.

F19 Die Impulse sind $p_{Pkw} = 1000\,\text{kg} \cdot 20\,\text{m/s} = 2 \cdot 10^4\,\text{kg} \cdot \text{m/s}$ und $p_{Lkw} = 3000\,\text{kg} \cdot 6{,}67\,\text{m/s} = 2 \cdot 10^4\,\text{kg} \cdot \text{m/s}$.
Die Impulse sind somit genau gleich groß. Das bedeutet, dass sich der Gesamtschwerpunkt unter 45° der Kreuzung nähert. Weil der Impuls erhalten bleibt, werden die beiden Autos nach dem Aufprall auch in diese Richtung weiter rutschen.



F20 $[F \cdot t] = \text{N} \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$

F21 Das Gewicht ist sogar einen Tick größer! Es ist ähnlich wie beim Glas voller Fliegen (Frage 15). Zwar befindet sich ein Teil des Sandes im freien Fall, aber es entsteht eine zusätzliche Kraft beim Aufprallen des Sandes. Das gleicht sich aus. Zusätzlich wird aber der Gesamtschwerpunkt des Sandes nach oben beschleunigt, und dadurch wächst die angezeigte Kraft ein wenig.

F22 Die Zeigerbewegung kommt von der Impulsänderung des Blutes, die durch den Rhythmus des Herzens verursacht wird.

F23 Es fliegen immer genauso viele Kugeln weg, wie auf der anderen Seite aufprallen. Würden 2 Kugeln aufprallen und auf der anderen Seite nur 1 Kugel wegfliegen, muss aufgrund der Impulserhaltung $v' = 2v$ gelten. Für die kinetische Energie gilt daher:

$$E_{kin} = \frac{2m \cdot v^2}{2} = m \cdot v^2$$

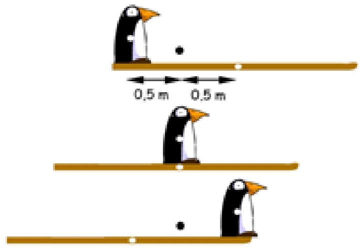
und

$$E'_{kin} = \frac{m \cdot (2v)^2}{2} = \frac{m \cdot 4v^2}{2} = 2m \cdot v^2$$

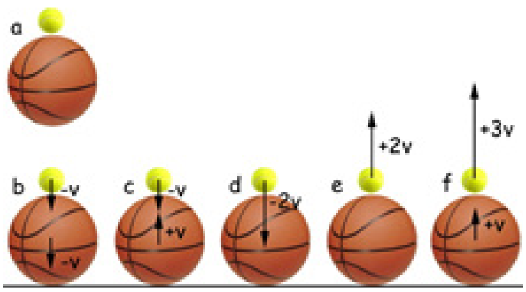
Die kinetische Energie würde sich dann verdoppeln und der Apparat wäre ein Perpetuum mobile!

F24 Die obere Rakete in Abb. 9.26 bewegt sich nach dem Ausströmen nach links. Warum? Wenn der Gesamtschwerpunkt vorher in Ruhe war, dann muss er auch nachher in Ruhe sein. Wenn sich das Gas nach rechts bewegt, muss sich somit die Rakete nach links bewegen. Wie ist das bei der unteren Rakete? Bewegt sich nachher das Gas in irgendeine Richtung? Nein, das Gas ist eingeströmt und in Ruhe. Kann sich somit die Rakete bewegen? Nein, das wäre eine Verletzung des Impulssatzes. Nur während des Einströmens bewegt sich die Rakete etwas rechts.

F25 a) Wenn der Schlitten reibungsfrei gelagert ist, dann treten keine äußeren Kräfte auf. Daher muss der Gesamt-KSP an derselben Stelle bleiben.
b) + c): Weil Pinguin und Schlitten dieselbe Masse haben, bewegen sie sich auch während des Watschelns gleich schnell, aber in die Gegenrichtung. Der Gesamt-KSP bleibt dabei natürlich immer an derselben Stelle. Der Pinguin watschelt relativ zum Brett 2 m nach rechts. Das Brett bewegt sich dabei aber relativ zum Boden 1 m nach links. Also hat sich der Pinguin relativ zum Boden um 1 m bewegt.



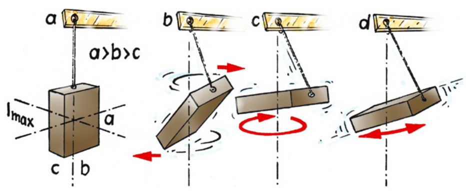
F26 Bei der sogenannten Ballschleuder treten zwei Stöße kurz hintereinander auf. Im Folgenden sind Geschwindigkeiten nach unten mit negativem Vorzeichen versehen. Anfangs fallen beide Bälle mit gleicher Geschwindigkeit $-v$ zu Boden (Abb. a und b). Die momentane Geschwindigkeit ergibt sich aus $v = \sqrt{2g \cdot h}$, wobei h die bisherige Fallstrecke angibt.
Dann trifft der große Ball auf den Boden. b zeigt die Situation genau beim Beginn des Aufpralls. Der große Ball wird nach oben reflektiert. Bei einem angenommenen vollkommen elastischen Stoß wird dabei der Geschwindigkeitsvektor umgedreht. In diesem Augenblick hat der kleine Ball aber noch die Geschwindigkeit $-v$ (c). Großer und kleiner Ball treffen also mit jeweils v aufeinander. Um den spektakulären Abflug des kleinen Balles zu verstehen, ist es am einfachsten, nun das Bezugssystem zu wechseln. Wir legen dieses in Gedanken in den großen Ball (d). Die Situation sieht also so aus: Der kleine Ball prallt mit $-2v$ auf den großen auf. Wenn wir annehmen, dass dessen Masse viel viel kleiner ist, wird diese Geschwindigkeitskomponente einfach umgedreht. Aus dieser Sicht ist es so, als würde der kleine Ball an einer Wand reflektiert. Seine Geschwindigkeit beträgt danach $+2v$ (d + e).
Zum Schluss führen wir eine Rücktransformation durch und sehen uns die Situation wieder aus Sicht des Bodens an. Weil der untere Ball viel schwerer ist, verändert sich seine Geschwindigkeit praktisch nicht, er hat also nach der Reflexion immer noch $+v$. Der kleine Ball hat $+2v$ relativ zum großen Ball und somit nun zum Boden $+3v$ (f). Bei dreifacher Geschwindigkeit kann er aber nun 9-mal so hoch fliegen.



a) die Bälle werden gerade fallen gelassen; b) der untere Ball prallt gerade auf; c) der untere Ball wurde reflektiert und fliegt wieder nach oben; d) dieselbe Situation wie in c), aber aus Sicht des großen Balles; e) der kleine Ball nach dem Aufprall aus Sicht des großen Balles; f) die Bälle nach dem Aufprall aus der Sicht des ruhenden Beobachters

10 Rotationen

F8 Kleine Störungen führen zu Kräften, die den Körper noch weiter von seiner Ausgangsposition auslenken. Nur die Position mit der größten Drehmasse (c) ist stabil.



F14 El Niño bremst die Erde ab! Das Verlagern des Meerwassers in die Regenwolken erhöht die Drehmasse der Erde, so als würde die Eisläuferin ihre Arme bei der Pirouette wieder ausstrecken. Der Effekt liegt nur in der Größenordnung von 1⁄10 000 Sekunde pro Tag. Ähnliches passiert, wenn sich die Kontinentalplatten bei einem Erdbeben nach oben oder unten verschieben. Im zweiten Fall erhöht sich die Rotationsgeschwindigkeit der Erde ein wenig.

F27 Durch den Drall bleiben die Geschosse im Flug stabil, d.h., dass die Spitze während des Flugs auch wirklich nach vorne zeigt. Je größer der Drall, desto weniger wirken sich angreifende Drehmomente aus.

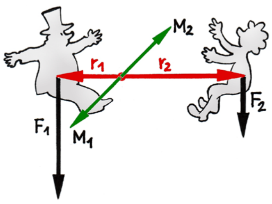
F28 Der Mythos des zurückkehrenden Jagdbumerangs setzt sich aus zwei – für sich alleine richtigen – Tatsachen zusammen. Es gibt nämlich zwei Arten von Bumerangs: 1.) solche, die für die Jagd geeignet sind, aber nicht zurückkehren (Nicht-Rückkehrer, Jagdbumerangs); 2.) solche, die für Sport und Spiel geeignet sind und zurückkehren (Rückkehrer, Sportbumerangs), aber wiederum nicht für die Jagd geeignet sind. Aus der Vermischung dieser beiden Bumerangformen wurde der große Mythos, der bis heute bestehen blieb.

F29 Aus $a = v^2/r$ ergeben sich für a folgende Werte: 4,6 m/s², 18,5 m/s², 41,7 m/s² und 74 m/s². Die letzten beiden Werte entsprechen über $4g$ bzw. $7g$ und sind nicht mehr realistisch.

F30 Sie rutscht, aber dreht sich nicht, weil in diesem Fall kein Drehmoment erzeugt wird.

F31 Nein! Worin liegt dann der Unterschied? Arbeit ist Kraft in Kraftrichtung mal Weg (siehe Kap. 8.1). Die Kraft zeigt also in diesem Fall in Wegrichtung. Das Drehmoment ist aber definiert als Kraft mal Normabstand zur Drehachse (siehe Kap. 10.3). In diesem Fall zeigt die Kraft immer senkrecht auf r.

F32 F, r und M stehen unter 90° aufeinander. M_1 zeigt aus der Buchebene heraus, M_2 zeigt hinein.



F33 Bei Afrikanern und ihren nordamerikanischen Nachfahren ist das Fersenbein tatsächlich oft länger als bei Europäern. Für einen Sprinter ist das allerdings sogar ein Nachteil! Warum? Der Wadenmuskel muss zwar die 2,5fache Kraft aufbringen, dafür bewegt sich aber auch der Fußballen 2,5-mal so schnell wie das Fersenbein. Der Sinn der Fußkonstruktion ist es daher, auf Geschwindigkeit zu übersetzen. Für einen Sprinter ist es daher eher von Vorteil, ein kurzes Fersenbein zu besitzen – vorausgesetzt, er kann mit dem Wadenmuskel die dann erforderliche höhere Kraft erzeugen. Die Dominanz der afroamerikanischen Sprinter ist wohl eher auf den hohen Prozentsatz an schnell zuckenden Muskelfasern zurückzuführen. Ein längeres Fersenbein hat nur dann Sinn, wenn man es nicht eilig hat, aber – wie in Afrika – große Strecken zurücklegen muss. Der Kraftaufwand pro Schritt wird dadurch geringer und die Ökonomie größer.

F34 Wenn sich die Drehmasse halbiert, dann verdoppelt sich die Winkelgeschwindigkeit. Der Drehimpuls bleibt dadurch gleich. Was bedeutet das für die Drehenergie? Diese ist proportional zu $I \cdot \omega^2$. Eine Halbierung von I und Verdopplung von ω bedeutet daher eine Verdopplung der Gesamtenergie. Wo kommt die zusätzliche Energie her? Aus der chemischen Energie in den Muskeln der Läuferin!

F35 Um die Drehmasse zu berechnen, nimmt man zunächst an, dass der rotierende Gegenstand aus vielen kleinen Teilen besteht. Seine kinetische Energie ist dann

$$E_{kin} = \frac{m_1 \cdot v_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot v_2^2}{2} + \frac{m_3 \cdot v_3^2}{2} \ldots$$

Nun ersetzt man die Tangentialgeschwindigkeit durch $v_i = \omega \cdot r_i$ und erhält

$$E_{kin} = \frac{m_1 \cdot \omega^2 \cdot r_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot \omega^2 \cdot r_2^2}{2} + \frac{m_3 \cdot \omega^2 \cdot r_3^2}{2} \ldots$$

Wenn man ausmultipliziert, ergibt sich

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \cdot \sum m_i \cdot r_i^2 = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

I ist daher

$$\sum m_i \cdot r_i^2$$

F36 Die erforderliche Mindestgeschwindigkeit am höchsten Punkt beträgt

$$v = \sqrt{g \cdot r}$$

Die Geschwindigkeit hängt aber gleichzeitig immer von der Fallhöhe h ab, und zwar mit der Gleichung

$$v = \sqrt{2g \cdot h}$$

Man kann daher gleichsetzen und nach h auflösen: $h = r/2$. Generell muss also mindestens 0,5 Radien über dem Looping gestartet werden. Im konkreten Fall sind das 1,5 m über dem Looping bzw. 7,5 m über dem Boden.

