4. Vorstellung des Münchner Unterrichtskonzepts

Ziel dieser Arbeit war es, mit dem neuen Unterrichtskonzept die vom bayerischen Lehrplan vorgegebenen Unterrichtsinhalte nach didaktischen Gesichtspunkten neu zu ordnen und gegebenenfalls weitere, für das Verständnis benötigte Lerninhalte anzufügen. An dieser Stelle möchte ich auf das Kapitel „1. Einführung“ verweisen. Dort werden die einzelnen Ziele, die mit dem neuen Unterrichtskonzept verfolgt wurden, detailliert dargelegt.

4.1 Übersicht über das Münchner Unterrichtskonzept

An dieser Stelle wird nur ein Überblick über das Münchner Unterrichtskonzept gegeben. Am Ende vom Kapitel 4 ist das ausführliche Skriptum des Münchner Unterrichtskonzepts (für Schüler/innen und Lehrer/innen) abgedruckt.

A. Reibung:
Es werden die verschiedenden Arten der Reibung besprochen. Die Bearbeitung dieses Stoffgebietes erfolgt wie bei den bisher gebräuchlichen Unterrichtskonzepten.

B. Mechanische Energie und Arbeit

B.1 Energieerhaltungssatz:
Die Betrachtung der sich wiederholenden Bewegung eines nahezu idealen Gummiballs führt zu der Annahme, dass es in dem abgeschlossenen mechanischen System Erde-Gummiball eine Größe gibt, die während der Bewegung konstant bleibt. Diese Größe nennt man Gesamtenergie. Weitere Versuche aus der Mechanik zeigen, dass diese Annahme sinnvoll ist. So haben zum Beispiel sowohl das Fadenpendel als auch ein Massenstück, das an einer Schraubenfeder hängt, einen immer wiederkehrenden, also konstanten Bewegungsablauf.

B.2 Energiearten und Energieumwandlung:
Die unterschiedlichen Energiearten (kinetische Energie, Höhenenergie und Spannenergie) ergeben sich bei genauerer Betrachtung der oben angesprochenen Experimente ganz zwangsläufig. In diesem Zusammenhang werden bereits die vorkommenden Energieumwandlungen qualitativ besprochen. Nach der Herleitung der Formeln für die verschiedenen Energiearten wird die Anwendung des Energieerhaltungssatzes anhand unterschiedlicher Beispiele vertieft.

B.3 Arbeit:
Bei der darauffolgenden Betrachtung nicht abgeschlossener mechanischer Systeme ergibt sich die Notwendigkeit eine neue physikalische Größe zu definieren, die die Änderung der Gesamtenergie des nicht abgeschlossenen Systems beschreibt. Diese Größe nennt man Arbeit. Mehrere Übungsbeispiele zeigen, dass auch in abgeschlossenen mechanischen Systemen zwischen Teilsystemen Arbeit verrichtet wird.

B.4 Kraftwandler:
Anschließend betrachtet man die in der 8. Klasse bereits kennengelernten Kraftwandler näher. Hier werden bereits bekannte Formeln, wie zum Beispiel das Hebelgesetz, mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes hergeleitet. Aber auch die Formel beim Flaschenzug und der schiefen Ebene werden deduktiv gewonnen und anschließend experimentell bestätigt.

B.5 Wirkungsgrad und Leistung:
Die Behandlung des Wirkungsgrads und der Leistung erfolgen traditionell.

C. Wärmelehre

C.1 Innere Energie

C.1.1 Definition der inneren Energie und Erweiterung des Energieerhaltungssatzes:
Bisher wurden nur Systeme betrachtet, bei denen die Reibung vernachlässigt werden konnte. Diese Einschränkung wird nun aufgegeben. Der folgende Versuch läßt die Schüler/innen anschaulich erfahren, wie die mechanische Energie aufgrund der Reibung in innere Energie umgewandelt wird: An einer Schnur wird ein Körper der Masse 1 kg befestigt. Anschließend lässt man die Schnur so durch die Hand gleiten, dass sich der Körper mit konstanter Geschwindigkeit nach unten bewegt. Die Schüler/innen spüren, dass sich ihre Hand erwärmt hat.
Da der Energieerhaltungssatz immer gelten soll, muss die zu Beginn vorhandene Energie in die Hand und in die Schnur gegangen sein. Diese sich in der Hand und im Seil befindende Energie nennt man „innere Energie". Der Energieerhaltungssatz, den die Schüler in der Mechanik kennengelernt haben, ist damit um die innere Energie erweitert worden.
Das oben beschriebene Experiment zeigt, dass die Temperaturerhöhung ein Maß für die Änderung der „inneren Energie" ist. Ziel ist es nun, eine Formel für die Berechnung der Änderung der inneren Energie angeben zu können. Um dies zu erreichen, wird im Folgenden erst einmal die Temperaturmessung durchgenommen.

C.1.2 Temperaturmessung:
Zu Beginn dieses Kapitels wird der Nullte Hauptsatz der Thermodynamik besprochen. Er soll bei den Schüler/innen das Verständnis wecken, warum man Temperaturen überhaupt messen kann. Erst dann erfolgt eine Betrachtung der einzelnen Thermometerarten. Daran schließt sich eine, kurz gehaltene mikroskopische Betrachtung der inneren Energie an. Sie wird aber nur dazu benötigt, die Kelvin-Temperaturskala einzuführen. 0 K wird als die Temperatur definiert, bei der den Teilchen eines Körpers keine Energie mehr entzogen werden kann. Auf die mikroskopische Betrachtung der inneren Energie wird im gesamten restlichen Unterrichtskonzept kein Bezug mehr genommen.

