Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften

Life Sciences und
Facility Management

# Physik

für die Studienrichtung Lebensmitteltechnologie

Auf den nachfolgenden Seiten finden Sie den Stoff, der im ersten Semester vorausgesetzt wird:

Als ausführlichere Lehrmittel empfehlen wir zudem folgende Bücher:

- „Physik 1", Compendio Bildungsmedien, ISBN 978-3-7155-9370-8
- „Physik 2", Compendio Bildungsmedien, ISBN 3-7155-9088-2

Wädenswil, 06. Juli 2005 murs

# 0. Mechanik

Die Mechanik, die Wissenschaft von Kräften und Bewegungen, ist das Fundament der Physik. Im Mittelschul– und im Hochschul–Physik–Unterricht füllt sie meist viele Lektionen. Bei uns liegt der Schwerpunkt eher auf anderen Bereichen. Aber gewisse Grundlagen aus der Mechanik werden auch in diesen anderen Bereichen vorausgesetzt. Daher eine kurze Repetition in diesem Kapitel.

## 0.1 Vektorielle Grössen

Bevor wir richtig loslegen, eine allgemeine Bemerkung. Man unterscheidet in der Physik zwischen „Skalaren" (oder „skalaren Grössen") und „Vektoren" (oder „vektoriellen Grössen"). Vektoren sind Grössen, die einen räumlichen Richtungssinn haben. Z.B. eine Kraft: die zieht oder stösst in eine bestimmte Richtung. Skalaren Grössen dagegen fehlt dieser Richtungssinn, z.B. der Lufttemperatur oder der Farbe eines Autos.

Will man eine vektorielle Grösse vollständig angeben, muss man „Betrag" (z.B. wie stark eine Kraft ist) *und* Richtung formulieren. Das mit den Richtungsangaben werden wir nicht richtig auskosten, aber in einer stark reduzierten Form begegnet es uns: vektorielle Grössen wie z.B. eine Kraft haben ein positives Vorzeichen, wenn sie in der Richtung der Koordinatenachse gehen, in der entgegengesetzten Richtung sind sie negativ.

($\xi$) Notation: Vektoren schreibt man gerne mit einem Pfeil (z.B. „Kraft $\vec{F}$"), wenn man den Richtungssinn betonen will. Kommt bei uns vielleicht hin und wieder vor, du kannst es aber auch ignorieren.

## 0.2 Bewegung

### 0.2.1 Ort und Geschwindigkeit

Die „Kinematik" („Bewegungs–Lehre") lehrt uns, Bewegungen zu beschreiben. Aber eben nur zu *beschreiben*, ohne die Ursachen in die Betrachtung mit einzubeziehen, ohne Zusammenhang mit Kräften und dergleichen.

Wir beschränken uns hier auf die Bewegung von Festkörpern; die Bewegung von Flüssigkeiten und Gasen (—> Strömungslehre) wird in der Betriebstechnik angesprochen werden. Mindestens für die Fragestellungen, mit denen wir uns hier auseinandersetzen, kann man Festkörper auf einen Punkt reduzieren. (Schwerpunkt). Das ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn weder die Ausrichtung, noch Drehbewegungen eine Rolle spielen. Aber wenn man z.B. die Fahrt eines Autos von Wädenswil nach Chur beschreiben will (wann ist das Auto wo?), reicht es aus, die Bewegung seines Schwerpunktes zu beschreiben. Man spricht von „Massenpunkt" und von „Punktmechanik".

Eine mögliche Beschreibungsweise einer Bewegung eines Massenpunktes stellt die „Ortsfunktion" $x(t)$ dar, d.h. man gibt an, *wann* der Punkt *wo* ist. Die Ortsfunktion kann man wie jede Funktion (siehe Mathi) in verschiedenen Arten darstellen. Beliebt ist das $x-t-$Diagramm (auch „Orts–Zeit–" oder „Weg–Zeit–Diagramm").

Eine weitere Grösse, mit der man die Bewegung eines Massepunktes beschreiben kann, ist die Geschwindigkeit $v$. Volkstümlich ist die Geschwindigkeit als „Weg pro Zeit" definiert. Systematischer ist es die Ableitung der Ortsfunktion nach der Zeit:

∇ DEFINITION: DIE GESCHWINDIGKEIT $v(t)$ IST DIE ABLEITUNG DER ORTSFUNKTION:

$$v(t) = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}x(t) \,. \tag{0.1}$$

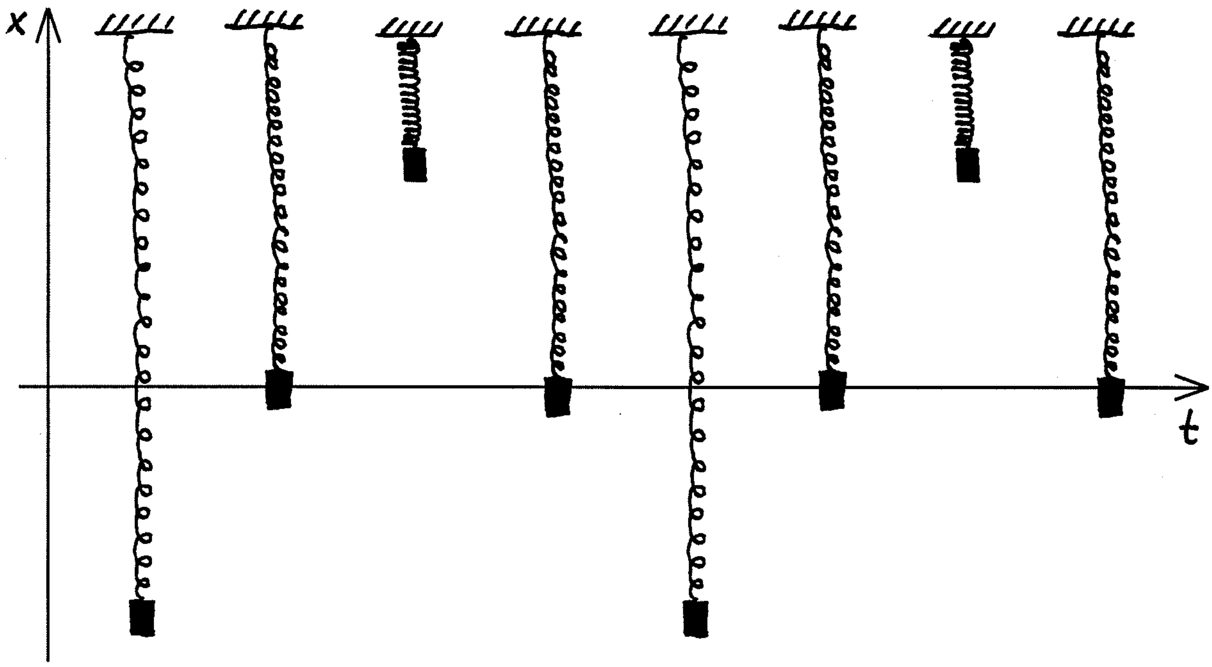
Auch die Geschwingkeit kann man als Funktion $v(t)$ der Zeit auffassen. Entsprechend gibt es das $v-t-$Diagramm,
bzw. „Geschwindigkeits–Zeit–Diagramm".

? *Frage 0.1:*

*(Lösungen zu den numerierten Frage auf* *p. 0–24ff.)*

*Eine Masse schwingt an einer Feder auf und ab. Die Höhe $x$ der Masse ist*

$$x(t) = \sin(t) \; .$$




*Wie sieht dann $v(t)$ aus?*

Als Ableitung der Ortsfunktion ist die Geschwindigkeit im $x-t-$Diagramm als Steigung des Graphen zu sehen.

Umgekehrt ist die Ortsfunktion die Stammfunktion der Geschwindigkeit und als Fläche unter dem Graphen im $v-t-$Diagramm zu sehen.

### 0.2.2 Beschleunigung

Der Schritt von der Geschwindigkeit zur Beschleunigung ist ganz analog dem von der Ortsfunktion zur Geschwindigkeit. Einfach die Geschwindigkeit noch einmal ableiten:

> ∇̥ DEFINITION: DIE BESCHLEUNIGUNG $a(t)$ IST DIE ABLEITUNG DER GESCHWINDIGKEITSFUNKTION:
>
> $$a(t) = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} v(t) = \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2} x(t) . \tag{0.2}$$

Kommentare:

o volkstümlich: „Beschleunigung gleich Geschwindigkeitsänderung pro Zeit".

o Wenn $a(t)$ die Ableitung von $v(t)$ ist, so ist $v(t)$ umgekehrt die Stammfunktion von $a(t)$.

o Die Beschleunigung sieht man im $v-t-$Diagramm als Steigung der Kurve. Umgekehrt sieht man die Geschwindigkeit als Fläche unter der Kurve im $a-t-$Diagramm.

o Im Gegensatz zur Normalsprache, bedeutet der physikalische Fachausdruck „Beschleunigung" nicht unbedingt, dass der *Betrag* der Geschwindigkeit zunimmt, dass etwas „schneller" wird. Von Beschleunigung spricht man in der Physik auch, wenn $v$ kleiner wird. Im $v-t-$Diagramm fällt dann der Graph; seine Steigung, also $a$, ist damit negativ, wir haben eine *negative Beschleunigung*. Bei positivem $v$ ist dies eine Verlangsamung, Abbremsung, „Verzögerung".

o Eine Beschleunigung im Sinne des physikalischen Fachausdrucks muss nicht einmal den Betrag der Geschwindigkeit (die „Schnelligkeit") ändern. Es kann auch einfach eine Richtungsänderung sein. Denn Geschwindigkeit ist eine vektorielle Grösse, d.h. eine Grösse mit Richtungssinn. Eine Änderung dieser Richtung ist eine Änderung der Grösse $v$, und damit ist $a$ auch nicht gleich null.