F37 Für die Winkelgeschwindigkeit ergibt sich

$$m \cdot \omega^2 \cdot r = m \cdot g \quad \Leftrightarrow \quad 90\,\omega^2 = 10\,\frac{m}{s^2} \Leftrightarrow \omega = \sqrt{\frac{10}{90}} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{3}\,\frac{1}{s}$$

Das bedeutet für die Umlaufzeit T:

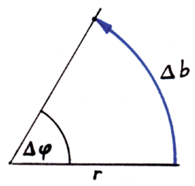
$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \Rightarrow \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = 18{,}85\,s$$

Die Winkelgeschwindigkeit muss zur Erzeugung einer normalen Schwerkraft $\frac{1}{3}\,\frac{1}{s}$ sein, das ergibt eine Umlaufzeit von knapp 19 Sekunden. Die Schwerkraft wäre aber anders als in der Fernsehserie Star Trek dargestellt, weil sie nach außen wirken würde. Die Köpfe der Insassen würden also zueinander zeigen (wie in Abb. 10.53 rechts). Außerdem würden bei Bewegung unangenehme Corioliskräfte auftreten.

F38 Je nach Geschwindigkeit beträgt die Coriolisbeschleunigung nur 10^{-5} bis $10^{-3}\,g$, ist also verschwindend klein. Einige Leute schwören darauf, dass sich die Wirbel in allen Abflüssen auf der nördlichen Hemisphäre gegen den Uhrzeigersinn drehen. Tatsache ist aber: Das Wirbeln in eine Richtung ist bedingt durch so unkontrollierbare Faktoren wie Form des Abflusses oder die Richtung, in die der Stöpsel herausgezogen wird, restliche Wirbel vom Einlaufen des Wassers, Luftströmungen über dem Wasser oder Form und Lage des Beckens, sodass die Corioliskraft selbst wohl kaum einen Einfluss hat. Auch bei der asymmetrischen Abnutzung von Eisenbahnschienen handelt es sich um eine Ente. Die geringste Abweichung der Gleisverlegung von der Horizontalen (um 0,1 mm) oder die leiseste Kurve (Kurvenradius etwa 200 km!) haben einen stärkeren Effekt auf die Asymmetrie der Abnutzung.
Bei der Erosion der Flussufer gehen die Meinungen auseinander. Immerhin kann das Wasser eines 1 km breiten, in N-S-Richtung fließenden Stroms tatsächlich am rechten Ufer bis zu 1 cm höher stehen als am linken. Sind Bodenwellen vorhanden, so wäre es denkbar, dass sich der Fluss nach rechts an sie heranarbeitet und die Flussufer somit asymmetrisch erodieren.

F39 Die Gleichung für die Geschwindigkeit lautet allgemein $v = \Delta s/\Delta t$. Bei einer Kreisbewegung entspricht der zurückgelegte Weg dem Kreisbogen Δb, also $v = \Delta b/\Delta t$. Der Kreisbogen berechnet sich aus $\Delta b = r \cdot \Delta\varphi$ (siehe Abb.). Außerdem gilt $\omega = \Delta\varphi/\Delta t$. Daraus folgt:

$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = r \cdot \omega$



F40 Der Radius der Zu- und Abfahrten nimmt langsam zu, erreicht seinen kleinsten Wert (= stärkste Krümmung) und nimmt dann wieder ab. Eine solche Kurvenform nennt man eine Klothoide. Würde die Kurve quasi ansatzlos beginnen, also gleich mit dem minimalen Radius, müsste man ruckartig einlenken, wenn man nicht an den Rand der Fahrbahn gelangen will,und das ist gefährlich. Klothoiden dienen daher der Fahrsicherheit.

F41 Das rohe Ei ist schneller unten. Weil es innen noch flüssig ist, rotiert nicht die gesamte Masse. Daher nimmt es auch weniger Rotationsenergie auf, wodurch die Translationsenergie und somit auch die Geschwindigkeit größer sein müssen. Andere Sichtweise: Weil es innen flüssig ist und nicht die gesamte Masse rotiert, ist die Drehmasse des rohen Eies geringer. Daher setzt es sich bei gleichem Drehmoment schneller in Bewegung.

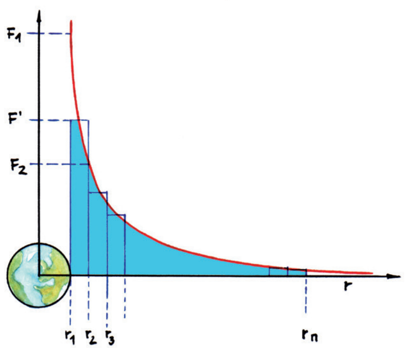
F42 Die Erklärung liegt in der Erhaltung des Drehimpulses. Durch die Drehung der Bänder in der Kassette kam es zu einer winzigen Gegendrehung der gesamten Sonde. Das Bodenpersonal musste den Bordcomputer so umprogrammieren, dass gleichzeitig mit dem Ein- oder Ausschalten des Recorders ein kurzer Schub der Triebwerke ausgelöst wurde, der die Rotation ausglich.

11 Newtons Gravitationsgesetz

F16 Im ersten Fall würde das Kaninchen zwischen Nord- und Südpol hin und her pendeln. Auch in einem Tunnel unter der Erde wäre eine Kreisbahn möglich. Die notwendige Zentripetalkraft wäre dann aber geringer als an der Oberfläche und somit auch die Geschwindigkeit.

F27 Für die Hubarbeit im homogenen Gravitationsfeld gilt: $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ oder anders geschrieben $E_{pot} = F_G \cdot h$. Bei einer allgemeinen Gleichung zur Arbeit im Gravitationsfeld muss man das Gravitationsgesetz $F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ berücksichtigen. Die Arbeitsberechnung im Gravitationsfeld erfordert die Flächenberechnung unter einem nicht geradlinigen Graphen (siehe Abb.). Dazu muss man den Weg in kleine Intervalle teilen. Der Arbeitsbetrag W_1, der dem ersten (linken) Rechteck zuzuordnen ist, lautet:

$W_1 = F' \cdot (r_2 - r_1)$



Eine brauchbare Näherung für F' ist das geometrische Mittel aus F_1 und F_2, also

$F' = \sqrt{F_1 \cdot F_2} = G \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \sqrt{\frac{1}{r_1^2 \cdot r_2^2}} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r_1 \cdot r_2}$

Für die Arbeit ergibt das dann:

$W_1 = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r_1 \cdot r_2} \cdot (r_2 - r_1) = G \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \left(\frac{r_2}{r_1 \cdot r_2} - \frac{r_1}{r_1 \cdot r_2}\right) =$

$G \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$

Die gesamte Arbeit kann man nun berechnen, indem man alle Teilarbeiten addiert: $W_H = W_1 + W_2 + W_3 \ldots$

Setzt man für die Teilarbeiten ein, erhält man:

$W_H = G \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3}\right) + \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right) + \ldots + \left(\frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{r_n}\right)\right]$

Wenn man die Klammern nun weglässt, kann man den Ausdruck stark vereinfachen:

$W_H = G \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_n}\right)$

Man muss also nur den Abstand vor (r_1) und nach der Hebung (r_n) einsetzen.

F28 Wenn du die entsprechenden Werte in das Gravitationsgesetz einsetzt und den Abstand für die Füße mit 1000 km und für den Kopf mit 1000 km + 1 m annimmst, dann bekommst du eine Kraftdifferenz von 2667 N pro kg. Kopf und Füße werden daher mit einer Kraft auseinandergezogen, die der 267fachen Erdanziehungskraft entspricht. Wärst du nur 1 m groß, dann wäre die Gezeitenkraft nur halb so groß (1334 N). Wenn du dich auf 100 km genähert hättest, wäre bei einer Größe von 2 m die Gezeitenkraft bereits auf $2{,}7 \cdot 10^6$ N/kg angewachsen!

F29 Wir nehmen an, dass das Baby 3,5 kg und der Arzt 100 kg hat und ihr kleinster Abstand 0,5 m beträgt, dies ergibt: $F = 9{,}34 \cdot 10^{-8}$ N. Die Gravitationskraft des Jupiter ist 12-mal und jene der Venus 6,9-mal größer, die aller anderen Planeten kleiner.

F30 Das liegt daran, dass die Raumkrümmung in der Nähe der Sonne besonders stark ist. Alle anderen Planeten bewegen sich in so großer Entfernung, dass der Raum dort praktisch nicht gekrümmt ist.

F31 Würde ihr Eintritt nur von der Erdrotation abhängen, gäbe es sie alle 24 Stunden. Doch der Mond rotiert um die Erde. So erreicht er jeden Tag um durchschnittliche 50 Minuten später seinen höchsten Punkt.

F32 Die Winkelgeschwindigkeit der Erde um die Sonne ist $\omega = 2\pi/T$, wobei T einem Jahr in Sekunden entspricht. T ist also $365 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24\,\text{s} \approx 3{,}15 \cdot 10^7\,\text{s}$. Die Zentripetalkraft wird durch die Gravitationskraft hervorgerufen. Man kann daher beide Kräfte gleichsetzen und nach M_{Sonne} auflösen:

$\frac{(G \cdot M_{Erde} \cdot M_{Sonne})}{r^2} = M_{Erde} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \pi \quad \Rightarrow \quad M_{Sonne} = \frac{\omega^2 \cdot r^3}{G} = \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{G \cdot T^2}$

Wenn man die bekannten Werte einsetzt, erhält man für M_{Sonne} $2 \cdot 10^{30}$ kg, was sehr gut dem in der Literatur angeführten Wert entspricht.

F33 Der Komet wurde aufgrund der Gezeitenkräfte des Jupiter auseinandergerissen.

F34 Die Formel für die potenzielle Energie im Gravitationsfeld einer Zentralmasse lautet $E_{pot} = G \cdot m \cdot M \cdot (\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_n})$. Nehmen wir an, dass sich das Teilchen zuerst in extrem großer Entfernung befunden hat. Der negative Term in der Klammer ist daher praktisch null und kann vernachlässigt werden. Nehmen wir weiter an, dass die Geschwindigkeit des Brockens zu Beginn null war. Aufgrund des Energiesatzes muss sich daher die potenzielle Energie vollständig in kinetische Energie umwandeln. Wir können diese beiden Energien daher gleichsetzen und nach v auflösen:

$\frac{G \cdot m \cdot M}{r_1} = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2G \cdot M}{r_1}}$

Das ist im Prinzip die Formel für die Fluchtgeschwindigkeit. Es ist ähnlich wie bei einem senkrechten Wurf auf der Erde: Wenn man den Luftwiderstand vernachlässigt, prallt der Ball nach einiger Zeit wieder mit der Abwurfgeschwindigkeit auf. Das gilt auch für das inhomogene Schwerefeld. Gäbe es keine Atmosphäre, würden wir somit 11,2 km/s als Aufprallgeschwindigkeit erwarten. Wir wollen aber berechnen, wie groß die Geschwindigkeit in 250 km Höhe ist. Daher ist ein etwas kleinerer Wert zu erwarten. Wenn man die bekannten Daten einsetzt (wobei r_1 = Erdradius + 250 km ist), erhält man rund 11 km/s. Warum wird die Geschwindigkeit in den meisten Fällen größer sein? Weil die Sonne den Brocken zusätzlich beschleunigt!

12 Grundlagen der Schwingungen

F2 Die Masse hat keinen Einfluss. Wenn du stehst, dann wird aber die effektive Pendellänge geringer und du schaukelst schneller. Auf dem Mond wäre aufgrund der geringeren Anziehung das Schaukeln relativ langweilig.

