

8 Arbeit und Energie

In diesem Kapitel geht es um alle möglichen Formen der **Energie**. Du hörst davon, wie sich Energien ineinander umwandeln und dass man auf diese Weise eine Menge Dinge recht einfach abschätzen kann. Und du hörst von einem Eckpfeiler der gesamten Physik: vom **Energieerhaltungssatz**.

8.1 Eine gute und eine schlechte Nachricht Definition der Arbeit

In diesem Abschnitt geht es um eine Definition der Arbeit, den Unterschied zur Energie und um die „Goldene Regel der Mechanik“. Letztere beinhaltet eine gute und eine schlechte Nachricht bezüglich Arbeit und Kraftaufwand.

F1 Die Straße in Abb. 8.1 ist genau 100 m lang. Weil sie sehr steil ist, fährst du mit dem Rad einen 200 m langen Zick-Zack-Kurs. Verändert sich dabei die benötigte Kraft? Und verändert sich die Arbeit?



F2 Du musst Fässer auf einen Lkw laden. Wofür benötigst du mehr Kraft: Wenn du sie über die Rampe rollst (a) oder wenn du sie hebst (b)? Kannst du in einem der beiden Fälle Arbeit sparen?



Abb. 8.2

Die Begriffe Arbeit und Energie werden oft im Alltag verwendet. Man sagt etwa „ich hab in dieser Woche aber sehr viel Arbeit“ oder „ich habe heute wenig Energie“. Die Bedeutung der Begriffe in der Physik ist ähnlich, aber doch etwas anders und vor allem exakter. Das „Etikett“ Arbeit beziehungsweise Energie darf in der Physik nur dann verwendet werden, wenn man diese in Joule messen kann, wie du später noch genauer hören wirst.

Zuerst die gute Nachricht: Du kannst in vielen Fällen durch geeignete Wahl des Weges **Kraft sparen**. Wenn der Weg doppelt so lange ist, dann brauchst du nur die Hälfte der Kraft (→ F1 und → F2). Die schlechte Nachricht: Man kann dadurch leider **keine Arbeit sparen**, weil sich gleichzeitig der Weg verdoppelt (siehe Abb. 8.3).

Das nennt man die „Goldene Regel der Mechanik“: Man kann Kraft sparen, wenn man den Weg verlängert, aber man kann damit keine Arbeit sparen. Als Gleichung kann man das wie in der Formelbox formulieren. Entscheidend für die Arbeit ist nur die Kraft, die parallel zum Weg zeigt (\vec{F}_{Weg}). In Abb. 8.3 wäre das die Kraftkomponente \vec{F}_{\parallel} . Das ist die sogenannte **Hangabtriebskraft** und jener Anteil der Gewichtskraft \vec{F}_G , der parallel zum Hang zeigt (siehe auch Abb. 3.16).

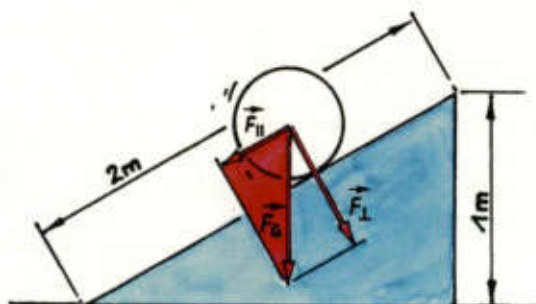


Abb. 8.3 Wenn du die Fässer wie in Abb. 8.2 hebst bzw. rollst, dann verhalten sich die Wege wie 1:2. Die zu überwindende Kraft beim Heben ist das Gewicht \vec{F}_G , beim Rollen die Komponente \vec{F}_{\parallel} . Das rote und das blaue Dreieck sind ähnlich (haben also gleiche Winkel), daher ist $\vec{F}_{\parallel} = \vec{F}_G/2$: also halbe Kraft, dafür doppelter Weg.

FORMEL Arbeit

Arbeit = Kraft (in Wegrichtung) · Weg

$$W = \vec{F}_{\text{Weg}} \cdot \vec{s}$$

W ... Arbeit (work)

\vec{F}_{Weg} ... Kraft parallel zum Weg

\vec{s} ... Weg

$$[W] = N \cdot m = \frac{kg \cdot m^2}{s^2} = J \text{ (Joule)}$$

$$[F] = N$$

$$[s] = m$$

Die **Einheit der Arbeit** ist das **Joule (J)**. Vor allem beim Energiegehalt der Nahrung ist auch noch die Einheit **Kalorie (cal)** im Umlauf (siehe Kap. 8.8; $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$). Diese ist aber **keine SI-Einheit** (Kap. 2.1) und sollte eigentlich nicht mehr verwendet werden.