(?) Wie sehen die Orts– und die Geschwindigkeits–Funktion aus, wenn die Beschleunigung einen konstanten Wert hat?

(Ʊ) *Einheit: Die Masseinheiten ergeben sich in der Physik meist aus den Definitionen.*
*Für die Geschwindigkeit ist das* $\frac{m}{s}$
*und für die Beschleunigung* $\frac{m}{s^2}$.
*Dies sind die SI–Basiseinheiten. Für die Geschwindigkeit ist im Alltag km/h gebräuchlich. In Amerika braucht man mph (miles per hour), in der See– und in der Luftfahrt „Knoten" (Seemeilen pro Stunde).*

(?) *Frage 0.2: Wie rechnet man km/h in m/s um?*

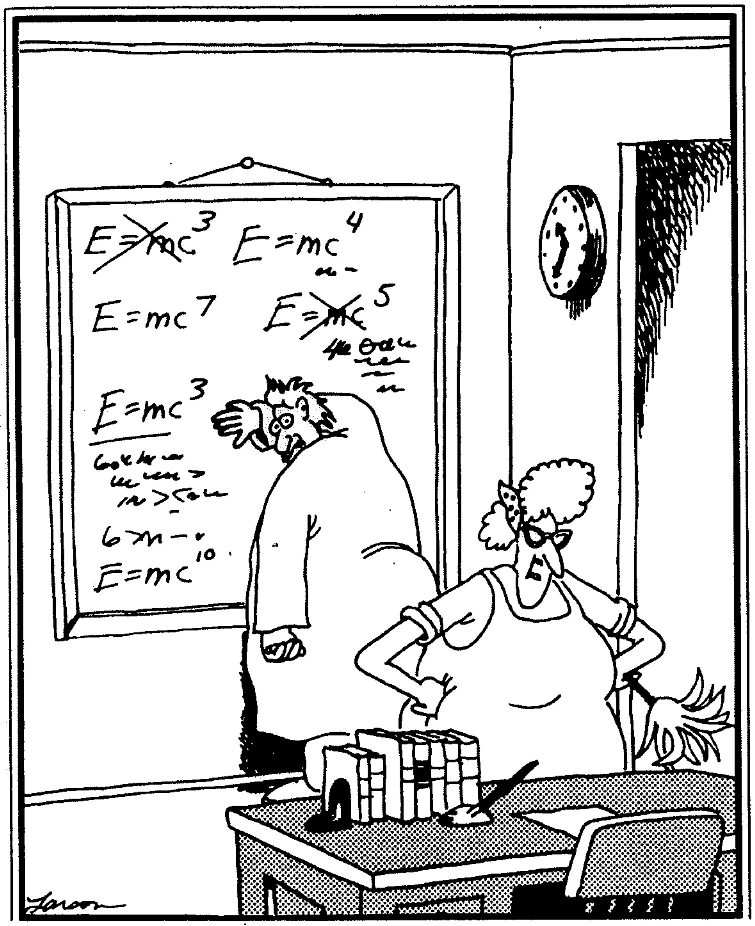
## 0.3 Masse

Die Bewegungen, die man beschreiben möchte, sind die Bewegungen von *Körpern.* Was muss man von einem Körper auch noch wissen, wenn man seine Bewegung verstehen will? Die wichtigste mechanische Eigenschaft eines Körpers ist seine „Masse". Wie wir in Bälde sehen werden, ist die Masse entscheidend für den Zusammenhang zwischen Bewegung und Kraft.

Masse ist ein Mass für die Grösse eines Körpers, für die Stoffmenge, aus der er besteht. Man kann die Grösse eines Körpers auch in $m^3$ oder mol angeben. Aber für die Mechanik sind Grössenangaben in kg praktischer.

Ⓤ *<u>Einheit:</u> kg ist die SI–Grundeinheit der Masse.*

Masse ist nicht das gleiche wie Gewicht! Auf diesen Unterschied werden wir im Zusammenhang mit der Gewichtskraft noch zu sprechen kommen.




**"*Now* that desk looks better. Everything's squared away, yessir, squaaaaaared away."**

## 0.4 Kraft

### 0.4.1 Was ist das, eine Kraft?

Was eine Kraft ist, weisst du aus dem normalen Leben – anders als bei manch anderen physikalischen Begriffen stimmen hier Fachsprache und Normalsprache weit gehend überein. Du kennst z.B. die Gewichtskraft, die dich am Boden hält, Reibungskräfte, dank denen dein Velo bremsen kann, die Muskelkraft, die Kraft einer gespannten Feder, und so fort.

Eigenschaften von Kräften:

- Eine Kraft hat immer einen Richtungssinn. Z.B. zieht die Gewichtskraft immer nach unten, oder genauer gesagt, in die Richtung des Erdmittelpunktes. Kraft ist also eine vektorielle Grösse.
- Eine Kraft geht immer von einem Körper 1 aus. Eine Kraft wirkt immer auf einen Körper 2. Z.B. wirkt die Schwerkraft ausgehend vom Körper Erde auf den Körper Tisch (an dem du gerade sitzt). Körper 1 und Körper 2 können nicht identisch sein, eine Kraft wirkt niemals auf den Körper, von dem sie ausgeht. (Ausser bei Münchhausen, der sich an seinen eigenen Haaren aus dem Sumpf zieht.)

? *Frage 0.3: Ein Auto bremst. Das erfordert eine Kraft. Was ist hier Körper 1, was ist Körper 2?*

- Wirken zwei oder mehr Kräfte auf den gleichen Körper (und nur dann!), so addieren sie sich in ihrer Wirkung, der Körper reagiert auf die Kräfte gleich wie auf eine einzige, die der Summe der einzelnen Kräfte entspricht.
  Diese „Summe" der einzelnen Kräfte bezeichnet man als „Resultierende".
  Nun ist aber noch zu präzisieren, was mit „addieren" gemeint ist. Die Kräfte sind ja eben Grössen mit Richtungssinn:
  - Wirken zwei (oder mehrere) Kräfte in die gleiche Richtung („parallele" Kräfte), so ist die Resultierende die Summe der Einzelkräfte.
  - Wirken sich zwei Kräfte diametral entgegen („antiparallele" Kräfte), so ist die Resultierende die Differenz der Einzelkräfte.
  - Stehen die einzelnen Kräfte in einem anderen Winkel zueinander, ist die Resultierende die „Vektorsumme". Diese besprechen wir an dieser Stelle nicht(siehe Mathi).

  Wichtig ist, dass sich diese Erkenntnisse nur auf Kräfte beziehen, die auf den *gleichen* Körper wirken! Man darf keine Kräfte zusammenzählen, die auf verschiedene Körper wirken.

- Wirkt eine Kraft $F_1$ von Körper A auf Körper B, so wirkt gleichzeitig auch eine Kraft $F_2$ von Körper B auf Körper A. Dabei ist $F_2$ im Betrag gleich gross wie $F_1$ und in der Richtung $F_1$ entgegengesetzt.
  Beispiel: ich drücke mit der Faust auf den Tisch, der Tisch stoppt meine Faust, gibt eine Gegenkraft gegen meine Faust.
  Dies ist als „Wechselwirkungsgesetz" bekannt oder einprägsamer als „Actio = Reactio".
  Wichtig ist, dass die Actio nicht auf den gleichen Körper wirkt wie die Reactio. Sonst würden sich die beiden Kräfte ja aufheben; und da es zu jeder Kraft eine Reactio gibt, würden alle Kräfte der Welt aufgehoben, es gäbe gar keine Kräfte.

? *Frage 0.4: Was ist die Reactio zum Luftwiderstand, mit dem ein Auto gebremst wird?*

ξ Notation: Das übliche Formelzeichen für eine Kraft ist $F$ (in Erinnerung an englisch „force"). Um daran zu erinnern, dass die Kraft ein Vektor ist, schreibt man das Formelzeichen manchmal mit einem Pfeil: „$\vec{F}$".

