4 Arbeit, Leistung und Energie

Dieses Kapitel bringen eine Einführung in die mechanischen Arbeits- und Energieformen und erklärt den Unterschied zur Leistung. Ausserdem wird erklärt, warum Glühbirnen eine gute Wahl als Heizelemente darstellen.

Inhaltsverzeichnis

4 Arbeit, Leistung und Energie 1
4.1 Physikalische Arbeit 3
4.1.1 Definition der Arbeit 3
4.1.2 Kraft – Ort Diagramm 5
4.2 Physikalische Arbeitsformen 6
4.2.1 Hubarbeit 6
4.2.2 Reibarbeit 7
4.2.3 Deformationsarbeit 8
4.2.4 Beschleunigungsarbeit 10
4.3 Mechanische Energie und Energieformen 12
4.3.1 Lage- oder Potentielle Energie 12
4.3.2 Bewegungs- oder kinetische Energie 14
4.3.3 Deformationsenergie oder Spannenergie – auch eine potentielle Energieform 16
4.3.4 Die innere Energie oder: Wohin verschwindet denn die Reibarbeit? 18
4.4 Energieumwandlung und Energieübertragung 19
4.5 Energieerhaltungssatz im abgeschlossenen System 22
4.5.1 Anwendungen des Energieerhaltungssatzes 22
4.6 Leistung 25
4.7 Der Wirkungsgrad 27
4.8 Experiment Bestimmung der Hubarbeit 29
4.9 Experiment Bestimmung der Deformationsarbeit an einer Spiralfeder 31
4.10 Experiment Bestimmung der menschlichen Leistung 33

4.1 Physikalische Arbeit

In Abbildung 1 ist dargestellt, wie zwei Kisten *gleicher Masse* auf *unterschiedliche Höhen* gebracht wurden. Es ist offensichtlich, dass die Ergebnisse des jeweils erbrachten Aufwands nicht identisch sind. Der Fall B wird mehr Aufwand erfordern.
In Abbildung 2 wird gezeigt, wie zwei Kisten *unterschiedlicher Masse* auf die *gleiche Höhe* gebracht wurden. Auch hier ist offensichtlich, dass der Aufwand zur Erreichung des Resultats nicht identisch ist. Hier wird der Fall A mehr Aufwand benötigen.

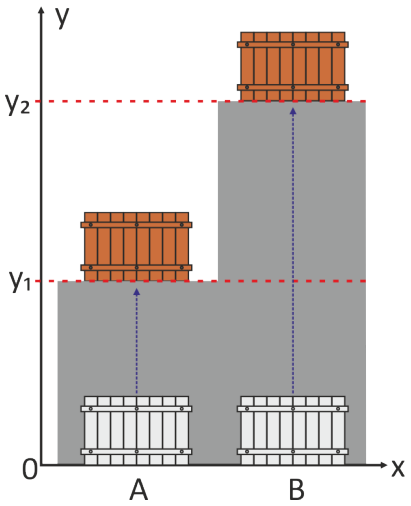


Abbildung 1 Zwei Körper gleicher Masse werden auf unterschiedliche Höhen gebracht.

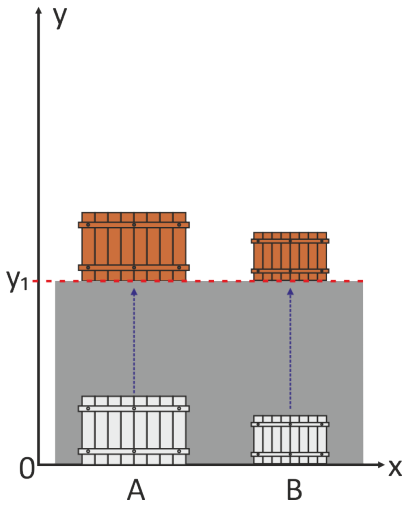


Abbildung 2 Zwei Körper unterschiedlicher Masse werden auf gleiche Höhen gebracht.

4.1.1 Definition der Arbeit

Doch wie definiert man nun diesen Aufwand? Nun, offenbar spielen dafür sowohl die für die Erreichung des Resultats notwendige Kraft wie auch die Strecke eine Rolle. Bei den Situationen aus Abbildung 1 besitzen beide Kisten dieselbe Gewichtskraft, welche für den Hebevorgang überwunden werden muss. Allerdings muss diese Hubkraft entlang einer unterschiedlichen Strecke wirken. In den Situationen in Abbildung 2 wirken die unterschiedlichen Hubkräfte, weil die Kisten eine unterschiedliche Gewichtskraft haben sollen, entlang unterschiedlich langer Strecken.

Dies fasst man in der Physik zusammen, indem man mit der ***Arbeit W*** eine neue Grösse ***definiert***:

Die Arbeit, die eine Kraft an einem Körper verrichtet, ist definiert als das Produkt dieser Kraft und der Verschiebung des Körpers, die diese Kraft erzeugt.

Mathematisch wird die Arbeit als Skalarprodukt ausgedrückt

$$W = \vec{F} \cdot \overrightarrow{\Delta s} \tag{1}$$

Die Einheit der Arbeit ist das ***Joule J***, das sich wie folgt aus den SI-Einheiten zusammensetzt:

$$[W]=[F]\cdot[\Delta s]=N\cdot m=\frac{kg\cdot m^2}{s^2}=J \tag{2}$$

Die Arbeit als eine skalare Grösse ist nicht gerichtet. Es ist aber wichtig festzuhalten, dass sowohl die Kraft wie auch die Strecke gerichtete Grössen sind – es spielt also eine Rolle, ob die Kraft, welche eine Arbeit verrichtet, auch in die gleiche Richtung wie die Strecke zeigt.

Betrachten wir dazu mal Abbildung 3, in denen die einwirkende Kraft (rot) und die daraus resultierende Bewegungsrichtung (grüner Pfeil) von Kisten dargestellt ist.

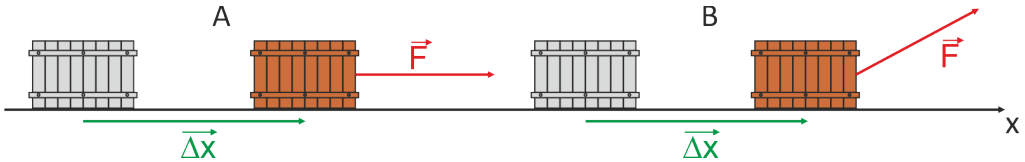


Abbildung 3 Die gleiche Kraft greift in unterschiedliche Richtung an einem Körper an, der dadurch verschoben wird.

Niemand würde auf die Idee kommen, die Situationen als gleichwertig zu betrachten. Im Fall A wird die gesamte Kraft dafür eingesetzt, den Körper über die Unterlage zu ziehen, während im Fall B nur ein Teil der Kraft den Strohballen nach oben zieht (ohne ihn hochzuheben). Welchen Einfluss hat dies auf die verrichtete Arbeit?

Nun, zur Beantwortung dieser Frage zerlegt die Kraft $\vec{F}$ einfach in zwei Komponenten, wobei eine Komponente parallel zur zurückgelegten Strecke gerichtet sein muss. Im Falle einer horizontalen Ebene wird die angreifende Kraft entlang der y- und der x-Achse zerlegt, wie das in Abbildung 4 dargestellt ist.

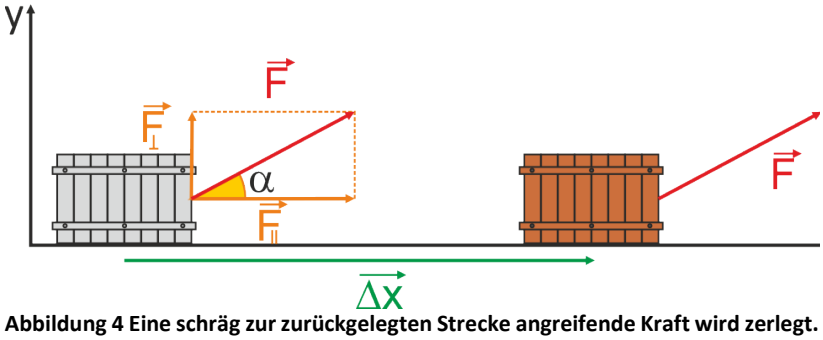


Abbildung 4 Eine schräg zur zurückgelegten Strecke angreifende Kraft wird zerlegt.

Die Arbeit berechnet sich in diesem Fall einfach aus

$$W=\vec{F}\cdot\overrightarrow{\Delta x}=F\cdot\cos(\alpha)\cdot\Delta x=F_{\parallel}\cdot\Delta x \tag{3}$$

Beispiel: Ein Anhänger wird von einem Traktor gezogen. Die Kraft von 15 kN wird entlang der Deichsel übertragen, welche einen Winkel von 5° mit der Horizontalen einschliesst. Welche Arbeit wird vom Traktor am Anhänger verrichtet, wenn das Gespann 2km weit gezogen wird?

Lösung: Von der Zugkraft von 15 kN werden lediglich

$$F_{\parallel}=F_{Zug}\cdot cos(\alpha)=15'000N\cdot cos(5°)=14'943N$$

für die Bewegung in horizontaler Richtung benötigt. Die insgesamt vom Traktor verrichtete Arbeit beträgt damit

$$W = F_{||} \cdot \Delta x = 14'943 N \cdot 2000 m = \underline{\underline{2.99 \cdot 10^7 J}}\,.$$

Aufgabe: Ein Pferd ziehe einen Plug über den Acker. Der Winkel des Gestänges zwischen Geschirr und Plug betrage 10°. Die vom Pferd verrichtete Arbeit sei $3 \cdot 10^5$ J, wodurch der Pflug über eine Strecke von 145m durch den Acker gezogen wird. Wie gross ist die vom Pferd erzeugte Kraft entlang des Gestänges?