F14 Weil die Frequenz (fast) nicht von der Auslenkung abhängig ist.

F24 Es scheint eigentlich so, als wäre es im Alltag viel wichtiger, dass Schwingungen gedämpft sind, bei Schwingtüren, Autos, Zügen, Straßenbahnen oder bei Gebäuden aller Art. Eine ungedämpfte Schwingung wäre bei einer mechanischen Uhr günstig, weil man diese dann niemals aufziehen müsste.

F27 Wenn man stark Gas gibt, führt das nur dazu, dass sich die Räder noch tiefer eingraben. Man kann aber das Auto aus den Mulden „schaukeln". Man gibt kurz Gas, das Auto rollt ein wenig aus der Mulde und wieder zurück. Am tiefsten Punkt gibt man wieder Gas und so weiter. Wenn das Gasgeben in der Eigenfrequenz der Schaukelbewegung erfolgt (Resonanzfrequenz), kann man die Bewegung immer mehr verstärken – bis man frei ist.

F32 Das Rauschen des Meeres in einer Muschel kommt nicht vom Meer (und auch nicht vom eigenen Trommelfell oder vom fließenden Blut), sondern von den Geräuschen der Umgebung. Die Muschel verstärkt jene Geräusche, die in ihrer Resonanzfrequenz schwingen. Du kannst auch in einem Staubsaugerrohr das Meer rauschen hören. Wenn du die Länge des Rohres veränderst, dann verändert das Rauschen seine Höhe: Je länger das Rohr, desto tiefer der Ton. Die Schwingung des Trommelfells kann man nicht hören, weil diese einfach viel zu leise ist.

F34 In der Position in Abb. 12.40 ist der Ring verkantet und die Reibung zwischen Ring und Stange so groß, dass der Specht haftet. Wenn man ihn in Schwingungen versetzt, dann kippt der Ring hin und her und kann für kurze Zeit rutschen, ehe er wieder haftet. Dadurch ruckelt der Specht langsam die Stange hinunter.

F41 Durch die Gezeitenkraft wird bei Springflut tatsächlich mehr Flüssigkeit in die Pflanzen gezogen – allerdings auch bei Neumond!

F47 Harmonische Schwingungen entstehen, wenn die rücktreibende Kraft proportional zur Auslenkung (x) ist. In diesem Fall gilt das Hooke'sche Gesetz $F = D \cdot x$ (siehe Kap. 7.4.3), wobei D die Federkonstante ist. Des Weiteren gilt das 2. Newton'sche Axiom $F = m \cdot a$ (siehe Kap. 7.3). Die Beschleunigung a ist wegen der engen Verwandtschaft der harmonischen Schwingung zur Kreisbahn die Zentripetalbeschleunigung $a = \omega^2 \cdot x$ (siehe Kap. 10.6). Dabei ist $\omega = 2\pi/T$. Wenn man nun gleichsetzt, erhält man $D \cdot x = m \cdot \omega^2 \cdot x$ und für die Schwingungsdauer einer harmonischen Schwingung gilt:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}}$$

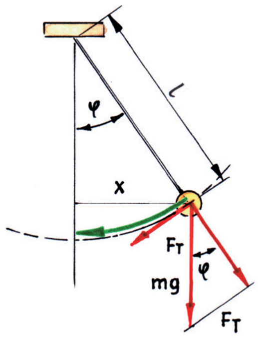
Diese Gleichung gilt allgemein und auch speziell für das Federpendel.

F48 Bei einer Auslenkung φ wirkt auf die Pendelmasse eine rücktreibende Kraft $F_T = m \cdot g \cdot \sin\varphi$ (siehe Abb.). Bei kleinen Auslenkungen gilt $\sin\varphi \approx \varphi$ und somit

$$F_T = m \cdot g \cdot \varphi = m \cdot g \cdot \frac{x}{l} = D \cdot x \text{ mit } D = \frac{m \cdot g}{l}$$

Die rücktreibende Kraft ist bei kleiner Schwingungsweite proportional zur Auslenkung. Das Pendel führt daher eine harmonische Schwingung aus (siehe Kap. 12.3). Wenn man nun für D einsetzt, erhält man für die Schwingungsdauer eines Fadenpendels

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{\frac{m \cdot g}{l}}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$



F49 Tatsächlich wäre zum Beispiel die Gleichung $\ddot{s}(t) + s(t) = 0$ unmöglich, weil die Einheiten nicht stimmen. In der richtigen Differentialgleichung stehen aber $\ddot{s}(t)$ und $s(t)$ nicht nackt da, sondern in einem Produkt mit anderen Größen: $m \cdot \ddot{s}(t) + k \cdot s(t) = 0$. Was bedeutet das für die Einheiten?

$$[m \cdot \ddot{s}(t)] = \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} = \mathrm{N} \text{ und } [k \cdot s(t)] = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}} \cdot \mathrm{m} = \mathrm{N}$$

In beiden Fällen handelt es sich bei den Summanden um Kräfte, und die Einheit muss daher in beiden Fällen N sein!

F50 Wäre das Minus nicht da, würde also $F = m \cdot a = k \cdot s$ gelten. Dann würde es sich aber nicht um einen Oszillator handeln, weil die Beschleunigung in dieselbe Richtung wie die Auslenkung zeigen würde. Spricht: Je mehr das Ding ausgelenkt ist, desto größer wäre die Beschleunigung vom Nullpunkt weg, und es würde sich immer schneller von der Nulllage wegbewegen.

F51 Ewig lange! Je besser die Übereinstimmung ist, desto weiter auseinander liegen die Schwebungen. Auch wenn die Schwebungen eine Minute auseinander liegen, sind sie immer noch da. Um eine perfekte Stimmung zu bekommen, braucht man ewig lang Zeit.

F52 Erstens darf die Reibung nicht zu gering sein, weil das Spielzeug sonst rutscht. Die zweite Bedingung ist die, dass die Pendelfrequenz der Beine mit der Links-Rechts-Bewegung des gesamten Tiers übereinstimmt.

F53 16,4 Sekunden!

F54 Liegt der Körperschwerpunkt eines rotierenden Teiles nicht genau in der Drehachse, beginnt er zu schwingen. Das kannst du manchmal bei Deckenventilatoren sehen. Diese Schwingung ist umso stärker, je genauer die Drehzahl mit der Eigenfrequenz übereinstimmt. Und diese Eigenfrequenz wird eben bei einer bestimmten Drehzahl erreicht. Was kann man dagegen tun? Man kann den Reifen auswuchten lassen. Dabei werden zusätzliche Massenstücke angebracht.

F55 Das Pfeifen des Lautsprechers hat zwar mit Rückkopplung, nicht aber mit Resonanz zu tun. Der Lautsprecher verstärkt alle

Frequenzen, nicht nur eine bestimmte! Resonanzphänomene sind aber immer mit einer bestimmten Frequenz verbunden.

F56 Stimmt nicht! Zwar ist es üblich, dass Soldaten beim Überqueren von Brücken normal marschieren, jedoch gibt es keinen dokumentierten Fall, in dem eine Brücke durch die Resonanz der Schritte eingestürzt ist. Die Millennium-Brücke in London (Abb. 12.36) hat aber gezeigt, dass Brücken zumindest sehr stark zu schwingen anfangen können.

13 Wellengrundlagen (1)

F10 Eine Lichtwelle benötigt kein Medium! → **F29**!

F16 Beim 400-m-Lauf sind die Startblöcke um jeweils rund 7,5 m versetzt. Der Startblock auf Bahn 8 ist daher etwa 50 m von Bahn 1 entfernt. Wenn der Starter direkt hinter Bahn 1 die Pistole abschießen würde, dann bräuchte der Schall zu Bahn 8 rund 15⁄100 Sekunden. Ähnliches gilt natürlich auch für den 100-m-Lauf, obwohl bei diesem die Zeitverzögerung nicht so groß ist.

F17 Ein krabbelnder Käfer erzeugt Wellen im Sand, quasi ein Mini-Erdbeben. Diese Wellen nützt der Sandskorpion zur Ortung im Dunkeln, denn er hat „Seismografen" in den Füßen. Die Richtung zur Beute kann er leicht feststellen, je nachdem welches seiner 8 Beine zuerst die Wellen wahrnimmt (siehe Abb.). Woher weiß er aber die Entfernung? Weil sich Longitudinalwellen im Sand 3-mal so schnell ausbreiten wie Transversalwellen (v_l etwa 150 m/s, v_t etwa 50 m/s) und sie daher zu unterschiedlicher Zeit bei ihm auftreffen. Es gilt: $v = s/t$ und daher $t = s/v$

Das rechte hintere Bein nimmt die erste Welle wahr. Das zeigt dem Skorpion die Richtung zum Käfer. Der zeitliche Abstand zwischen den Wellenfronten gibt Aufschluss über die Entfernung der Beute.

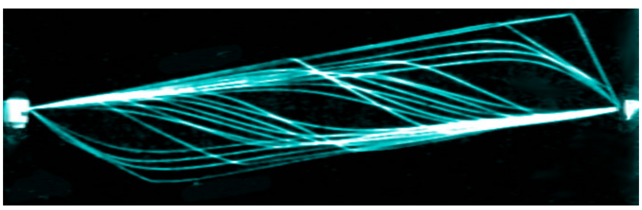
Für die Zeitdifferenz bis zum Eintreffen der beiden Wellen ergibt sich dann (rechne nach):

$$\Delta t = \frac{s}{v_t} - \frac{s}{v_l} = s \cdot \left(\frac{v_l - v_t}{v_l \cdot v_t}\right) \Rightarrow s = \frac{75\,\text{m}}{\text{s}} \cdot \Delta t$$

Ist die Zeitdifferenz zum Beispiel 4 ms, dann ist der Käfer 0,3 m oder 30 cm entfernt. Mahlzeit! Nach derselben Methode kann man auch mit einem wirklichen Seismografen feststellen, wie weit ein Erdbeben entfernt war.

F24 Durch das Anblasen werden zwar alle möglichen Frequenzen erzeugt, es „überleben" aber nur die Wellen, die in die Flasche passen. Alle anderen löschen sich durch destruktive Interferenz aus.

F26 Eine gezupfte Saite schwingt mit einem starken Knick (siehe Abb.). Für einen solchen Knick sind aber sehr viele Obertöne notwendig und das hört man sofort am Klang.

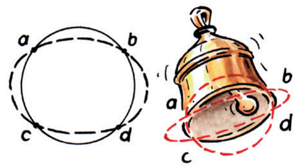


F29 Die Antwort auf diese Frage war lange ein großes Rätsel. 1905 konnte Albert Einstein aber zeigen, dass Licht und elektromagnetische Wellen allgemein kein Medium zur Ausbreitung brauchen. Das ist deshalb möglich, weil man sie als Welle und Teilchen zugleich betrachten kann, und fliegende Teilchen brauchen kein Medium. Diese Erkenntnis ist eine der Grundlagen der Relativitätstheorie.

F30 Die Erdbebenwellen eines Atomtests schwingen nur longitudinal.

F31 Für Transversalwellen ist eine Bindung zwischen den Teilchen nötig (wie bei den Pendeln in Abb. 13.10 a). In Flüssigkeiten und Gasen sind die Teilchen aber nicht untereinander verbunden.

F32 Wenn der Klöppel an die Glocke schlägt, wird der Rand zu einer Ellipse verbogen. Die Glocke beginnt dann, von einer Ellipsenform zu einer anderen zu schwingen – es bildet sich also eine stehende Welle aus. An vier Punkten schwingt die Glocke daher gar nicht und dort ist auch nichts zu hören.



F33

F34 Nein! Sieh dir die Gleichungen in Abb. 13.17 an!

F35 Trägt eine Wasserwelle Energie? Ja! Eine Welle bedeutet ja den Transport von Energie. Eine Wasserwelle kann aber einen Korken nicht verschieben. Sie hat keinen Nettoimpuls. Was bedeutet das? Der Nettoimpuls, also die Summe der Impulse in den Einzelteilen der Welle, ist bei einer Wasserwelle null. Gleiches gilt auch für den Schall.