*Einheit: Die Masseinheit für die Kraft heisst „Newton", abgekürzt: N.*
*Stell dir irgendwas vor, das eine Masse von 100 g hat (z.B. eine Tafel Schokolade). 1 N ist die Kraft, mit der das Gewicht dieser 100 g auf deine Hand drückt.*
*(Eine präzisere Definition folgt im nächsten Abschnitt, diese hier ist nur behelfsmässig, provisorisch.)*


DIE ERFINDUNG DES AUTOS, WELCHES KEIN BENZIN VERBRAUCHT, WEIL ES IMMER BERGAB ROLLT, ENDETE MIT EINER HERBEN ENTTÄUSCHUNG.

### 0.4.2 Zusammenhang zwischen Kraft und Bewegung

Mechanik ist die Lehre von den Bewegungen und von den Kräften. Der zentrale Punkt der Mechanik ist der Zusammenhang zwischen diesen beiden Dingen: was haben Bewegungen und Kräfte miteinander zu tun? Die Antwort auf diese Frage gibt das wichtigste Gesetz der Mechanik, das

> KRAFTWIRKUNGSGESETZ VON NEWTON: UM EINEM KÖRPER DER MASSE $m$ EINE BESCHLEUNIGUNG $a$ ZU VERLEIHEN, MUSS AUF DIESEN KÖRPER EINE RESULTIERENDE KRAFT
>
> $$F = m \cdot a \tag{0.3}$$
>
> WIRKEN. BESCHLEUNIGUNG UND KRAFT HABEN DIE SELBE RICHTUNG.

Ⓤ *Einheit: Jetzt kann man die Definition der Krafteinheit Newton ablesen:*

$$1\ N = 1\ kg \cdot 1\ \frac{m}{s^2} = 1 \cdot \frac{kg\,m}{s^2}\,, \tag{0.4}$$

*oder in Worten: 1 Newton ist die Kraft, die es braucht, um einem Körper von 1 kg Masse eine Beschleunigung von 1 $\frac{m}{s^2}$ zu verleihen.*

? *Frage 0.5:*

*a) Wie stark wird eine Tafel Schockolade (100 g) beschleunigt, wenn man sie fallen lässt?*

*b) Wie sieht es bei einem 8 kg schweren Stein aus? (Vorausgesetzt, der Luftwiderstand spielt keine Rolle.)*

? *Frage 0.6: Ein Sportwagen von 900 kg Masse soll in 6 s „von null auf 100" kommen. Welche Kraft ist dazu nötig? (Der Einfachheit nehmen wir an, Kraft und Beschleunigung wären während des Vorganges konstant.)*

Denken wir über das zentrale Gesetz (0.3) noch etwa nach:

- Die Kraft ist proporzional zur Masse des Körpers. Das klingt plausibel: je schwerer z.B. ein Ball ist, desto mehr Kraft brauchst du, um den Ball wegzukicken. Die Masse erscheint hier alse ein Art Trägheit, die sich der Beschleunigung entgegenstellt.
- Das Kraftwirkungsgesetz ist im Alltag alles andere als offensichtlich. Zwar erleben wir täglich, dass es eine Kraft braucht, um etwas zu bewegen, aber die meisten Menschen würden die Kraft eher mit der *Geschwindigkeit* in Beziehung bringen als mit der Beschleunigung. Das Kraftwirkungsgesetz ist der Grund, weshalb ich die Beschleunigung in der Kinematik überhaupt besprochen habe. Sie erscheint dort eher als etwas, „das es auch noch gibt", das man

auch noch erwähnen kann, um die Lektion voll zu kriegen. Aber jetzt erkennen wir, dass sie in einem gewissen Sinn die zentrale Bewegungsgrösse ist, nämlich diejenige, die den Zusammenhang mit Kräften und damit mit den Ursachen von Bewegungen herstellt. In mechanischen Fragestellungen geht man oft von den Kräften aus und leitet die durch die Kräfte verursachten Bewegungen her, indem man mit (0.3) die Beschleunigung berechnet und daraus dann anschliessend $v(t)$ und $x(t)$ mit den Methoden der Kinematik.

(?) *Frage 0.7: Wenn eine Tafel Schokolade wie im Beispiel oben zu Boden fällt, so ist das eine Folge der Erdanziehungskraft. Was ist hierzu die Reactio und wie wirkt sie sich aus?*

o Der Antwort auf diese Frage entnehmen wir: auch wenn Actio und Reactio (im Betrag) gleich gross sind, heisst das nicht, dass auch die hervorgerufenen Wirkungen gleich sind – denn hier spielt noch die Masse der entsprechenden Körper hinein.

o Nach dem Kraftwirkungsgesetz (0.3) bewirkt eine Kraft also eine Beschleunigung. Man muss sich dabei aber immer an die verschiedenen Eigenschaften von Kräften erinnern (z.B. dass sich zwei oder mehr Kräfte, die auf den gleichen Körper wirken, zur Resultierenden aufaddieren, und dass es diese Resultierende ist, die zählt). Und an die verschiedenen Eigenschaften der Beschleunigung: z.B. dass sie auch negativ sein kann, oder eine Ablenkung darstellen kann, bei der sich der Betrag der Geschwindigkeit nicht ändert.

(?) *Frage 0.8: Wie verhält es sich (u.a. in Bezug auf Vorzeichen) mit Kraft und Beschleunigung*
*a) bei einem fallenden Regentropfen?*
*b) bei einem Auto, das abbremst?*
*c) bei einem Auto, das mit konstanter Geschwindigkeit um eine Kurve fährt?*
*d) bei einem Auto, das mit konstanter Geschwindigkeit geradeaus fährt?*

o Ein wichtiger Spezialfall von (0.3) ist das

> „TRÄGHEITSGESETZ": EIN KÖRPER, AUF DEN KEINE RESULTIERENDE KRAFT WIRKT, BLEIBT IN RUHE, ODER ER BEWEGT SICH MIT KONSTANTER GESCHWINDIGKEIT, UND UMGEKEHRT.

Das ist einfach der Spezialfall $F = 0$ / $a = 0$.

(?) Suche Beispiele im Alltag, wo das Trägheitsgesetz wirkt.

o (0.3) ist eigentlich die Definition von „Kraft". Meine vorangehenden Bemerkungen waren keine brauchbare Definition, sondern bestenfalls Hinweise.

### 0.4.3 Ein paar spezielle Kräfte

Es gibt viele verschiedene Arten von Kräften. Ein paar besonders wichtige wollen wir exemplarisch anschauen.

o Die Gewichtskraft

Ein Körper, der zu Boden fällt, wird mit der Erdbeschleunigung

$$g = 9.8\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \tag{0.5}$$

beschleunigt. Welche Kraft braucht es, um einem Körper der Masse $m$ die Beschleunigung $g$ zu geben? Natürlich

$$F_{\mathrm{G}} = m \cdot g \tag{0.6}$$

(sagt doch das Kraftwirkungsgesetz). Und was ist das für eine Kraft, die die Masse fallen lässt? Das ist die „Gewichtskraft" oder kurz „Gewicht" oder „Schwerkraft" oder „Schwere". Sie heisst auch „Gravitationskraft", wobei man diesen Begriff mehr in z.B. astronomischen Zusammenhängen verwendet.

*Einheit: Jetzt ist auch klar, warum 1 N etwa dem Gewicht von 100 g Schokolade entspricht, oder?*

Die Formel (0.6) für die Gewichtskraft gilt zwar immer, aber die Fallbeschleunigung hat nicht immer den Wert von (0.5). An der Erdoberfläche variiert der Wert zwar nur um Promille (je nach dem, wo man steht – Pol oder Äquator, Berg oder Tal). Aber er ist völlig anders im Weltraum. Auf dem Mond ist die Fallbeschleunigung z.B. etwa 6 mal langsamer. Und „Schwerelosigkeit" bedeutet sogar

$$g = 0\ .$$

Gewicht ist nicht das gleiche wie Masse. Das soll in den folgenden Fragen klarer werden:

? *Frage 0.9: Was sagst du zu den Aussagen:*

*a) „ich bin 70 kg schwer",*

*b) „das Gewicht hat einen Richtungssinn",*

*c) „2 kg Bananen sind auch im Weltraum 2 kg Bananen."*

**Übrigens: Nachdenken über die Fallbewegung**
(aus R.U. Schneider: „das Buch der verrückten Experimente", Bertelsmann)
Ist es möglich, die Meinung zu widerlegen, dass ein schwerer Stein schneller fällt als ein leichter, ohne je einen Stein in die Hand zu nehmen? Der italienische Gelehrte Galileo Galilei tat im 17. Jahrhundert mit einem Gedankenexperiment genau das. Damals galt noch die zweitausend Jahre alte Ansicht des griechischen Gelehrten Aristoteles: die Geschwindigkeit von frei fallenden Körpern ist proportional zu ihrem Gewicht.
In seinem Gedankenexperiment band Galilei den schweren und den leichten Stein zusammen und fragte sich, wie schnell die Steine jetzt wohl fallen würden. Falls Aristoteles tatsächlich Recht hätte und der schwere Stein allein schneller fiele als der leichte, dann „bremst der langsame den schnellen, und der schnelle beschleunigt den langsamen. Zusammen haben sie also eine Geschwindigkeit, die zwischen der des langsamen und der des schnellen Steins liegt." Andererseits, argumentierte Galilei, seien die beiden Steine zusammen doch schwerer als der schwere Stein allein und müssten deshalb schneller fallen als der schwere Stein. Das Prinzip von Aristoteles führt zu einem Widerspruch, der sich erst auflöst, wenn man annimmt, dass die Fallgeschwindigkeit eines Körpers unabhängig von seinem Gewicht ist. Die Alltagserfahrung, dass ein Laubblatt langsamer fällt als eine Bleikugel, hat nichts mit dem Gewicht der beiden Gegenstände zu tun, sondern mit dem unterschiedlichen Widerstand, den sie der Luft mit ihrer Form und Oberfläche entgegensetzen. Wer es immer noch nicht glaubt: auf dem Mond wurde es getestet.