4.1.2 Kraft – Ort Diagramm

Wie bei vielen anderen Anwendungen auch, kann es sinnvoll sein, die für die Verschiebung eines Objekts verantwortliche Kraft, also $F_{||}$, als Funktion des Ortes darzustellen. Entsprechend erhält man dann ein ***Kraft-Ort-Diagramm***, wie eines für eine konstante Kraft schematisch in Abbildung 5 dargestellt ist.

Es ist leicht zu erkennen, dass die markierte Fläche sich über

$$\text{Fläche} = F_{||} \cdot \Delta s$$

berechnen lässt. Die markierte Fläche entspricht somit aber gerade der von der Kraft $F_{||}$ zwischen den Orten s_1 und s_2 verrichteten Arbeit! Dies gilt natürlich für jede beliebige Form der Kraftkurve, sodass man sagen kann:

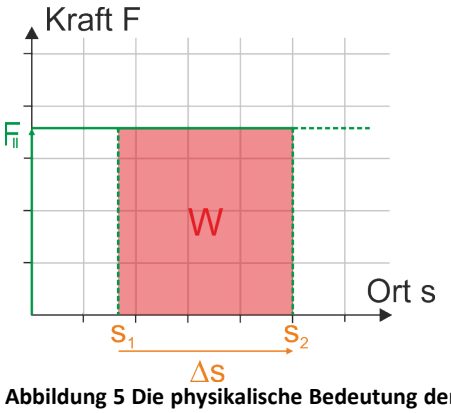
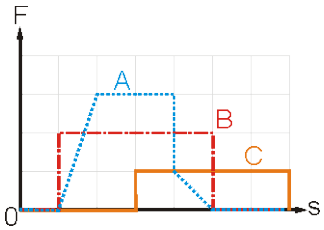


Abbildung 5 Die physikalische Bedeutung der Fläche im Kraft-Ort Diagramm.

Die Fläche unterhalb der Kurve im Kraft-Ort-Diagramm entspricht der verrichteten Arbeit.

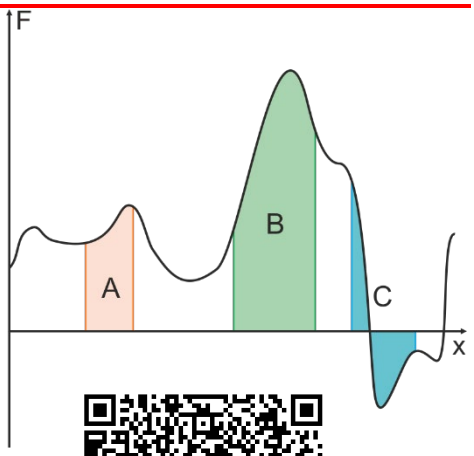
Beispiel: In der nebenstehenden Abbildung sind drei verschiedene Kraft-Ort Kurven dargestellt. Die drei Fälle sind nach der verrichteten Arbeit zu ordnen.



Lösung: Die Fläche unterhalb der "Kurven" im Kraft-Ort-Diagramm entspricht der verrichteten Arbeit. Somit müssen zur Ermittlung der Antwort lediglich Häuschen gezählt werden. Die Lösung lautet

$$W_A = W_B > W_C$$

Aufgabe: Im in der nebenstehenden Abbildung dargestellten Kraft-Ort Diagramm sind drei Bereiche A bis C markiert. Ordnen Sie die drei Bereiche nach der verrichteten Arbeit. Benutzen Sie zur eindeutigen Einordnung die mathematischen Vergleichsoperatoren "<,=,>".



4.2 Physikalische Arbeitsformen

Mit der Definition der Arbeit in Abschnitt 4.1.1 ist eigentlich alles geschrieben und mit Hilfe von Formel (1) kann jegliches Problem gelöst werden – o.k.: fast jedes. Allerdings kann man die Arbeit in wenige verschiedene Kategorien einteilen und ableiten, welches Resultat Formel (1) für die jeweilige Situation liefert. Man muss dann nicht jedes Mal diese Herleitung aufs Neue durchführen.

4.2.1 Hubarbeit

Häufig es so, dass ein Körper mit *konstanter* Geschwindigkeit um die Strecke Δy angehoben wird. Das ist beispielsweise bei Baukränen der Fall. Dafür ist die Hebekraft F_{Zug} erforderlich, welche dem Betrage nach gleich gross ist, wie die Gewichtskraft F_G aber in die entgegengesetzte Richtung zeigt. Es wird ***Hubarbeit*** verrichtet.
Für die resultierende Kraft gilt in diesem Fall nach Abbildung 6

$$\vec{F}_{res} = \vec{F}_G + \vec{F}_{Zug} = \vec{0} \quad (4)$$

Oder in Betragsschreibweise

$$F_{Res} = F_{Zug} - F_G = 0 \quad (5)$$

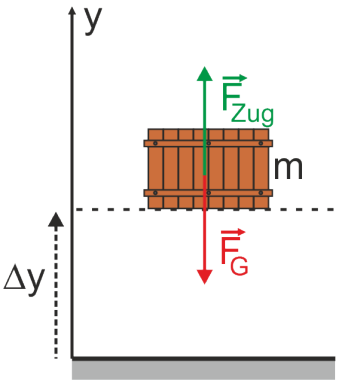


Abbildung 6 Ein Körper wird mit konstanter Geschwindigkeit hochgehoben – es wird Hubarbeit verrichtet.

Mittels Formel (1) erhält man also für die verrichtete Hubarbeit

$$W_{Hub} = F_{||} \cdot \Delta s = F_{Zug} \cdot \Delta y = F_G \cdot \Delta y = \underline{\underline{mg\Delta y}} \qquad (6)$$

Beispiel: Ein Baukran hebt einen 2.5 Tonnen schweren Stahlträger in eine Höhe von 22m. Welche Hubarbeit wird dadurch vom Baukran am Stahlträger verrichtet?

Lösung: Es wird Hubarbeit verrichtet, also verwenden wir Formel (6) zur Ermittlung der Arbeit:

$$W = mg\Delta y = 2500kg \cdot 9.81\frac{m}{s^2} \cdot 22m = \underline{\underline{539550J}}$$

Aufgabe: Ein Wassereimer mit einem Inhalt von 10 Litern wird gefüllt aus einem Brunnenschacht hochgezogen. Dabei wird eine Arbeit von *687J* verrichtet. Wie tief ist der Schacht?

Aufgabe: Bearbeiten Sie das Experiment 4.8. Die Daten und die Auswertung sind der Lehrperson zur Kontrolle zu zeigen.

4.2.2 Reibarbeit

Eine weitere Arbeitsform tritt auf, wenn ein Körper unbeschleunigt gegen die Reibungskraft über die Strecke Δs über eine horizontale Ebene gezogen wird. Es wird ***Reibarbeit*** verrichtet. Für die resultierende Kraft in x-Richtung gilt in diesem Fall nach Abbildung 7

$$\vec{F}_{res,x} = \vec{F}_R + \vec{F}_{Zug} = \vec{0} \qquad (7)$$

Oder in Betragsschreibweise

$$F_{Res,x} = F_{Zug} - F_R = 0 \qquad (8)$$

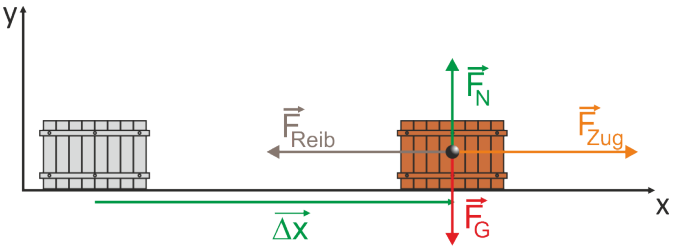


Abbildung 7 Ein Körper wird mit konstanter Geschwindigkeit über eine Unterlage gezogen – es wird Reibarbeit verrichtet.

Mittels Formel (1) erhält man also für die verrichtete Reibarbeit

$$W_{Reib} = F_{||} \cdot \Delta x = F_{Zug} \cdot \Delta x = F_R \cdot \Delta x = \underline{\underline{\mu mg\Delta x}} \qquad (9)$$

Formel (9) gilt allerdings nur für die horizontale Ebene. Falls die Ebene schief in der Landschaft steht, sieht die Sache etwas komplizierter aus:

4.2.2.1 Reibarbeit auf der schiefen Ebene

4.2.3 Deformationsarbeit

Auch beim Spannen einer Feder wird Arbeit verrichtet. Die aufgewendete Kraft dient der Verformung der Feder. Dementsprechend nennt man diese Form der Arbeit ***Deformationsarbeit***. In Abbildung 8 ist einerseits eine Feder dargestellt, die dem Hookeschen Gesetz genügen soll. Andererseits wird auch das Kraft-Auslenkungsdiagramm gezeigt.

