4 Geradlinige Bewegungen

Vertiefung und Kompetenzüberprüfung

Martin Apolin (Stand November 2015)

zu Kapitel 4.1 *Gleichförmige Bewegung* und 4.2 *Beschreibung der Geschwindigkeit*

A1 Auf Seite 21 in Kapitel 4.1 ist zu lesen, dass sich die Erde mit 30 km/s um die Sonne bewegt. Überprüfe diese Angabe! Du benötigst dafür die Formel für die Geschwindigkeit aus S. 22. Die Entfernung zwischen Erde und Sonne beträgt rund 150 Millionen Kilometer.

A2 Bei großen Leichtathletik-Wettkämpfen hat jeder Läufer bei den Sprint-Distanzen einen eigenen Lautsprecher für das Startsignal hinter seinem Startblock. Kannst du dir vorstellen, warum das so ist? Versuche den Effekt größenordnungsmäßig anzugeben.

A3 In 2 bis 4 Milliarden Jahren (die Angaben differieren in der Literatur) wird unsere Milchstraße wahrscheinlich mit dem Andromedanebel (Abb. 1) kollidieren, der etwa 2,5 Millionen Lichtjahre von uns entfernt ist. Wie schnell fliegen wir demnach aufeinander zu? Berechne die Länge eines Lichtjahrs selber ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) oder schlag nach auf S. 11 in Kap. 2.2.

Abb. 1: Der imposante Andromedanebel. *(Quelle: NASA)*

A4 Auf Seite 21 steht: „Wenn keine Beschleunigungen in irgendeiner Form auftreten, dann spricht man in der Physik von einem Inertialsystem. Man kann also sagen: Wenn du dich in einem völlig ruhig fliegenden Flugzeug befindest, dann befindest du dich in einem Inertialsystem."
(Streng genommen ist das eigentlich gar nicht richtig! Warum? Lies in Band III unter „Allgemeiner Relativitätstheorie" nach!)

A5 a Wie lang wachsen Haare in einem Jahr in Zentimetern? Schätze die Zahl an Hand deiner eigenen Erfahrung ab oder schaue im Internet nach. Rechne diese Wachstumsgeschwindigkeit in SI-Einheiten (siehe Tab. 2.2, S. 10) um, und vergleiche dein Ergebnis mit dem Wert in Tab. 4.1 auf S. 22.

b Atome haben einen Durchmesser von etwa 10^{-10} m. Wie viele „Lagen" Atome müssen an der Haarwurzel pro Sekunde eingebaut werden, damit sich die Haarspitzen mit der oben berechneten Geschwindigkeit voranschieben können?

c Wie vielen Atomen pro Sekunde entspricht das pro einem Haar bzw. bei allen Haaren am Kopf? Nimm an, dass ein Haar einen Durchmesser von 0,1 mm hat und der Mensch etwa 100.000 Kopfhaare besitzt.

A6 a Das Alter des Universums beträgt 13,7 Milliarden Jahren (siehe Band III). Rechne das Alter in Sekunden um.

b Mit welcher Durchschnittsgeschwindigkeit seit dem Urknall hat sich daher ein Raumbereich ausgedehnt, der jetzt 1 m lang ist? Sieh dir Tabelle 4.1 auf S. 22 an und gib vor der Rechnung einen Tipp ab.

A7 a Um ganz auf der sicheren Seite zu sein, sollte man beim Autofahren einen Sicherheitsabstand von zwei Sekunden einhalten. Wie könnte man diese Zeit während des Fahrens einfach abschätzen? Leite weiters eine Faustregel für den Abstand mit Hilfe der gefahrenen Geschwindigkeit in km/h ab (nach dem Motto: der Abstand in Metern ist zahlenmäßig die Geschwindigkeit in km/h durch soundsoviel …).

b Manche notorischen Drängler halten auf der Autobahn nur einen Abstand von 5 m oder sogar weniger ein. Welche Reaktionszeit müssten sie haben, um rechtzeitig bremsen zu können?

A8 a Du fährst auf der Landstraße und willst ein Auto überholen, das vor dir mit 80 km/h fährt. Beide Autos sind 4 m lang. Vor dem Überholen sollte der Abstand 10 m betragen (Ausscherabstand), nach dem Überholen ebenfalls 10 m (Einscherabstand). Aus- und Einscherabstand dürfen nicht mit dem Sicherheitsabstand verwechselt werden, weil du ja zügig an dem Auto vorbeifährst. Wie lange dauert der Überholvorgang, wenn du mit 100 km/h überholst? Wie weit fährst du dabei? Welches Bezugssystem solltest du wählen, um dieses Bespiel so einfach wie möglich zu berechnen? Gib vor deiner Rechnung einen Tipp ab.

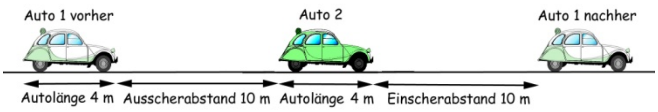

Abb. 2: Schematische Darstellung des Überholvorganges.

b Berechne dieselben Werte, wenn es sich um zwei Laster mit 20 m Länge handelt und die Geschwindigkeiten 80 km/h und 85 km/h betragen. Weil die Relativgeschwindigkeiten bei Lastern oft sehr gering sind, spricht man auch scherzhaft von „Schildkrötenrennen".

A9 Nimm an, du fährst mit deinem Auto mit 50 km/h gegen ein starres Hindernis, etwa eine Betonmauer. Das Auto knautscht sich zusammen. Auf Grund der Trägheit bewegt sich dein Körper aber mit derselben Geschwindigkeit weiter. Wie schnell muss der Airbag aufgehen, um dich zu schützen, wenn du dich 0,5 m vor dem Lenkrad befindest?