## o Die Reibungskraft

### Das Phänomen Reibung und seine Bedeutung

Ebenso omnipräsent wie die Gewichtskraft ist in unserem Leben die Reibung. Sie ist schuld daran, dass im Alltag alles früher oder später zum Stillstand kommt, wenn es nicht durch einen Motor oder etwas Entsprechendes angetrieben wird (zum Beispiel ein Einkaufswägeli, dem man einen Schupf gegeben hat – irgendwo bleibt es „von selbst" stehen). Und auch wenn ein Motor oder sonst eine Vortriebskraft vorhanden ist: etwas bremst, und das ist die Reibung (plus eventuell noch anderes, je nach Situation).
Handkehrum könnten wir uns ohne Reibung gar nicht vom Fleck bewegen.

(?) Wie sähe eine Welt ohne Reibung aus?

Wenn du Velo fährst, denkst du bei der bremsenden Kraft vielleicht zuerst an den Luftwiderstand. Auch dies wird als eine Art Reibung bezeichnet.

Gleit–Reibung

Mit welcher Kraft bremst die Reibung, wenn zwei Körper aneinander entlanggleiten, und wovon hängt diese Kraft ab? Antwort gibt das

> „GLEIT–REIBUNGS–GESETZ": WENN ZWEI FESTE KÖRPER, DIE SICH AN EINER GEMEINSAMEN, EBENEN FLÄCHE DER GRÖSSE $A$ BERÜHREN, ANEINANDER ENTLANG GLEITEN, WIDERSETZT SICH DIESER BEWEGUNG DIE GLEITREIBUNG
>
> $$F_{\mathrm{R}} = \mu_{\mathrm{G}} \cdot F_{\perp}\ . \tag{0.7}$$
>
> DABEI IST $\mu_{\mathrm{G}}$ DIE „GLEITREIBUNGSZAHL" (ODER: DER „GLEITREIBUNGS–KOEFFIZIENT") UND $F_{\perp}$ DIE KRAFT, MIT DER DIE BEIDEN KÖRPER GEGENEINANDER GEDRÜCKT WERDEN („NORMALKRAFT").

Bemerkungen:

- Der Koeffizient ist eine dimensionslose Zahl (also ohne Masseinheit). Sie hängt ab von der Beschaffenheit der Oberflächen. Rauhes Holz auf grobem Stein hat ein anderes $\mu_{\mathrm{G}}$ als Papier auf fein geschliffenem Holz. Eine kleine Tabelle mit *ungefähren(!)* Werten:

| | $\mu_{\mathrm{G}}$ | $\mu_{\mathrm{H}}$ |
|---|---|---|
| Holz auf Holz | 0.4 | 0.6 |
| Stahl auf Stahl | 0.1 | 0.15 |
| Pneu auf Asphalt (trocken) | 0.6 | 1.0 |
| Stahl auf Eis | 0.014 | 0.027 |

  (Von $\mu_{\mathrm{H}}$ wird weiter unten die Rede sein.)

- Das Gesetz (0.7) ist in der Praxis nicht sehr genau. Wenn man genauer hinschaut (was wir nicht tun werden), entpuppt sich Reibung als etwas gar nicht so Einfaches.
- Bemerkenswert ist vor allem, was in (0.7) alles *nicht* vorkommt. Was würde man „vom Gefühl her" noch erwarten?

? *Frage 0.10: Ein Eishockey–Puck schlittert mit anfänglich $v_0 = 15$ m/s übers Eis. Der Puck hat eine Masse von 120 g, 6 cm Scheibendurchmesser, und der Reibungskoeffizient betrage etwa $\mu_{\mathrm{G}} \approx 0.1$*

*a) Mit welcher Kraft wird er gebremst?*

*b) Nach wie vielen Sekunden bleibt er auf dem Eis liegen?*

*c) Wie weit rutscht er in dieser Zeit?*

### Haft–Reibung

Die Reibung ist nach (0.7) zwar unabhängig von $v$. Aber im Spezialfall $v = 0$, d.h. wenn gar keine Bewegung vorhanden ist, verhält es sich doch anders mit der Reibungskraft. Man spricht dann auch nicht mehr von „Gleitreibung", sondern von „Haftreibung".

> „HAFT–REIBUNGS–GESETZ": WENN ZWEI FESTE KÖRPER, DIE SICH AN EINER GEMEINSAMEN, EBENEN FLÄCHE DER GRÖSSE $A$ BERÜHREN, NICHT GEGENEINANDER BEWEGEN, DANN WIDERSETZT SICH EINER POTENZIELLEN BEWEGUNG DIE GLEITREIBUNG VON MAXIMAL
>
> $$F_{\mathrm{H}} = \mu_{\mathrm{H}} \cdot F_{\perp} \,. \tag{0.8}$$
>
> DABEI IST $\mu$ DIE „HAFTREIBUNGSZAHL" (ODER: DER „HAFTREIBUNGS–KOEFFIZIENT") UND $F_{\perp}$ DIE KRAFT, MIT DER DIE BEIDEN KÖRPER GEGENEINANDER GEDRÜCKT WERDEN („NORMALKRAFT").

Um etwas vorerst Ruhendes zum Gleiten zu bringen, muss man erstmal die Haftreibung überwinden. Deshalb starten Bewegungen manchmal mit einem Ruck (plötzliche Kraftänderung von Haftreibung auf Gleitreibung).

? *Frage 0.11: Welche Kraft ist minimal nötig, um den Puck von vorhin aus der Ruhe in Bewegung zu versetzen? ($\mu_{\mathrm{H}} \approx 0.15$.)*

### Andere Arten der Reibung

Nebst der Haft– und der Gleitreibung gibt es noch die „Rollreibung", die beschreibt, wie leicht ein Rad rollt. Behandeln wir hier nicht weiter.

Es sei noch einmal erwähnt, dass auch Luftwiderstand, der Widerstand, den einem das Wasser beim Schwimmen entgegensetzt, und Ähnliches als „Reibung" bezeichnet wird. Die Gesetzmässigkeiten sind aber ganz anders, wenn Flüssigkeiten oder Gase involviert sind.

o Elastische Kräfte

Was bewirkt eine Kraft, die auf einen Körper einwirkt? Nach dem Kraftwirkungsgesetz (0.3) entsteht aus einer Nettokraft ungleich null eine Beschleunigung. Zusätzlich kann aber noch etwas Weiteres passieren: der Körper kann *deformiert* werden. Vor allem wenn mehr als eine Kraft einwirkt und die verschiedenen Kräfte nicht am gleichen Punkt des Körpers angreifen. Beispiele:
o Gummi wird gequetscht, gedehnt oder sonstwie deformiert;
o dito mit Feder welcher Art auch immer;
o Brot wird geschnitten.

Setzen wir im Folgenden voraus, dass zwei entgegengesetzte Kräfte an entgegengesetzten Enden eines Körpers angreifen, und dass der Körper bleibt, wo er ist, weil die beiden entgegengesetzten Kräfte im Betrag gleich gross sind. Falls die Kraft nicht so stark ist, dass der Körper dauerhaft („plastisch") deformiert oder gar zertrennt wird, gilt dann das

„FEDERGESETZ" („HOOK'SCHES GESETZ"): WIRD EIN KÖRPER DURCH EINE KRAFT $F$ GEDEHNT ODER GESTAUCHT, VERÄNDERT SICH SEINE AUSDEHNUNG IN KRAFTRICHTUNG UM

$$F = D \cdot \Delta\ell\,. \tag{0.9}$$

DABEI IST $D$ DIE „FEDERKONSTANTE"; SIE HÄNGT AB VON FORM UND MATERIAL DES KÖRPERS.

Ⓤ *Einheit: Die Federkonstante hat die Mass–Einheit* $\frac{N}{m}$.

(0.9) gilt sowohl, wenn ein Körper gedehnt ($\Delta\ell > 0$) wird, als auch bei einer Stauchung ($\Delta\ell < 0$).