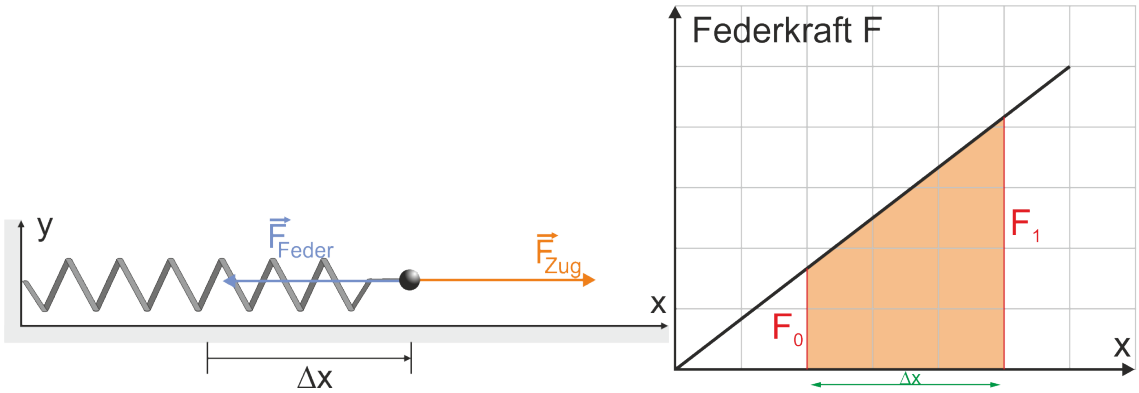


Abbildung 8 Eine Hookesche Feder wird gedehnt– es wird Deformationsarbeit verrichtet.

Wiederum berechnen wir zunächst die resultierende Kraft in x-Richtung:

$$\vec{F}_{res,x} = \vec{F}_{Feder} + \vec{F}_{Zug} = \vec{0} \tag{10}$$

Oder in Betragsschreibweise

$$F_{Res,x} = F_{Zug} - F_{Feder} = 0 \tag{11}$$

Leider können wir nun nicht einfach in Formel (1) $F_{||} = F_{Feder}$ setzen, weil die Federkraft F_{Feder} abhängig ist von der Auslenkung der Feder und somit nicht konstant ist. Für jeden Ort x in den Formeln (10) oder (11) nehmen die Kräfte also andere Werte an, wie das im Kraft-Auslenkungsdiagramm in Abbildung 8 gezeigt ist.
Zur Lösung des Problems greifen wir wiederum auf die Tatsache zurück, dass die Fläche unterhalb der Kurve im Kraft-Ort-Diagramm der verrichteten Arbeit entspricht. Wir berechnen also die Trapezfläche aus Abbildung 8:

$$W_{Def} = \frac{F_0 + F_1}{2} \cdot \Delta x = \frac{D \cdot x_0 + D \cdot x_1}{2} \cdot (x_1 - x_0) \tag{12}$$

Dabei entspricht die Grösse D der Federkonstanten der Feder. Vereinfacht wird daraus

$$W_{Def} = \frac{1}{2}(x_1 + x_0)(x_1 - x_0) = \frac{1}{2} D \left(x_1^2 - x_0^2\right) \tag{13}$$

Beispiel: Eine horizontal liegende Spiralfeder mit der Federkonstanten $D = 6\frac{N}{m}$ werde gegenüber dem unbelasteten Zustand von 10cm auf 30cm gedehnt. Wie gross ist die dabei verrichtete Deformationsarbeit?

Lösung: Die Angaben setzt man einfach in Formel (13) ein und erhält

$$W_{Def} = \frac{1}{2} D \left(x_1^2 - x_0^2\right) = \frac{1}{2} \cdot 6 \frac{N}{m} \left((0.3m)^2 - (0.1m)^2\right) = \underline{\underline{0.24J}}$$

Aufgabe: Eine vertikal aufgehängte, unbelastete Spiralfeder wird durch eine angehängte Masse von 30g um 5cm gedehnt. Welche Deformationsarbeit wird an der Feder durch eine zusätzlich angehängte Masse von 40g verrichtet?

Aufgabe: Bearbeiten Sie das Experiment 4.9. Die Daten und die Auswertung sind der Lehrperson zur Kontrolle zu zeigen.

4.2.4 Beschleunigungsarbeit

Als letzte Arbeitsform wird die ***Beschleunigungsarbeit*** betrachtet. Eine Masse m wird durch eine konstant wirkende Kraft, die parallel zur zurückgelegten Strecke wirkt, auf dieser von einer Anfangsgeschwindigkeit auf eine gewisse Endgeschwindigkeit beschleunigt. Es handelt sich also um eine gleichmässig beschleunigte Bewegung.

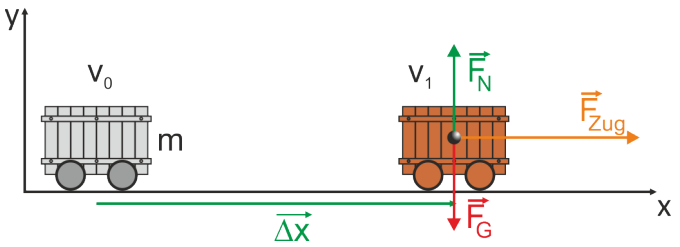


Abbildung 9 Ein Körper wird mit konstanter Kraft über eine Unterlage gezogen und dadurch beschleunig– es wird Beschleunigungsarbeit verrichtet.

Die resultierende Kraft in x-Richtung berechnet sich nach

$$\vec{F}_{res,x} = \vec{F}_{Zug} \tag{14}$$

Oder in Betragsschreibweise

$$F_{Res,x} = F_{Zug} \tag{15}$$

Die Beschleunigungsarbeit beträgt somit einfach

$$W_{Beschl} = F_{||}\Delta x = F_{Zug}\Delta x \tag{16}$$

Da lässt sich aber noch etwa machen. Gemäss Newton 2 gilt für die resultierende Kraft auch $F_{Res} = ma_{Res}$ und für die Strecke gilt die Beziehung $\Delta x = \frac{v_1^2 - v_0^2}{2a_{Res}}$. Für die Beschleunigung folgt daraus $a_{Res} = \frac{v_1^2 - v_0^2}{2 \cdot \Delta x}$. Damit ergibt sich zusammengefasst für die Arbeit, welche nötig ist, um ein Objekt der Masse m von einer Geschwindigkeit v_0 auf eine Geschwindigkeit v_1 zu beschleunigen:

$$W = F_{||} \cdot \Delta x = m \cdot a_{Res} \cdot \Delta x = m \cdot a_{Res} \cdot \frac{v_1^2 - v_0^2}{2 \cdot a_{Res}} = \underline{\underline{\frac{1}{2} m \left(v_1^2 - v_0^2\right)}} \tag{17}$$

Beispiel: An einem Fahrzeug mit einer Masse von 1200 kg, welches mit einer Geschwindigkeit von $60\frac{km}{h}$ auf einer Landstrasse unterwegs ist, wird eine Beschleunigungsarbeit von $129630J$ verrichtet. Welche Endgeschwindigkeit wird dadurch erreicht?

Lösung: Wir lösen Formel (17) nach der gesuchten Grösse auf und erhalten

$$v_1 = \sqrt{\frac{2W_{Beschl}}{m} + v_0^2} = \sqrt{\frac{2 \cdot 129630J}{1200kg} + \left(\frac{60}{3.6}\frac{m}{s}\right)^2} = 22.2\frac{m}{s} \hat{=} 80\frac{km}{h}$$

Aufgabe: Ein Bauer fährt mit seinem Gespann auf eine Landstrasse und beschleunigt dabei auch den Anhänger von 400kg Masse auf $30\frac{km}{h}$. Dabei wird am Anhänger durch das Zugfahrzeug eine Arbeit von $13503J$ verrichtet. Wie gross war die Anfangsgeschwindigkeit beim Einbiegen auf die Landstrasse?

Aufgabe: Bei welchem Vorgang wird welche Art von Arbeit verrichtet? Füllen Sie die folgende Tabelle entsprechend aus.

Arbeitsform	**Hubarbeit**	**Reibarbeit**	**Deformations-arbeit**	**Beschleunigungsarbeit**	**keine Arbeit**
Ein Körper wird mit einer konstanten Geschwindigkeit gehoben					
Ein Körper bewegt sich reibungsfrei mit konstanter Geschwindigkeit auf horizontaler Unterlage					
Ein Körper bewegt sich reibungsfrei immer schneller werdend auf horizontaler Unterlage					
Eine elastische Schraubenfeder wird gespannt					
Eine elastische Schraubenfeder wird gespannt gehalten					
Ein Schmied bearbeitet das Hufeisen mit einem Hammer					

Quelle: www.leifiphysik.de

Wie in der letzten Aufgabe gesehen, können verschiedene Arbeitsformen durchaus gleichzeitig auftreten. Dazu gleich ein

Beispiel: Ein Fahrradfahrer fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von $12\frac{km}{h}$ eine Rampe mit einer Steigung von 10% hoch. Die Gesamtmasse von Radfahrer und Fahrrad beträgt $75kg$. Er legt auf der Rampe eine Strecke von $700m$ zurück. Die Reibungszahl beträgt 0.003. Wie gross ist die gesamthaft verrichtete Arbeit?

Lösung: In diesem Fall wird sowohl Hubarbeit wie auch Reibarbeit verrichtet:

$$W_{ges} = W_{Hub} + W_{Reib} = mg\Delta y + \mu mg\, cos(\alpha)\Delta s$$

Eine Steigung von 10% bedeutet, dass auf einer horizontalen Strecke von 100m eine Höhendifferenz von 10m überwunden wird. Der Winkel berechnet sich also zu

$$\alpha = arctan(0.1) = \underline{5.7°}$$

Eine Strecke von $\Delta s = 700m$ auf der schiefen Ebene entspricht einer Höhendifferenz von

$$\Delta y = \Delta s \cdot sin(\alpha) = 700m \cdot sin(5.7°) = \underline{69.7m}$$

Gesamthaft wird also die Arbeit

$$W_{ges} = W_{Hub} + W_{Reib} = 75kg \cdot 9.81\frac{m}{s^2}69.7m + 0.003 \cdot 75kg \cdot 9.81\frac{m}{s^2}cos(5.7°)700m = \underline{\underline{51249J}}$$

Dabei ist der Anteil der Reibarbeit mit $W_{Reib} = 2.2J$ in diesem Fall sehr gering.