F36 Die Schallgeschwindigkeit entspricht der Ausbreitung der Kompressionswelle. Wie erfährt ein Luftmolekül von diesem Luftüberdruck? Nur durch Zusammenstoß mit den anderen Luftteilchen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls hängt also davon ab, wie schnell die Moleküle von ihren Nachbarn „informiert" werden. Weil bei höheren Temperaturen die thermische Geschwindigkeit größer ist, ist auch die Schallgeschwindigkeit größer.

F37 Aufgrund der Dispersion der Schallwellen im Eis: Die hohen Frequenzen breiten sich schneller aus.

F38 Bei einer Wellenlänge von 200 km müsste das Meer rund 33 km tief sein, damit der Tsunami nicht durch den Boden gebremst wird. Der Tsunami hätte dann rund 570 m/s (über 2 000 km/h)!

F39 Das demonstriert eindrucksvoll, dass sich nur eine Störung ausbreitet. Die Luftmasse schwingt ja nicht gleichzeitig.

F40 Weil sich an Decke und Boden Wellenknoten ausbilden, entspricht die Höhe der halben Wellenlänge. Eine 6-m-Schallwelle hat bei Zimmertemperatur eine Frequenz von 57 Hz. So tief kann kein Mensch singen. Aber auch bei 114 Hz, 171 Hz … kannst du Resonanz erzeugen, also bei allen Obertönen.

14 Wellengrundlagen (2)

F20 **INFO Doppel-Doppler-Effekt:** Zunächst ist das Blutkörperchen der „Beobachter“. Daher gilt (v_{Obj} ist die Geschwindigkeit des Blutkörperchens, v die des Schalls):

$$\Delta f = f' - f = f \cdot \left(1 - \frac{v_{\text{obj}}}{v}\right) - f = f \cdot \frac{v_{\text{obj}}}{v}$$

Dann ist das Blutkörperchen der „Sender“ und es gilt:

$$\Delta f = f' - f = f \cdot \frac{1}{1 + \frac{v_{\text{obj}}}{v}} - f = f \cdot \frac{v_{\text{obj}}}{v + v_{\text{obj}}} \approx f \cdot \frac{v_{\text{obj}}}{v}$$

Weil die Schallgeschwindigkeit v viel größer ist als die des Blutkörperchens, kann man den vorletzten Term vereinfachen. Durch den doppelten Doppler-Effekt ergibt sich daher $|\Delta f_{\text{ges}}| \sim 2f \cdot (v_{\text{Obj}}/v)$.

Straßenverkehr: Im Falle von elektromagnetischen Wellen sind die Gleichungen für Bewegung von Sender und Empfänger gleich.

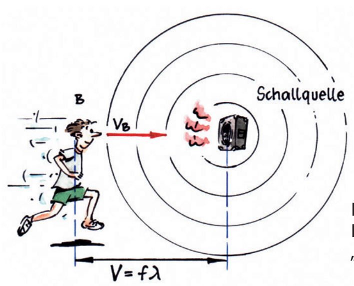
Daher gilt: $\Delta f = f \cdot \frac{1 - \frac{v_{\text{obj}}}{c}}{1 + \frac{v_{\text{obj}}}{c}} - f$ und die Näherung $1 - \frac{1-x}{1+x} \approx 2x$

Deshalb ergibt sich auch in diesem Fall $|\Delta f_{\text{ges}}| \sim 2f \cdot (v_{\text{Obj}}/v)$

F24 Mechanische Wellen: Würde der Beobachter ruhen, so würden pro Sekunde die auf einer Strecke SB liegenden Wellenberge mit $v = \lambda \cdot f_Q$ vorbeilaufen (siehe Abb.). Er würde die Frequenz f_Q wahrnehmen. Wenn er sich bewegt, dann durchläuft er in einer Sekunde zusätzlich v_B/λ Wellenberge. Er nimmt daher eine größere Frequenz wahr:

$$f_B = f_Q + \frac{v_B}{\lambda} = f_Q + \frac{v_B \cdot f_Q}{v} = f_Q \cdot \left(1 + \frac{v_B}{v}\right)$$

Bei einer Bewegung von der Schallquelle weg ist v_B durch $-v_B$ zu ersetzen.

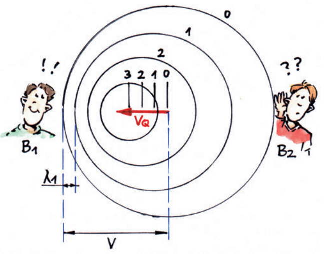


Bewegter Beobachter: Der äußerste Kreis hat den Durchmesser einer „Schallsekunde“.

Wie sieht es bei einer bewegten Quelle aus? Die Schallquelle S ist zur Zeit $t = 0$ bei 0 (siehe Abb.) und erregt einen Wellenberg. Während sie sich in einer Sekunde um v nach links verschiebt, erregt sie in den Punkten 1, 2, 3 und 4 weitere Wellenberge (mit z.B. $f_Q = 4\,\text{Hz}$). Alle diese Wellenberge sind zur selben Zeit $t = 1\,\text{s}$ eingezeichnet.
Für den bei 0 zur Zeit $t = 0$ erregten Wellenberg ist $r = v \cdot 1\,\text{s}$, für den bei 1 erregten Wellenberg ist $r = v \cdot 0{,}75\,\text{s}$. Zum Beobachter gelangt eine kleinere Wellenlänge $\lambda_1 = (v - v_Q)/f_Q$. Daraus folgt

$$f_B = \frac{v}{\lambda_1} = f_Q \cdot \frac{v}{v - v_Q} = f_Q \cdot \frac{1}{1 - v_Q/v}$$

Für Beobachter 2 ist v_Q durch $-v_Q$ zu ersetzen.



Bewegte Quelle

Elektromagnetische Wellen: Nimm an, dass sich eine Lichtquelle mit der Geschwindigkeit v von dir entfernt. In Analogie mit einer sich entfernenden Quelle bei einer Schallwelle kann man daher die Frequenz so schreiben:

$$f_B = f_Q \cdot \frac{1}{1 - v_Q/c}$$

Bei hohen Geschwindigkeiten tritt aber zusätzlich ein Effekt auf, den man die Zeitdehnung nennt: Für bewegte Objekte vergeht die Zeit langsamer und daher sinkt auch die Frequenz f_Q um den Faktor

$$\sqrt{1 - \frac{v_Q^2}{c^2}}$$

ab. Wenn man diesen Effekt in der oberen Gleichung berücksichtigt,

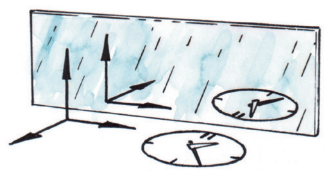
erhält man $f_B = f_Q \cdot \frac{\sqrt{1 - v_Q^2/c^2}}{1 + v_Q/c}$. Wir ersetzen nun $\frac{v_Q}{c}$ durch a.

$$f_B = f_Q \cdot \frac{\sqrt{1 - a^2}}{1 + a} = f_Q \cdot \frac{\sqrt{1 - a^2}}{\sqrt{(1 + a)^2}} = f_Q \cdot \frac{\sqrt{(1 - a)(1 + a)}}{\sqrt{(1 + a)(1 + a)}} = f_Q \cdot \frac{\sqrt{1 - a}}{\sqrt{1 + a}}$$

Wenn man nun wieder einsetzt, erhält man $f_B = f_Q \cdot \frac{\sqrt{1 - v_Q/c}}{\sqrt{1 + v_Q/c}}$

Weil EM-Wellen kein Medium zur Ausbreitung benötigen, spielt es keine Rolle, ob sich die Quelle oder der Beobachter bewegt. Man kann daher die Geschwindigkeit der Quelle v_Q durch die Relativgeschwindigkeit zwischen Beobachter und Quelle v_{BQ} ersetzen. Bei Annäherung befindet sich im Zähler ein + und im Nenner ein −.

F25 Nein! Sieh dir das Bild an. Die Pfeile, die hinauf und nach rechts zeigen, tun das auch im Spiegel. Der Pfeil, der rauszeigt, zeigt aber im Spiegel hinein. Ein Spiegel vertauscht vorne und hinten!



F26 Es gibt zwei einfache Argumente, die dagegen sprechen. Damit das Licht der Kerze auf diese Weise gesammelt werden kann, müsste der Brechungswinkel β immer null sein. Das wäre nur möglich, wenn die Lichtgeschwindigkeit im Glas null wäre. Aber dann würde das Licht praktisch im Glas stecken bleiben. Außerdem ist das Fermat-Prinzip nicht erfüllt. Denn alle Lichtstrahlen haben den gleichen Weg durch das Glas. Somit können die Randstrahlen keine Zeit gewinnen und kommen später an.

F27 Die Unebenheiten eines „Spiegels“ müssen viel kleiner sein als die Wellenlänge. Bei sichtbarem Licht ist dazu eine möglichst glatte Glas- oder Metallplatte notwendig. Radarstrahlen haben aber eine so große Wellenlänge, dass für sie sogar ein Drahtgitter glatt wirkt.

F28 Nein. Diese Frage führt auf direktem Weg zur Relativitätstheorie. Eine Lichtmauer im Sinn einer Schallmauer gibt es nicht, weil Licht von der Warte eines Raumschiffpiloten auch nach vorne immer c hat und – im Gegensatz zur Schallwelle – nicht eingeholt werden kann.

F29 Die Geschwindigkeiten verhalten sich wie $1 : 0{,}74$. Auf dasselbe kommst du natürlich, wenn du die Strecken BB′ und AA′ vermisst.

F32 Weil die Spitze der Peitsche die Schallmauer durchbricht!

F33 Nimm die Gleichung aus Tab. 20.1, setze die für Autostraßen erlaubte Maximalgeschwindigkeit von 100 km/h (27,8 m/s) und für die Schallgeschwindigkeit 340 m/s ein. Es geht hier nur ums Frequenzverhältnis:

$$\frac{\frac{1}{1-v_Q/v}}{\frac{1}{1+v_Q/v}} = \frac{1+v_Q/v}{1-v_Q/v} = \frac{1+27{,}8/340}{1-27{,}8/340} = 1{,}178$$

Das erlaubte Frequenzverhältnis ist 1,177. Wenn du „Kuckuck" hörst, liegt aber ein Frequenzverhältnis von $6/5 = 1{,}2$ vor. Das Auto war also zu schnell. „Kuckuck" entspricht 111 km/h! F1-Wagen erreichen maximal rund 300 km/h (83,3 m/s). Das ergibt ein Frequenzverhältnis von rund 5 : 3. Das ist eine große Sext. Für eine Oktav müsste das Auto 408 km/h (113,3 m/s) fahren. Das schafft auf den üblichen Rennstrecken nicht einmal ein F1-Auto!

F34 Mechanische Wellen brauchen zur Ausbreitung ein Medium, elektromagnetische Wellen nicht. Deshalb ist es auch sinnlos, von einer Bewegung der Quelle oder des Beobachters zu sprechen. Es gibt dann eben nur Relativbewegungen.

F35 Echo und Hall entstehen durch Reflexion von Schallwellen. Beim Hall ist so wenig Zeit zwischen dem ursprünglichen Geräusch und dem reflektierten, dass wir es nicht wirklich trennen können. Beim Echo entsteht eine ganz deutliche Pause dazwischen.

15 Sprache und Gehör

F14 Je stärker eine Saite gespannt ist, desto stärker ist auch die Rückstellkraft. Eine stärker gespannte Saite schwingt daher nach Auslenkung schneller durch die Mittellage. Daher ist ihre Frequenz dann höher. Je größer die Masse der Saite ist, desto träger ist sie und desto langsamer schwingt sie zurück. Die Frequenz wird dann kleiner. Deshalb müssen alle Größen, die mit der Masse zu tun haben, im Nenner sein: Länge, Dichte und Querschnitt.