? *Frage 0.12: Ein 80 kg schwerer Bergsteiger (inkl. Gepäck) hängt nach einem Absturz aus einer überhängenden Wand an seinem ursprünglich 40 m langen Seil. Das Seil ist jetzt allerdings 42 m lang. Welche Federkonstante hat das Seil?*

o Elektrische und magnetische Kräfte

Es gibt Kräfte, die z.B. bewirken, dass

o sich ein Magnet an die Kühlschranktür klacken lässt,

o dass sich eine Kompassnadel in Nord–Süd–Richtung ausrichtet,

o dass sich die dünnen Plastik–Folien in der Küche an alles anheften, wo sie nicht hin sollten,

o dass Elektromotoren einen Zug die Gotthardrampe hinauftreiben.

Bei uns wird das, wie so viele andere Kräfte, die es auch noch gibt, mangels Zeit weiter kein Thema sein.

## 0.5 Arbeit

### 0.5.1 Definition

Eine weitere wichtige mechanische Grösse ist die „Arbeit". Angenommen, eine Arbeit besteht darin, eine Umzugskiste in den 7. Stock zu tragen (kein Lift!). Was wäre dann ein vernünftiges Mass für die Menge dieser Arbeit?

- Die Arbeit ist umso grösser, je schwerer die Kiste ist; „schwer" bedeutet physikalisch: Gewichts*kraft*;
- die Arbeit ist umso grösser, je höher die Kiste hochgetragen wird;
- bei beiden Faktoren ist eine Proporzionalität sinnvoll (doppelt so hoch bedeutet doppelte Arbeit etc.).

Derartige Überlegungen machen die folgende Definition sinnvoll:

> ∇ DEFINITION: UNTER DEM BEGRIFF „ARBEIT" $W$ VERSTEHT MAN IN DER PHYSIK DAS PRODUKT AUS KRAFT $F$ UND WEG $s$:
>
> $$W = F \cdot s\,. \qquad (0.10)$$

Das Formelzeichen „$W$" kommt aus dem Englischen: „work".

*Einheit: Die Masseinheit der Arbeit heisst „Joule", abgekürzt J. Sie ergibt sich aus (0.10):*

$$1\,J = 1\,N \cdot 1\,m\,. \qquad (0.11)$$

*Frage 0.13: Welche Arbeit verrichtet ein Motor, der einen 300 kg schweren Lift mit 4 Personen à durchschnittlich 70 kg in den 4. Stock (12 m über dem Erdgeschoss) hochzieht?*

Etwas ist an der Definition (0.10) zu präzisieren: es ist eine Kraft gemeint, die in die Richtung der Bewegung wirkt, d.h. die Kraft verursacht die Bewegung oder unterstützt sie zumindest. Oder etwas detaillierter:

- Wirkt die Kraft exakt in die Richtung der Bewegung, gilt (0.10) ohne wenn und aber.
- Ist die Kraft der Bewegung genau entgegengesetzt, so ist die Arbeit *negativ*, d.h. die Arbeit ist $W = -F \cdot s$.
- Wirkt die Kraft rechtwinklig zur Bewegung, so leistet sie *keine* Arbeit: $W = 0$.
- Wirkt die Kraft in einem anderen Winkel zur Bewegung, so zählt nur die Projektion der Kraft auf die Bewegungsrichtung. (Wir gehen diesem Fall aus dem Weg.)

*Frage 0.14:*

*a) Welche Arbeit leiste ich, wenn ich die (30 kg schwere) Zügelkiste von vorher vom Lastwagen bis zur Haustür (300 m Distanz) trage?*

*b) Welche Arbeit leiste ich, wenn ich die Zügelkiste vom 7. Stock (20 m Höhe) wieder hinuntertrage (falschen Eingang erwischt)?*

Beachte: der physikalische Begriff „Arbeit" deckt sich nicht immer mit dem umgangssprachlichen. Beispiele hast du soeben gesehen. Noch ein anderes: du stemmst eine Hantel hoch, und hältst sie nachher noch eine Viertel Stunde in der Höhe. Während das Hoch*stemmen* eines Gewichtes auch technisch seinen Preis verlangt, kann man das Hoch*halten* eines Gewichtes praktisch gratis haben, man kann es ja z.B. mit einem Seil an die Decke binden und fertig.

(?) Wo wird denn in unserem Alltag sonst noch so physikalisch Arbeit geleistet? Ein paar Beispiele:

Motor, Motor .... In der Tat besteht der Sinn eines jeden Motors darin, für uns Arbeit zu leisten! Motoren bewegen etwas, indem sie in Bewegungsrichtung eine Kraft ausüben – das entspricht exakt der Definition von Arbeit. Dies lässt erahnen, dass Arbeit für die Menschen ein sehr wichtiges und teures Gut ist. So haben die ersten grossen Motoren, die für den Menschen arbeiteten (Dampfmaschinen), die industrielle Revolution ausgelöst. Motoren liefern also ein für den Menschen wichtiges Gut, eben Arbeit, aber auf der anderen Seite verlangen sie immer auch nach etwas, z.B. Strom oder Benzin.

### 0.5.2 Kraft verstärkende Vorrichtungen

Klar, dass wir auch im Alltag immer wieder für etwas Kraft brauchen. Manchmal sogar mehr, als uns lieb ist, z.B. wenn wir eine Nuss öffnen wollen; oder wenn wir die Wohnungstür aufbrechen müssen (weil der Wohnungs–Schlüssel ebensowenig am Flughafen angekommen ist wie die Tasche, in die wir den Schlüssel gesteckt hatten); oder wenn wir mit dem Fahrrad eine Strasse bezwingen wollen, die uns in diesem Moment überhängend vorkommt ...

Es gibt zum Glück ein paar recht simple Methoden, Vorrichtungen, Werkzeuge, die Kräfte verstärken können. Beispielsweise:

- Hebel
- Rampen
- Schrauben
- Zahnräder

Soweit ist das eine schöne Sache. Theoretisch kann man ein Haus hochheben, wenn nur der Hebel lang genug ist. Wie steht es dabei aber mit der Arbeit?

Bei all diesen Vorrichtungen wird nicht nur die Kraft, sondern auch der Weg verändert. Beispiel Rampe: ich brauche zwar weniger Kraft, um etwas eine Rampe hochzustossen, aber dafür verlängert die Rampe auch meinen Weg.

Die Wege werden bei der Verstärkung der Kraft immer um den gleichen Faktor verkürzt, mit dem auch die Kraft verstärkt wird. Das Produkt aus Weg und Kraft, also die Arbeit, wird nicht verändert. Was man an Kraft gewinnt, muss man an Weg bezahlen („goldene Regel der Mechanik").

| |
|---|
| Merke: Man kann Kräfte relativ einfach verstärken, aber die Arbeit wird dabei niemals kleiner. |

## 0.6 Energie

Man muss eine Arbeit leisten, um einen Körper hochzuheben. Das offensichtliche Resultat davon ist die erhöhte Lage des Körpers. Auf den zweiten Blick hat der Körper ausser der Höhe noch etwas anderes gewonnen: die Fähigkeit, seinerseits wieder eine Arbeit zu leisten; er kann nämlich sein Gewicht dazu verwenden, einen anderen Körper hochzuziehen. Man denke etwa an das Gegengewicht eines Personenliftes. Die Arbeit, mit der das Gegengewicht hochgezogen worden ist, ist noch vorhanden, sie ist in der erhöhten Lage zwischengespeichert und kann wieder freigesetzt werden, indem das Gegengewicht hilft, den Lift hochzuziehen. Genau dies ist die physikalische Vorstellung des Begriffes „Energie":

> ☿ DEFINITION: DIE FÄHIGKEIT EINES KÖRPERS, ARBEIT ZU LEISTEN, NENNT MAN *Energie*.

,,Energie" – ursprünglich ein eigens erfundener Fachbegriff – ist heute eine Allerwelts–Vokabel der Umgangssprache. Aber innerhalb des Physik–Zimmers ist ausschliesslich die eingerahmte Bedeutung zugelassen!

Ⓤ *Einheit: Energie ist gespeicherte Arbeit und muss daher die gleiche Masseinheit haben wie die Arbeit, also Joule.*
*Je nach Zusammenhang sind auch noch zwei andere Einheiten im Gebrauch, die*

$$\textit{Kilowattstunde:} \quad 1\ kWh = 3\,600\,000\ J \tag{0.12}$$

*und die*

$$\textit{Kalorie:} \quad 1\ cal = 4.18\ J\,. \tag{0.13}$$

*Kalorien sind allerdings veraltet und müssen von Gesetzes wegen durch Angaben in Joule ersetzt oder zumindest ergänzt werden.*

### 0.6.1 Potenzielle Energie

⑦ *Frage 0.15: Wie viele kWh Energie enthält ein Stausee mit $3 \cdot 10^9$ $m^3$ Wasser 800 m über dem Kraftwerk?*

Wir werden noch auf manch andere Form der Energie kommen. Was wir in diesen Beispielen angeschaut haben, nennt sich „potenzielle Energie" oder „Energie der Lage" (Energie der erhöhten Lage in diesen Beispielen). Sie wird in diesen Beispielen durch die Gewichtskraft verursacht.
Allgemeine Formel:

> EIN KÖRPER DER MASSE $m$ HAT IN DER HÖHE $h$ DURCH SEINE GEWICHTSKRAFT EINE POTENZIELLE ENERGIE
>
> $$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h \quad . \tag{0.14}$$

⊕ Vorzeichen: Bemerkung: „Höhe $h$" bezieht sich auf ein Koordinatensystem. Dessen 0–Punkt darf willkürlich gewählt werden. Einmal gewählt, darf er aber innerhalb einer Berechnung nicht mehr verändert werden.
Je nach Wahl des Nullpunktes kann die potenzielle Energie auch negativ sein. Macht nichts.