4.3 Mechanische Energie und Energieformen

Nun stellt sich die Frage, wo geht denn die an einem Objekt verrichtete Arbeit denn eigentlich hin? Dies wollen soll in diesem Abschnitt beleuchtet werden.

4.3.1 Lage- oder Potentielle Energie

Kommen wir auf das Beispiel der Hubarbeit aus Abschnitt 4.2.1 zurück. Ein 10 kg schwerer wird Stein um eine Strecke von 15 m hochgehoben. Dabei wird *am Stein* die Hubarbeit

$$W_{Hub} = m \cdot g \cdot \Delta y = 10kg \cdot 9.81\frac{m}{s^2} \cdot 15m = 1472J$$

verrichtet. Der Stein könnte nun etwas tun, was er vorher nicht konnte: die Strecke Δy wieder herunterfallen. Und dabei jemandem auf den grossen Zeh fallen und somit Deformationsarbeit verrichten. Solange der Stein aber nicht herunterfällt, wird er keine Arbeit jeglicher Form verrichten – aber er könnte! Die am Stein verrichtete Hubarbeit ist also quasi in seiner (höheren) Lage gespeichert. Man nennt dies ***Lageenergie***. Man könnte auch sagen, dass die Hubarbeit dazu diente, den Stein in die Lage zu versetzen, selbst Arbeit zu verrichten. Anstelle von Lageenergie wird in der Physik der Begriff ***potentielle Energie*** verwendet. Diese berechnet sich wie folgt:

$$E_{pot} = mgy \tag{18}$$

Bei der Energie handelt es sich wie bei der Arbeit auch um eine skalare Grösse. Die Einheit der Energie ist selbstverständlich ebenfalls das Joule:

$$\left[E_{pot}\right] = J \tag{19}$$

Die Abbildung 10 soll den Unterschied zwischen Hubarbeit und Lageenergie verdeutlichen. Mittels Hubarbeit lässt sich die Lageenergie eines Körpers verändern, wobei die Differenz der Lageenergien von Endzustand und Anfangszustand gerade der verrichteten Hubarbeit entsprechen. Aus Abbildung 10 wird ebenfalls deutlich, dass die Wahl des Nullpunktes beliebig sein darf – auf die Differenz der Lageenergien hat die Lage des Nullpunktes keinen Einfluss.

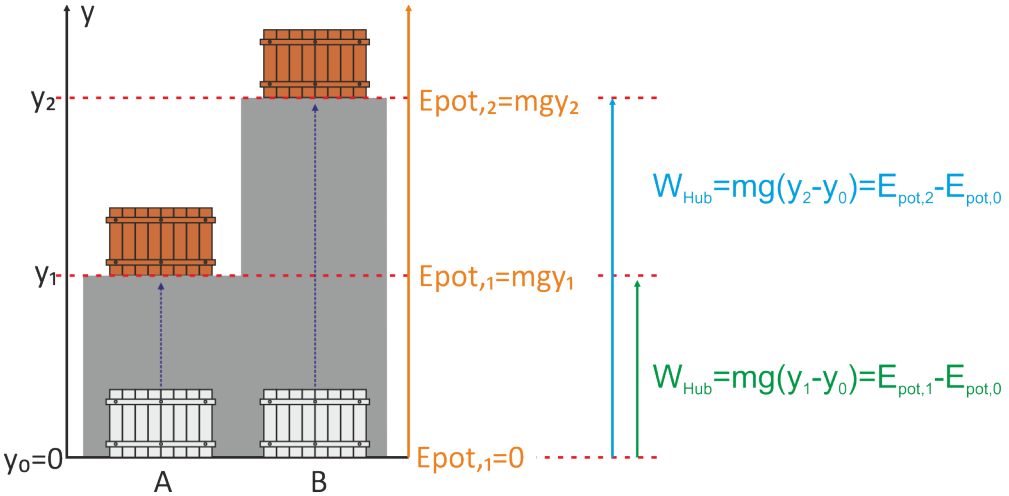


Abbildung 10 Zur Verdeutlichung des Unterschiedes von Hubarbeit und Potentieller Energie.

Beispiel: Ein Baukran lässt einen Stahlträger von 450kg Masse vom Abladeplatz in die 7m tiefe Baugrube hinab. Wie gross ist die Änderung der potentiellen Energie des Stahlträgers? Wie gross ist die potentielle Energie absolut?

Lösung: Die Änderung der potentiellen Energie entspricht der verrichteten Hubarbeit. Wir setzen die Höhe des Ablageplatzes zu $y_0 = 0m$. Die Grube liegt dann bei $y_1 = -7m$. Wir erhalten als Resultat

$$\Delta E_{pot} = W_{Hub} = mg\Delta y = 400kg \cdot 9.81\frac{m}{s^2} \cdot (-7m - 0m) = \underline{\underline{-27468J}}\,.$$

Das Resultat ist negativ, weil die Endposition tiefer liegt als die Anfangsposition. Dasselbe Resultat hätte man auch erhalten, wenn man den Nullpunkt in die Grube gelegt hätte ($y_1 = 0$). Der Abladeplatz befindet sich dann auf der Höhe $y_0 = 7m$ über dem gewählten Nullpunkt:

$$\Delta E_{pot} = W_{Hub} = mg\Delta y = 400kg \cdot 9.81\frac{m}{s^2} \cdot (0m - 7m) = \underline{\underline{-27468J}}$$

Das Resultat ist also wirklich vom gewählten Nullpunkt unabhängig. Allerdings kann über den Absolutwert der potentiellen Energie keine Aussage gemacht werden, solange der Nullpunkt nicht festgelegt ist. So ist im ersten Fall die potentielle Energie des Stahlträgers $E_{pot} = mgy_1 = 400kg \cdot 9.81\frac{m}{s^2} \cdot (-7m) = -27468J$, im zweiten Fall jedoch $E_{pot} = 0J$.

Aufgabe: Die Lageenergie eines Körpers beträgt $-6337J$. An ihm wird nun Hubarbeit verrichtet, wodurch sich seine Lageenergie auf $-3891J$ verändert.

a) Wie gross ist die verrichtete Hubarbeit?
b) Liegt der Körper nach der Verrichtung der Hubarbeit höher oder tiefer als zu Beginn?
c) Wo liegt der Nullpunkt der potentiellen Energie? Ober- oder unterhalb der beiden Lagen?
d) Was würde sich am Resultat von a) verändern, wenn der Nullpunkt zur Ausgangslage des beschriebenen Problems hin verschoben würde?

4.3.2 Bewegungs- oder kinetische Energie

Um ein Objekt zu beschleunigen, muss an ihm Beschleunigungsarbeit verrichtet werden. Diese Arbeit wird dazu benutzt, die Geschwindigkeit des Objekts zu verändern. Setzt die beschleunigende Kraft plötzlich aus, so bewegt sich – eine reibungsfreie Unterlage vorausgesetzt – das Objekt mit konstanter Geschwindigkeit weiter. Die Beschleunigungsarbeit wird in Form von ***Bewegungsenergie*** gespeichert. Denn aufgrund seiner Bewegungsenergie kann das Objekt etwas machen, was es vor der Verrichtung der Beschleunigungsarbeit nicht in gleichem Masse tun konnte: Es kann z.B. irgendwo dagegen knallen und dabei Deformationsarbeit verrichten.

Der Bewegungsenergie sagt man in der Physik ***kinetische Energie***. Die kinetische Energie hängt von der Masse und der Geschwindigkeit des bewegten Körpers ab:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2 \tag{20}$$

In Abbildung 11 wird der Unterschied zwischen Beschleunigungsarbeit und kinetischer Energie

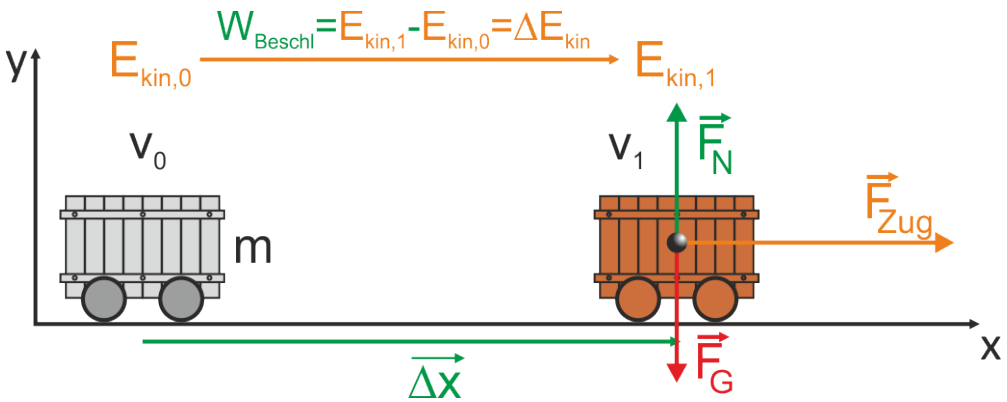


Abbildung 11 Zur Verdeutlichung des Unterschiedes von Beschleunigungsarbeit und kinetischer Energie.

verdeutlicht. Durch verrichten von Beschleunigungsarbeit verändert sich die kinetische Energie der rollenden Kiste. Die an der Kiste verrichtete Beschleunigungsarbeit entspricht der Änderung der kinetischen Energie ΔE_{kin}.