F15 Die Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Transversalwelle auf einer Saite kann aus der sogenannten Wellengleichung erfolgen, ist mathematisch aber ziemlich kompliziert. Wir begnügen

uns hier mit dem Endergebnis $v = \sqrt{\frac{F}{\varrho \cdot A}}$

Eine stehende Welle entsteht durch die Überlagerung von zwei gleichen, gegenläufigen Wellen (siehe Abb. 13.27). Nimm an, dass du eine Saite in der Mitte anzupfst. Dieser Wellenbauch breitet sich in beide Richtungen aus, wird am Rand reflektiert, läuft zurück bis zum anderen Ende, wird noch einmal reflektiert und kommt wieder in die Mitte zurück. Dann ist eine komplette Schwingung absolviert. Dazu muss der Wellenbauch zweimal die Saitenlänge ($= 2l$) zurücklegen. Die Frequenz der Schwingung beträgt daher $f = v/2l$ und somit gilt:

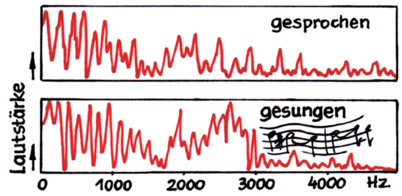
$$f = \frac{1}{2l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\varrho \cdot A}}$$

F16 Beim Flüstern schwingen die Stimmbänder nicht. Nur ein kleiner Spalt in der Stimmritze bleibt offen, das „Flüsterdreieck". Die Schallwellen werden dann nur durch die Luftverwirbelungen erzeugt, die sich beim Ausströmen der Luft ergeben. Heiserkeit kann verschiedene Ursachen haben, aber es treten in jedem Fall bei der Tonerzeugung zusätzliche Geräusche auf. Bei leichter Heiserkeit sind diese in einem Bereich um 3 000 Hz und können daher vor allem das „i" beeinflussen. Bei einer sehr starken Heiserkeit können die Störfrequenzen aber bis auf 500 Hz absinken.
Die Stimmen von Frauen sind ja etwa eine Oktave höher als die Männerstimmen. Eine Oktave höher bedeutet doppelte Tonhöhe beziehungsweise eine Erhöhung der Sprechfrequenz um 100 %. Eine solche Erhöhung könnte man daher auch für die Formantenfrequenzen erwarten. Diese sind bei Frauen aber nur rund 10 % höher als bei Männern. Du darfst Obertöne und Formanten nicht verwechseln!

Konsonanten werden auf verschiedene Arten erzeugt. So gibt es stimmlose Konsonanten, die entweder durch Strömungsgeräusche erzeugt werden (f, s oder sch) oder durch explosionsartiges Ausströmen der Luft (p, t und k). Bei ihnen schwingen die Stimmbänder nicht mit. Dann gibt es Konsonanten, bei denen auch der Klang der Stimmbänder dazukommt, etwa bei b, d oder g und bei m sowie bei n, bei denen ein Teil der Luft durch die Nase strömt.

Du hörst deine eigene Stimme nicht nur über die Luft, sondern auch durch deinen Schädelknochen. Dieser überträgt aber fast nur tiefe Frequenzen bis etwa 300 Hz, und dieser zusätzliche tieffrequente Schall verleiht deiner eigenen Stimme ihren fülligen Klang. Vom Tonband, das natürlich nur den Luftschall aufnimmt, hörst du deine Stimme normal, also höher und dünner – aber eben so, wie dich alle anderen Menschen hören.

F17 Der Unterschied zwischen Sprechen und Singen ist wesentlich geringer, als du wahrscheinlich denkst. Die Abbildung zeigt das Obertonspektrum des englischen Vokalklangs „who'd", der von einem Opernsänger sowohl gesprochen als auch gesungen wurde. Die Grundfrequenz betrug in beiden Fallen etwa 110 Hz. Es besteht zwischen diesen beiden Spektren eigentlich kaum ein Unterschied – mit Ausnahme des Bereichs knapp unter 3 000 Hz. Dort gibt es eine zusätzliche Energiespitze, die auch als Gesangs-Formant bezeichnet wird.



F18 In Helium ist die Schallgeschwindigkeit etwa 3-mal so groß wie in Luft. Die Resonanzeigenschaften deines Rachenraumes verändern sich dadurch und erzeugen die seltsam hohe Stimme bei gleicher Lautbildung.

F19 Es gibt einen guten Grund, warum wir bei niedrigen Frequenzen schlechter hören. Wären deine Ohren dort ebenso empfindlich, könntest du eine ganze Reihe physiologischer Geräusche deines eigenen Körpers hören, etwa das Öffnen und Schließen der Herzklappen, die Blutturbulenzen oder Gelenkbewegungen. Und das wäre auf Dauer sicher ziemlich lästig.

F20 Die Länge der frei schwingenden Saiten beträgt etwa 65 cm. Die Dicke der höchsten drei Saiten (g, h und e') beträgt etwa 1,01 mm, 0,81 mm und 0,71 mm, und ihre Frequenzen liegen bei 196,0 Hz, 246,9 Hz und 329,6 Hz. Das Umformen der zweiten Gleichung in → **F15** liefert $F = 4f^2 \cdot l^2 \cdot \varrho \cdot A$ und somit 59,8 N, 61,0 N und 89,6 N.

F21 Unter einer Oktave versteht man die Verdoppelung der Frequenz eines Tones. Zwei Töne im Abstand einer Oktave erscheinen sehr ähnlich, fast wie ein Einklang, also eine Prime.

F22 Die mathematisch einfache Variante ist, die Frequenz so lange zu verdoppeln, bis 20 000 Hz erreicht sind. Nach 9 Oktaven kommst du auf 10 240 Hz und nach 10 auf 20 480 Hz. Man kann also auf jeden Fall 9 Oktaven hören, in jungen Jahren sogar knapp 10. Die elegante Variante lässt sich in einem Aufwasch berechnen. Allgemein gilt $20 \cdot 2^n \leq 20\,000$ Hz. Daraus folgt $2^n \leq 1000$ und $n \leq \log(21\,000) = 9{,}97$.

F23 Die Frequenz des sichtbaren Lichts liegt im Bereich zwischen 4 und $7{,}1 \cdot 10^{14}$ Hz, das entspricht also einer knappen Oktave.

F24 Der Knall einer Pistole hat drei Ursachen: 1.) die Explosion des Schießpulvers, 2.) den Austritt der Gase, wenn die Kugel den Lauf verlässt (vergleichbar mit dem Austritt eines Sektkorkens aus einer Flasche) und 3.) den Überschallknall des Projektils. Ein Schalldämpfer beeinflusst nur Ursache Nummer 2. Dadurch wird der Lärm von 150 dB auf etwa 120 dB reduziert, und das ist immer noch ein Höllenlärm. Pistolen mit Schalldämpfer machen also nicht ein leises „Plopp", wie das in Filmen immer vorgegaukelt wird.

F25 Deine Ohren sind perfekte Fourier-Analysatoren! Sie zerlegen Geräusche und Klänge wieder in ihre einzelnen Bestandteile. Die Phasenlage der Wellen, also wie die Wellenberge und -täler zueinander liegen, ist ihnen dabei aber egal. Deshalb nimmst du diese bei¬den Klänge gleich wahr, weil sie aus den gleichen Tönen bestehen. Das ist auch gut so, denn sonst würde dir zum Beispiel der Klang einer Band aus verschiedenen Richtungen unterschiedlich vorkommen, weil sich die Entfernung zu den Musikern ändert und somit auch die Phasenlage der Wellen.

16 Grundlagen zur Thermodynamik

F9 seine eigene

F13 Für das maritime Klima sind zwei Dinge verantwortlich: die hohe spezifische Wärmekapazität c des Wassers und die Tatsache, dass Wasser flüssig ist, das Festland aber nicht. c ist immer auf die Masse eines Objekts bezogen, und hier schneidet Wasser wirklich viel besser ab. Für das Klima entscheidend ist aber der Austausch von Wärme über die Oberfläche. Und dabei spielt es eine große Rolle, wie gut die Wärme ins Innere abgeleitet werden kann. Das ist in der Größe $c(A)$ zusammengefasst, und hier schneidet Wasser schlecht ab: $c(A)_{\text{Wasser}} = 9\,\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$, $c(A)_{\text{Granit}} = 16\,\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$. Der Grund für das maritime Klima ist also die hohe Wärmekapazität von Wasser und der Wärmetransport in tiefere Schichten durch Konvektion.

F20 Der Beleg ist das „Klatsch"! Mit dieser Schallwelle wird ein Teil der Energie abtransportiert. Wenn der Schall verklungen ist, dann hat sich auch diese Energie in Wärme umgewandelt.

F21 −459,67 °F

F22 Das liegt daran, dass der Tripelpunkt von Wasser nicht bei 0 °C, sondern bei 0,01 °C liegt.

F23 Der See hat ein Volumen von $1{,}5 \cdot 10^8\,\text{m}^3$ und das Wasser somit eine Masse von $1{,}5 \cdot 10^{11}\,\text{kg}$. Seine Temperatur beträgt 288 K. Da der See unter 0 °C gefroren ist, nehmen wir für die spezifische Wärmekapazität die von Eis ($2\,100\,\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$). Die ungeordnete Bewegungsenergie liegt daher bei $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$, also bei rund 10^{17} J (rechne nach!). Das ist in etwa der Jahresenergiebedarf eines großen Bundeslandes. Man wäre also mit ein paar kleinen Seen für ein Jahr alle Energiesorgen los. Leider verbietet der 2. Hauptsatz, dass die ungeordnete Bewegungsenergie in Richtung höherer Temperatur abfließt.

F24 Die benötigte Energiemenge, um 1 l Wasser um 85 °C zu erwärmen, beträgt $Q = c \cdot m \cdot \Delta T = 4\,200 \cdot 1 \cdot 85\,\text{J} \approx 3{,}6 \cdot 10^5\,\text{J}$. Wenn ein Mensch 100 J pro Sekunde auf dem Ergometer leisten will, dann muss er 3 600 Sekunden lang fahren. Mit anderen Worten: Um bloß einen Liter Wasser zum Kochen zu bringen, müsste er eine ganze Stunde auf dem Ergometer schwitzen!

F25 Die Reibung tritt deshalb auf, weil sich die Moleküle und Atome an den unebenen Flächen der sich berührenden Gegenstände „verhaken". Wenn der Gegenstand weitergeschoben wird, verformen sich die kleinen Unebenheiten, bis die Kraft so groß wird, dass sie sich lösen und zurückspringen. Dadurch beginnen aber die Teilchen an den Grenzflächen stärker zu schwingen.

F26 Beim Fallen wird die Hubenergie $m \cdot g \cdot h$ frei. Die Energie, um den Tropfen um 1 °C zu erwärmen, beträgt $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$. Wenn man das gleichsetzt, kann man durch m kürzen und dann nach h auflösen: $h = (c \cdot \Delta T)/g$. Du siehst also, dass die Höhe von der Masse unabhängig ist. Wenn man für ΔT 1 °C einsetzt und für g 10 m/s^2, dann erhält man etwa 420 m!

17 Formen der Wärmeübertragung

F2 – F3 Wasser leitet Wärme 25-mal so gut wie Luft. Außerdem hat es eine viel größere Dichte und Wärmekapazität.

F8 Die unbewegte Luft in der Nähe der Haut erwärmt sich im Extremfall bis auf Hauttemperatur. Dadurch verschlechtert sich die Wärmeabgabe. Ein Ventilator erzeugt künstliche Konvektion und weht wieder kühlere Luft an die Haut. Außerdem fördert der Luftstrom die Verdunstung von Schweiß, der den Körper zusätzlich kühlt.

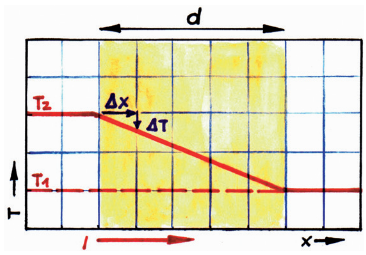
F12 Durch Konvektion geht bei offenem Topf enorm viel Wärme verloren!

F14 Ob sich ein Gegenstand erwärmt oder abkühlt, hat mit der Strahlungsbilanz zu tun. Das Thermometer strahlt mehr thermische Energie ab, als es vom Eiswürfel zurückbekommt. Daher kühlt es ab. Es gibt aber keine „Kältestrahlen", sondern nur eine negative Bilanz der Wärmestrahlen. Bei der glühenden Kohle ist diese Bilanz für das Thermometer positiv und es erwärmt sich.