Die Begriffe **Arbeit** und **Energie** sind nicht voneinander zu trennen! Wenn man an einem Gegenstand Arbeit verrichtet, dann kann man dessen Energie erhöhen. Wenn du zum Beispiel ein **Gewicht** in die Höhe **hebst**, dann erhöhst du durch deine Muskelarbeit dessen Energie. Wenn dir das Gewicht auf den Fuß fällt, kannst du spüren, wie die gespeicherte Energie wieder frei wird (Abb. 8.4).

Auf der anderen Seite wird beim Heben des Gewichts aber auch **Energie von einer in eine andere Form umgewandelt**, nämlich die chemische Energie deiner Muskeln (siehe Kap. 8.8) in die **Lageenergie** des Gewichts. Man kann also auch so sagen: **Energie ist gespeicherte Arbeitsfähigkeit** und **Arbeit ist Energieübertragung** (Abb. 8.4 und Abb. 8.5). Die **Einheit der Energie** ist wie auch die der Arbeit das **Joule**.



Abb. 8.4 Die gespeicherte Energie wird wieder freigesetzt!

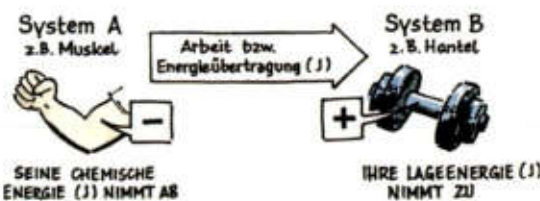


Abb. 8.5 Durch Arbeit wird Energie übertragen und/oder werden Energieformen umgewandelt.



INFO Energy Drink

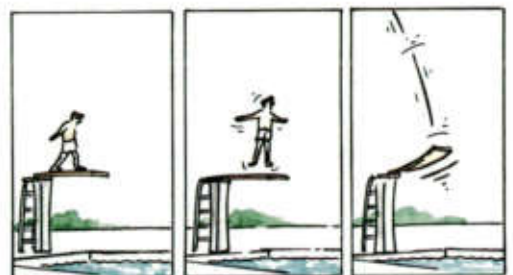
Das „**Etikett**“ **Arbeit** beziehungsweise **Energie** darf in der Physik nur dann verwendet werden, wenn man diese in **Joule** messen kann. Es ist sehr wichtig, dass du das immer im Hinterkopf behältst, etwa wenn du mal im Internet auf eine Esoterikseite gerätst. Da findet man zum Beispiel den Beruf „Energetiker“. Diese „arbeiten mit der Energie eines Menschen, eines Tieres oder eines Raums. Durch die Wiederherstellung des natürlichen Flusses der Lebensenergie können alle energetischen Systeme ins Gleichgewicht kommen. Ein Energetiker entfernt oder reduziert energetische Verunreinigungen.“ Hm!?

Hier wird, wie in der Esoterik so üblich, mit Begriffen aus der Physik hantiert, aber diese

werden in einen völlig anderen Kontext gesetzt. Jeder hat eine zumindest skizzenhafte Vorstellung davon, was man unter „Lebensenergie“ verstehen kann, aber diese lässt sich eben **nicht in Joule** messen und hat daher mit Physik rein gar nichts zu tun – wie auch die im Text oben angesprochenen „energetischen Verunreinigungen“. Auch die Energie in einem **Energy Drink** ist keine Energie im physikalischen Sinn, weil sie auf der Wirkung des Koffeins oder anderer aufputschender Stoffe beruht, die keinen Brennwert haben. Ein zuckerfreier Energy Drink hat zum Beispiel gar keine Joule. Energie Begriffe, die in der Physik anders – und natürlich genauer – verwendet werden, wirst du noch kennenlernen.

ZUSAMMENFASSUNG

Man kann Kraft auf Kosten des Wegs sparen. Die Arbeit bleibt aber leider immer gleich. Wird Arbeit verrichtet, geht Energie von einem Körper auf einen anderen über und/oder wird eine Energieform in eine andere umgewandelt. Energie ist gespeicherte Arbeitsfähigkeit!



8.2

Die Cheops-Pyramide

Hubarbeit und Lageenergie

Wenn ein Gegenstand gehoben wird, dann erhöht sich seine Energie. Man spricht von Lageenergie. Dazu muss man aber Hubarbeit aufwenden.