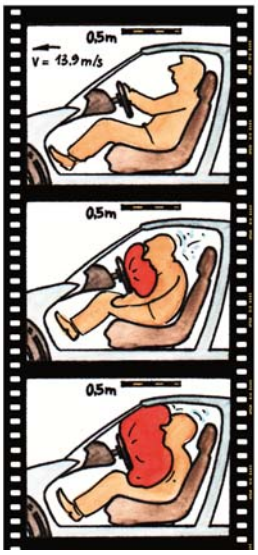

Abb. 3: Ein Airbag in Aktion *(Grafik: Janosch Slama)*

zu Kapitel 4.3 → siehe Arbeitsblatt *Diagramme interpretieren und zeichnen*

zu Kapitel 4.4 *Gleichmäßig beschleunigte Bewegungen*

A10 Du lässt eine Kugel aus 1 m Höhe auf den Boden fallen. Wie lange dauert es bis zum Aufprall? Wie schnell ist die Kugel beim Aufprall? Versuche vorher die Werte im Kopf überschlagsmäßig abzuschätzen. Berechne dann dasselbe für die verschiedene Fallbeschleunigungen auf der Erde (siehe Infobox *Erdbeschleunigung g* auf S. 24). Vergleich diese Werte mit dem gerundeten Wert für g (10 m/s^2) und erstelle eine Tabelle, in der du die Abweichungen einträgst.

A11 a Du befindest dich auf der Sonnenoberfläche und lässt eine Kugel aus 1 m Höhe auf den „Boden" fallen. Die Fallbeschleunigung beträgt dort 274 m/s^2. Wie lange dauert es bis zum Aufprall? Wie schnell ist die Kugel beim Aufprall? Natürlich ist das Beispiel sehr hypothetisch, weil die Sonnenoberfläche rund 5800 Kelvin heiß ist und man dort überdies nicht stehen kann. Aber es geht ums Prinzip!

b Die Sonne endet in rund 8 Milliarden Jahren als weißer Zwerg (siehe Band III). Sie hat dann nur mehr etwa die Größe der Erde (Radius etwa $6 \cdot 10^6$ m) und rund 55 % ihrer heutigen Masse. Berechne daraus zunächst die Fallbeschleunigung und dann t und v wie in A8 a). Benutze dazu die Formel für das Newton'sche Gravitationsgesetz aus Kap. 10.4 und setze sie mit der allgemeinen Formel für das Gewicht (S. 43, Kap. 6.4.1) gleich.

A12 a Der Kopf einer Klapperschlange kann während des Angriffs eine Beschleunigung von 50 m/s^2 erreichen. Wenn ein Auto genauso schnell beschleunigen könnte, in welcher Zeit käme es dann von null auf 100 km/h?

b Der Bugatti Veron (siehe Abb. 4 nächste Seite) mit 736 kW oder 1001 PS beschleunigt von 0 auf 100 km/h in 2,5 Sekunden. Wie viel g wirken auf den Fahrer?

Abb. 4: Der Bugatti Veyron ist er der schnellste straßenzugelassene Seriensportwagen der Welt *(Quelle: Wikipedia)*.

c Um das relativ schwere Fahrzeug sicher abbremsen zu können, werden Carbon-Keramik-Bremsscheiben eingebaut, welche den Wagen aus 100 km/h in 2,3 Sekunden auf einer Strecke von 31,4 m zum Stehen bringen. Wie viele g wirken? Wie groß ist diese Bremsverzögerung im Vergleich mit der gesetzlich vorgeschriebenen?

d Der Bugatti Veyron hat eine Maximalgeschwindigkeit von 403 km/h und einen c_W-Wert von 0,36. Schätze die Anströmfläche ab. Hilfe: Arbeit ist Kraft mal Weg, Leistung ist Arbeit pro Zeit. Wegen der Luftwiderstandskraft schau nach auf Seite 29, Kap. 4.5.

A13 a Ein Specht schlägt mit etwa 25 km/h (7 m/s) gegen die Rinde. Nimm an, der Schnabel dringt 5 mm bzw. 2 mm tief in die Rinde ein. Welche Beschleunigungskraft entsteht dabei? Überlege Dir, wie das Hirn und Kopf des Spechts konstruiert sein könnten, damit er dabei nicht Kopfschmerzen bekommt.

b Interpretiere die Grafik auf Grundlage der Gleichung $W = F \cdot s$ (siehe Kap. 7.1, S. 51).

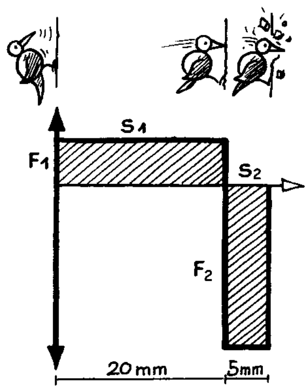

Abb. 5: Wie der Specht große Kräfte erzeugt. *(Grafik: Janosch Slama)*

A14 In der Formel 1 besteht die schützende Sicherheitszelle, die den Piloten umgibt, aus extrem harten Karbonfasern. Warum verwendet man diesen Stoff nicht gleich für das ganze Auto?

A15 Du wirfst einen Stein in schlammigen Matsch. Er dringt einen Zentimeter tief ein. Wie schnell musst du den Stein hineinwerfen, wenn er vier Zentimeter tief eindringen soll?

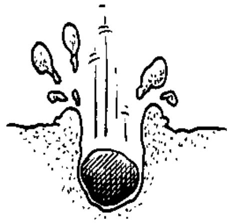

Abb. 6 *(Grafik: Janosch Slama)*

A16 Möwen sind nicht in der Lage, mit ihrem Schnabel Muscheln aufzubrechen. Sie habe aber einen Trick! Welchen? Warum verwendet man im Turnen Weichböden? Die Antworten auf beide Fragen hängen zusammen – und auch mit Aufgabe 10. Wie könnte man die Antwort formelmäßig demonstrieren?

A17 John Paul Stapp war Pionier in der Erforschung der Auswirkungen von Beschleunigungskräften auf den menschlichen Körper. Besonders bemerkenswert sind seine Selbstversuche auf Raketenschlitten (Abb. 7+8), bei denen er sich selbst großen Belastungen aussetzte und mit seinen Ergebnissen zur Sicherheit von Fahrgästen in Flugzeugen, sowie zur Weiterentwicklung von Sicherheitsgurten beitrug. Er war ein Kollege Chuck Yeagers, der als erster Mensch nachweislich eine Geschwindigkeit von nahezu Mach 1 (also Schallgeschwindigkeit) erreichte.