Beispiel: An einem Auto mit einer Masse von $900kg$, das mit einer Geschwindigkeit von $55\frac{km}{h}$ unterwegs ist, wird auf einer Landstrasse eine Beschleunigungsarbeit von $176215J$ verrichtet. Wie gross ist die kinetische Energie anschliessend? Mit welcher Geschwindigkeit ist das Auto nach der Beschleunigung unterwegs?

Lösung: Die Beschleunigungsarbeit führt zur Erhöhung der kinetischen Energie:

$$\Delta E_{kin} = \underline{W_{Beschl} = E_{kin,1} - E_{kin,0}}$$

Dies wird nach der gesuchten Grösse aufgelöst:

$$E_{kin,1} = E_{kin,0} + W_{Beschl} = \frac{1}{2} m v_0^2 + W_{Beschl}$$

Mit den angegebenen Werten erhält man schliesslich

$$E_{kin,1} = \frac{1}{2} 900kg \left(\frac{55}{3.6} \frac{m}{s} \right)^2 + 176215J = \underline{\underline{281250J}}$$

Das entspricht einer Geschwindigkeit von

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{kin,1}}{m}} = 25\frac{m}{s} \triangleq \underline{\underline{90\frac{km}{h}}}$$

Aufgabe: Beim Baseball werden Bälle mit einer Geschwindigkeit von zuweilen über 100 mph (161km/h) geworfen. Normal sind Geschwindigkeiten von rund 90mph, also 145 km/h. Wie gross ist die kinetische Energie in den beiden Fällen, wenn man bei den geworfenen Bällen von einer Masse von 145g ausgeht?

4.3.3 Deformationsenergie oder Spannenergie – auch eine potentielle Energieform

Wenn eine Spiralfeder gestaucht oder gedehnt wird, also verformt wird, dann muss dafür Deformationsarbeit verrichtet werden. Diese Deformationsarbeit ist nun aber in der Spiralfeder gespeichert. Die gespannte Feder besitzt ***Deformationsenergie***, welche wiederum zur Verrichtung von Arbeit benutzt werden kann (z.B. bei Hüpffröschen oder Aufziehautos). Die Deformationsenergie, welche eine Feder bei einer bestimmten Dehnung speichert, beträgt

$$E_{Def} = \frac{1}{2} D x^2 \tag{21}$$

wobei mit x in Formel (21) die Dehnung der Feder bezüglich ihres *unbelasteten* Zustandes gemeint ist!

Mit Abbildung 12 wird der Unterschied zwischen Deformationsarbeit und Deformationsenergie nochmals verdeutlicht. Die Verrichtung von Deformationsarbeit an einer Spiralfeder führt zu einer Veränderung der vorhandenen Deformationsenergie.

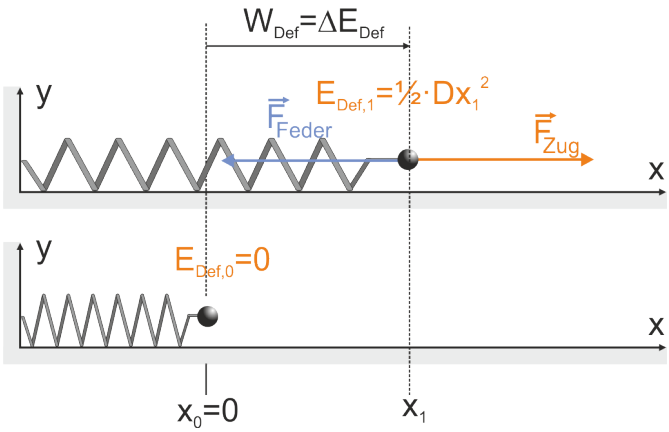


Abbildung 12 Zur Verdeutlichung des Unterschiedes von Deformationsarbeit und Deformationsenergie.

Beispiel: Ein trainierter Bogenschütze ist in der Lage, einen Langbogen mit bis zu $300N$ zu spannen, und die Bogensehne dabei um $0.6m$ zurückzuziehen. Angenommen, der Bogen verhält sich wie eine ideale Feder, wie gross ist die Deformationsenergie des gespannten Bogens?

Lösung: Zur Berechnung der Deformationsenergie nach Formel (21) muss zunächst die Federkonstente ermittelt werden. Der Bogen wird um eine Strecke von $\Delta x = 0.6m$ gespannt, das ergibt dann

$$D = \frac{F}{\Delta x} = \frac{300N}{0.6m} = 500\frac{N}{m}$$

Daraus ergibt sich die Deformationsenergie am Ort $x = 0.6m$ zu

$$E_{Def} = \frac{1}{2}Dx^2 = \frac{1}{2}\cdot 500\frac{N}{m}\cdot(0.6m)^2 = \underline{\underline{90J}}$$

Aufgabe: An einer unbelasteten Spiralfeder mit einer Federkonstanten von $D = 2000\frac{N}{m}$ wird eine Deformationsarbeit von $-1.6J$ verrichtet.

a) Welche physikalische Bedeutung kommt dem Minuszeichen bei der Deformationsarbeit zu?
b) Um welche Strecke wird die Spiralfeder gestaucht?
c)

4.3.4 Die innere Energie oder: Wohin verschwindet denn die Reibarbeit?

Eine weitere Frage, die beantwortet werden muss, betrifft die Reibarbeit. Bei der Beschleunigungsarbeit und der Hubarbeit ist inzwischen klar geworden, in welchen Energieformen sie gespeichert werden. Was ist mit der Reibarbeit?

Reibt man mit einer Handfläche wiederholt, kräftig und schnell über eine Tischplatte – man verrichtet also Reibarbeit – so spürt man zeitnah, wo diese Reibarbeit hingeht. Man spürt deutlich, dass die Temperaturen der Tischplatte und der Handfläche (und diejenige der Umgebung) zunehmen. Nun ist die Temperatur eines Körpers aber nichts anderes als ein Mass für die Eigenbewegung der kleinsten Teilchen des Körpers. Die Reibungsarbeit bewirkt also eine Zunahme der Teilchenbewegung (kinetische Energie) auf molekularer Ebene. Diese Energieform nennt man ***innere Energie U***.
Der Absolutwert der inneren Energie kann – bis auf wenige Ausnahmen – nicht berechnet werden. Die Änderung hingegen schon, weil diese jeweils eine berechenbare Ursache haben muss!
Dies ist auch in Abbildung 13 dargestellt. Das Verrichten von Reibarbeit beim Verschieben einer Kiste führt dazu, dass die inneren Energien des Bodens, der Kiste und der Umgebung zunehmen. Dadurch steigt die Temperatur ein klein wenig an.

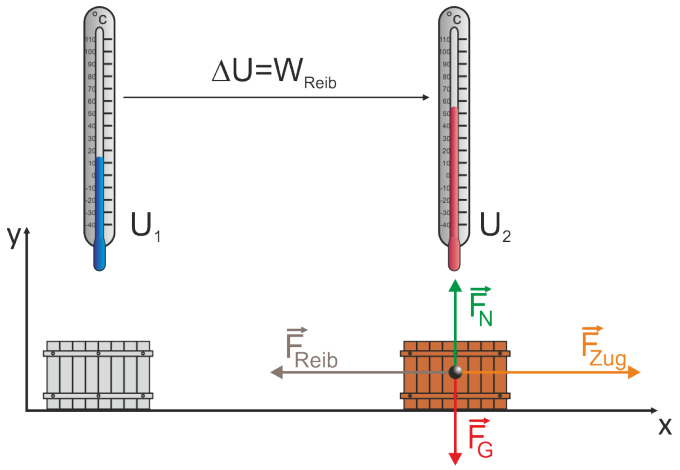


Abbildung 13 Zur Verdeutlichung des Unterschiedes von Reibarbeit und innerer Energie.

4.4 Energieumwandlung und Energieübertragung

Spring eine Klippenspringerin vom Absprungpunkt weg, so fällt sie in Richtung Wasser. Sie wird beschleunigt, weil die Erde an ihr Beschleunigungsarbeit verrichtet, wodurch ihre Geschwindigkeit laufend zunimmt. Ihre potentielle Energie nimmt dabei kontinuierlich ab. Offenbar wird in diesem Fall kontinuierlich potentielle in kinetische Energie umgewandelt. Falls Reibung vorhanden ist, wird noch ein Teil der vorhandenen potentiellen Energie in innere Energie umgesetzt.
Doch wie sieht die Energiebilanz dabei aus? Dazu nun ein paar Fragen.

Aufgabe: Starten Sie die angegebene Simulation. Wählen Sie "Einführung" und aktivieren Sie die Optionen "Balkendiagramm" und "Geschwindigkeit". Zunächst soll die V-förmige Fahrbahn ausgewählt bleiben. Als Bezugspunkt bei der Skaterin ist unterhalb des Skateboards ein roter Punkt gesetzt.

a) Was ist bei den einzelnen Energien im Balkendiagramm zu beobachten, wenn die Skaterin in unterschiedliche Höhen bewegt wird?

b) Die Skaterfigur wird in einer bestimmten Höhe auf die Bahn gesetzt und losgelassen. Was lässt sich bezüglich der kinetischen, der potentiellen und der Gesamtenergie aussagen (Ändert sich die Gesamtenergie? Wann sind kinetische und potentielle Energie maximal, wann minimal? Wann sind sie gleich gross?)

c) Nun wird die L-förmige Bahn ausgewählt und die Skaterin an den höchsten Punkt gesetzt. Was lässt sich bezüglich der kinetischen, der potentiellen und der Gesamtenergie aussagen? Ändert sich bei den Energien noch etwas, wenn die Skaterin sich auf der horizontalen Ebene befindet? Wie sieht es mit der Geschwindigkeit aus?

d) Wiederholen Sie die Aufgaben a) bis c), benutzen Sie aber verschiedene Massen. Welchen Einfluss hat die Masse?

e) Nun wird "Reibung" angewählt. Wiederum werden das "Balkendiagramm" und die "Geschwindigkeit" als Option gesetzt. Alle anderen Optionen können wie eingestellt übernommen werden. Wiederholen Sie die Aufgaben a) bis d).