C.1.3 Die Formel für die Änderung der inneren Energie auf thermische Art:
Jetzt kann die Herleitung der Formel ($\Delta E_i = cm\Delta\vartheta$) für die Änderung der inneren Energie auf thermische Art erfolgen. Traditionell wird die Formel für die Änderung der inneren Energie mit dem Kurbelversuchs hergeleitet. Dass die Schüler bei diesem Versuch Probleme haben, den Zusammenhang zwischen mechanischer Energie und

innerer Energie zu erkennen, ist ganz offensichtlich. So wird die Änderung der inneren Energie nicht von einer mechanischen Energie herbeigeführt, sondern durch einen biochemischen Prozess verursacht. Diese Probleme treten bei dem neu konzipierten Versuch nicht auf. Die Schüler erfahren unmittelbar, wie sich die Änderung der mechanischen Energie auf die Temperaturerhöhung auswirkt. Der Versuch wird wie folgt durchgeführt: Eine Schnur, an die ein Massenstück (1 kg) geknotet ist, wird zum Teil um ein Thermometer (Thermoelement) gewickelt. Damit die Reibung groß genug ist, wird die Schnur mit samt dem Thermometer zwischen zwei Styroporteile eingeklemmt. Das Massenstück lässt man nun langsam nach unten gleiten. Dabei erwärmen sich sowohl das Thermometer, als auch das Seil, das um das Thermometer gewickelt ist. Gemessen wird der Weg h, den das Massenstück zurückgelegt hat, und die am Thermometer angezeigte Temperaturerhöhung. Der Versuch ergibt: $\Delta h \sim \Delta\vartheta$.
Wenn bei dem Versuch immer der gleiche Anteil von ΔE_H des Massenstücks an das Thermometer abgegeben wird, gilt für die Änderung der inneren Energie des Thermometers: $\Delta E_i \sim \Delta E_H$.
Mit $\Delta E_H \sim h$ und dem experimentell bestimmten $\Delta h \sim \Delta\vartheta$ folgt: I. $\Delta E_i \sim \Delta\vartheta$.
Die direkte Porportionalität zwischen ΔE_i und der Masse m des Thermometers wird anhand des folgenden Gedankenversuchs hergeleitet:
Bei n gleichen Anordnungen (gleiche Massen der durch Reibung erwärmten Thermometer, gleiche ΔE_H) wird bei jeder der n Anordnungen die innere Energie um $\Delta E_i^{(k)}$ (k = 1, 2, 3 .. n) geändert, insgesamt also um $\Delta E_i = n \cdot \Delta E_i^{(k)}$. Bei den n Thermometern mit Gesamtmasse n·m wurde die innere Energie also insgesamt um $n \cdot \Delta E_i^{(k)}$ geändert. Daraus folgt II. $\Delta E_i \sim m$.

Aus den funktionalen Zusammenhängen von I. und II. ergibt sich die gewünschte Formel $\Delta E_i = cm\Delta\vartheta$. c ist dabei die spezifische Wärmekapazität, eine materialabhängige Größe.

Dieser Versuch zur direkten Umwandlung von mechanischer Energie in innere Energie ist ein wesentlicher Bestandteil des Münchner Unterrichtskonzepts. Er stellt eine Brücke zwischen der Mechanik und der Wärmelehre dar. Zudem zeigt er, dass sich der Energieerhaltungssatz wie ein roter Faden durch die einzelnen Teilgebiete der Physik zieht.

C.2 Änderung der inneren Energie

C.2.1 Der erste Hauptsatz der Wärmelehre:
Mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik wird den Schülern/Schülerinnen anschließend gezeigt, dass der Wert der inneren Energie sowohl durch Arbeit, als auch durch Wärme geändert werden kann. Dabei wird deutlich darauf hingewiesen, dass die Wärme genauso wie die Arbeit keine Energieart ist. Die Wärme wird hier als übertragene Energiemenge zweier Körper unterschiedlicher Temperatur verstanden, die sich im thermischen Kontakt befinden. Den Schülern/innen wird damit vor Augen geführt, dass die Wärme in der Wärmelehre annähernd die gleiche Rolle spielt wie die Arbeit bei der mechanischen Energie. Die Arten des thermischen Energieaustausches, nämlich Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung, runden dieses Kapitel ab.

C.2.2 Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre:
An die Besprechung des Wärmeaustausches schließt sich naheliegend die Besprechung des zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre an (alle in der Natur vorkommenden Vorgänge sind irreversibel). Reversible und irreversible Vorgänge werden hier ausführlich besprochen.

C.3 Änderung des Aggregatzustands:
Die Stoffbearbeitung erfolgt in üblicher Weise.

C.4 Das ideale Gas:
Die Herleitung des idealen Gasgesetzes wird mit der daran anschließenden Betrachtung der technischen Nutzung der inneren Energie motiviert. Dazu verweist man darauf, dass nach dem 1. Hauptsatz der Wärmelehre innere Energie in mechanische Energie umgewandelt werden kann. Technisch realisiert wird dies sowohl in einer Gasturbine, als auch in dem Benzinmotor, indem man die Expansion eines Gases bei einem Verbrennungsprozess ausnutzt.