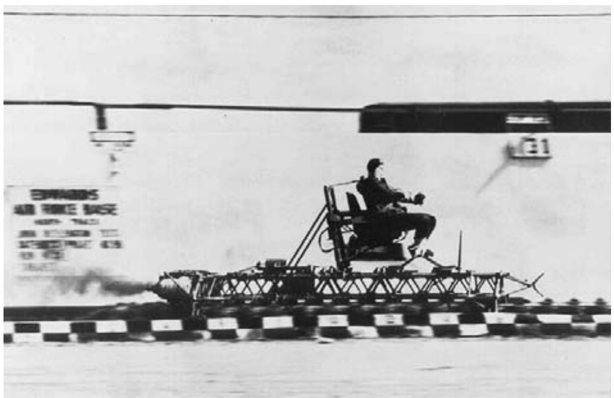

Abb. 7: J. P. Stapp auf dem Raketenschlitten *(Quelle: U.S. Air Force)*

Im März 1954 stellte er mit dem raketengetriebenen Schlitten, der mit 1020 km/h seine Bahn entlang schoss, einen neuen Geschwindigkeitsrekord zu Lande auf. Fahrer und Schlitten wurden innerhalb von 1,4 s wieder zum Stehen gebracht. Wie groß war die Beschleunigung beim Bremsen in *g*?

Abb. 8: J. P. Stapp beim Fahren auf dem Raketenschlitten *(Quelle: U.S. Air Force).*

A18 a Die Todesursache bei schweren Unfällen sind meist Schädelverletzungen. Größere Beschleunigungen führen auch ohne Schädelbruch zum Tod, weil das Gehirn durch die extremen Belastungen zusammengedrückt wird. Abb. 9 wurde aus Unfallanalysen erstellt. Die Linie markiert die Belastung, bei der noch eine 50 %ige Überlebenschance besteht. Oberhalb der Linie wird die Überlebenswahrscheinlichkeit rasch kleiner. Interpretiere zuerst das Diagramm. Schätze dann ab, in welchem Bereich sich John Paul Stapp (A17) bei seinem Selbstversuch befand. Trage den Werte ein. Achtung: Die Skala ist logarithmisch!

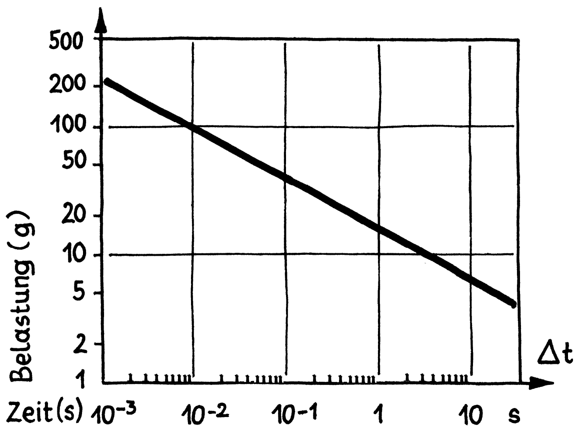

Abb. 9: Bremskräfte und Zeitdauer der Einwirkung. Die Linie markiert die Belastung, bei der noch eine 50%ige Überlebenschance besteht. *(Grafik: Janosch Slama)*

b Nimm an, ein Auto hat eine Knautschzone von 0,5 m und fährt gegen eine Betonmauer. Bei welcher Geschwindigkeit kommt man in den Bereich der 50%igen Überlebenschance? Löse das Beispiel grafisch und verwende dazu die Gleichung für die Falltiefe beim freien Fall auf S. 25 und die Formel für die Bremsverzögerung auf S. 27. Berechne zuerst die Bremsverzögerung bzw. die auftretenden *g* und damit die Zeitdauer. Erstelle mit Hilfe eines Kalkulationsprogramms eine Tabelle (siehe unten) und übertrage diese Wertepaare aus den letzten beiden Spalten in Abb. 9. Hilfe: die gesuchten Werte liegen im Diagramm auf einer Geraden.

v in m/s	*v* in km/h	*a* in m/s²	entspricht *g*	*t*

Wie realistisch sind die berechneten Werte? Können diese 1:1 auf den Alltag übertragen werden?

A19 Eine Auto fährt mit 30 m/s und bremst dann innerhalb von 2 Sekunden bis zum Stillstand ab. Zu welcher Wagenklasse gehört das Auto? Überlege, ohne eine Formel zu verwenden. Eine Hilfe liefert die Antwort auf A12c.

A20 In Abb. 10 siehst du eine Stroboskopaufnahme eines springenden Basketballs. In welche Richtung hüpft der Ball? Zeichne in den Punkten a, b und c die momentane Beschleunigung ein. Vernachlässige dabei den Luftwiderstand.

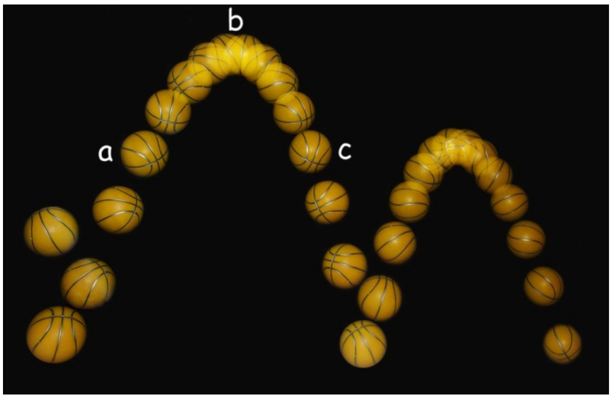

Abb. 10: Stroboskopaufnahme eines springenden Basketballs von Michael Maggs

A21 Im Rahmen der Apollo 15-Mission ließ der Astronaut David Scott am Mond einen Hammer und eine Falkenfeder fallen.

a Stoppe mit Hilfe des Videos, das du auf BB-online im Kapitel 1 findest, die Fallzeit.

b Schätze ab, ob diese größenordnungsmäßig richtig sein kann.

c Welche Fallzeit würde man im Vakuum auf der Erde erwarten? Überlege allgemein, indem du den proportionalen Zusammenhang zwischen a und t berechnest.

zu Kapitel 4.5 *Ungleichmäßig beschleunigte Bewegungen*

A22 a Mary Poppins ist ein mit magischen Fähigkeiten ausgestattetes Kindermädchen. Berühmt ist die Szene aus dem Disney-Film, in der sie mit Hilfe eines Regenschirms zu Boden schwebt. Berechne, wie groß ihre Endgeschwindigkeit wäre, wenn sie tatsächlich einen Regenschirm als „Fallschirm" verwendete. Überlege dir dazu vernünftige Rahmenbedingungen was die Schirmgröße und die Masse von Mary Poppins anbelangt. Der c_W-Wert eines Fallschirms bzw. einer Halbkugelschale beträgt etwa 1,3.