Die Resultate der letzten Aufgabe zeigen, dass kinetische und potentielle Energie ineinander umgewandelt werden können. Dies macht die Natur allerdings nicht gratis: Sie verlangt für diesen Vorgang quasi eine Transaktionsgebühr in Form von Reibarbeit, die für eine Erhöhung der inneren Energie sorgt.

Aufgabe: Mit Hilfe der Simulation sollen Energieumwandlungsprozess untersucht werden. Wählen Sie "Systeme" und aktivieren Sie die Option "Energiesymbole". Das voreingestellte System mit Wasserrad und Wasserkochen kann übernommen werden.

a) Welches Energiesymbol ist zu Beginn schon vorhanden und für welche Energieform steht es?

b) Der Zufluss von Wasser wird gestartet. Welche Energieumwandlungsprozesse finden wo statt?

c) Nachdem das Wasser im Heizgefäss siedet, wird der Zufluss von Wasser wird gestoppt. Fliesst noch irgendwo Energie? Warum?

d) Der Wasserhahn soll durch die Fahrradfahrerin ersetzt werden, ebenso der Wasserkocher durch die Glühlampe. Die Simulation wird gestartet. Welche Energieumwandlungsprozesse finden wo statt?

e) Testen Sie andere Systeme aus und beobachten Sie hier die Energieumwandlungsprozesse.

4.5 Energieerhaltungssatz im abgeschlossenen System

Die bisherigen Ergebnisse kann man so zusammenfassen, dass unterschiedliche Energieformen können ineinander umgewandelt werden können und die Gesamtenergie eines Systems konstant bleibt, wenn von aussen her keine Energie oder Masse zugeführt wird.

Dies führt zur Definition des abgeschlossenen Systems:

Auf ein abgeschlossenes System kann von aussen her nicht eingewirkt werden. Ein abgeschlossenes System tauscht mit seiner Umgebung weder Energie noch Materie aus.

Die Gesamtenergie in einem abgeschlossenen System bleibt konstant!

oder

$$E_{pot} + E_{kin} + E_{Def} + U = E_{gesamt} = konst. \tag{22}$$

Dieser Zusammenhang ist als ***Energieerhaltungssatz*** bekannt! Daraus folgt direkt,

dass es keine Maschine geben kann, welche mehr Energie oder Arbeit abgibt, als ihr zugeführt wird. ***Es gibt kein Perpetuum Mobile 1. Art.***

4.5.1 Anwendungen des Energieerhaltungssatzes

Der Energieerhaltungssatz bietet uns die Möglichkeit, physikalische Probleme auf sehr elegante Art und Weise zu lösen. Dabei geht es immer darum, die Energiebilanz für ein System zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufzustellen und gleichzusetzen.

In Abbildung 14 ist als Beispiel das vertikale Abfeuern einer Kanonenkugel dargestellt. Bei bekannter Abschussgeschwindigkeit möchte man z.B. wissen, welche maximale Höhe die Kanonenkugel erreichen kann.
Wie geht man dabei vor? Nun, zunächst werden die unterschiedlichen Zeitpunkte bezeichnet. In Abbildung 14 geschieht dies mit den Buchstaben A und B. Als nächstes wird der Nullpunkt der potentiellen Energie gesetzt. Sinnvollerweise ist der am Abschusspunkt der Kanonenkugel, also am Punkt A. Dann schreibt man hin, was über die Energien in den beiden Punkten bekannt ist. Z.B. ist die Geschwindigkeit der Kanonenkugel am höchsten Punkt gleich null – also auch die kinetische Energie am Punkt B. Das

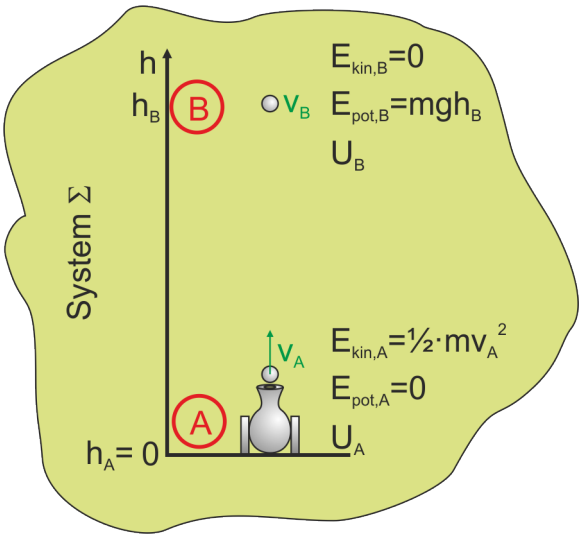


Abbildung 14 Zur Verdeutlichung des Energieerhaltungssatzes.

System Σ wird soweit gefasst, dass kein Energie- oder Materieaustausch auftreten kann (die Kanonenkugel soll z.B. nicht aus dem Bild fliegen). Nun wird der Energieerhaltungssatz für jeden Punkt aufgestellt und die beiden Ergebnisse gleichgesetzt:

$$E_{pot}^{A} + E_{kin}^{A} + E_{Def}^{A} + U_{A} = E_{pot}^{B} + E_{kin}^{B} + E_{Def}^{B} + U_{B} \tag{23}$$

Da die inneren Energien absolut nicht bekannt sein werden, wird aus (23)

$$E_{pot}^{A} + E_{kin}^{A} + E_{Def}^{A} = E_{pot}^{B} + E_{kin}^{B} + E_{Def}^{B} + \left(U_{B} - U_{A}\right) \tag{24}$$

Oder auch

$$E_{pot}^{A} + E_{kin}^{A} + E_{Def}^{A} = E_{pot}^{B} + E_{kin}^{B} + E_{Def}^{B} + \Delta U \tag{25}$$

Mit Formel (25) kann nun jedes Problem angegangen werden. Sie muss nur an die Aufgabenstellung angepasst werden. Zurück also zu unserer Kanonenkugel. Dort triff keine Deformationsarbeit einer Feder auf, also vereinfacht sich (25) zu

$$E_{pot}^{A} + E_{kin}^{A} = E_{pot}^{B} + E_{kin}^{B} + \Delta U \tag{26}$$

Nun verwendet man noch die bekannten Angaben $E_{pot}^{A} = 0$ und $E_{kin}^{B} = 0$ und erhalten

$$E_{kin}^{A} = E_{pot}^{B} + \Delta U\,. \tag{27}$$

Bei der beschriebenen Situation in Abbildung 14 wird also die beim Abschuss vorhandene kinetische Energie der Kanonenkugel in potentielle und innere Energie umgesetzt. Wenn die ganze Sache nun auch noch ohne Berücksichtigung der Reibung betrachtet werden soll, wird es sehr einfach:

Beispiel: Eine Kanonenkugel wird mit einer Geschwindigkeit von $60\frac{m}{s}$ vertikal nach oben abgeschossen. Wie hoch wird die Kugel steigen? Der Luftwiderstand soll vernachlässigt werden es wird also keine Reibung vorhanden sein.

Lösung: Die Skizze entspricht Abbildung 14. Da die Reibung nicht berücksichtigt werden soll, ist $\Delta U = 0$, weil ja keine Reibarbeit verrichtet werden wird. Der Energieerhaltungssatz (25) vereinfacht sich zu

$$E_{kin}^{A} = E_{pot}^{B}\,.$$

Obige Formel wird zu

$$\frac{mv_{A}^{2}}{2} = mgh_{B}\,.$$

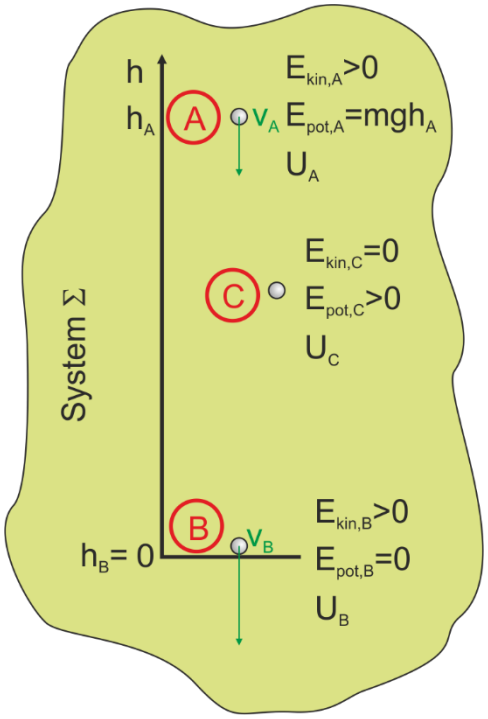
Auflösen nach der Höhe h_{B} ergibt

$$h_B = \frac{v_A^2}{2g} = \frac{\left(60\frac{m}{s}\right)^2}{2\cdot 9.81\frac{m}{s^2}} = \underline{\underline{183m}}$$

Die Formel war auch schon aus der Betrachtung des freien Falls bekannt. Allerding hatte dort die Herleitung etwas mehr Mühe bereitet.

Beispiel: Ein Gummiball wird aus einer Höhe von 3m mit einer Anfangsgeschwindigkeit von $12\frac{m}{s}$ vertikal nach unten geworfen. Beim Aufprall auf den Boden verliert er 30 % seiner kinetischen Energie infolge von Reibung. Wie hoch springt er zurück?