F3 ○ In Deutschland gibt es 36 Speicherkraftwerke. Das sind Becken, in die man zu bestimmten Zeiten Wasser hinaufpumpt. Warum macht man das?

F4 ☉ Die 137 m hohe Cheops-Pyramide ist das letzte der 7 Weltwunder, das noch erhalten ist. In ihr ist sehr viel Hubarbeit von sehr vielen Menschen gespeichert. Angenommen, man könnte diese Energie ohne Verlust in Strom umwandeln, wie lange – meinst du – könnte man Deutschland damit versorgen:
a) etwa 30 Jahre, b) etwa 30 Wochen,
c) etwa 30 Tage oder d) etwa 30 Sekunden?



Abb. 8.6 Die Cheops-Pyramide



Abb. 8.7 Um diese Uhr aufzuwickeln, muss man ein Gewicht in die Höhe ziehen. Die gespeicherte Energie bewegt dann die Zeiger.

Elektrizität lässt sich in großen Mengen leider nicht speichern (→ F3). Also muss man Strom dann erzeugen, wenn man ihn braucht. In der Nacht ist meist ein Überfluss da. Damit kann man Wasser in höher gelegene **Stauseen** pumpen. Gibt es einen Stromengpass, lässt man den Stausee ab und erzeugt mit dem fallenden Wasser elektrischen Strom. Bei dieser Technik nutzt man aus, dass durch das Heben eines Gegenstandes **Energie gespeichert** wird, die beim Sinken wieder frei wird. Nach diesem Prinzip funktionieren auch die ersten genauen Uhren, die Räderuhren (siehe Abb. 8.7). Diese werden aufgezogen, indem man ein Gewicht in die Höhe hebt.

Die Arbeit, die man zum Heben aufwenden muss, nennt man **Hubarbeit**, und die Energie, die man dadurch speichert, **Lageenergie**, **Höhenenergie** oder **potenzielle Energie**.

Potenziell bedeutet möglich! Die Energie kann, muss aber nicht frei werden! Wenn zum Beispiel das Ventil des Stausees nicht geöffnet wird, dann bleibt das Wasser oben und die Energie gespeichert.

Zur Gleichung der Hubarbeit kommt man ganz einfach über die mechanische Definition der Arbeit: **Arbeit ist Kraft mal Weg**. Die Kraft, die man beim Heben überwinden muss, ist die Gewichtskraft eines Gegenstandes, und der Weg ist die Hubhöhe. Also gilt: Hubarbeit ist Gewicht mal Hubhöhe. Du siehst, dass die Hubarbeit linear mit der Hubhöhe wächst: doppelte Höhe, doppelte Hubarbeit.

FORMEL Hubarbeit

Hubarbeit (W_H) und potenzielle Energie (E_{pot})

$$W_H = E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$$

m ... Masse	$[m] = \text{kg}$
g ... Erdbeschleunigung	$[g] = \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
$m \cdot g$... Gewicht	$[m \cdot g] = \text{N}$
h ... Hubhöhe	$[h] = \text{m}$

Manchmal wird die potenzielle Energie negativ angegeben. Das liegt daran, dass man den **Nullpunkt**, von dem aus man die Höhe misst, beliebig wählen kann. Um eine 1-kg-Kugel aus einer 1 m tiefen Mulde zu rollen, braucht man etwa 10 J (Abb. 8.8). Es ist völlig egal, ob man den Nullpunkt oben (a) oder in der Mulde (b) annimmt. Die Differenz zwischen unten und oben sind immer 10 J. Wenn man den Nullpunkt oben annimmt, dann hat die Kugel unten -10 J. Das Minus bedeutet, dass sich die Kugel in einem „gebundenen Zustand“ befindet und dass man Energie braucht, um sie da rauszukriegen.

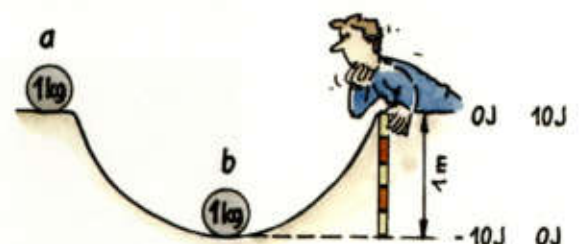


Abb. 8.8 Die Wahl des Nullniveaus ist Geschmacksache. Zum Rausrollen der Kugel sind in beiden Fällen 10 J nötig.