Abb. 11: Mary Poppins schwebt sanft am Sonnenschirm zur Erde. *(Quelle: Wikipedia)*

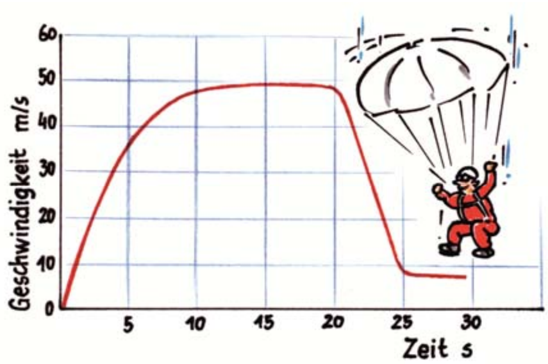

Abb. 12: v-t-Diagramm eines Fallschirmsprunges *(Grafik: Janosch Slama)*

b Welchen Durchmesser müsste der Schirm haben, damit Mary Poppins gemächlich mit 0,5 m/s zur Erde schweben kann? Überlege zunächst einmal ganz allgemein, bevor du rechnest. Wirf dazu einen Blick auf Abb. 12.

c Welcher proportionale Zusammenhang besteht zwischen A und v? Was bedeutet das für Größe der Fläche und Geschwindigkeit?

d Abgesehen davon, dass Mary Poppins hart aufschlagen würde, gibt es noch einen zusätzlichen Grund, warum sie nicht so wie in Abb. 12 zur Erde schweben kann. Welchen?

A23 In Abb. 13 siehst du eine Abschätzung des Zusammenhangs zwischen der Tropfengröße und der Fallgeschwindigkeit. Leite zuerst allgemein eine Formel ab, die diesen Zusammenhang darstellt. Du brauchst dazu die Dichte von Wasser (siehe Kap. 2.6), die Formel für die Fallgeschwindigkeit im lufterfüllten Raum (siehe S. 29) und die Volumenformel der Kugel. Wie lautet der proportionale Zusammenhang zwischen v und r?

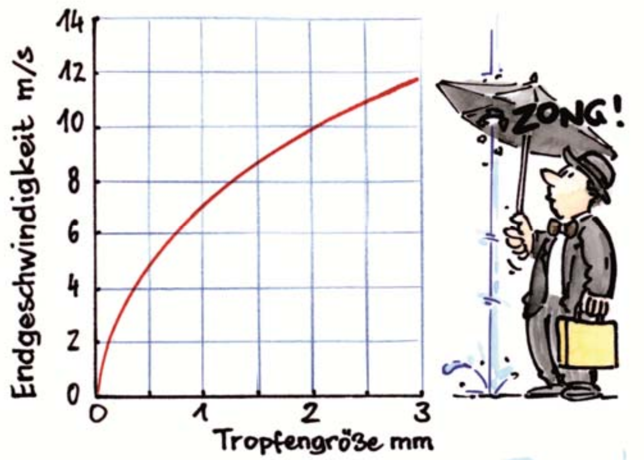

Abb. 13: Abschätzung der Fallgeschwindigkeit eines Tropfens auf Grund seiner Größe *(Grafik: Janosch Slama)*

A24 Ein Porsche Boxter 987 hat eine Leistung von 176 kW, einen c_W-Wert von 0,29 und eine Anströmfläche von 1,96 m². Schätze aus diesen Daten seine maximale Geschwindigkeit ab.
Hilfe: Verwende die Gleichungen $P = W/t$, $W = F \cdot s$, sowie die Gleichung für den Luftwiderstand.

Hilfe und Lösungen

Hilfe zu A1: Die Erdbahn ist zwar ganz leicht elliptisch, wir können sie aber für unsere Berechnungen als Kreis annehmen. Der Umfang der Erdbahn ist daher $U = 2r\pi \approx 9{,}4.10^8$ km. Dafür benötigt die Erde 365,25 Tage oder 365,25.86400 s = $3{,}16.10^7$ s.
$v = s/t = (9{,}4.10^8\ \text{km})/(3{,}16.10^7\ \text{s}) = 29{,}8$ km/s.

Hilfe zu A2: 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.

Hilfe zu A3: Ein Lichtjahr entspricht der Entfernung von etwa 10^{16} m. Die Entfernung Milchstraße - Andromedanebel beträgt daher $2{,}5 \cdot 10^{22}$ m. 2 Milliarden Jahre sind etwa $6{,}3 \cdot 10^{16}$ s. In diesem Fall beträgt die Relativgeschwindigkeit knapp 400 km/s. Wenn man 4 Milliarden annimmt, dann beträgt die Geschwindigkeit immer noch rund 200 km/s.

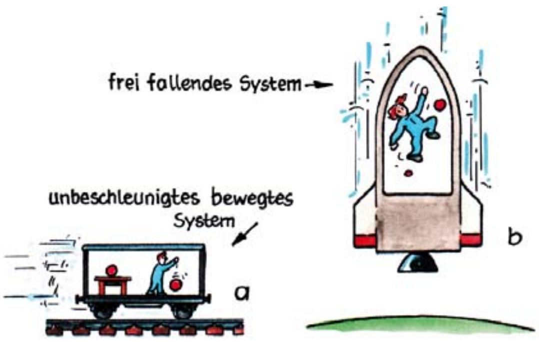

Abb. 14: Eine Kugel, die am Tisch liegt, bleibt liegen. Eine Kugel, die du auslässt, wird vertikal beschleunigt. Der Trägheitssatz ist in vertikaler Richtung nicht erfüllt. b) Alle Objekte, die in Ruhe sind, bleiben in Ruhe. Der Trägheitssatz ist in allen Richtungen erfüllt. *(Grafik Janosch Slama)*

Hilfe zu A4: Im ruhig fliegenden Flugzeug oder ruhig fahrenden Zug gilt der Trägheitssatz nur in horizontaler Richtung, nicht aber vertikal. Salopp könnte man sagen, dass solche Systeme „zweidimensionale Inertialsysteme" sind. Gibt es Systeme, bei denen der Trägheitssatz in allen drei Dimensionen gilt? Ja, frei fallende bzw. im All schwebende Systeme (siehe Abb. 14).