C.5 Technische Nutzung der inneren Energie:
Bei den Wärmekraftmaschinen wird der 2. Hauptsatz der Thermodynamik nochmals betrachtet. (Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die nichts anderes bewirkt als die Umwandlung von innerer Energie in mechanische Energie und die Abkühlung eines Wärmereservoirs.) Dass dadurch der Wirkungsgrad der Wärmekraftmaschinen beschränkt ist, wird ausführlich problematisiert.
Die Betrachtung der Energieentwertung schließt das Kapitel „Technische Nutzung der inneren Energie“ ab.

4.2 Vergleich des Münchner Unterrichtskonzepts mit dem konventionellen Konzept

Die untenstehende Tabelle zeigt den Unterschied zwischen dem bisherigen, konventionellen Unterrichtskonzept und dem Münchner Unterrichtskonzept auf. Die Unterrichtsinhalte wurden neu angeordnet und bei der Wärmelehre weitere Unterrichtsinhalte zugefügt.

		konventionelles Unterrichtskonzept	Münchner Unterrichtskonzept
Mechanik	Reibung	bei beiden gleich behandelt	
	Energie und Arbeit	Betrachtung mechanischer Maschinen (Fortführung aus der 8. Klasse) $\Rightarrow$ $F \cdot s =$ konstant $\Downarrow$ Arbeit $:= F \cdot s$ $\Downarrow$ Energie := gespeicherte Arbeit Energiearten, Energieumwandlungen, dann Energieerhaltungssatz	Energieerhaltungssatz $\Rightarrow$ Energiearten $\Downarrow$ Motivation mit nicht abgeschlossenen Systemen Arbeit := ΔE und Arbeit $= F \cdot s$ $\Downarrow$ mechanische Maschinen betrachtet unter dem Blickwinkel des Energieerhaltungssatzes

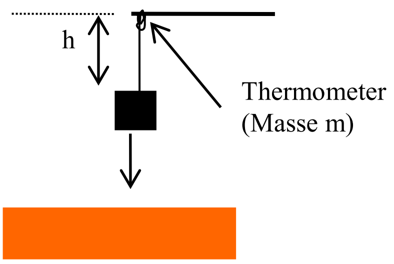
	Wirkungsgrad, Leistung	Bei beiden gleich behandelt	
Wärmelehre	Innere Energie	Zu einem späteren Zeitpunkt.	Energieerhaltungssatz erfordert neue Energieform, die innere Energie
	Temperatur	Temperaturmessung	Temperaturmessung, nullter Hauptsatz der Thermodynamik
	ideales Gas	Volumenausdehnung verschiedener Körper $\Downarrow$ Gesetz des idealen Gases	Zu einem späteren Zeitpunkt.
	Innere Energie, Wärme	Reibungsarbeit bewirkt Änderung der inneren Energie $\Delta E_i = W_R = cm\Delta\vartheta$ Energieerhaltungssatz $\Downarrow$ Wärme Q := ΔE_i (bei Temperaturänderung)	Bei der Umwandlung von mechanischer Energie in innere Energie ergibt sich mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes: $\Delta E_i = cm\Delta\vartheta$ $\Downarrow$ Erster Hauptsatz der Thermodynamik
	reversible und irreversible Prozesse	Zu einem späteren Zeitpunkt.	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik
	Aggregatzustand	Bei beiden gleich behandelt	
	ideales Gas	Bereits früher behandelt.	Voruntersuchung zur technischen Nutzung der inneren Energie $\Rightarrow$ Gesetz des idealen Gases
	Wärmekraft-maschinen mit reversiblen und irreversiblen Vorgängen	Betrachtung der technischen Nutzung der inneren Energie$\Rightarrow$ reversible und irreversible Prozesse; Energieentwertung	Betrachtung der technischen Nutzung der inneren Energie $\Rightarrow$ andere Betrachtung des zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre; Energieentwertung

4.3 Versuche zur Umwandlung von mechanischer Energie in innere Energie

Wie bereits erwähnt, hat der Versuch zur Veranschaulichung der Umwandlung von mechanischer in innere Energie innerhalb des Münchner Unterrichtskonzeptes eine zentrale Bedeutung. Bei diesem Versuch wird den Schülern direkt vor Augen geführt, wie die Höhenenergie in innere Energie umgewandelt wird.