F16 Der 2. Hauptsatz der Wärmelehre besagt, dass thermische Energie nie von selbst von Orten mit höherer Temperatur auf solche mit niedrigerer Temperatur übergeht. Das gilt auch für die Temperaturstrahlung. Deshalb kann der Brennpunkt niemals eine höhere Temperatur bekommen als die Sonnenoberfläche.

F19 Der Wärmeverlust hängt linear von der Fläche ab. An den Ohren kann man das Klima erkennen. In Afrika ist es am wärmsten, und die Ohren des Elefanten sind wichtig zur Wärmeabgabe. Mammuts haben zur Eiszeit gelebt. Die kleinen Ohren schützten vor einer zu starken Wärmeabgabe.

F20 Die Festsetzung des Wärmestroms bzw. Energieflusses (bzw. der Wärmeleistung) $I = \Delta Q/t$ ist zunächst eine Definition. Dann kann man folgendermaßen argumentieren: Jede Wandschicht gleicher Dicke wird vom gleichen Wärmestrom durchsetzt (wenn man einen homogenen Stoff annimmt). Zwischen ihren Grenzflächen muss daher die gleiche Temperaturdifferenz bestehen. Das Temperaturgefälle ist konstant: $\Delta T/\Delta x$ (siehe Abb.).



Der Energiefluss ist proportional zum Temperaturgefälle. Das ist vergleichbar damit, dass der Wasserfluss proportional zum Gefälle eines Flussbettes ist. Zudem hängt der Energiefluss linear von der Fläche A ab: doppelte Fläche, doppelter Wärmestrom. Und letztlich ist der Wärmestrom proportional zur Wärmeleitfähigkeit λ des Materials. Das macht also:

$$I = \frac{\Delta Q}{t} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d}$$

F21 Silber leitet die Wärme rund 5-mal besser als Eisen. Der Löffelstiel kann also unangenehm heiß werden.

F22 Die Wände von Backofen und Kühlschrank müssen sehr gut wärmeisoliert sein. Sonst würde man extrem viel Energie verschwenden. Backöfen sind meist mit Mineralwolle, Kühlschränke mit Hartschaum isoliert.

F23 Es wird nicht „Kühle" zugeführt, sondern Wärme abgeführt. Das Gegenteil von Erwärmung ist daher, wenn man es physikalisch sehr genau nimmt, Entwärmung!

F24 Weil es durch die Dickflüssigkeit zu keiner Konvektion kommt und die Wärme nicht gleichmäßig verteilt werden kann. Durch das Umrühren – eine Form von künstlicher Konvektion – kann das Anbrennen (lokal entstehen Temperaturen von über 200 °C) verhindert werden.

F25 Der Energieverlust beim Aufwärmen ist umso größer, je länger es dauert. Deshalb muss man voll aufdrehen. Kochendes Wasser hat immer dieselbe Temperatur, egal wie stark man aufdreht. Deshalb muss man dann so klein drehen, dass das Wasser gerade noch kocht.

F26 Bei Fieber erhöht der Körper den Sollwert der Kerntemperatur, um die Immunabwehr zu unterstützen. Damit in der „Heizphase" so wenig Wärme wie möglich verloren geht, wird die Hauttemperatur herabgesetzt. Manchmal hilft sich der Körper durch Muskelzittern. Wenn man ein fiebersenkendes Medikament einnimmt, dann sinkt der Sollwert, und die Wärme muss wieder abgeführt werden. Dabei erweitern sich die Blutgefäße. Die Haut erwärmt sich und die Wärme wird durch vermehrte Schweiß-Produktion abgeführt.

F27 Im Wesentlichen isolieren im Styropor die eingeschlossenen Luftbläschen. Diese sind so klein, dass die Konvektion verhindert wird. Daher liegt die Wärmeleitfähigkeit von Styropor in der Größenordnung von Luft (siehe Tab. 17.1). Sie ist ein bisschen höher, weil das Polystyrol selbst eine Wärmeleitfähigkeit hat, die etwa um den Faktor 3 größer ist als die von ruhender Luft.

F28 Fett hat eine Wärmeleitfähigkeit von 0,16 W/(m · K). Wenn du in die Gleichung für den Energiestrom einsetzt, dann bekommst du etwa 8 500 W an benötigter Heizleistung! Sehr beachtlich!

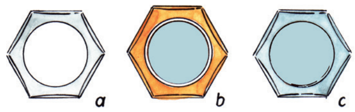
F29 Nimm an, der Löffelstiel ist 10 cm lang, im Querschnitt rechteckig und hat 1 cm Breite und 1 mm Dicke. Die Querschnittsfläche beträgt daher 10^{-5} m². Bei einer Länge von 10 cm beträgt der Energiestrom 3 Watt.

F30 Bei der kleinen Maus kommen auf 1 cm³ Volumen, das die Wärme erzeugt, 6 cm² Oberfläche, die die Wärme wieder abgibt (Abb. 17.19 a). Bei der großen Maus sind es pro 1 cm³ nur 3 cm² (b). Die Wärmeproduktion ist eine Folge des Volumens und somit $\sim L^3$. Der Wärmeverlust hängt von der Oberfläche ab und ist $\sim L^2$. Die relative Wärmeproduktion, bezogen auf die Oberfläche, ist daher $\sim L^3/L^2 \sim L$. Kleinere Lebewesen haben somit eine kleinere relative Wärmeproduktion als größere mit gleicher Form und kühlen daher leichter aus.

F31 Die relative Wärmeproduktion bezogen auf die Oberfläche ist $\sim L$ (→ **F30**). Größere Lebewesen haben eine größere relative Wärmeproduktion als kleinere mit gleicher Form und kühlen somit nicht so leicht aus. Größer zu sein bringt also in kalten Gegenden einen Vorteil und deshalb ist es in der Natur auch so zu finden, etwa bei den Pinguinen.

18 Ausdehnung, Diffusion und Phasenübergänge

F5 Man nennt diese Methode aufschrumpfen. Sie wird überall dort verwendet, wo eine Verbindung zwischen zwei Materialien nur auf Reibung basiert. Die Mutter muss so klein sein, dass sie bei normaler Temperatur nicht auf die Schraube passt. Wenn man die Mutter erhitzt, dann dehnt sich aber auch das Loch aus (b), und in diesem Zustand schraubt man sie auf. Kalt sitzt sie dann bombenfest.



F8 Leder hat Poren, die eine Diffusion des Wasserdampfs zulassen, Gummi nicht. Der Wasserdampf kann daher aus einem Gummistiefel nicht entweichen. Ein atmungsaktives Material (z. B. eine Klima-Membran) hat Poren, die gerade so groß sind, dass die Moleküle des Dampfes entweichen können. Sie sind aber viel zu klein für Regentropfen. Daher kann der Schweiß hinaus, das Regenwasser aber nicht hinein.

F11 Ein Gegenstand taucht so weit ein, dass die Masse des verdrängten Wassers seiner eigenen Masse entspricht. Weil Eis etwa 9 % mehr Volumen hat als die gleiche Masse an Wasser, schaut der Eiswürfel ein bisschen über die Oberfläche. Wenn er schmilzt, dann wird sein Volumen genauso groß wie der Teil, der sich unter Wasser befindet. Die Antwort lautet daher: Der Wasserspiegel bleibt exakt gleich hoch.

F27 Der Wasserfilm ist das sogenannte Kondenswasser. An der Wand der Milchpackung kühlt die Luft ab und dadurch steigt die relative Luftfeuchtigkeit. Irgendwann kann die Luft die Feuchtigkeit nicht mehr halten und diese kondensiert an der Milchpackung.

F31 Bei der Gefriertrocknung wird der heiße und flüssige Kaffee sekundenschnell bei Temperaturen zwischen −40 und −50 °C tiefgefroren. Anschließend wird er zermahlen. Im Hochvakuum und unter allmählicher Erwärmung sublimiert das Eis, das noch im Kaffeekonzentrat vorhanden ist. Zurück bleiben kleine trockene Kaffeepartikel.

F32 Zuerst muss der Eisblock auf 0 °C erwärmt werden. Dazu sind $0{,}5 \cdot 18 \cdot 2{,}1\,\text{kJ} = 18{,}9\,\text{kJ}$ notwendig. Dann muss das Eis von 0 °C in Wasser mit 0 °C umgewandelt werden. Dazu sind $0{,}5 \cdot 334\,\text{kJ} = 167\,\text{kJ}$ nötig. Zum Schluss muss die Suppe von 0 auf 100 °C erwärmt werden. Macht noch einmal $0{,}5 \cdot 100 \cdot 4{,}2\,\text{kJ} = 210\,\text{kJ}$. Insgesamt sind also rund 396 kJ notwendig. Die Mikrowelle hat 900 W Leistung, also 900 J/s oder 0,9 kJ/s. Das Aufwärmen bis zum Kochen dauert also 440 Sekunden oder 7 Minuten und 20 Sekunden.

F33 Wenn er mit konstanter Geschwindigkeit fährt, müssen die abwärts treibende Kraft F und die Reibungskraft F_R gleich groß sein: $F = F_R = m \cdot g \cdot \sin\alpha \approx 694\,\text{N}$. Die geleistete Reibungsarbeit ist Kraft mal Weg, also $694 \cdot 1000\,\text{J} = 6{,}9 \cdot 10^5\,\text{J}$ oder 694 kJ. Zum Schmelzen von 1 kg Schnee (bzw. Eis) sind 334 kJ notwendig (siehe Tab. 13.2). Der Skifahrer schmilzt daher etwas mehr als 2 kg Schnee. Hierbei wurde natürlich nicht berücksichtigt, dass bei solchen Geschwindigkeiten der Skifahrer eigentlich auf einem Luftpolster und kaum noch auf Schnee gleitet.

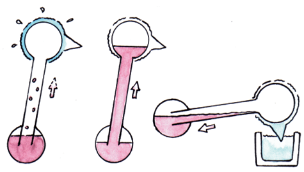
F34 Bei der Verbrennung von Kerosin in den Triebwerken der Flugzeuge entsteht unter anderem auch Wasserdampf. Aufgrund der geringen Temperaturen in dieser Höhe (etwa −40 bis −50 °C) kondensiert und gefriert der Wasserdampf bereits einige Meter hinter dem Triebwerk. Es entsteht eine künstlich erzeugte Wolke aus Eis.

F35 Wenn Wasser verdunstet, dann entsteht über der Oberfläche eine Schicht aus sehr dichtem Wasserdampf. Diese erschwert das weitere Verdunsten. Wenn man über die Suppe bläst, dann kann man diese Wasserdampfschicht wegblasen und die Verdunstung läuft wieder schneller ab. Aus demselben Grund empfindet man es als besonders kalt, wenn man aus dem Wasser steigt und der Wind weht.

F36 Der Mensch besteht zu etwa 75 % aus Wasser. Nimm an, er bestünde zu 100 % aus Wasser und im Inneren würde keine Wärme nachproduziert. Die Verdunstung von 1 Liter Schweiß entzöge also dem Körper 2 257 kJ an Wärme. Die spezifische Wärmekapazität von Wasser beträgt 4,2 kJ pro kg und pro Kelvin. Wenn der Mensch 50 kg hätte, dann würde er dabei also um 10,7 °C abkühlen, bei 75 kg um 7,2 °C und bei 100 kg um 5,4 °C. Da Wasser eine sehr hohe Wärmekapazität hat, wäre die tatsächliche Abkühlung noch größer.

F37 Durch den Druck des Gletschers schmilzt das Eis, das auf dem Felsen aufliegt, und dadurch kann der Gletscher weiterrutschen. Alpengletscher fließen 30 bis 150 m pro Jahr.