Hilfe zu A5 a: Wenn man annimmt, dass Haare in einem Jahr 12 cm wachsen, dann ergibt das eine Wachstumsgeschwindigkeit von $3{,}8 \cdot 10^{-9}$ m/s. Bei angenommenen 10 cm pro Jahr ist die Geschwindigkeit $3{,}2 \cdot 10^{-9}$ m/s.
b: Atome haben einen Durchmesser von etwa 10^{-10} m. Daher müssen also an den Haarwurzeln etwa 30 bis 40 „Atomschichten" pro Sekunde eingelagert werden.
c: Ein Haar hat einen Durchmesser von etwa 0,1 mm (10^{-4} m). Pro Sekunde entsteht am unteren Ende ein neuer „Haarzylinder" mit einem Durchmesser von 10^{-4} m und einer Höhe von 4.10^{-9} m. Das Volumen eines Zylinders ist $V_{zyl} = r^2\pi h = (0{,}5.0^{-4})^2.\pi.4.10^{-9}\ \text{m}^3 = \pi.4.0{,}25.10^{-8}.10^{-9}\ \text{m}^3 \approx 3.10^{-17}\ \text{m}^3$
Ein Atom hat einen Durchmesser von etwa 10^{-10} m und benötigt daher ein Volumen von etwa 10^{-30} m³.
Pro Haar und pro Sekunde benötigt man daher $3.10^{-17}/10^{-30} = 3 \cdot 10^{13}$ Atome, also 30 Billionen Atome. Ein Mensch hat etwa 100.000 Haare am Kopf. Das macht also in Summe $3.10^{13} \cdot 10^5 = 3.10^{18}$ Atome pro Sekunde, also 3 Trillionen Atome.

Hilfe zu A6 a: Das Alter des Universums ist $4{,}3 \cdot 10^{17}$ s.
b: Mit dem Kehrwert der Zahl, also mit $2{,}3 \cdot 10^{-18}$ m/s.

Hilfe zu A7 a: Um den zeitlichen Abstand zu ermitteln, musst du beobachten, wann das vordere Auto bei einer markanten Stelle vorbeifährt (etwa einer Straßenmarkierung am Rand) und dann die Sekunden zählen, bis du ebenfalls an dieser Markierung vorbeikommst. Zur Faustregel: Aus $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{s}/t$ ergibt sich $\boldsymbol{s} = \boldsymbol{v} \cdot t$. Weiters gilt km/h durch 3,6 = m/s. Für den Abstand zum vorderen Auto gilt daher

$$s = \frac{x\ \text{km/h}}{3{,}6} \cdot 2s = x\ \text{km/h} \cdot 2/3{,}6 \approx x\ \text{km/h} \cdot 0{,}5$$

Um die Meter für den richtigen Abstand abzuschätzen, muss man also die Geschwindigkeit in km/h durch 2 dividieren. Auf der Autobahn sollte man daher etwa 65 m Sicherheitsabstand halten.
b: 130 km/h entsprechen etwa 36 m/s. Bei 5 m Abstand müssten Dränger eine beinahe überirdische Reaktionszeit von 0,14 s aufweisen.

Hilfe zu A8 a: Am einfachsten ist es, sich in das Bezugssystem des überholten Autos zu begeben. Dann sieht der Vorgang so aus: Das hintere Auto überholte das stehende vordere Auto mit 20 km/h. Um die Zeit für den Überholvorgang zu berechnen, muss man daher nur die Formel $t = s/v$ benutzen. v entspricht der Relativgeschwindigkeit, s ist der gesamte Weg, der zurückgelegt werden muss, also Autolänge 1 + Autolänge 2 + Ausscherabstand + Einscherabstand. In diesem Fall ist der Weg also 8 m + 20 m = 28 m. Bei 20 km/h (5,55 m/s) beträgt die Zeit daher rund 5 Sekunden und der auf der Straße tatsächlich zurückgelegte Weg immerhin 154 m (Achtung: hier musst du die Geschwindigkeit relativ zur Straße einsetzen, also 100 km/h oder 27,8 m/s).

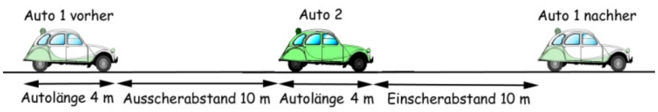

Abb. 15: Schematische Darstellung des Überholvorganges.

Hilfe zu A8 b: Im Falle der Laster ist der Gesamtweg aus der Sicht des überholten Lasters 40 m + 20 m = 60 m. Bei 5 km/h (1,39 m/s) ergeben sich dann rund 43 s und ein aus der Sicht der Straße zurückgelegter Weg von sehr beachtlichen 1015 m, also rund einem Kilometer.

Hilfe zu A9: Wenn du dich ungebremst weiterbewegst, dann benötigst du für 0,5 m 0,036 s, also weniger als 4/100 s! Der Airbag muss natürlich vorher aufgehen! Lies zum Thema Airbag in auf S. 104 in BB8 nach.

Hilfe zu A10: Überschlagsmäßige Abschätzung: In einer Sekunde fällt ein Gegenstand knapp 5 m tief. In der Hälfte der Zeit fällt er ein Viertel so tief, also 1,25 m. Für 1 m benötigt der Gegenstand daher etwas weniger als 0,5 Sekunden. Nach einer Sekunde hat ein fallender Gegenstand rund 10 m/s. Nach knapp 0,5 Sekunden daher auch knapp 5 m/s. Die genauen Werte siehst du in der Tabelle rechts oben.