Beim Münchner Unterrichtskonzept verwendeter Versuch:

Versuchsaufbau:



Versuchsaufbau zur Bestimmung der Formel $\Delta E_i = c\, m\Delta\vartheta$

Typische Versuchsergebnisse:

h in cm	0	5	10	15	20
ΔE_h in J	0	0,49	0,98	1,47	1,96
$\Delta\vartheta$ in °C	0	0,6	1,2	1,8	2,3

Unter der Annahme, dass die Änderung der Höhenenenergie zur Änderung der inneren Energie des Thermometers direkt proportional ist, folgt aus der Tabelle:

$$\frac{\Delta E_i}{\Delta\vartheta} = \text{constant} \quad \text{bzw. } \Delta E_i \sim \Delta\vartheta$$

Mit der, aus einem Gedankenversuch gewonnen Proportionalität $\Delta E_i \sim m$ ergibt sich: $\Delta E_i \sim \Delta\vartheta m$

Jetzt ist nur noch die spezifische Wärmekapazität als Proportionalitätskonstante einzuführen. Dann erhält man die Formel für die Änderung der inneren Energie

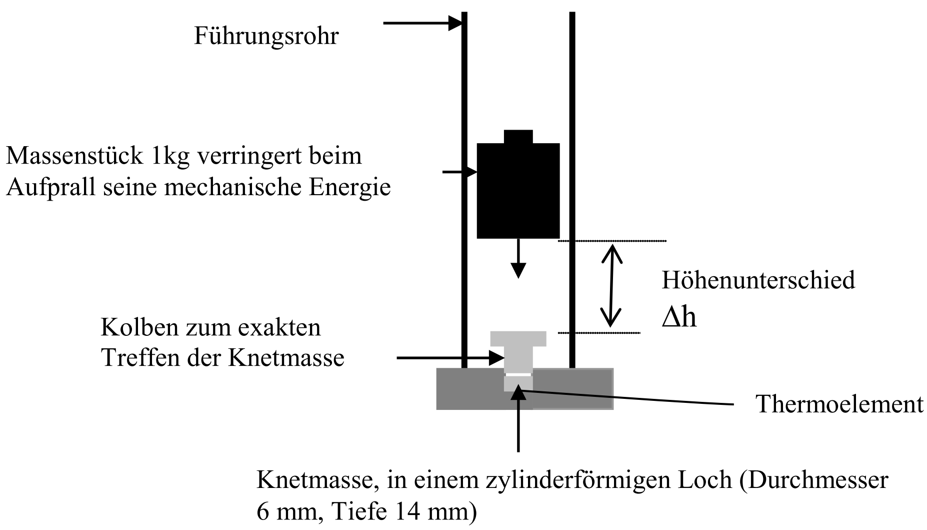
$$\Delta E_i = cm\Delta\vartheta$$

Das Umwandlungsrohr:

Zu Beginn war eine andere Versuchsdurchführung geplant. Da hier, wie weiter unten noch genauer beschrieben wird, mechanische Probleme auftraten, wurde dieser Versuchsaufbau letztlich verworfen.

Bei dem Versuch lässt man ein Massenstück aus einer bekannten Höhe fallen. Das Massenstück fällt anhand des Führungsrohrs zentriert auf einen Kolben, der daraufhin ein Stück Knetmasse kurzzeitig komprimiert. Ein Teil der mechanischen Energie des Massenstücks ist bei diesem Vorgang in innere Energie der Knetmasse umgewandelt worden. Die dadurch entstandene Temperaturerhöhung wird mit Hilfe eines Thermoelements bestimmt.

Den detaillierten Versuchsaufbau zeigen die folgenden Abbildungen. Sowohl der Kolben als auch die Grundplatte sind aus Edelstahl.



Schnittbild durch das „Umwandlungsrohr“

Die folgende Tabelle zeigt eine typische Messreihe dieses Versuchs:

Fallstrecke Δh des 1kg Massenstücks in cm	5	10	15
Thermospannung in μV	5,5	12	18
Temperatur- erhöhung: $\Delta\vartheta$ in °C	0,133	0,294	0,441

Im Rahmen der Messgenauigkeit gilt also: $\Delta h \sim \Delta\vartheta$.

Bei den Versuchen galt: Masse der Knetmasse: 0,450g; spezifische Wärmekapazität c_K = 3,25 J/(gK) Thermospannung des Thermoelements bei der Temperaturerhöhung um 1°C: 41µV. Das Thermoelement zeigt in weniger als einer Sekunde die Temperaturänderung an. Der Ausschlag geht aber auch innerhalb weniger Sekunden zurück.

Die Temperaturerhöhung scheint etwas zu gering zu sein. Mit der folgenden Rechnung wird gezeigt, wie sich die Temperatur der Knetmasse erhöhen müsste, wenn sich die gesamte mechanische Energie in innere Energie der Knetmasse umwandeln würde, und das Massenstück aus 15 cm herunter fällt.

$$\Delta E_{\text{Massenstück}} = \Delta E_{\text{i, Knetmasse}}$$

$$m_M gh = c_K\, m_K \Delta\vartheta$$

$$\Delta\vartheta = \frac{m_M gh}{c_K m_k} = \frac{1\text{kg}\cdot 9{,}81\frac{\text{J}}{\text{mkg}}\cdot 0{,}15\text{m}}{3{,}25\frac{\text{J}}{\text{gK}}\cdot 0{,}450\text{g}} \approx 1{,}006\text{K} \pm 0{,}117\text{K}$$

Der Wert $\pm$ 0,117K gibt den Fehler aus der hier - nicht vorgeführten - Fehlerrechnung wieder.

Die theoretisch bestimmte Temperaturerhöhung von 1,006K ist also 2,3 mal so groß wie die experimentell bestimmte Temperaturerhöhung. Das hat mehrere Gründe:

- Das Thermoelement kann nicht in die Mitte, sondern nur an den Rand der Knetmasse positioniert werden, da die Kräfte, die beim Auftreffen des Massenstücks an dem Thermoelement angreifen, so groß sind, dass das Thermoelement nach einigen Versuchen brechen würde.
- Der Kolben ist nach einigen Versuchen sehr stark eingekerbt. Daher wird die Reibung zwischen dem Kolben und dem zylinderförmigen Loch sehr groß.
- Es wird nicht die gesamte mechanische Energie in innere Energie der Knetmasse umgewandelt.
- Der Wärmeübergang Knetmasse - Thermoelement ist schlecht.