Energie kommt in verschiedenen Formen vor. Energie enthält beispielsweise auch eine gespannte Feder.

? *Frage 0.16: Beweise, dass eine gespannte Feder Energie enthält.*

Auch dies ist eine Art potenzielle Energie, denn sie hängt von der *Lage* (der Enden der Feder) ab. Die treibende Kraft ist diesmal aber nicht die Gewichtskraft, weshalb hier die Formel (0.14) nicht gilt.

### 0.6.2 Kinetische Energie

Neben der potentiellen Energie ist auch die *„kinetische" oder „Bewegungs–Energie"* sehr wichtig: bei einem Körper, der sich bewegt, stellt die Bewegung eine Form der Energie dar.

? *Frage 0.17: Beweise von irgend einem Alltags–Gegenstand, dass seine Bewegung eine Energie darstellt.*

EIN KÖRPER DER MASSE $m$, DER SICH MIT EINER GESCHWINDIGKEIT $v$ BEWEGT, HAT EINE KINETISCHE ENERGIE

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2 \,. \tag{0.15}$$

Den Beweis dieser Formel könnte man z.B. führen, indem man sich überlegt, welche Arbeit nötig ist, um einen Körper auf eine gewisse Geschwindigkeit zu bringen.

? *Frage 0.18:*

*a) Welche kinetische Energie hat ein Auto von 1.5 t Masse bei einer Geschwindigkeit von 120 km/h?*

*b) Wie hoch müsste man eine 30 kg schwere Hantel heben, um ihr die gleiche Energie zu geben?*

*c) Hat ein Flugzeug, das in 11 000 m Höhe mit 900 km/h fliegt, mehr potentielle oder mehr kinetische Energie?*

### 0.6.3 Andere Formen der Energie

Aus dem Bereich der Mechanik wäre das Essenziellste damit aufgezählt. Der Begriff „Energie" geht aber weit über die Mechanik hinaus, durchzieht die ganze Physik und ist auch in anderen Naturwissenschaften und in den technischen Wissenschaften wichtig. Nicht mechanische Varianten von Energie werden uns noch weiterhin beschäftigen, hier sollen einfach einmal die wichtigsten notiert werden:

? *Frage 0.19: Fülle die Lücken in der folgenden Tabelle:*

| *Energie–Form* | | *Beispiel, wie sie Arbeit leisten kann* |
|---|---|---|
| *mechanisch* | *kinetisch* | *Flusswasser treibt Turbine an* |
| | *potenziell* | *Wasser aus Stausee treibt Turbine an* |
| > | | *Dampfturbine* |
| *Elektrizität* | | > |
| > | > | *Muskel* |
| | > | *Automotor* |
| | > | *Brenner der Ölheizung* |
| *Radioaktivität* | | > |
| *Strahlung* | | > |

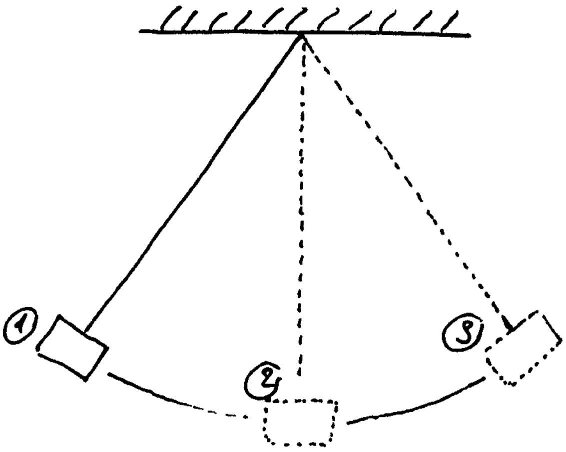
7 Zahlen–Beispiel: Vergleichen wir ein paar sehr verschiedene Formen von Energie! Eine Energie von grob (!) etwa 300 000 J $\approx 1/10$ kWh sind enthalten in oder werden erzeugt bei oder verbraucht für:

- 0.1 $\ell$ Milch (Nährwert)
- 10 cm$^3$ Benzin (Brennwert). Damit fährt ein Auto 0.1 km weit.
- 1 $\ell$ Hahnen–Wasser aufkochen (Wärme)
- 0.1 $\ell$ Wasser verdampfen (Verdampfungswärme)
- Eiffelturm besteigen (Arbeit —> potenzielle Energie)
- Auto bei 100 km/h (kinetische Energie)
- 50 W Schreibtischlampe 2 h brennen lassen oder 1 h fernsehen (elektrische Arbeit)
- 50 Walkman–Batterien (elektrochemisch)
- Sonnenstrahlung (Schweiz, Hochsommer, bestes Wetter) auf 1 m$^2$ Boden während 5 min (Strahlungsenergie)

### 0.6.4 Erhaltung der Energie

Die wichtigste Eigenschaft der Energie ist, dass sie eine so genannte „Erhaltungsgrösse" ist. Was das heisst, überlegen wir uns an einem

7 Zahlen–Beispiel: Ein 3 kg schwerer Ziegelstein sei an einer 1.4 m langen Schnur aufgehängt und relativ zur vertikal hängenden Lage um 0.6 m zur Seite gezogen. Dann lässt man den Stein los, er schwingt hin und her. Wie sieht es dabei mit der Energie aus?




$E_{pot} = 4\,J$, $E_{kin} = 0$, $E_{tot} = 4\,J$

$E_{pot} = 0$, $E_{kin} = 4\,J$, $E_{tot} = 4\,J$

$E_{pot} = 4\,J$, $E_{kin} = 0$, $E_{tot} = 4\,J$

Beobachtung: die Energie wechselt permanent die *Form*, aber die Summe aller Energien bleibt erhalten.
Bliebe die Energie nicht erhalten, würde der Stein nicht immer auf die gleiche Höhe hinaufschwingen.

Nun ist die Schwingung aber in der Tat gar nicht konstant, sondern sie lässt mit der Zeit allmählich nach, kommt nach Langem sogar zum Stillstand. Ist damit die obige Erkenntnis widerlegt? Nein, man muss nur noch mehr Energie–Formen in die Betrachtung mit einbeziehen: wir haben bis hierher nur an die mechanische (kinetische plus potenzielle) Energie gedacht; aber auch die Wärme spielt in unserem Fall eine Rolle, denn die Reibung (Luftwiderstand), die den Stein bremst, erzeugt eine (unwahrnehmbar kleine) Wärme. Würde man diese auch noch mitrechnen, wäre die Summe der Energien exakt immer gleich!

Bezieht man *alle* Energieformen mit ein in die Bilanz, gilt immer der

> ENERGIE–(ERHALTUNGS–)SATZ ODER (IM ZUSAMMENHANG MIT WÄRME) 1. HAUPTSATZ DER WÄRMELEHRE: WIRD EINEM SYSTEM WEDER ENERGIE ZUGEFÜHRT, NOCH ENTNOMMEN, BLEIBT SEINE GESAMT–ENERGIE IMMER GLEICH GROSS. DIE GESAMT–ENERGIE ERHÖHT SICH BEI EINER ENERGIE–ZUFUHR UM DEREN WERT, UND BEI EINER ENERGIE–ABFUHR SINKT SIE ENTSPRECHEND.

Bemerkung: Etwas technisch klingt vielleicht das Wort „System". Es handelt sich einfach um einen (gedachten) Ausschnitt der Welt, um den man die „Bilanz–Grenze" zieht, d.h. was in diesen Ausschnitt hineintritt, gilt als Zufuhr usw.

Die Energie–Erhaltung ist eines der bemerkenswertesten und zentralsten Gesetze der Physik! Daher nochmal: Energie kann zwar die Form ändern, sogar recht vielfältig, aber insgesammt entsteht Energie nie neu, und sie kann auch nicht vernichtet werden.

? Energie hat einen gewaltigen Stellenwert für die Menschheit – wieso eigentlich?

## 0.7 Leistung

Wenn man einen Arbeiter einstellt, will man nicht nur wissen, *ob* er fähig ist, eine Arbeit zu verrichten. Man will auch wissen, *wie viel* Arbeit er *pro Stunde* leisten wird. Bei Maschinen etc. ist das nicht anders. Hierfür verwenden die Physiker den Begriff „Leistung":

> DEFINITION: ALS LEISTUNG $P$ BEZEICHNET MAN DAS VERHÄLTNIS VON ÜBERTRAGENER ODER UMGEWANDELTER ENERGIE PRO ZEIT:
>
> $$P = \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} \left( = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} \right) . \tag{0.16}$$

Der Buchstabe $P$ soll an engl. „power" erinnern.