Ort	g [m/s²]	Fallzeit [s] $t = \sqrt{2s/g}$	Differenz [s]	Aufprallgeschwindigkeit $v = a \cdot t$ [m/s]
Pol	9,832	0,45102	0	4,434
Wien	9,8086	0,45156	$5{,}38 \cdot 10^{-4}$	4,429
Salzburg	9,8073	0,45159	$5{,}68 \cdot 10^{-4}$	4,429
Graz	9,8070	0,45159	$5{,}75 \cdot 10^{-4}$	4,429
Äquator	9,780	0,45222	$1{,}20 \cdot 10^{-3}$	4,423
gerundeter Wert	10	0,44721	$-3{,}80 \cdot 10^{-3}$	4,472

Hilfe zu A11a: Die Kugel erreicht den „Boden“ nach etwa 85/1000 s und hat dabei eine Geschwindigkeit von 23,4 m/s (84,3 km/h).
b: Die Sonne hat eine Masse von $2 \cdot 10^{30}$ kg. Als weißer Zwerg hat sie somit etwa 10^{30} kg. Das Gewicht kann man einerseits über $F = mg$ berechnen, andererseits über das Newton'sche Gravitationsgesetz: $F = G \cdot (Mm/r^2)$. Man kann diese Formeln daher gleichsetzen und erhält: $g = (G \cdot M)/r^2$. Mit dem Erdradius (etwa $6 \cdot 10^6$ m), der oben erwähnten Masse und $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ m³kg⁻¹s⁻¹ erhält man für die Fallbeschleunigung $1{,}85 \cdot 10^6$ m/s². Der Fall dauert dann nur mehr 1/1000 Sekunde und die Endgeschwindigkeit liegt bei 1925 m/s (also knapp 2 km/s oder fast 7000 km/h). Beeindruckend!

Hilfe zu A12 a: $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \rightarrow \Delta t = \frac{\Delta v}{a} \approx 0{,}56\,s$
b: 1,1 g; **c:** 12 m/s² oder 1,2 g; das ist rund 2,7-mal so viel wie die gesetzlich vorgeschriebene Mindestbremsverzögerung.
d: $W = F \cdot s$, $P = W/t$. Daher ist $P = F \cdot (s/t) = F \cdot v$. Die Kraft ist in diesem Fall die Luftwiderstandskraft (siehe Kapitel 6.5): $F_W = 0{,}5\, c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$. Für die Leistung ergibt sich daher : $P = F_W \cdot v = 0{,}5\, c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$ und somit für die Anströmfläche $A = \frac{2P}{c_w \cdot \rho \cdot v^3} = 2{,}24\,m.$

Hilfe zu A13 a: Rechnen wir für einen „Bremsweg“ von 2 mm: $a = v^2/2s = 12 \cdot 10^3$ m/s² = 1200 g. Eine Besonderheit der Spechte ist, dass sie mit erheblichem Kraftaufwand und erheblicher Ausdauer mit ihrem Schnabel gegen Baumstämme klopfen und dabei das Holz zerspanen. Es wurde berichtet, dass der Helmspecht bis zu 12.000-mal pro Tag seinen Schnabel gegen Holz schlägt.

In mehreren wissenschaftlichen Publikationen wird erklärt, warum Spechte trotz dieser Belastungen keine Kopfschmerzen bekommen. Zum einen ist das Gehirn der Spechte von besonders wenig Gehirnflüssigkeit umgeben: Ihr Gehirn sitzt also relativ starr im Schädel und wird durch die beim Klopfen entstehenden Schockwellen nicht von innen gegen die Schädeldecke geschleudert, wodurch eine Gehirnerschütterung vermieden wird. Ferner ist der Schädel von auffallend starken Muskeln umgeben, die als Stoßdämpfer dienen: Wie bei einem Boxer, der einen Schlag herannahen sieht, werden diese Muskeln kurz vor dem Aufprall gegen das Holz angespannt und absorbieren so einen Großteil der Energie.

Hilfe zu A13 b: Der Specht beschleunigt den Kopf etwa 2 cm lang. Die dabei im Kopf gespeicherte Energie wird innerhalb einer Strecke von nur 5 mm abgegeben. Der „Bremsweg" hängt von der Härte des Holzes ab. Durch die kurze Bremsstrecke treten sehr hohe Kräfte und Leistungen auf: $W = F \cdot s \rightarrow F = W/s$ und $P = W/t$.

Hilfe zu A14: Man denkt vielleicht zuerst, dass ein möglichst starres Auto wesentlich sicherer wäre. Trotzdem baut man aber bei jedem Auto sogenannte Knautschzonen ein. Sie befinden sich an der Front und am Heck des Autos. Wieso? Bei einem Aufprall deformieren sich diese, wodurch das Fahrzeug nicht sofort zum Stillstand gebracht wird. Der Effekt ist also derselbe wie bei den Weichböden: die einwirkenden Kräfte werden verringert. Und durch diesen Effekt wird wiederum unsere Überlebenschance bei einem Unfall erhöht.

Hilfe zu A15: Die Antwort, die uns sofort auf der Zunge liegt, lautet viermal so schnell. Das ist aber falsch! Das Eindringen in den Matsch ist sozusagen wieder der Bremsweg. Eine Verdopplung der Geschwindigkeit bedeutet aber vierfache kinetische Energie und somit vierfachen Bremsweg. Du musst also nur doppelt so schnell werfen.
Die Bedeutung für den Straßenverkehr ist klar. Eine Verdopplung der Geschwindigkeit vervierfacht die Energie, die im Falle eines Zusammenstoßes in Verformung umgewandelt werden muss. Das Verletzungsrisiko wächst nicht mit der Geschwindigkeit, sondern mit dem Quadrat der Geschwindigkeit!

Hilfe zu A16: Möwen lassen die Muscheln aus einigen Metern Höhe fallen. Beim Auftreffen auf den Boden treten sehr hohe Kräfte auf, die die Schale der Muschel zerbrechen. Diese Methode funktioniert nur auf felsigem Boden, nicht jedoch auf Sandboden, wo die Bremsstrecke zu groß und daher die Kraft wesentlich kleiner ist. Umgekehrt verwendet man beim Sport Weichböden, um den Bremsweg möglichst zu vergrößern. Dadurch treten weniger Bremskräfte und somit auch weniger Verletzungen auf. Es gilt $F = W/s$. Je kürzer der „Bremsweg", desto größer die auftretende Kraft (Muscheln fallen auf felsigen Boden), je länger der „Bremsweg", desto kleiner die auftretende Kraft (Schüler/in springt auf Weichboden).