F38 Die Ente besteht aus zwei Glaskugeln, die durch ein Rohr verbunden sind. In der unteren Glaskugel befindet sich Methylalkohol, der bei Zimmertemperatur schnell verdunstet. Die obere Kugel ist außen mit Filz überzogen. Zu Beginn ist der Schwerpunkt der Anordnung unterhalb des Drehpunktes und der Schnabel wird kurz ins Wasserglas getaucht. Das Wasser verdunstet und die obere Kugel kühlt sich ab. Der Dampf des Methylalkohols in der oberen Kugel kondensiert. Dadurch entsteht in dieser Kugel ein Unterdruck und als Folge davon steigt der Alkohol hoch. Dadurch wird die Ente „kopflastig" und kippt. In dieser Position läuft die Flüssigkeit wieder in die untere Kugel und das Ganze beginnt von vorne.



19 Die Gasgesetze

F5 Druck ist Kraft pro Fläche. Das Wasser drückt mit seinem Gewicht von oben auf das Blatt, der Luftdruck von unten. Weil der Luftdruck viel größer ist, bleibt das Blatt haften. Es würde auch noch dann halten, wenn das „Glas" rund 10 m hoch wäre.

F15 Mit der allgemeinen Gasgleichung lässt sich das einfach berechnen. Es geht nur um das relative Volumen. Wir rechnen nur für 1 mol. $V = R \cdot T/p$. Zu Beginn kommt das Molvolumen für 20 °C heraus, nämlich 24 l. Pro 100 m sinkt die Temperatur um 1 °C. Nehmen wir den Druckwert für 4 810 m aus Tab. 13.3. In dieser Höhe wären der Druck auf 56 % und die Temperatur um 48 °C auf −28 °C gesunken. Für das Volumen ergibt das knapp 36 l – der Ballon dehnt sich also aus.

F19 Es ist wie beim Autoreifen: Das Gerät zeigt dir den Druckunterschied an und nicht den absoluten Wert. Wenn der äußere Luftdruck 760 torr beträgt und das Blutdruckmessgerät 140 torr anzeigt, dann beträgt der Blutdruck absolut 900 torr.

F20 Man könnte meinen, dass er $10 \cdot 30$ l, also 300 Liter verbraucht. Das ist aber falsch. In 30 m Tiefe herrscht ein Druck von insgesamt 4 bar. Während der Taucher an Land pro Minute 30 l Luft in die Lungen atmet, sind es in 30 m Tiefe 4-mal so viel, weil der Druck in den Lungen 4-mal so groß ist. Der Taucher verbraucht 1 200 l!

F21 Gase lassen sich zusammendrücken, kondensierte Stoffe fast nicht. Die Dichte von Gasen erhöht sich bei Druckzunahme, die von kondensierten Stoffen fast nicht. Gase dehnen sich bei Wärmezufuhr aus, kondensierte Stoffe fast nicht. Und schließlich: Der Zustand eines Gases (p, V und T) steht fest, wenn die Werte von zwei Größen feststehen. Das ist bei kondensierten Stoffen nicht der Fall.

F22 Ein Kreis mit einem Durchmesser von 0,2 m hat eine Fläche von 0,03 m². 100 bar entsprechen 10^7 Pa oder 10^7 N/m². Am Boden der Flasche wirkt daher eine Kraft von $10^7 \cdot 0{,}03$ N = 300 000 N. Das entspricht dem Gewicht eines 30-t-Sattelschleppers – und das auf dieser winzigen Fläche!

F23 Die Druckgleichung lautet: $p = \frac{2N}{3V} \cdot \overline{E}_{\text{kin}}$ und die allgemeine Gasgleichung

$\frac{p \cdot V}{T} = N \cdot k$. Wenn du nun einsetzt und umformst, bekommst du:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \frac{\frac{2N}{3V} \cdot \overline{E}_{\text{kin}} \cdot V}{T} = \frac{2N \cdot \overline{E}_{\text{kin}}}{3T} = N \cdot k$$

Die Teilchenzahl fällt logischerweise weg und du bekommst:

$$\overline{E}_{\text{kin}} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$$

Die mittlere kinetische Energie ist also proportional zur absoluten Temperatur oder, wie wir es in Kap. 16.2 formuliert haben: Die absolute Temperatur ist ein Maß für die ungeordnete kinetische Energie. Am Beispiel des idealen Gases ist das sehr schön zu sehen.

F24 Wir formen die Gasgleichung um:

$$\frac{p \cdot V}{T \cdot k} = N \quad \Rightarrow \quad \frac{n \cdot R}{k} = N$$

Für 1 Mol ist die Teilchenzahl daher R/k, und das ergibt logischerweise wieder $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen.

F25 Bei der Blutdruckmessung wird um den Oberarm eine Druckmanschette gelegt und auf deutlich über 120 mm Hg aufgeblasen. Dadurch wird die Armarterie komplett abgedrückt (Abb. 19.20 a), und mit dem Stethoskop ist in der Armbeuge kein Geräusch zu hören. Wenn man langsam den Manschettendruck verringert, fließt ab einem bestimmten Wert das Blut während des Herzschlages, hört aber in der Schlagpause wieder auf. Dieser eingeschränkte Blutfluss tritt beim Gesunden bei etwa 120 mm Hg auf und ist im Stethoskop als Rauschen zu hören (b). Wenn der Druck weiter reduziert wird, kann irgendwann das Blut wieder völlig ungehindert fließen (c) und das Geräusch im Stethoskop verschwindet. Bei einem Gesunden ist das bei etwa 80 mm Hg der Fall. Diese Person hätte also einen Blutdruck von 120/80.

F26 a) Der Normaldruck beträgt 101 300 Pa oder 101 300 N/m². Gewichtskraft ist Masse mal Erdbeschleunigung, also $F_G = m \cdot g$. Man kann daher aus dem Normaldruck sofort ausrechnen, dass pro m² eine Masse von 101 300 N/9,81 m/s² = 10 326 kg Luft lastet.
b) Die Gesamtkraft, die auf den Menschen wirkt, beträgt 101 300 N/m² · 1,8 m² = 182 340 N. Das entspricht der Gewichtskraft einer Masse von etwa 18,6 Tonnen oder rund 19 Klein-Pkws oder 4 Elefanten. Warum ist das auszuhalten? Weil diese Kraft von allen Seiten wirkt und sich gleichmäßig auf den Körper verteilt. 4 Elefanten auf dem Kopf würde man natürlich nicht aushalten.
c) Die Oberfläche der Erde beträgt $O = 4\pi \cdot r^2 = 5{,}1 \cdot 10^{14}$ m². Über jedem dieser Quadratmeter liegt eine Luftmasse von 10 326 kg (a). Die Gesamtmasse der Atmosphäre beträgt daher etwa $5{,}3 \cdot 10^{18}$ kg.

F27 Wird der Kolben mit der flachen Hand niedergeschlagen und die Luft dadurch sehr schnell komprimiert, findet eine adiabatische Zustandsänderung statt. Die dabei freigesetzte Energie erwärmt die Luft, und die Wärme kann aufgrund der schnellen Kompression nicht nach außen abgegeben werden. Im Inneren muss sich ein leicht entzündbares Material befinden. Meistens befindet sich unter dem Kolben an einem Häkchen eine Stückchen Zündschwamm, das dabei zu brennen beginnt.

F28 Ein Kondensstreifen ist eine künstlich erzeugte Wolke, die durch Abgase der Triebwerke eines Flugzeugs entsteht. Seine Entstehung ist ein ziemlich komplizierter Vorgang und wird in der Literatur auch etwas unterschiedlich beschrieben. Die bei der Verbrennung entstehenden Gase dehnen sich sehr schnell sehr stark adiabatisch aus, wodurch sie sich extrem abkühlen. Dadurch kondensiert der Wasserdampf, der bei der Verbrennung des Kerosins entsteht (daher auch der Name Kondensstreifen).

20 Kältetechnik und Wärmekraftmaschinen

F11 Der Vergaser ist der Teil, in dem das Benzin-Luftgemisch erzeugt wird. Streng genommen ist der Vergaser ein Zerstäuber, denn das Benzin erfährt keine Zustandsänderung, sondern wird feinstmöglich zerstäubt. Beim Turbolader (oder kurz Turbo) strömt das Abgas durch eine Turbine. Diese ist ähnlich wie beim Strahltriebwerk mit einem Verdichter verbunden, der das Luft-Benzin-Gemisch in den Kolben drückt. Der Zylinder wird mit mehr Luft und Benzin gefüllt und die Leistung steigt. Bei einem normalen Motor erfolgt die Füllung nur durch Ansaugen, wenn sich der Kolben hinunter bewegt. Man spricht daher von Saugmotoren. Bei V-Motoren stehen die Zylinder nicht parallel, sondern in einem V zueinander, bei Boxer-Motoren hat das „V" quasi 180° und die Kolben arbeiten genau in die Gegenrichtung. Bei Dieselmotoren verwendet man meist die Common-Rail-Technik. Dabei wird nicht mehr ein Druckpuls erzeugt, um den Diesel einzuspritzen, sondern es gibt ein gemeinsames Hochdruckreservoir (= Common Rail) für alle Einspritzdüsen, das auf konstantem Druck gehalten wird. Das Einspritzen besorgt das elektromagnetisch oder piezoelektrisch gesteuerte Ventil selbst.

F12 Der Kompressor der Klimaanlage braucht für den Betrieb Energie und deshalb benötigt das Auto mehr Benzin.

F13 Wie effizient der Kühlschrank arbeitet, hängt davon ab, wie gut die Wärme an der Rückseite abgegeben werden kann. Im Sommer muss der Kühlschrank länger arbeiten, damit die Kühlung gleich stark ist, und daher steigt der Stromverbrauch.

F14 Nein! Die „Maschine Mensch" bezieht ihre Energie nicht aus Wärme, sondern aus der chemischen Energie der Nährstoffe Eiweiß, Fett und Kohlenhydrate.

F15 Zweitakter haben keine Kühlflüssigkeit. Die Lamellen sind Kühlrippen (so wie bei einem Radiator), die die entstehende Wärme besser abführen können.

F16 Kerosin ist ein Kraftstoff, der wie Benzin oder Diesel aus Rohöl gewonnen wird. Es entflammt aber weniger leicht als Benzin und verbrennt beinahe rückstandslos.

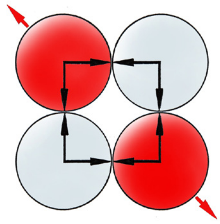
F17 Der Hubraum gibt an, um welches Volumen das Gas zusammengedrückt wird. Wenn ein Motor also 2000 cm^3 (= 2 l) Hubraum besitzt, bedeutet das, dass in Summe in allen Zylindern der Unterschied im Hohlraum zwischen oberem und unterem Totpunkt 2 l beträgt. Eine Verdoppelung des Hubraumes verdoppelt auch die Fläche im *p-V*-Diagramm und somit die Leistung. Über den Daumen kann man sagen, dass die Motorleistung linear vom Hubraum abhängt.

F18 Die Durchschnittsgeschwindigkeit ist 2 · Hubhöhe · Frequenz, also:

$$2 \cdot 0{,}08 \cdot \frac{7000}{60}\,\frac{\text{m}}{\text{s}} = 18{,}7\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

21 Grundlagen der Elektrizität (1)

F7 Das Wasserstoffatom besteht aus einem Elektron und einem Proton im Abstand von etwa 10^{-10} m. Die elektrische Kraft beträgt daher rund $-2 \cdot 10^{-8}$ N. Wenn es technisch möglich wäre, dann könntest du also das Elektron mit Leichtigkeit ablösen. Ein typischer Abstand für Protonen im Kern ist $1{,}5 \cdot 10^{-15}$ m. Nehmen wir einen Heliumkern: Die elektrische Kraft zwischen den beiden Protonen beträgt daher rund 100 N. Das entspricht bereits der Kraft, mit der 9 kg von der Erde angezogen werden. Es wäre möglich, aber sehr anstrengend, auch nur 2 Protonen mit Daumen und Zeigefinger zusammenzuhalten. Bei Elementen mit mehr Protonen wäre es schlichtweg unmöglich. Gott sei Dank gibt es die Neutronen und die Starke Wechselwirkung, die den Kern zusammenhalten. Das ist in der Abb. schematisch dargestellt. Nur die Protonen stoßen einander ab (rote Pfeile), die Starke Wechselwirkung (schwarze Pfeile) herrscht zwischen allen benachbarten Nukleonen. (Die Kräfte sind nicht maßstabsgetreu dargestellt!)