Man muss sich das einmal vorstellen: Beim Bau der **Cheops-Pyramide** haben 20 Jahre lang bis zu 25 000 Arbeiter geschuftet! Könnte man diese potenzielle Energie ohne Verlust in elektrischen Strom umwandeln, dann könnte man Deutschland damit aber für bloß 30 Sekunden versorgen (→ F4)! 20 Jahre Arbeit in nur **30 Sekunden** verbraucht! Daran siehst du zwei wichtige Dinge: Erstens steckt im Strom unglaublich viel Energie (siehe auch Kap. 8.5), und zweitens ist unser intuitives Verständnis für Energien nicht wirklich ausgeprägt!

INFO Cheops

Die Cheops-Pyramide hat eine Seitenlänge von 230 m und eine Höhe von 137 m. Das Volumen beträgt daher sagenhafte $2,42 \cdot 10^6 \text{ m}^3$! Der Schwerpunkt einer Pyramide liegt bei einem Viertel der Höhe, bei der Cheops daher bei etwa 34 m. Als Material wurde Kalkstein mit einer Dichte von 2 500 kg pro Kubikmeter verwendet. Die Gesamtmasse der Pyramide beträgt daher etwa $6 \cdot 10^9 \text{ kg}$. Und damit kann

man nun die **gespeicherte Energie** ausrechnen: $E_p = m \cdot g \cdot h = 6 \cdot 10^9 \cdot 10 \cdot 34 \text{ J} \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ J}$.

Der **elektrische Energiebedarf in Deutschland** liegt momentan bei etwa $2 \cdot 10^{18} \text{ J}$ pro Jahr. Könnte man die Lageenergie der Cheops-Pyramide ohne Verlust in Strom umwandeln, dann könnte man damit nur 10^{-6} Jahre auskommen. Ein Jahr hat $60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 \approx 32 \cdot 10^6 \text{ s}$. 10^{-6} Jahre sind daher bloß etwa 30 Sekunden!

ZUSAMMENFASSUNG

Wenn man Hubarbeit aufwendet, kann man potenzielle Energie speichern. Die Hubarbeit ist proportional zur Höhe und zur Masse.

8.3

Hammer im freien Fall

Beschleunigungsarbeit und Bewegungsenergie

Wenn sich ein Gegenstand bewegt, dann hat er Bewegungsenergie. Um ihn in Bewegung zu versetzen, muss man Beschleunigungsarbeit verrichten.



F5 • Dem Dachdecker fällt der Hammer runter. Nach einer Sekunde ist er 5 m tief gefallen. Wie tief ist er nach zwei Sekunden? Welche Geschwindigkeit hat er nach ein und zwei Sekunden? Welche Energie wurde in der ersten und in der zweiten Sekunde frei?

F6 • Ein Auto braucht, um auf 50 km/h zu beschleunigen, eine bestimmte Menge Benzin.

Wie viel Energie braucht das Auto, um von 50 auf 100 km/h zu beschleunigen? a) gleich viel, b) weniger, c) mehr. Vernachlässige die Reibung!

F7 • Was besitzt mehr kinetische Energie: ein Auto (1500 kg) im Schrittempo oder eine abgeschossene Gewehrpatrone (0,02 kg)?

Nicht nur gehobene, sondern auch bewegte Körper enthalten Energie. Man nennt diese **Bewegungsenergie** oder **kinetische Energie** (kinetisch bedeutet bewegend). Wird ein Gegenstand abgebremst, dann wird diese Energie frei. Mit fallendem Wasser kann man aus diesem Grund elektrischen Strom erzeugen, mit einem Hammer einen Nagel einschlagen und wenn ein Auto gegen ein Hindernis prallt, dann knautscht die frei werdende Bewegungsenergie die Front zusammen (Abb. 8.10). Welchen Zusammenhang gibt es zwischen Geschwindigkeit und kinetischer Energie?



Abb. 8.10 Mit der frei werdenden Bewegungsenergie kann Arbeit verrichtet werden, in diesem Fall Verformungsarbeit.

Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet werden, es kann nur eine Energieform in eine andere **umgewandelt** werden (siehe Kap. 8.6). Wenn zum Beispiel ein Gegenstand fällt, dann nimmt seine **potenzielle Energie ab**. Im gleichen Maße nimmt aber seine **kinetische Energie zu**, und somit bleibt die Gesamtenergie erhalten. Mit Hilfe dieser Tatsache kann man sich den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und kinetischer Energie überlegen. Nimm an, dass ein fallender Gegenstand 2 kg hat (\rightarrow F5). Die ersten beiden Sekunden sind in Abb. 8.11 eingezeichnet.

