7. Energieumwandlungen und die Wirkung von Reibung

Rainer Hauser

November 2010

1 Einleitung

1.1 Formen von Energie

Zwei wichtige Formen von Energie:

- Ein Körper hat *Bewegungsenergie* oder *kinetische Energie*, wenn er in Bewegung ist. Die kinetische Energie hängt nur von der Masse m und der Geschwindigkeit v ab.
- Ein Körper hat *Lageenergie* oder (gravitationelle) *potenzielle Energie*, wenn die Gewichtskraft auf ihn wirkt. Die potenzielle Energie hängt nur von der Masse m und der Höhe h ab.

1.2 Beispiele von Energieumwandlungen

Bei Energieumwandlungen wird Energie von einer Form in eine andere umgewandelt.

Beispiele:
Im Benzinmotor wird die im Benzin gespeicherte chemische Energie in kinetische Energie und Wärme umgewandelt, und bei einem Stromgenerator in einem Wasserkraftwerk wird Bewegungsenergie in elektrische Energie umgewandelt.

Detailliertes Beispiel:
Wirft man einen Hartgummiball senkrecht nach oben, so fliegt er hoch, bis er still steht, umkehrt und wieder nach unten zu fallen beginnt. Am Boden wird der Ball zusammengedrückt, prallt ab und fliegt wieder hoch.

Man verrichtet Arbeit am Ball und er bekommt so
→ kinetische Energie
→ potenzielle Energie
→ kinetische Energie
→ elastische Energie
→ kinetische Energie

2 Kinetische und potenzielle Energie

2.1 Von potenzieller zu kinetischer Energie

Lässt man einen Stein mit Masse $m = 0.5\,\mathrm{kg}$ von einem Turm mit Höhe $h = 50\,\mathrm{m}$ fallen, so gilt am Anfang, also zum Zeitpunkt, an dem der Stein losgelassen wird:

$e_p = m \cdot g \cdot h \approx 0.5\,\mathrm{kg} \cdot 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot 50\,\mathrm{m} = 250\,\mathrm{J}$
$e_k = 0\,\mathrm{J}$

Weil der Stein in der ersten Sekunde die Geschwindigkeit $v = g \cdot t \approx 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot 1\,\mathrm{s} = 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ gewinnt und um die Strecke $s = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \approx 0.5 \cdot 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot 1\,\mathrm{s}^2 = 5\,\mathrm{m}$ fällt, gilt eine Sekunde nach dem Loslassen:

$e_p = m \cdot g \cdot h \approx 0.5\,\mathrm{kg} \cdot 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot 45\,\mathrm{m} = 225\,\mathrm{J}$
$e_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = 0.5 \cdot 0.5\,\mathrm{kg} \cdot 100\,\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2} = 25\,\mathrm{J}$

(Bemerkung: Man beachte, dass $E_p + E_k$ zu beiden Zeitpunkten gleich ist. Weil für die Erdbeschleunigung der gerundete Wert $10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$ benutzt worden ist, könnte das Zufall sein.)

2.2 Von kinetischer zu potenzieller Energie

Wirft man einen Stein mit Masse $m = 0.5\,\mathrm{kg}$ mit einer Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 6\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ senkrecht nach oben, so gilt am Anfang, also zum Zeitpunkt, an dem der Stein losgelassen wird:

$e_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 = 0.5 \cdot 0.5\,\mathrm{kg} \cdot 36\,\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2} = 9\,\mathrm{J}$
$e_p = 0\,\mathrm{J}$

Weil der Stein in einer halben Sekunde die Höhe $h = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \approx 6\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot 0.5\,\mathrm{s} + 0.5 \cdot (-10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}) \cdot 0.25\,\mathrm{s}^2 = 1.75\,\mathrm{m}$ erreicht und noch mit der Geschwindigkeit $v = v_0 + a \cdot t \approx 6\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} + (-10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}) \cdot 0.5\,\mathrm{s} = 1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ aufwärts fliegt, gilt eine halbe Sekunde nach dem Wurf:

$e_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = 0.5 \cdot 0.5\,\mathrm{kg} \cdot 1\,\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2} = 0.25\,\mathrm{J}$
$e_p = m \cdot g \cdot h \approx 0.5\,\mathrm{kg} \cdot 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot 1.75\,\mathrm{m} = 8.75\,\mathrm{J}$

(Bemerkung: Man beachte, dass $E_p + E_k$ zu beiden Zeitpunkten gleich ist, was aber wiederum an den Rundungsfehlern liegen könnte.)

3 Reibung und Wirkungsgrad

3.1 Reibungsverlust

Wenn keine Energie in Wärme umgewandelt wird, spricht man von *mechanischer Energieumwandlung.* In Alltagssituationen ist aber immer Reibung im Spiel, und diese führt zu Wärme.

Die Energie nimmt bei der Reibungsarbeit $W = -F_R \cdot s$ ab, wobei die Reibungskraft $F_R = \mu_G \cdot m \cdot g$ mit der Gleitreibungszahl μ_G ist.

Wenn eine Glühbirne nicht nur Licht abstrahlt, sondern auch heiss wird, oder der Automotor nicht nur die Passagiere von einem Ort zum anderen bringt, sondern sich nebenbei auch erhitzt, so sind das unerwünschte Nebeneffekte, die man *Reibungsverluste* nennt.

3.2 Wirkungsgrad

Definition:
Der *Wirkungsgrad* η einer Energieumwandlung ist das Verhältnis aus der Energie E_{ab}, die nach der Energieumwandlung in der gewünschten Form vorliegt und genutzt werden kann, und der Energie E_{zu}, die der Energieumwandlung zugeführt wurde, und ist somit durch

$$\eta = \frac{E_{ab}}{E_{zu}} \tag{1}$$

definiert. Der Wirkungsgrad ist eine dimensionslose Zahl, die man oft in Prozent angibt.