Zusammenfassung:

Der beim Münchner Unterrichtskonzept letztendlich verwendete Versuch ist sehr gut zur Einführung der Formel $\Delta E_i = cm\Delta\vartheta$ geeignet. Er ist schnell aufgebaut und besteht nur aus Materialien, die in jeder Physiksammlung einer Schule vorrätig sind. Das Fallrohr erfüllt diese Anforderungen leider nicht. Zudem sind bei ihm die mechanischen Beanspruchungen an einzelne Bauteile groß, so dass des öfteren Defekte auftreten.

4.5 Das Skript des Münchner Unterrichtskonzepts

Bader

Physik 9

Verfasser: Martin Bader

Inhaltsangabe

I. Die Reibung

1. Reibungsarten und deren mikroskopische Betrachtung

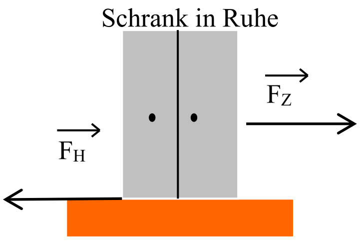


Abb. 3.1: Haftreibung bei einem Schrank.

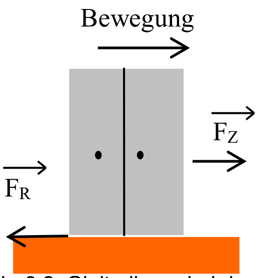


Abb. 3.2: Gleitreibung bei dem, mit konstanter Geschwindigkeit gezogenen Schrank.

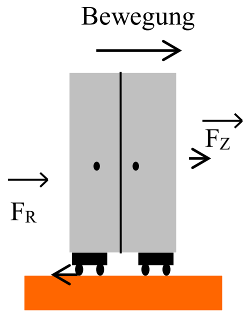


Abb. 3.3: Rollreibung bei dem, mit konstanter Geschwindigkeit auf kleinen Wagen gerollten Schrank.

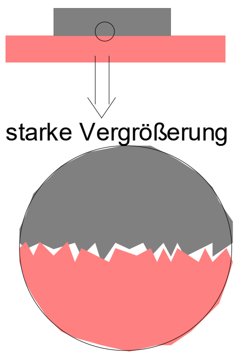


Abb. 3.4: Verzahnung der Oberflächen bei der Reibung

Die Reibung spielt in vielen Vorgängen des täglichen Lebens eine wichtige Rolle. Will man zum Beispiel einen Schrank verschieben (Kraft F_Z), muß an ihm recht kräftig gezogen werden, dass er sich überhaupt in Bewegung setzt (siehe Abb. 3.1). Grund dafür ist, dass die Berührungsflächen des Schranks und des Bodens aneinander reiben. Die Kraft, mit der der Schrank aufgrund der Haftreibung zu Beginn am Boden haftet, nennt man Haftkraft F_H. Die maximale Haftkraft ist die Reibungskraft, die angreift, wenn sich der Gegenstand grade noch nicht bewegt. Wenn nach heftigem Ziehen der Schrank erst einmal über den Boden gleitet, ist zum Ziehen eine wesentlich geringere Kraft nötig (siehe Abb. 3.2). Man nennt die Kraft, mit der die Bewegung des Schranks aufgrund der Gleitreibung gehemmt wird, Gleitreibungskraft F_R. Möbelpacker bewegen einen Schrank meist sehr viel einfacher. Sie stellen den Schrank auf zwei kleine Rollwagen und schieben ihn mit einer wesentlich geringeren Kraft an die gewünschte Stelle (siehe Abb. 3.3). Diese Art der Bewegung wird aufgrund der Rollreibungskraft F_{Rol} gehemmt. Haftkraft, Gleitreibungskraft und Rollreibungskraft hemmen die gewünschte Bewegung. Daher sind hier diese drei Kräfte gegen die Bewegungsrichtung gerichtet.
Es gibt aber auch viele Bewegungen, die ohne Reibung gar nicht möglich wären. Ein Beispiel ist das Laufen, bei dem zwischen der Schuhsohle und der Unterlage Reibung vorhanden sein muß. Sonst käme man nicht vorwärts.