F21 Ja, ein wesentlicher! Bei der „einfachen" Ladungstrennung sind ja die Ladungen vorher schon vorhanden. Dafür benötigt man wenig Energie. Bei der Ladungserzeugung aus dem Nichts muss man aber zuerst die Teilchen erzeugen! Die benötigte Energie dafür kann man mit der berühmten Gleichung $E = m \cdot c^2$ abschätzen. Die benötigte Energie ist in diesem Fall viel viel höher.

F22 Genaugenommen streichst du gar nicht die positiven Ladungen vom Glas auf das Elektroskop ab, sondern umgekehrt die negativen Ladungen vom Elektroskop auf den Glasstab. Wenn man sich aber nur die Überschussladungen ansieht, dann scheint es so, als hätte der Glasstab positive Ladungen abgegeben. Ist aber nicht so!

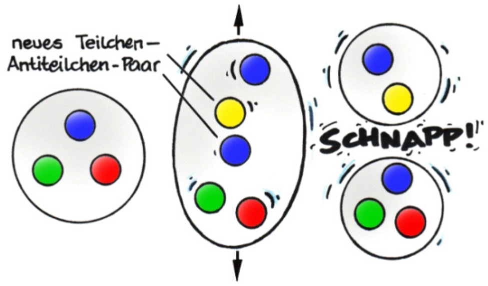
F23 Wenn du „Plomben", also Amalgamfüllungen, im Mund hast, dann hast du zwei verschiedene Metalle und mit dem Speichel einen Elektrolyten. Was du dann also „schmeckst", ist ein schwacher elektrischer Strom.

F25 Die Gleichung, die du benötigst, ist Einsteins berühmte Gleichung: $E = m \cdot c^2$. Die Masse eines Elektrons – und somit auch die des Positrons – ist $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg, die Lichtgeschwindigkeit $3 \cdot 10^8$ m/s.
Für die Mindestenergie ergibt sich daher $2 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2\,\text{J} = 1{,}6 \cdot 10^{-13}\,\text{J}$ oder rund 1 MeV. In der Praxis braucht man aber zur Erzeugung eines solchen Paars mindestens 2 MeV.

F26 Durch das Rutschen wurden das Kind und somit auch seine Haare durch Reibung elektrisch aufgeladen. Die Haare haben daher einen Ladungsüberschuss. Weil gleichnamige Ladungen einander abstoßen, entfernen sich die Haare so weit wie möglich voneinander und stehen dadurch ab. Es ist ein ähnlicher Effekt wie bei den Blättchen eines Elektroskops (Abb. 21.15). Welche Ladung die Haare haben, kann man anhand dieses Bildes nicht erkennen. Dazu müsste man das Material der Rutsche und der Kleidung kennen.

F27 In einem abgeschlossenen System ist die Gesamtladung immer gleich groß. Es kann aber gleich viel positive und negative Ladung entstehen oder vernichtet werden. Daher können die Reaktionen a, d (jeweils vorher elektrisch neutral und nachher positiver Ladungsüberschuss) und e (vorher positiver Ladungsüberschuss, nachher negativer) nicht vorkommen.

F28 Im Gegensatz zur elektromagnetischen Kraft sinkt die starke Kraft nicht ab, wenn man den Abstand der Teilchen erhöht. Je weiter man zwei Quarks „auseinanderzieht", desto größer ist die Energiemenge, die man in das System stecken muss. Bei einem Abstand von 10^{-15} m ist die investierte Energie so hoch, dass ein neues Quark-Antiquark-Paar entsteht (siehe Abb.). Übrig bleiben das ursprüngliche Proton und ein neu erzeugtes Teilchen, das aus 2 Quarks besteht. Genau das passiert in Teilchenbeschleunigern. Natürlich werden dort Protonen nicht auseinandergezogen, sondern mit hoher Geschwindigkeit beschossen. Aber das Ergebnis ist dasselbe. Das bedeutet, dass es zwar kleinere Ladungen als die Elementarladung gibt, man diese aber niemals frei beobachten kann.



F29 a) Ein Elektron hat eine Ladung von $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Um eine Ladung von insgesamt $2 \cdot 10^{-10}$ C/cm² zu erzeugen, braucht man daher $(2 \cdot 10^{-10}\,\text{C/cm}^2)/1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{C} = 1{,}25 \cdot 10^9$ Stück pro cm². Pro Quadratzentimeter befinden sich also größenordnungsmäßig eine Milliarde überschüssige Elektronen.
b) Ein Kupferatom hat einen Atomradius von $200 \cdot 10^{-12}$ m. Nimm an, es nimmt an der Oberfläche einen quadratischen Bereich ein. Dieser hat dann eine Fläche von $(400 \cdot 10^{-12}\,\text{m})^2 = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{m}^2$. Ein m² entspricht 10^4 cm². Daher nimmt ein Kupferatom $1{,}6 \cdot 10^{-15}$ cm² ein, und auf einen Quadratzentimeter passen $N = 1/1{,}6 \cdot 10^{-15}\,\text{cm}^2 = 6{,}25 \cdot 10^{14}$ Elektronen. In der obersten Atomschicht befinden sich somit $6{,}25 \cdot 10^{14}$ freie Elektronen pro Quadratzentimeter und bei starker Ladungsverschiebung etwa $1{,}25 \cdot 10^9$ überschüssige Elektronen (siehe a). Das bedeutet, dass nur etwa jedes 500 000te frei bewegliche Elektron des Metalls bei starker negativer elektrischer Aufladung verschoben wird.

F30 Muskeln werden durch kleine Spannungsänderungen in den Nerven zum Zusammenziehen gebracht. Diesen Effekt kann man auch über die Haut auslösen. Auch die Sache mit Galvanis Froschschenkel funktionierte so. Dieser erzeugte die Spannung allerdings selbst, weil er gleichzeitig auch die Batterie war.

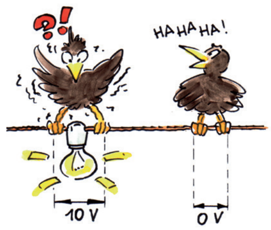
22 Grundlagen der Elektrizität (2)

F4 Nein! Die Driftgeschwindigkeit der Elektronen beträgt ja nur Bruchteile eines Millimeters in der Sekunde. Aber die Information, dass der Stromkreis geschlossen ist, breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit im Leiter aus. Die Elektronen im Leiter beginnen sich also praktisch alle gleichzeitig zu bewegen. Das ist wie bei einem wassergefüllten Schlauch. Wenn du aufdrehst, dann beginnt das gesamte Wasser fast gleichzeitig zu fließen.

F6 Im Haushalt gibt es Wechselstrom. Das bedeutet, dass die Elektronen ständig die Richtung wechseln, und zwar 100-mal pro Sekunde. Deshalb ist die Antwort e).

F16 Der größere Widerstand ist in der Lampe, weil der Glühdraht viel dünner ist als die Zuleitung. Aber es gibt noch ein viel einfacheres Argument. Wenn der Widerstand in der Zuleitung größer wäre, dann würde das Kabel leuchten und nicht die Lampe.

F17 Nimm an, am Draht liegt eine Spannung von 10 V an. Der „elektrische Höhenunterschied" zwischen den Füßen des linken Vogels (die Schrittspannung) beträgt dann 10 V. Deshalb bekommt er einen Stromschlag. Die Schrittspannung beim rechten Vogel beträgt praktisch 0 V. Daher können Vögel ohne Gefahr auf Überlandleitungen sitzen.



F28 Die thermische Geschwindigkeit ist eine Milliarde Mal größer als die Driftgeschwindigkeit.

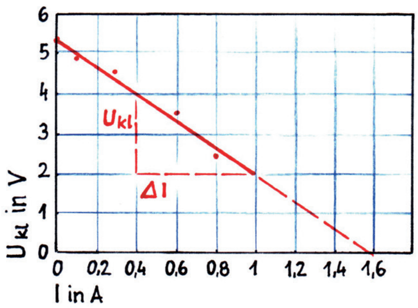
F29 Die Driftgeschwindigkeit hängt von der Stromstärke ab. Je größer diese ist, desto mehr Elektronen fließen pro Sekunde durch den Draht. Außerdem hängt sie vom Material ab. Je größer die Elektronendichte, desto kleiner wird die Driftgeschwindigkeit.

F30 Man darf zwei Dinge nicht verwechseln! Sobald Leitblitz und Fangladung zusammenkommen, beginnen die Ladungen zu fließen. Diese Information breitet sich von unten nach oben aus und deshalb kann man auf Hochgeschwindigkeitsbildern sehen, wie tatsächlich der Blitz von unten nach oben aufleuchtet. Die negativen Ladungen selbst fließen aber von oben nach unten!

F31 Bei der Straßenbahn sind die Schienen der zweite Pol. Das ist normalerweise nicht gefährlich, weil man niemals Schienen und Oberleitung gleichzeitig berührt.

F32 Du kannst Vogel und Leiter auch als Parallelschaltung sehen. Die Glühbirne hat einen größeren Widerstand als der Vogel. Daher fließt über den Vogel mehr Strom und er bekommt einen Schlag. Beim rechten Vogel fließt aber praktisch der gesamte Strom durch den Draht, weil er eben einen viel geringeren Widerstand hat.

F33 $U_0 = I \cdot R_i + U_{kl} \quad \Rightarrow \quad U_{kl} = U_0 - I \cdot R_i$
Dieser Zusammenhang ist in der Grafik dargestellt. Verlängert man die Gerade in Richtung der I-Achse, so kann man den Kurzschlussstrom I_k ablesen, der bei etwa 1,6 A liegt. Der Innenwiderstand ergibt sich aus dem Betrag der Steigung der Geraden und liegt bei etwa 3 Ω.



F34 Das Gerät mit 30 kΩ! Voltmeter werden ja parallel geschaltet. Je größer der Innenwiderstand, desto kleiner die Stromstärke im Gerät, desto weniger werden die ursprünglichen Verhältnisse durch die Messung verändert; und das ist ja das Ziel der Messung.

F35 Der Ohm'sche Zusammenhang lautet $R = U/I$, und somit gilt $U = I \cdot R = 0{,}03\,\text{A} \cdot 1000\,\Omega = 30\,\text{V}$. Ab dieser Spannung sollte man lieber vorsichtig sein. In der Praxis werden Gefahrenhinweise aber schon ab 24 Volt aufgeführt.

F36 Einen elektrischen Schlag bekommst du dann, wenn Strom durch deinen Körper fließt. Dieser fließt aber wiederum nur, weil es eine elektrische Spannung gibt. Deshalb wird der elektrische Schlag sowohl durch den Strom als auch durch die Spannung verursacht.

F37 Bei 10 000 V würde im Extremfall nach $I = U/R$ eine Stromstärke von 10 A durch deinen Körper fließen. Das wäre absolut tödlich. Die Stromstärke bei einem Weidezaun ist aber auf 0,01 A begrenzt. Daher ist es zwar für Menschen unangenehm, den Zaun zu berühren, aber trotzdem ziemlich harmlos. Die hohe Spannung ist nötig, um die meist große Zaunlänge von bis zu mehreren Kilometern zu überbrücken. Es ist nur ein Pol an den Zaun angeschlossen. Der Erdnagel wirkt als Erdung und schließt den Stromkreis über die Erde.

F38 Gehe von der Gleichung $I = U/R$ aus. Der elektrische Widerstand steht im Nenner. Wenn R kleiner wird, muss daher die Stromstärke I größer werden: $I\uparrow = U/R\downarrow$. Bei einem Widerstand von nur 1 Ω würde bei einer Spannung von 230 V theoretisch ein Strom von 230 A fließen. Dabei würde es unweigerlich zu einem Kabelbrand kommen. Die Leitungen im Haushalt sind auf maximal 15 A ausgelegt. Würde der Widerstand bei einem Kurzschluss dermaßen absinken, würde sofort der Sicherungsautomat auslösen.