Lösung: Vom Vorgang wird eine Skizze angefertigt und die zu betrachtenden Punkte markiert. In diesem Fall kommt Reibung vor, es ist also $\Delta U > 0$. Der Ball fällt vom Punkt A, trifft auf der Erde auf (Punkt B), wo er Energie verliert und hüpft zum Punkt C auf die Höhe h_C zurück. Der Energieerhaltungssatz (25) lautet für die Verknüpfung von "A" und "C":



$$E_{pot}^A + E_{kin}^A + E_{Def}^A = E_{pot}^C + E_{kin}^C + E_{Def}^C + \Delta U\,.$$

Wir setzen die potentielle Energie am tiefsten Punkt h_B gleich null. Ausserdem kommen keine Spannenergien E_{Def} vor. Weiter wissen wir, dass sich der Gummiball am Umkehrpunkt "C" der Flugbahn nicht bewegt – also nur potentielle Energie besitzt. Setzen wir dieses Wissen ein, erhalten wir

$$E_{pot}^A + E_{kin}^A = E_{pot}^C + \Delta U\,.$$

Wir wissen, dass $\Delta U = 0.3\cdot\left(E_{kin}^A + E_{pot}^A\right)$ ist, eben 30% der ursprünglich vorhandenen gesamten Energie ausmacht. Daraus folgt für den Energieerhaltungssatz

$$E_{pot}^A + E_{kin}^A = E_{pot}^C + \Delta U$$
$$E_{pot}^A + E_{kin}^A = E_{pot}^C + 0.3\cdot\left(E_{kin}^A + E_{pot}^A\right)$$
$$0.7E_{pot}^A + 0.7E_{kin}^A = E_{pot}^C$$
$$0.7\cdot m\cdot g\cdot h_A + 0.7\cdot\frac{1}{2}mv_A^2 = m\cdot g\cdot h_C\,.$$

Dies lösen wir leicht nach h_C auf und bekommen

$$h_C = \frac{0.7\left(h_A + \frac{1}{2}v_A^2\right)}{g} = \frac{0.7\cdot\left(3m + \frac{1}{2}\left(12\frac{m}{s}\right)^2\right)}{9.81\frac{m}{s^2}} = \underline{\underline{5.35m}}\,.$$

4.6 Leistung

Zwei Bergsteiger, beide mit einer Masse von 90 kg, wandern unabhängig voneinander auf den gleichen Berg. Für den Weg zum Gipfel müssen 2000 Höhenmeter überwunden werden. Der eine schafft die Wanderung in sieben Stunden, der andere in knapp acht Stunden. Beide Wanderer verrichten die gleiche Hubarbeit:

$$W_{Hub} = mg\Delta h = 90kg\cdot 9.81\frac{m}{s^2}\cdot 2000m = \underline{1.77\cdot 10^6 J}$$

Trotzdem würden wir wahrscheinlich nicht sagen, dass die Ergebnisse gleichberechtigt seien, da der eine Wanderer diese Hubarbeit ja eine Stunde schneller erbracht hat als der andere. Für eine faire Beurteilung muss also noch berücksichtigt werden, in welcher Zeit die Arbeit verrichtet wurde. Die physikalische Grösse ***Leistung P*** (von Power P) trägt diesem Umstand Rechnung. Die Leistung ist definiert als der Quotient aus der verrichteten Arbeit, oder Energieänderung, und der dazu benötigten Zeitspanne.

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \tag{28}$$

Die Einheit der Leistung ist das ***Watt W***

$$[P] = \frac{[W]}{[\Delta t]} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{J}{s} = \frac{Nm}{s} = \frac{kgm^2}{s^3} = \frac{Ws}{s} = W \tag{29}$$

Die beiden Wanderer erbrachten also eine Leistung von $P_1 = \frac{W}{\Delta t} = \frac{1.77\cdot 10^6 J}{7h\cdot 3600\frac{s}{h}} = 70\frac{J}{s} = 70W$,

respektive $P_2 = \frac{W}{\Delta t} = \frac{1.77\cdot 10^6 J}{8h\cdot 3600\frac{s}{h}} = 61\frac{J}{s} = 61W$. Die Leistung des zügigeren Wanderers liegt dabei in etwa bei der zu erwartenden Dauerleistung eines Menschen, wie Tabelle 1 zeigt.

Tabelle 1 Einige Leistungen aus dem Alltag

	Leistung [W]		Leistung [W]
Glühbirne	25-100 W	Waschmaschine	2 kW
Mensch (Dauer-leistung)	70 W	Mittelklasse-auto	70 kW
Pferd (Dauer-leistung)	700 W	gängige Wind-kraftwerke	700 kW
Heizkörper	1-3 kW	Grosskraftwerke	> 1 GW

Beispiel: Welche Leistung liefert der Elektromotor eines Baukranes, der eine Kiste mit einer Masse von $200kg$ innerhalb von $6s$ in eine Höhe von 4m über Grund bringen kann?

Lösung: Es wird Hubarbeit verrichtet, also berechnet sich die erbrachte Leistung zu

$$P = \frac{W_{Hub}}{\Delta t} = \frac{mg\Delta h}{\Delta t} = \frac{200kg \cdot 9.81\frac{m}{s^2} \cdot 4m}{6s} = \underline{\underline{1308W}}$$

Aufgabe: Welche Masse kann durch eine Leistung von $P = 400W$ in einer Sekunde um einen Meter angehoben werden?

Aufgabe: Führen Sie das Experiment bei 4.10 durch!

Wenn die Geschwindigkeit des Körpers, an dem Arbeit verrichtet wird, entlang der Strecke konstant ist, kann man die Formel (28) etwas weiter entwickeln:

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{F \cdot \Delta s}{\Delta t} = F \cdot v \qquad (30)$$

Als Einschränkung gilt hier lediglich, dass der Kraft und der Geschwindigkeitsvektor parallel zueinanderstehen müssen.

Beispiel: Ein Schlitten muss mit einer horizontalen Kraft von $350N$ gezogen werden. Die konstante horizontale Geschwindigkeit dabei beträgt $0.7\frac{m}{s}$. Wie gross ist die erbrachte mechanische Leistung?

Lösung:

$$P = F \cdot v = 350N \cdot 0.7\frac{m}{s} = \underline{\underline{245W}}$$

Aufgabe: Der Motor eines Lamborghini Murciélago Roadster kann eine maximale Leistung von $426kW$ abgeben. Die bei maximaler Geschwindigkeit zu überwindende Reibungskraft beträgt $4793N$. Welche Maximalgeschwindigkeit erreicht der Murciélago Roadster?

4.7 Der Wirkungsgrad

Eine der wahrscheinlich wichtigsten physikalischen Grössen ist der ***Wirkungsgrad***. Darunter versteht man das Verhältnis der von einem System abgegebenen, nutzbaren Leistung, Energie oder der vom System verrichteten Arbeit, zu der dem System zugeführten Leistung, Energie oder an ihm verrichteten Arbeit:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{W_{out}}{W_{in}} = \frac{E_{out}}{E_{in}} \tag{31}$$

Nach dem Erhaltungssatz der Energie (siehe Abschnitt 4.5) kann obiger Bruch *nie* grösser als 1 werden. Der Wirkungsgrad wird häufig auch in Prozent angegeben.
In Abbildung 15 wird die Bedeutung des Wirkungsgrades anhand einer Glühlampe mit einer Leistung von 100W dargestellt. Von der aufgenommenen elektrischen Leistung von 100W werden lediglich rund 5W in sichtbares Licht umgewandelt, der Wirkungsgrad der Lichtausbeute beträgt also

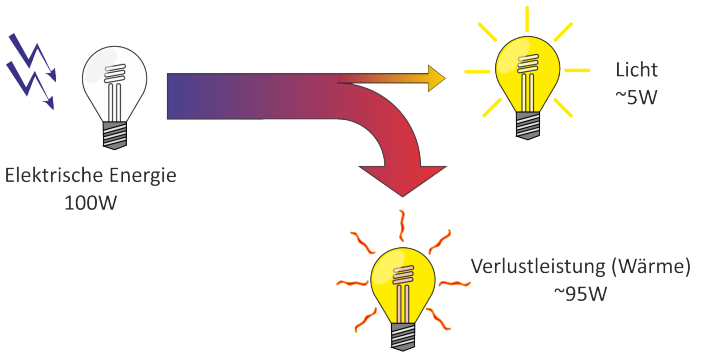


Abbildung 15 Der Wirkungsgrad, dargestellt am Beispiel einer Glühlampe.

$$\eta_{Licht} = \frac{5W}{100W} = 0.05 \triangleq \underline{\underline{5\%}}$$

Die restliche Leistung von 95W wird in Form von Wärmestrahlung an die Umgebung abgegeben. Glühbirnen haben also *bezüglich der Lichtausbeute* einen sehr schlechten Wirkungsgrad. Wenn man aber dieselbe Glühbirne unter dem *Aspekt ihrer Heizleistung* betrachtet, so besitzt sie einen Wirkungsgrad von

$$\eta_{Heiz} = \frac{95W}{100W} = 0.95 \triangleq \underline{\underline{95\%}},$$

was sehr gut ist. Es kommt also auf den Standpunkt an. In Tabelle 2 sind ein paar Wirkungsgrade aufgeführt.