Versuchen wir nun zu verstehen, warum die Reibung zwischen zwei Körpern überhaupt auftritt. Dazu muß man zwei Effekte unterscheiden, die für die Reibung zwischen zwei Körpern verantwortlich sind:
1. Verzahnung der Oberflächen: Meist sind die Rauheiten der Oberflächen für die Reibung verantwortlich. Stellt man einen Körper auf die Unterlage, verzahnen sich Aufgrund der Rauheiten die Oberflächen ineinander. Damit der Körper bewegt werden kann, müssen die Verzahnungen zwischen dem Körper und der Unterlage gelöst werden (siehe Abb. 3.4). Dabei werden die verzahnten Teile etwas verbogen. Lösen sich die verzahnten Teile von Körper und Unterlage wieder, schwingen sie kurzzeitig hin und her.
2. Anziehen der Oberflächenteilchen: Haben zwei Körper, wie zum Beispiel zwei Glasplatten, sehr glatte Oberflächen, kommen sich die Teilchen (Atome oder Moleküle), aus denen die Körper aufgebaut sind, an der Berührungsfläche der beiden Körper sehr nahe. Diese Oberflächenteilchen ziehen sich gegenseitig an und bewirken so eine Reibungskraft, die oft sehr viel größer ist als die Reibungskraft, die durch die Verzahnung der Oberflächen zustande kommt. Um dies zu zeigen, machen wir folgenden Versuch. Zwei Glasplatten werden aufeinandergelegt. Zum gegenseitigen Verschieben der Glasplatten ist eine große Kraft erforderlich.

Zusammenfassung:

1. Reibungskräfte kommen entweder durch Verzahnung der Oberflächen (siehe Abb. 3.4) oder durch gegenseitige Anziehung der Oberflächenteilchen zustande.
2. Man unterscheidet drei Arten der Reibung:
   Haftreibung, Gleitreibung und Rollreibung.
3. Für die Reibungskräfte zwischen einem Körper und einer Unterlage gilt:
   maximale Haftkraft > Gleitreibungskraft > Rollreibungskraft

2. Die Reibungsgesetze

Nun beschäftigen wir uns damit, wie man die verschiedenen Reibungskräfte überhaupt messen kann und welche Gesetze gelten. Zieht man an einem Körper so, dass seine Geschwindigkeit konstant ist (das schließt den Fall, dass die Geschwindigkeit null ist, mit ein), so ist nach dem Trägheitssatz von Newton die Summe aller Kräfte gleich null. Daraus folgt, dass bei konstanter Geschwindigkeit die Richtungen der Reibungskraft und der Zugkraft entgegengesetzt, ihre Beträge aber gleich sind.

Somit haben wir eine einfache Möglichkeit gefunden, die Gleit- und Rollreibungskräfte zu messen. Man zieht dazu einen Körper mit konstanter Geschwindigkeit über die Unterlage und mißt mit Hilfe eines Kraftmessers die Zugkraft. Die Reibungskraft hat dann den gleichen Betrag wie die Zugkraft.

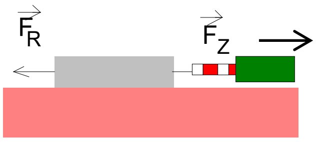


Abb. 4.1: Zusammenhang von Reibungskraft F_R und Zugkraft F_Z.

Von welchen Größen sind die Haftkraft und die Gleitreibungskraft abhängig?
Wir untersuchen die Abhängigkeit der Reibungskraft von der Geschwindigkeit, der Größe der Berührungsflächen und der Normalkraft (Abb. 4.1).

1. Reibungskraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit:
   Wir ziehen einen Holzquader mit unterschiedlichen, aber konstanten Geschwindigkeiten über den Tisch. Man erhält unabhängig von der Geschwindigkeit immer die gleiche Zugkraft. Da Gleitreibungskraft und Zugkraft vom Betrag her gleich sind, folgt aus den Versuchen, dass die Gleitreibungskraft nicht von der Geschwindigkeit abhängt.

2. Reibungskraft in Abhängigkeit von der Größe der Berührungsfläche:
   Dazu legen wir den Holzquader einmal auf die kleinere und einmal auf die größere Fläche und messen jeweils die maximale Haftkraft und die Gleitreibungskraft. Für beide Reibungsarten gilt, dass die Kraft von der Größe der Berührungsfläche unabhängig ist.

3. Reibungskraft in Abhängigkeit von der Normalkraft.
   Wir legen auf den Holzquader unterschiedlich viele, gleich große Holzquader und messen für die zwei Reibungsarten die Zugkräfte. Da wir den Holzquader über eine waagrechte Unterlage ziehen, ist in diesem Fall der Betrag der Normalkraft gleich der Gewichtskraft des Körpers (siehe Abb. 4.1).

Haftreibung:

F_N in N	1,2	2,4	3,6
F_H in N	0,72	1,5	2,1
$\frac{F_H}{F_N}$	0,60	0,63	0,60

Gleitreibung:

F_N in N	1,2	2,4
F_R in N	0,50	1,0
$\frac{F_R}{F_N}$	0,42	0,42

In der Tabelle ist F_H die maximale Haftkraft, das ist die Reibungskraft, bei der sich der Körper, wenn an ihm gezogen wird, gerade noch nicht bewegt.

Für beide Reibungsarten gilt: $F_{Reibung} \sim F_N$.

Bei der Haftreibung nennt man die Proportionalitätskonstante Haftreibungszahl μ_H, bei der Gleitreibung Gleitreibungszahl μ_R.