Durch das Fallen werden in der ersten Sekunde 100 J frei ($m \cdot g \cdot h = 2 \cdot 10 \cdot 5$ J). Also wächst die kinetische Energie um diesen Betrag an. Nach zwei Sekunden hat sich die potenzielle Energie bereits um 400 J verringert, während sich die Geschwindigkeit nur verdoppelt hat.

Du siehst also: doppelte Geschwindigkeit, aber bereits vierfache kinetische Energie! Die **kinetische Energie** muss daher **proportional zu v^2** sein.

INFO Kinetische Energie

Auch die Ableitung für die kinetische Energie kann aus der **allgemeinen Gleichung** für die **Arbeit** erfolgen. Wir nehmen eine gleichmäßige Beschleunigung an (siehe Kap. 5.4).

Wir setzen in $W_B = F \cdot s$ für $F = m \cdot a$ und für $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ ein:

$$W_B = m \cdot a \cdot \frac{a}{2} \cdot t^2 = \frac{m \cdot a^2 \cdot t^2}{2} = \frac{m \cdot (a \cdot t)^2}{2}$$

Nun für $a \cdot t = v$ einsetzen und fertig:

$$W_B = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

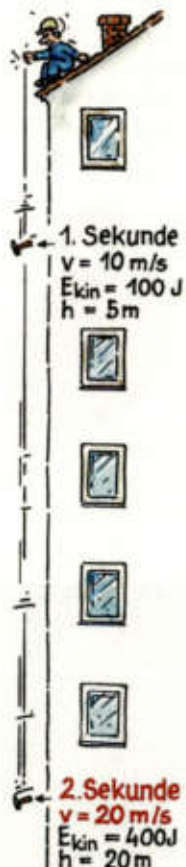
Diese Beschleunigungsarbeit entspricht gleichzeitig der kinetischen Energie (E_{kin}).

FORMEL Beschleunigungsarbeit

Beschleunigungsarbeit (W_B) und kinetische Energie (E_{kin})

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

m ... Masse $[m] = \text{kg}$
 v ... Geschwindigkeit $[v] = \frac{\text{m}}{\text{s}}$



Bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h hat ein Auto daher viermal so viel kinetische Energie wie bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h (\rightarrow F6), und bei 150 km/h bereits die neunfache. Das bedeutet, dass man zum Beschleunigen von 50 auf 100 km/h **dreimal so viel Benzin** verbraucht wie von **0 auf 50 km/h**, und von 100 auf 150 km/h wäre dazu schon fünfmal so viel Sprit nötig. Die mit dem Tempo zunehmende Reibung ist dabei noch gar nicht berücksichtigt!

Weil die kinetische Energie mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst, können auch sehr leichte Gegenstände hohe Energien haben. Ein **Auto** mit 1500 kg, das mit 1,5 m/s (etwa 5,5 km/h) dahinfährt, hat eine kinetische Energie von knapp **1700 J**. Eine **Gewehrpatrone** mit 20 Gramm, die mit 900 m/s abgefeuert wird, hat über **8000 J** an kinetischer Energie, also fast das 5-fache (\rightarrow F7)! Und das, obwohl das Auto 75000-mal schwerer ist als die Patrone. Eine **kugelsichere Weste** kann natürlich diese Energie nicht vermindern. Aber sie verteilt die einwirkende Kraft auf eine größere Fläche, sodass das Geschoss nicht eindringen kann (Abb. 8.12).

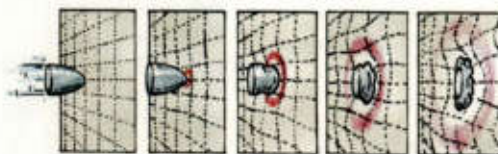


Abb. 8.12 Eine kugelsichere Weste verteilt die Energie auf eine größere Fläche. Die Patrone wird durch die frei werdende Energie flach gedrückt – und Rippen können dabei brechen.

ZUSAMMENFASSUNG

Die kinetische Energie eines Gegenstandes entspricht der Arbeit, die nötig ist, um ihn auf diese Geschwindigkeit zu bekommen. Sie hängt vom Quadrat der Geschwindigkeit ab.

Abb. 8.11 Kinetische Energie eines fallenden Hammers mit 2 kg