Hilfe zu A17: 1020 km/h ≈ 283 m/s. Die durchschnittliche Beschleunigung betrug daher $a = \Delta v/\Delta t =$ 283 m/s/1,4 s = 202 m/s^2 ≈ 20 g. Dabei wirkte im Augenblick der maximalen Abbremsung 46,2 g, sowie für ganze 1,1 Sekunden am Stück 25 g. Dies ist die höchste Beschleunigung, der ein Mensch bisher freiwillig standgehalten hat. Das Time Magazine veröffentlichte daraufhin eine Würdigung als *The fastest man on earth* and *No. 1 hero of the Air Force*.

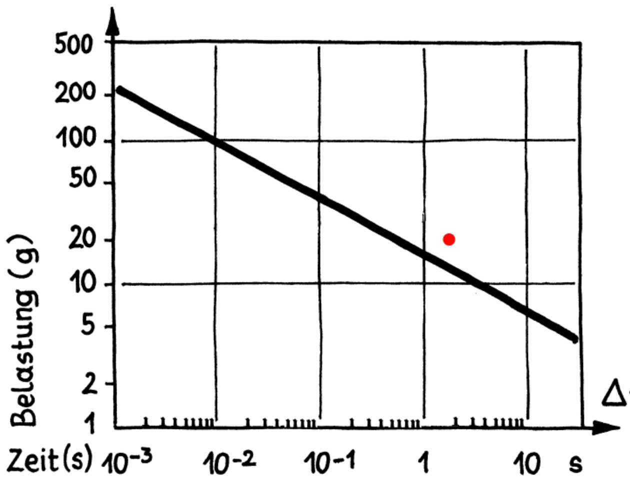

Abb. 16 zu A18 a

Hilfe zu A18 a: Eine hundertstel Sekunde und 100 g oder eine Sekunde und knapp 15 g ergeben eine 50 %ige Überlebenschance. J. P. Stapp befand sich mit 1,4 s bei etwa 20 g deutlich über der kritischen Linie (roter Punkt in Abb. 16). Eine Normperson wäre bei dieser Belastung wahrscheinlich gestorben.

Hilfe zu A18 b: In der Tabelle unten siehst du die Auswertung für 5 bis 30 m/s und die in die Grafik eingetragenen Werte.

v in m/s	v in km/h	$a = v^2/2s$ in m/s²	entspricht g ($g \approx 10$ m/s²)	$t = \sqrt{2s/a}$ in Sekunden
5	18	25	2,5	0,200
10	36	100	10	0,100
15	54	225	22,5	0,067
20	72	400	40	0,050
25	90	625	62,5	0,040
30	108	900	90	0,033

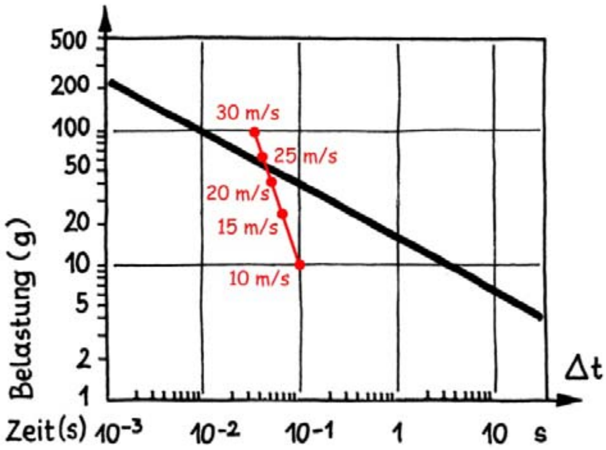

Abb. 17: Werte aus der Tabelle oben

Zwischen 20 und 25 km/h kommt man in den Bereich von weniger als 50 % Überlebenschance. Treten bei einem Frontalaufprall nun tatsächlich diese Kräfte auf? Die Größenordnung der Abschätzung ist richtig, aber die Wirklichkeit ist wesentlich komplizierter. Wenn du nämlich angeschnallt bist, dann sinkt die durchschnittliche Belastung, weil sich der Gurt dehnt und somit der Bremsweg für deinen Körper länger wird. Auf der anderen Seite erfolgt beim Aufprall auf die Lenkersäule oder den Airbag (der bei hohen Geschwindigkeiten allerdings noch nicht vollständig geöffnet sein wird; siehe A9) eine wesentlich höhere Beschleunigung als hier abgeschätzt. Und wie kommt man auf die wirklichen Belastungen? Nur durch den realen Versuch mit Crashtestdummies!

Hilfe zu A19: Zuerst ganz einfach: 30 m/s entsprechen 30·3,6 km/h = 108 km/h. Wenn das Auto in nur 2 Sekunden stehen bleibt, muss es über sehr sehr gute Bremsen verfügen. Wenn das Auto von 30 m/s auf 0 m/s in nur 2 Sekunden abbremst, beträgt die Bremsverzögerung 15 m/s². Diese Bremsverzögerung schaffen nur Supersportwagen mit speziellen Bremsen. Die gesetzlich vorgeschriebene Bremsverzögerung liegt bei nur 4,5 m/s², also bei weniger als einem Drittel.

Hilfe zu A20: Der Ball hüpft von links nach rechts, weil er beim Aufprall an Energie verliert und daher weniger hoch aufspringt. Wenn sich der Ball in der Luft befindet, dann befindet er sich im freien Fall. Die einzige Beschleunigung ist dann die Erdbeschleunigung g, die in allen drei Punkten gleich groß ist (siehe dazu auf F13 und F14 auf S. 26, Kap. 4.4.2). Die Länge des Pfeils ist Geschmackssache, er muss aber an allen drei Punkten gleich lang sein.