Beispiel:
Dem Motor eines elektrischen Personenlifts wird die Energie $E_{zu} = 550\,\mathrm{kJ}$ in Form von elektrischer Energie zugeführt. Befördert der Lift Passagiere mit der Masse $m = 1500\,\mathrm{kg}$ auf eine Höhe $h = 30\,\mathrm{m}$ mit dieser Energie, so verrichtet er Hubarbeit und erhöht die potenzielle Energie der Passagiere. Die genutzte Energie E_{ab} ist also die potenzielle Energie $E_p = m \cdot g \cdot h = 1500\,\mathrm{kg} \cdot 9.81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot 30\,\mathrm{m} \approx 440\,\mathrm{kJ}$, sodass der Wirkungsgrad nach (1)

$$\eta = \frac{E_{ab}}{E_{zu}} \approx \frac{440\,\mathrm{kJ}}{550\,\mathrm{kJ}} = 0.8$$

und somit 80% ist.

Typische Werte für den Wirkungsgrad einiger Beispiele von Energieumwandlungen:

Gerät	E_{zu}	E_{ab}	η
Dampfmaschine	Wärme	kinetische Energie	0.1
Dieselmotor	chemische Energie	kinetische Energie	0.3
Elektromotor	elektrische Energie	kinetische Energie	bis 0.9
Solarzelle	Lichtenergie	elektrische Energie	0.2

4 Energiebilanz

4.1 Gesamtenergie beim freien Fall

Lässt man einen Körper mit der Masse m von einem Turm der Höhe h fallen, so hat er beim Loslassen die Energie:

$$\begin{aligned} E_p &= m \cdot g \cdot h \\ E_k &= 0 \\ E_{total} &= E_p + E_k = m \cdot g \cdot h \end{aligned}$$

Später, wenn der Körper die Strecke s gefallen ist und dabei die Geschwindigkeit v erreicht hat, gilt wegen $s = \frac{v^2}{2g}$ (siehe Kinematik):

$$\begin{aligned} E_p &= m \cdot g \cdot (h - s) = m \cdot g \cdot (h - \frac{v^2}{2g}) \\ E_k &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \\ E_{total} &= E_p + E_k = m \cdot g \cdot (h - \frac{v^2}{2g}) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \\ &= m \cdot g \cdot h - \frac{m \cdot g \cdot v^2}{2 \cdot g} + \frac{m \cdot v^2}{2} = m \cdot g \cdot h \end{aligned}$$

Beim freien Fall ist also die Gesamtenergie des Körpers immer gleich gross: $E_{total} = E_p + E_k = konstant$.

4.2 Energieerhaltungssatz

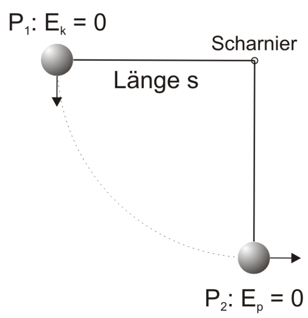
Satz (*Energieerhaltungssatz*)**:**
Die Gesamtenergie E_{total} ist konstant, und Energie kann somit weder erzeugt noch vernichtet werden, kann aber in eine andere Form umgewandelt werden.

Definition:
Ein *System* ist ein Teil des Universums, und die *Umgebung* ist der Rest des Universums. Bei einem *offenen* System tauschen System und Umgebung Energie aus. Bei einem *geschlossenen* System tun sie das nicht.

4.3 Anwendung auf geschlossene Systeme

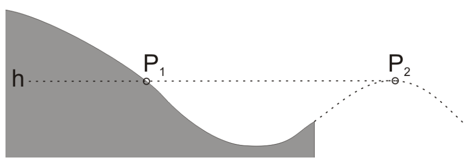
Die Gesamtenergie E_{total} in einem geschlossenen System ändert sich nicht, sondern bleibt konstant.

Beispiel:
Vernachlässigt man den Luftwiderstand und die Reibung im Scharnier, so ist ein Pendel ein geschlossenes System und E_{total} bleibt unverändert. Weil nur kinetische und potentielle Energie vorkommt, ist die Summe der beiden in jedem Zeitpunkt gleich.



In Position P_1 ist $E_k = 0$, sodass $E_{total} = E_p = m \cdot g \cdot s$ ist, und in Position P_2 ist $E_p = 0$, sodass $E_{total} = E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ ist.
Weil E_{total} konstant ist, gilt also $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot s$ für v in Position P_2, sodass bei einer Pendellänge $s = 1\,\mathrm{m}$ $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot s} = \sqrt{2 \cdot 9.81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot 1\,\mathrm{m}} \approx 4.4\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ gilt.

Beispiel:
Vernachlässigt man die Reibung, so bildet ein Skispringer ein geschlossenes System. Er hat somit beim Sprung im Punkt P_2 die gleiche Geschwindigkeit wie bei der Abfahrt im Punkt P_1.



4.4 Anwendung auf offene Systeme

Kennt man die Gesamtenergie eines offenen Systems zu zwei verschiedenen Zeiten, so weiss man, wie viel Energie in der Zwischenzeit an die Umgebung abgegeben worden ist.

Beispiel:
Fährt ein Skifahrer mit zerkratzen Skis beim Punkt P_1 los und kommt auf der anderen Seite beim Punkt P_2 zum Stillstand, so kann man aus der Höhendifferenz die Reibungsarbeit und somit die erzeugte Wärme aus $\Delta E = E_{P_1} - E_{P_2} = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$ berechnen, die an die Umgebung abgegeben wurde.