Tabelle 2 Einige Wirkungsgrade aus der Natur und Technik Quelle: Wikipedia

	η [%]		η [%]
Glühbirne	5	Ottomotor	25
Kohlekraftwerk	25-45	Glühwürmchen	<95
Brennstoffzelle	20-60	Windkraftanlag	50 (max)
Transformator	50-99	Mensch	0 - 30

Aufgabe: Betrachten Sie das Energieflussdiagramm von Windkraftanlagen, wie es auf der Homepage beim Bundesverband Windenergie gezeigt ist. Berechnen Sie anschliessend die Teilwirkungsgrade jedes einzelnen Umwandlungsvorgangs und den Gesamtwirkungsgrad.

4.8 Experiment Bestimmung der Hubarbeit[1]

Aufbau

- Bauen Sie den Versuch *gemäss Vorgabe* auf. Beachten Sie die Einstellungen der Sensoren: Der Kraftmesser ist auf ± 10N einzustellen und beim Bewegungssensor soll der Schieberegler auf der Seite des Balls sein.
- Starten Sie das Programm "LoggerPro"

auf dem Laptop. Die angeschlossenen Sensoren sollten automatisch erkannt werden.
- Öffnen Sie die Datei "18a Work and Energy" aus dem "Physics with Vernier" Ordner. Es erscheinen drei Graphen auf dem Bildschirm. Die Daten werden während 5s aufgezeichnet!
- Speichern Sie die Datei unter einem eigenen Namen auf einem USB – Stick oder in ihrem Verzeichnis auf dem Server!

Kalibrierung

- Halten Sie den Kraftsensor mit dem Haken nach unten aber ohne angehängte Masse. Stellen Sie den Kraftsensor auf null (kalibrieren) indem Sie "Ctrl" + "0" drücken. Markieren Sie, falls nicht vorgewählt, nur den Kraftsensor. Drücken Sie "OK".

Schutz des Bewegungssensors

- Unter keinen Umständen darf während des Experimentierens eine Masse auf das Metallgitter des Motion Detectors fallen – Sie haften für Schäden!!

Messwerterfassung

- Hängen Sie eine Masse von 200g an den Kraftsensor.
- Halten Sie den Kraftsensor mit der Masse etwa 50cm über den Bewegungsdetektor. Klicken Sie auf "Collect"

um die Messung zu starten. Etwa 1s nachdem das tickende Geräusch angefangen hat, bewegen Sie den Kraftsensor langsam (=unbeschleunigt) 50cm aufwärts. Halten Sie dann den Sensor ruhig, bis die Messung nach 5s stoppt.

Auswertung

- Speichern Sie ihre Messwerte!
- Drücken Sie auf "Autoscale" – die Messwerte werden nun optimal dargestellt.
- Klicken Sie auf den Position – Zeit Graphen um ihn für die Auswertung zu aktivieren.

  Drücken Sie auf "Examine" um zu bestimmen, wann Sie angefangen, respektive aufgehört haben, zu ziehen. Eventuell müssen Sie das Prozedere auch mit dem Kraft

[1] Übersetzt und adaptiert aus Physics with Vernier

– Zeit Graphen wiederholen, um zuverlässige Daten zu erhalten. Tragen Sie die beiden Positionen und die dazugehörigen Zeiten in die Datentabelle ein!

- Bestimmen Sie die mittlere Kraft ausgeübte Kraft, während das Gewicht gehoben wird. Wählen Sie dazu nur den Ausschnitt aus dem Kraft – Zeit Graphen, der mit dem Hebevorgang übereinstimmt (Eventuell die Grenzen anpassen). Klicken Sie auf "Statistics" , um den Mittelwert der Kraft zu berechnen. Tragen Sie den Wert in die Tabelle ein.
- Wählen Sie im Kraft – Position Graphen denjenigen Bereich, der mit dem Hubvorgang übereinstimmt. Klicken Sie auf "Integrate" , um die Fläche unter der Kurve zu bestimmen. Tragen Sie das Resultat in die Tabelle ein.
- Drucken Sie die Graphen (Querformat)

Datentabelle

Arbeit beim Heben einer Masse		
	Zeit [s]	**Position [m]**
Start Hubvorgang		
Ende Hubvorgang		
Durchschnittliche Kraft F [N]		
Verrichtete Arbeit [J] berechnet $\overline{F}\cdot\Delta s$		
Integral während des Hubvorgangs [N·m]		
$\Delta E_{pot} = mg\Delta h$ **berechnet**		

Analyse

Stimmen die berechneten Werte (Theorie) mit den gemessenen überein?

4.9 Experiment Bestimmung der Deformationsarbeit an einer Spiralfeder[2]

Durchführung

Aufbau

- Bauen Sie den Versuch *gemäss Vorgabe* auf. Beachten Sie die Einstellungen der Sensoren: Der Kraftmesser ist auf ± 10N einzustellen und beim Bewegungssensor soll der Schieberegler auf der Seite des Balls sein.
- Starten Sie das Programm "LoggerPro"

auf dem Laptop. Die angeschlossenen Sensoren sollten automatisch erkannt werden.
- Öffnen Sie die Datei "18b Work Done Spring" aus dem "Physics with Vernier" Ordner. Es erscheinen drei Graphen auf dem Bildschirm. Die Daten werden während 5s aufgezeichnet!
- Speichern Sie die Datei unter einem eigenen Namen in ihrem Verzeichnis auf dem Server!
- Spannen Sie eine Feder zwischen Stativhaken und Kraftsensor ein.

Kalibrierung

- Stellen Sie die beiden Sensoren auf null (kalibrieren) indem Sie "Ctrl" + "0" drücken. Markieren Sie, falls nicht vorgewählt, beide Sensoren. Drücken Sie "OK".

Überprüfung der Sensoren

- Klicken Sie "Collect"

– der Bewegungssensor sollte ein klickendes Geräusch von sich geben. Wenn Sie nun den Kraftsensor verschieben, müssten Sie die jeweilige Verschiebungslänge auf dem Bildschirm ablesen können. Dies muss bis zu einer Dehnung von maximal (!) 50 cm möglich sein. Falls nicht, müssen Sie die Ausrichtung des Bewegungssensors auf den befestigten Karton überprüfen und anschliessend neu kalibrieren.

Messwerterfassung

- Klicken Sie auf "Collect"

um die Messung zu starten. Spannen Sie die Feder langsam während 5s, indem Sie am Kraftmesser ziehen. Die Feder sollte nach diesen 5s etwa 50 cm gespannt sein.

Auswertung

- Speichern Sie ihre Messwerte!
- Drücken Sie auf "Autoscale"
– die Messwerte werden nun optimal dargestellt.

[2] Übersetzt und adaptiert aus Physics with Vernier

- Klicken Sie auf den Position-Zeit Graphen um ihn für die Auswertung zu aktivieren.

  Drücken Sie auf “Examine“ um zu bestimmen, wann Sie angefangen, respektive aufgehört haben, zu ziehen. Eventuell müssen Sie das Prozedere auch mit dem Kraft – Zeit Graphen wiederholen, um zuverlässige Daten zu erhalten. Tragen Sie die beiden Positionen und die dazugehörigen Zeiten in die Datentabelle ein!
- Klicken Sie auf den Kraft-Position Graphen, um ihn für die Auswertung zu aktivieren.

  Klicken Sie auf “Linear Fit“ , um die Steigung des Graphen zu bestimmen (Eventuell müssen Sie die Grenzen anpassen, indem Sie die Schieberegler so verschieben, dass nur der lineare Bereich abgedeckt wird). Die Steigung entspricht der Federkonstanten D. Tragen Sie den Wert in die Tabelle ein.
- Die Fläche unter dem Kraft – Position Graphen entspricht der verrichteten Deformationsarbeit. Wählen Sie im Graphen die ersten 10cm der Dehnung aus (Halten Sie die linke Maustaste gedrückt, während Sie den Ausschnitt markieren – Sie können die Grenzen jederzeit noch anpassen, indem Sie die Greifer verschieben). Klicken Sie auf “Integrate“ , um die Fläche unter der Kurve zu bestimmen. Tragen Sie auch die Fläche in die Tabelle ein.
- Wiederholen Sie obigen Punkt für eine Streckung von 20cm.
- Bestimmen Sie die gesamte verrichtete Deformationsarbeit durch eine geeignete Wahl der Fläche!
- Drucken Sie die Graphen aus (Querformat wählen!)

Datentabelle

Arbeit beim Deformieren einer Feder			
		Zeit [s]	**Ort [m]**
Start der Deformation			
Ende der Deformation			
Federkonstante [N/m]			
	10 cm	**20cm**	**Maximum**
Integral [Nm]			
W_{Def} *theoretisch*			

Analyse

Stimmen die berechneten Werte (Theorie) mit den gemessenen überein?

4.10 Experiment Bestimmung der menschlichen Leistung

Welche Leistung kann ein Mensch kurzfristig beim Treppensteigen erbringen? Dieses Experiment werden Sie am eigenen Leib erfahren. Dazu benötigen Sie lediglich eine Waage und eine Stoppuhr.

Aufgabe

Gehen bzw. laufen Sie jeweils einmal die Treppe vom Keller bis in den ersten Stock des Physikgebäudes hoch. Um die erbrachte Leistung berechnen zu können, müssen Sie ihre Masse und die dafür benötigte Zeit messen. Die Höhendifferenz Δh vom Keller bis in den ersten Stock ist am Geländer angeschrieben.

Resultate

Messgrössen			
$m =$	$\Delta h =$	$\Delta t_{gehen} =$	$\Delta t_{laufen} =$

Auswertung

Berechnen Sie die erbrachte Leistung und geben sie die Ergebnisse sowohl in der SI-Einheit wie auch in der Einheit PS an.

Leistung beim Hochgehen (entspricht der Dauerleistung)

Leistung beim Hochlaufen

Wie sind die von ihnen erbrachten Leistungen mit denjenigen von Tieren (z.B. Pferd) zu vergleichen?