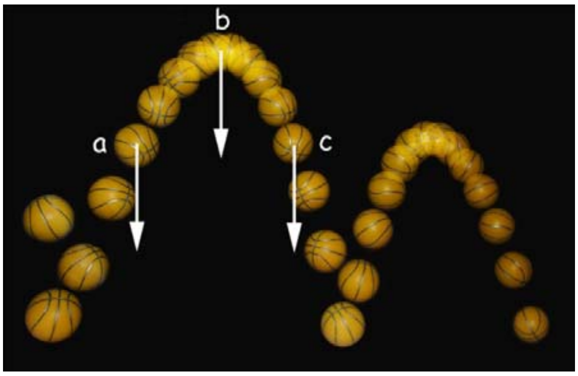

Abb. 18: Stroboskopaufnahme eines springenden Basketballs von Michael Maggs mit eingezeichneten Beschleunigungen.

Hilfe zu A21 a: Die Stoppung ergibt für die Fallzeit rund 1 s. Berücksichtige dabei, dass der Hammer sehr langsam zu fallen beginnt und man leicht den Anfang der Fallphase übersehen kann.
b: Der Zusammenhang zwischen Falltiefe, Zeit und Fallbeschleunigung lautet $s = (a/2)t^2$. Die Fallbeschleunigung am Mond beträgt 1,67 m/s². Die zu dieser Fallzeit und Beschleunigung passende Fallhöhe liegt daher bei etwa 0,83 m und ist daher zumindest größenordnungsmäßig richtig.
c: Wenn man die Gleichung oben nach t umformt, ergibt sich $t = \sqrt{2s/a}$. Bei gleicher Fallstrecke ergibt sich also der Zusammenhang $t \sim 1/\sqrt{a}$. Weil auf der Erde die Fallbeschleunigung 6-mal so groß ist, ist die Fallzeit bei gleicher Höhe generell 1/2,5 ≈ 0,4-mal kürzer. Im konkreten Fall würde der Fall also rund 0,4 Sekunden betragen.

Hilfe zu A22 a: Die Gleichsetzung von Luftwiderstandskraft und Gewicht und die Auflösung nach v ergibt $v = \sqrt{\frac{2mg}{c_W \rho A}}$ (siehe S. 61). 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 m^2. Bei einem c_W-Werte von 1,3 erhält man eine „Schwebegeschwindigkeit" von 34 m/s oder knapp rund 122 km/h. Mary Poppins würde eher unsanft aufschlagen!

Abb. 19: Die beiden Kräfte, die am System Mary Poppins - Tasche – Schirm angreifen, erzeugen ein Drehmoment. *(Quelle: Wikipedia; Nachbearbeitung: Martin Apolin)*

b: Ein Blick auf Abb. 12 zeigt, dass man selbst mit einem Fallschirm eine Sinkgeschwindigkeit von etwa 8 m/s erreicht. Mary Poppins Schirm muss daher sehr groß sein. Formen wir die Gleichung oben nach A um: $A = \frac{2mg}{\rho c_W v^2}$. Die Auflösung ergibt eine sagenhafte Fläche von über 2500 m^2 (genau 2515 m^2). Das wäre eine nette Grundstücksfläche. Wenn man 8 m/s einsetzt, die ein normaler Fallschirm erreicht, kommt man auf knapp 10 m^2. Das ist ein vernünftiger Wert für einen Fallschirm.

c: Verwenden wir die Gleichung oben, so ergibt sich $A \sim 1/v^2$ bzw. $v \sim 1/\sqrt{A}$. Um die Geschwindigkeit auf die Hälfte zu reduzieren, muss die Schirmfläche vervierfacht werden. Um die Geschwindigkeit von 8 m/s (Fallschirm) auf 0,5 m/s zu reduzieren (Mary Poppins), muss die Schirmfläche um den Faktor 16^2 = 256 wachsen. Daher hat ein Fallschirm eine Fläche von etwa 10 m^2 und der Schirm von Mary Poppins müsste über 2500 m^2 haben.

d: Die Gewichtskraft greift am gemeinsamen Schwerpunkt an. Die Luftwiderstandskraft kommt hauptsächlich durch den Schirm zu Stande und greift daher an diesem an. Dadurch entsteht ein Drehmoment, und Mary Poppins würde so lange kippen, bis sich der KSP genau unter dem Schirm befindet.

Hilfe zu A23: Die Gleichsetzung von Luftwiderstandskraft und Gewicht und die Auflösung nach v ergibt $v = \sqrt{\frac{2mg}{c_W \rho A}}$ (siehe S. 29). Weiters gilt $\rho_W = \frac{m}{V}$ Die Masse des Tropfens ist daher Dichte mal Volumen (Achtung: nicht die Wasserdichte mit der Luftdichte im Zähler der Formel verwechseln!). Das Volumen des Tropfens kann man durch $V = \frac{4r^3\pi}{3}$ berechnen. Die Schattenfläche entspricht einer Kreisfläche mit dem Radius der Kugel, also $A = r^2\pi$. Wenn man alles einsetzt und vereinfacht, erhält man $v = \sqrt{\frac{8g\rho_W r}{3c_W \rho_L}}$. Die Endgeschwindigkeit v ist daher proportional zu $\sqrt{r}$. Eine Vervierfachung des Radius ergibt eine Verdopplung der Fallgeschwindigkeit. (Anm.: Die „Tropfengröße" in Abb. 6.37 bezieht sich auf den Radius des Tropfens).

Hilfe zu A24: Aus $P = \frac{W}{t}$ und $W = Fs$ folgt $P = \frac{Fs}{t} = Fv$. Wir nehmen an, dass die gesamte Leistung durch den Reibungswiderstand zwischen Auto und Luft zu Stande kommt. ***F*** ist daher die Reibungskraft F_W, die es zu überwinden gilt: $P = F_W v = \frac{1}{2} c_W \rho A v^3$. Für die Endgeschwindigkeit ergibt das $v = \sqrt[3]{\frac{2P}{c_W \rho A}}$.

Wenn man 176 kW (also 176.000 W), einen c_W-Wert von 0,29 und eine Anströmfläche von 1,96 m^2 einsetzt, erhält man v = 80 m/s oder 289 km/h. Die offizielle Angabe beträgt 256 km/h. Wie kommt es zu der Differenz von 25 km/h? Erstens treten auch andere Reibungswiderstände auf (Reifen und Straße), zweitens gilt die angegebene Leistung nur für eine bestimmte Drehzahl.