*Einheit: Aus der Definition der Leistung ergibt sich Joule pro Sekunde als Masseinheit. Sie hat einen eigenen Namen, nämlich „Watt" (abgekürzt W), nach dem englischen Dampfmaschinen–Konstrukteur James Watt:*

$$1\ W = 1\ \frac{J}{s} . \tag{0.17}$$

*Autofreaks reden lieber in den veralteten PS (1 PS = 736 W).*

? *Frage 0.20:*

*a) Welche (der Einfachheit halber als konstant angenommene) Leistung muss ein Automotor erbringen, damit er ein 1.5 t schweres Auto in 7 s von 0 auf 100 bringen kann?*

*b) Nehmen wir uns nochmal den Lift von p. 0 – 15 vor. Der Liftmotor erzeuge eine Leistung von 5.5 kW. Wie lange dauert dann die Fahrt in den 4. Stock?*

7 Zahlen–Beispiel: Was hat so ungefähr was für eine Leistung?
Ein paar typische Zahlen:

| | |
|---|---|
| Sonne: | $4{\cdot}10^{26}$ W |
| Glühbirne: | 30–100 W |
| Fernseher (Röhre, 25 Zoll): | 110 W |
| Kühlschrank (200 $\ell$, Jahresmittel): | 80 W |
| Haarfön: | 1000–1800 W |
| KKW Gösgen: | $10^{9}$ W |
| Herdplatte: | 1000–2500 W |
| Geschirrspüler: | 2000 W |
| Apollo–Rakete beim Start: | $10^{11}$ W |
| Mensch: | 80–300 W |
| Bügeleisen*: | 1000 W |
| Jumbojet beim Start: | $3{\cdot}10^{7}$ W |
| Lokomotive (Re460, Vollgas): | $6{\cdot}10^{6}$ W |
| Staubsauger*: | 750 W |
| Toaster*: | 850 W |
| ganze Schweiz (Jahresmittel): | $3{\cdot}10^{10}$ W |
| Auto (Vollgas): | 30 000–150 000 W |

∗ sprich: dem Mürset seins/seiner

? Hausaufgabe: Versuche, den Jahresstromverbrauch deines Haushaltes zu schätzen. Vergleiche deine Schätzung anschliesend mit der Stromrechnung.

## 0.8 Wirkungsgrad

Fast jede Maschine, fast jeder Vorgang oder Prozess, in Technik wie Natur, setzt Energie um. Meist wird die Energie dabei von einer Form in eine andere umgewandelt. (Landläufig sagt man, die Energie würde „verbraucht", aber wir wissen dies natürlich besser.)

Ⓘ *Frage 0.21: Wie mag das mit dem Umsetzen gemeint sein bei*

*a) einem Küchenmixer,*

*b) einer Kerzenflamme,*

*c) einem Wasserfall?*

Fast immer geht dabei ein Teil der Energie „verloren", d.h., genauer gesagt, dieser Teil der Energie wird nicht in die angestrebte Form überführt, sondern in eine andere.

Am häufigsten ist die unerwünschte Energieform Wärme („Abwärme"). Selbst der Körper des Menschen gibt Wärme ab, weil er die in den Nahrungsmitteln enthaltene Energie nicht zu 100% in die gewünschte Form (Muskelbewegung etc.) bringen kann.

Der „Wirkungsgrad" gibt an, wie gross der Anteil der erwünschten Produkte sind:

DEFINITION: DER WIRKUNGSGRAD $\eta$ (GRIECHISCHER BUCHSTABE „ETA", GRIECHISCHES „ä") GIBT DEN ANTEIL $E_{\text{erwünschter Output}}$ DER AUFGENOMMENEN ENERGIE $E_{\text{input}}$ AN, DIE EIN PROZESS/EINE MASCHINE IN DIE GEWÜNSCHTE FORM UMWANDELT:

$$\eta = \frac{E_{\text{erwünschter Output}}}{E_{\text{input}}} . \tag{0.18}$$

IM FALLE KONTINUIERLICH ABLAUFENDER PROZESSE / MASCHINEN, DIE KEINE ENERGIE ZWISCHENSPEICHERN, KANN MAN $\eta$ AUCH AUF DIE LEISTUNG $P$ BEZIEHEN:

$$\eta = \frac{P_{\text{erwünschter Output}}}{P_{\text{input}}} . \tag{0.19}$$

Den Wirkungsgrad gibt man in der Regel in Prozenten an. Aber es geht natürlich auch mit einer Dezimalzahl.

Ⓘ *Frage 0.22:*

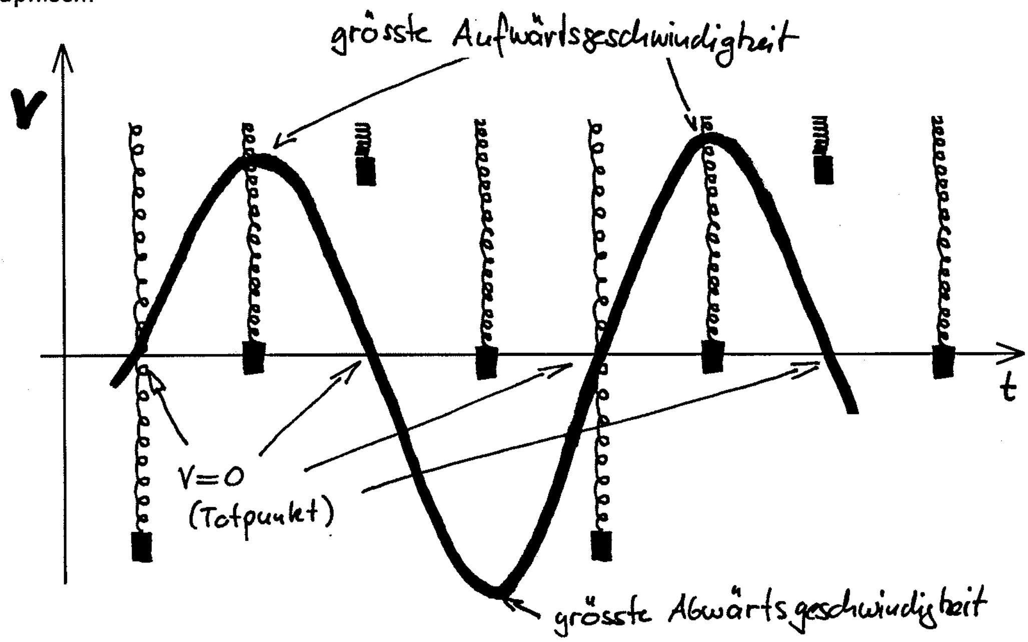
*a) eine Glühbirne hat einen Wirkungsgrad um 5%, eine Leuchtstoffröhre um $\eta = 0.2$. Was ist heller: eine 100 W–Glühbirne oder eine 40 W–Leuchtstoffröhre?*

*b) Auf 100 km braucht ein Auto 8 ℓ Benzin, was einer Energie von $2.5 \cdot 10^8$ J entspricht. Rollreibung und Luftwiderstand betragen zusammen 450 N. Wie gross ist der Wirkungsgrad des Autos? Welcher Teil des Benzins wird für die Heizung der Luft verwendet?*

Der Wirkungsgrad von Maschinen ist oft erstaunlich niedrig. Dies wird unser Verständnis der Energie noch stark beeinflussen.

## 0.9 Antworten auf die Fragen

Antwort auf Frage 0.1:
Geschwindigkeitsfunktion durch Ableiten: $v(t) = \cos(t)$.
Graphisch:




Antwort auf Frage 0.2:
Masszahl durch 3.6 dividieren.

Antwort auf Frage 0.3:
*Auf* das Auto (= Körper 2) wirkt eine Kraft, die von der Strasse (= Körper 1) ausgeht.

Antwort auf Frage 0.4:
Das Auto drängt die Luft zur Seite.

Antwort auf Frage 0.5:
a) $F = m \cdot a$. Dabei ist $F$ die Gewichtskraft (was sonst zieht die Schokolade nach unten?), d.h. nach der Regel von p. 0–7 etwa $F \approx 1$ N. Mit $m = 0.1$ kg gibt das $a \approx 10$ m/s$^2$. Das ist die Fallbeschleunigung $g$.

b) Ist $m$ 80 mal grösser als bei a), so ist auch die Gewichtskraft 80 mal grösser. Dieser Faktor 80 kürzt sich in $F = m \cdot a$ also weg, die Beschleunigung $a$ ist immer die gleiche. Alle Körper fallen gleich schnell (sofern man den Luftwiderstand vernachlässigen kann).

Antwort auf Frage 0.6:
Es gilt das Kraftwirkungsgesetz $F = m \cdot a$ mit $m = 900$ kg und der Beschleunigung

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{100\ \text{km/h} - 0}{6\ \text{s}} = \frac{\frac{100}{3.6}\ \text{m/s} - 0}{6\ \text{s}} = 4.6\ \text{m/s}^2\,,$$

also ist die Kraft $F = 900\ \text{kg} \cdot 4.6\ \text{m/s}^2 = 4200$ N.