Tab. 5.1:
Beispiele für Reibungszahlen:

	μ_H	μ_R
Eiche auf Eiche:	0,54	0,34
Stahl auf Stahl: (trocken)	0,15	0,12
Stahl auf Stahl: (geschmiert)		0,01
Stahl auf Eis:	0,025	0,014
Reifen auf Asphalt: (trocken)	0,55	0,3
Reifen auf Asphalt: (mit Wasser)	0,3	0,15

Reibungsgesetz für die Haftreibung: $F_H = \mu_H \cdot F_N$

μ_H: Haftreibungszahl

F_H : maximale Haftkraft

F_N : Normalkraft

Reibungsgesetz für die Gleitreibung: $F_R = \mu_R \cdot F_N$

μ_R: Gleitreibungszahl

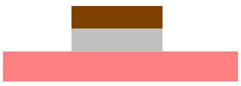
F_R : Gleitreibungskraft

F_N : Normalkraft

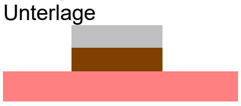
Gewünschte und unerwünschte Reibung:
In vielen Bereichen des täglichen Lebens ist die Reibung erwünscht. So macht zum Beispiel die Reibung zwischen Schuhsohle und Boden das Gehen überhaupt möglich. Ohne das Verhaken der Rauhigkeiten von Schuhsohle und Boden würde die Schuhsohle wie auf einer glatten Eisfläche auf dem Boden entlanggleiten. Auch das Abbremsen eines Fahrrads beruht auf der Reibung zwischen Bremsbacken und Felge des Fahrrades. Ohne die Reibung wäre ebenso das Abrollen der Reifen des Fahrrades auf der Straße nicht möglich.
Wird die Reibung nicht erwünscht, zum Beispiel zwischen den einzelnen Gliedern einer Fahrradkette, kann die Reibung durch Einfetten oder Ölen verringert werden. Eine andere Möglichkeit, die Reibung zu verringern ist, anstatt der Gleitreibung die viel geringere Rollreibung in Kauf zu nehmen. So kann man zum Beispiel die Reibung in einer Radachse mit Hilfe von Kugellagern deutlich verringern.

<u>Aufgaben:</u>

1. Eine Eiskunstläuferin (50 kg) wird von ihrem Partner mit konstanter Geschwindigkeit über das Eis gezogen.
   a. Berechne die Zugkraft, wenn die Kufen des Schlittschuhs aus Stahl sind.
   b. Was geschieht, wenn man die Zugkraft vergrößert?



1. Möglichkeit: Metall auf der Unterlage



2. Möglichkeit: Holz auf der Unterlage

Abb. 5.1: Zur Aufgabe 2

2. Ein Holzquader und ein Metallquader werden mit konstanter Geschwindigkeit über eine Unterlage gezogen (siehe Abb. 5.1).
   Es gilt: $\mu_{R,Holz} = 0{,}60$ und $\mu_{R,Metall} = 0{,}40$.
   In welchem der zwei skizzierten Fälle ist die Reibungskraft größer? (Begründung!)

3. Ein Vater zieht den Schlitten (m = 10,1 kg) seines Sohnes auf horizontaler Strecke mit konstanter Geschwindigkeit ($\mu_R = 0{,}400$).
   a. Mit welcher Kraft muß er den Schlitten ziehen?
   b. Mit welcher Kraft muß er am Schlitten ziehen, wenn die Auflagefläche des Schlittens doppelt so groß ist?
   c. Mit welcher Kraft muß der Vater den Schlitten mit dem darauf sitzenden Sohn (m_S = 40 kg) ziehen?

4. Ein Auto der Masse 1,34 t fährt auf einer waagrechten Straße. Als ein Reh über die Straße läuft, tritt der Fahrer des Wagens so stark auf die Bremse, dass die Räder blockieren.
   Berechne die Reibungskraft, die an dem Wagen angreift, wenn die Straße trocken ist.

II. Mechanische Energie und Arbeit

1. Die Energie E

Warum rollt eine Kugel eine schiefe Ebene nicht beliebig weit hinauf?
Warum wird ein Turmspringer, der vom 10-Meter-Brett springt, immer schneller, je näher er der Wasseroberfläche kommt?
Warum schwingt ein Fadenpendel, wenn es mal angestoßen wurde, sehr lange hin und her?
All diesen Phänomenen liegt das gleiche Naturgesetz zu Grunde. Dieses Naturgesetz wollen wir näher untersuchen und dabei verstehen lernen.

1. 1 Abgeschlossene mechanische Systeme und Energieerhaltungssatz

Zur einfachen Beschreibung von physikalischen Zuständen ist es nützlich, abgeschlossene Systeme zu betrachten. Abgeschlossenes System bedeutet, dass das System keinen oder vernachlässigbaren Kontakt mit der Umgebung hat. Der Zusatz "mechanisch" heißt, dass die Reibung ausgeschlossen wird. Selbstverständlich ist dies eine idealisierte Betrachtungsweise, sie kommt in der Natur so nicht vor.