Antwort auf Frage 0.7:
Die Schokolade zieht ihrerseits die Erde an. Im Prinzip wird auch die Erde auf die Schokolade zu beschleunigt, aber wegen der riesigen Masse der Erde ist deren Bewegung extrem klein.

Antwort auf Frage 0.8:
a) Konstante Geschwindigkeit (nicht wie beim freien Fall *ohne* Luftwiderstand); Beschleunigung wie auch resultierende Kraft sind gleich null; die Gewichtskraft und der Luftwiderstand heben sich gegenseitig auf.
b) Negative Beschleunigung: $a < 0$; es braucht eine entsprechende Kraft.
c) Zwar ändert sich der *Betrag* der Geschwindigkeit nicht, aber die Richtung ändert sich, und damit haben wir eine Veränderung der Vektorgrösse Geschwindigkeit, also haben wir eine Beschleunigung, und es muss eine Kraft wirken (so genannte „Zentripetalkraft").
d) $a = 0$, die resultierende Kraft ist $F = 0$; Motorkraft und Luftwiderstand heben sich gegenseitig auf.

Antwort auf Frage 0.9:
a) Wenn man physikalisch ganz korrekt sein will, müsste man entweder sagen „meine Masse ist 70 kg", oder dann „ich bin 700 N schwer", denn „schwer" ist eine Aussage über die Gewichtskraft, wogegen kg die Einheit der Masse ist.
b) und c) Beide völlig richtig.

Antwort auf Frage 0.10:
a) Die Reibungskraft ist das, was bremst:

$$F_\mathrm{R} = \mu_\mathrm{G} \cdot F_\perp = \mu_\mathrm{G} \cdot F_\mathrm{G} = \mu_\mathrm{G} \cdot m \cdot g = 0.1 \cdot 0.12\ \mathrm{kg} \cdot 9.8\ \mathrm{m/s^2} = 0.12\ \mathrm{N}$$

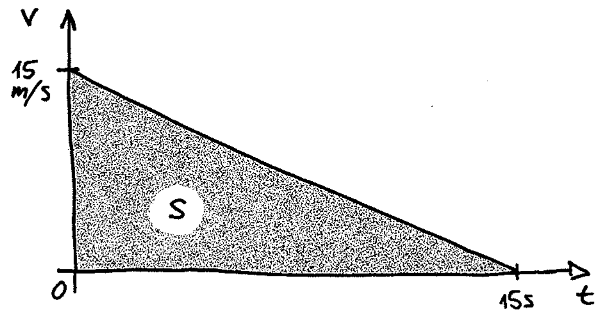
b) Das Kraftwirkungsgesetz $F_\mathrm{R} = m \cdot a = m \cdot \dfrac{\Delta v}{\Delta t}$ gibt mit $F_\mathrm{R} = 0.12$ N, $m = 0.12$ kg und $\Delta v = 15$ m/s

$$\Delta t = \frac{m \cdot \Delta v}{F_\mathrm{R}} = \frac{0.12\ \mathrm{kg} \cdot 15\ \mathrm{m/s}}{0.12\ \mathrm{N}} = 15\ \mathrm{s}$$

c) im $v$–$t$–Diagramm kann man unter dem Graphen die Fläche

$$s = \frac{15\mathrm{m/s} \cdot 15\ \mathrm{s}}{2} = 112.5\ \mathrm{m}$$

ablesen:



Antwort auf Frage 0.11:
Man muss die Haftreibung

$$F_\mathrm{H} = \mu_\mathrm{H} \cdot F_\perp = \mu_\mathrm{H} \cdot F_\mathrm{G} = \mu_\mathrm{H} \cdot m \cdot g = 0.15 \cdot 0.12\ \mathrm{kg} \cdot 9.8\ \mathrm{m/s^2} = 0.18\ \mathrm{N}$$

überwinden.

Antwort auf Frage 0.12:

$$D = \frac{F}{\Delta\ell} = \frac{m \cdot g}{\Delta\ell} = \frac{80\ \mathrm{kg} \cdot 9.8\ \mathrm{m/s^2}}{42\ \mathrm{m} - 40\ \mathrm{m}} = 392\ \mathrm{N/m}.$$

Antwort auf Frage 0.13:
$300\ \mathrm{kg} + 4 \cdot 70\ \mathrm{kg} = 580\ \mathrm{kg}$ Masse bedeuten ein Gewicht von
$m \cdot g = 580\ \mathrm{kg} \cdot 9.8\ \mathrm{m/s^2} = 5700\ \mathrm{N}$;
die Arbeit ist dann $5700\ \mathrm{N} \times 12\ \mathrm{m} = 68\,000\ \mathrm{J}$.

Antwort auf Frage 0.14:
a) $W = 0$, denn die Kraft, mit der man die Kiste trägt, geht nicht in die Richtung der Bewegung.

b) $W = -30\ \mathrm{kg} \cdot 9.8\ \mathrm{m/s^2} \cdot 20\ \mathrm{m} = -5900\ \mathrm{J}$.
(Das Minuszeichen kommt daher, dass die Bewegung der Kraftwirkung gerade entgegengesetzt ist.)

Antwort auf Frage 0.15:
$E = m \cdot g \cdot \Delta h = 3 \cdot 10^{12}\ \mathrm{kg} \cdot 9.8\ \mathrm{m/s^2} \cdot 800\ \mathrm{m} = 2.4 \cdot 10^{16}\ \mathrm{J} = 6.5 \cdot 10^9\ \mathrm{kWh}$

Antwort auf Frage 0.16:
Eine gespannte Feder kann z.B. ein Spielzeugauto in Bewegung versetzen, was einer Arbeit entspricht.

Antwort auf Frage 0.17:
Z.B. die Bewegung eines Hammers: sie kann einen Nagel in die Wand treiben, was eine Bewegung ist, in deren Richtung eine Kraft wirkt, also mit einer Arbeit verknüpft ist.

Antwort auf Frage 0.18:
a) $E_\mathrm{kin} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 1500\ \mathrm{kg} \cdot \left(\frac{120}{3.6}\ \mathrm{m/s}\right)^2 = 833\,000\ \mathrm{J}$.
b) mit $m \cdot g \cdot h$ gleichsetzen und nach $h$ auflösen:

$$h = \frac{E}{m \cdot g} = \frac{833\,000\ \mathrm{J}}{30\ \mathrm{kg} \cdot 9.8\ \mathrm{m/s^2}} = 2800\ \mathrm{m}$$

c) $$\frac{E_\mathrm{kin}}{E_\mathrm{pot}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2}{m \cdot g \cdot h} = \frac{\frac{1}{2} \cdot v^2}{g \cdot h} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{900}{3.6}\ \mathrm{m/s}\right)^2}{9.8\ \mathrm{m/s^2} \cdot 11\,000\ \mathrm{m}} = 0.29,$$

die kinetische Energie ist also nur etwa 30% der potentiellen.

Antwort auf Frage 0.19:

| | | |
|---|---|---|
| *Wärme* | | Dampfturbine |
| Elektrizität | | *Elektromotor* |
| *chemisch* | *Nährstoffe* | Muskel |
| | *Treibstoffe* | Automotor |
| | *Brennstoffe* | Brenner der Ölheizung |
| Radioaktivität | | *Kernreaktor plus Dampfturbine* |
| Strahlung | | *Solarzelle plus Elektromotor* |

Antwort auf Frage 0.20:

a) $P = \frac{E}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 1500 \text{ kg} \cdot \left(\frac{100}{3.6} \text{ m/s}\right)^2}{7 \text{ s}} = 83\,000 \text{ W}$

b) aus $P = \frac{E}{\Delta t} = \frac{m \cdot g \cdot h}{\Delta t}$ folgt:

$$\Delta t = \frac{m \cdot g \cdot h}{P} = \frac{580 \text{ kg} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 \cdot 12 \text{ m}}{5500 \text{ W}} = 12.4 \text{ s}$$

Antwort auf Frage 0.21:
a) elektrische Energie wird umgewandelt ins mechanische Arbeit;
b) chemische Energie wird umgewandelt in Licht und Wärme;
c) potentielle Energie wird zuerst in kinetische Energie umgewandelt, dann in Wärme.

Antwort auf Frage 0.22:
a) der Output ist $0.05 \cdot 100$ W $= 5$ W bei der Glühbirne und $0.2 \cdot 40$ W $= 8$ W bei der Leuchtstoffröhre. Letztere ist also heller.
b) Zur Überwindung der Reibung braucht es auf 100 km eine Arbeit von $W = 450$ N $\cdot\, 100\,000$ m $= 4.5 \cdot 10^7$ J. Das sind 18% des Inputs. Wenn man die Überwindung der Reibung als den gewünschten Output des Autos betrachtet – da gäbe es allerdings noch einiges zu diskutieren –, ist dessen Wirkungsgrad also 18%. Die anderen 82% gehen als
Wärme weg. Aber schlussendlich werden alle 100% in Wärme umgewandelt.