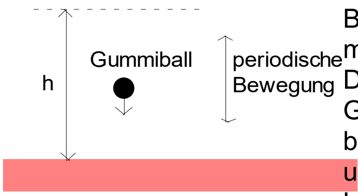


Abb. 6.1 Abgeschlossenes System "Gummiball mit Erde"

Betrachten wir nun das abgeschlossene mechanische System "Gummiball mit Erde" (Abb. 6.1).
Die Betrachtung des Gummiballs alleine ist nicht sinnvoll, da sich Gummiball und Erde gegenseitig anziehen. Die gegenseitige Anziehung bewirkt, dass der Gummiball auf seinem Weg nach unten immer schneller, und auf seinem Weg nach oben immer langsamer wird.
Lässt man einen Gummiball los, nimmt seine Höhe ab und er wird gleichzeitig immer schneller. Beim Auftreffen auf den Boden dreht sich seine Bewegungsrichtung um. Auf dem Weg nach oben nimmt seine Höhe zu und er wird dabei immer langsamer. Wenn er seine ursprüngliche Höhe erreicht hat, beginnt der Bewegungsablauf von neuem. Der Gummiball pendelt also immer zwischen der Höhe h, aus der er losgelassen wurde, und dem Boden hin und her. Es ist ein immer wiederkehrender, also konstanter Bewegungsablauf. Dies legt nahe, dass es in diesem abgeschlossenen System eine konstante Größe (eine Erhaltungsgröße) gibt, die diesen Bewegungsablauf charakterisiert. Diese Erhaltungsgröße nennt man Gesamtenergie E.
Die Überlegungen veranlassen uns zu folgender Annahme:

> Energieerhaltungssatz der Mechanik:
> In einem abgeschlossenen mechanischen System ist die Gesamtenergie E eine Erhaltungsgröße (d.h. sie ist konstant).

Anmerkung: Der Energieerhaltungssatz der Mechanik kann auch theoretisch hergeleitet werden.

Die konstante Gesamtenergie kann man mit einer bestimmten Menge Bausteine vergleichen, um die sich zwei Kinder streiten. Einmal kann sich das eine Kind mehr Bausteine verschaffen, und ein anderes Mal kann das andere Kind mehr Bausteine zu sich her ziehen. Die Summe der Bausteine ist immer konstant, nur ist die Aufteilung auf zwei Haufen jeweils unterschiedlich. So ist es auch bei der Energie in dem obigen Beispiel mit dem Gummiball. Sie kann in der Bewegung oder der Höhe stecken, wobei die Summe aus "Bewegungsenergie" und "Höhenenergie" konstant ist, denn diese Summe ist die Gesamtenergie E.

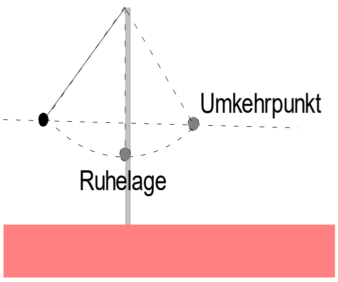


Abb. 7.1: Abgeschlossenes System "Fadenpendel mit Erde"

Betrachten wir nun einige Anwendungsbeispiele des Energieerhaltungssatzes der Mechanik:

a. **Das abgeschlossene mechanische System "Fadenpendel mit Erde"** (Abb. 7.1).

Lässt man den Pendelkörper an einem Umkehrpunkt los, wird er auf seinem Weg nach unten immer schneller und seine Höhe verringert sich dabei. Das heißt, dass seine Bewegungsenergie zunimmt und seine Höhenenergie abnimmt. Nachdem er die Ruhelage passiert hat, bewegt er sich wieder nach oben. Dabei wird er wieder langsamer und seine Höhe wächst an. Seine Bewegungsenergie nimmt ab und seine Höhenenergie zu. Wenn er seine ursprüngliche Höhe erreicht hat, kehrt sich die Bewegungsrichtung um. Der Bewegungsablauf beginnt von neuem.

Bei der geschilderten Bewegung nimmt also eine Energieform immer auf Kosten der anderen zu. Die Gesamtenergie, die sich aus der Summe der beiden Energieformen Bewegungsenergie und Höhenenergie ergibt, bleibt dabei konstant.

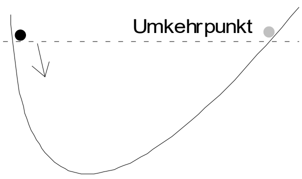


Abb. 7.2: Kugel auf einer Rennbahn.

b. **Das abgeschlossene mechanische System "Kugel auf einer Rennbahn mit Erde" (**Abb. 7.2).

Lässt man eine Kugel auf einer flexiblen Rennbahn an einem Umkehrpunkt los, so wird sie auf ihrem Weg nach unten immer schneller und ihre Höhe verringert sich dabei. Das heißt, dass ihre Bewegungsenergie zunimmt und ihre Höhenenergie abnimmt. Bewegt sie sich wieder nach oben, wird sie wieder langsamer. Hier nimmt also ihre Bewegungsenergie ab und ihre Höhenenergie zu. Wenn sie ihre ursprüngliche Höhe erreicht hat, dreht sich die Bewegungsrichtung um und der Bewegungsablauf beginnt von neuem.

Dass die Kugel immer wieder auf die gleiche Höhe kommt, ist also nicht auf eine besondere Form der Bahn zurückzuführen, sondern liegt ausschließlich in der Konstanz der Gesamtenergie begründet.

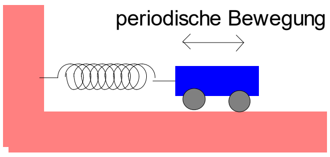


Abb. 7.3: Abgeschlossenes System "Schraubenfeder"

c. **Das abgeschlossene mechanische System "Schraubenfeder"** (Abb. 7.3).

Da sich der Abstand zwischen dem Wagen und dem Schwerpunkt der Erde nicht ändert, bewirkt die Gravitationskraft keine Änderung Geschwindigkeit des Wagens. Die Wechselwirkung zwischen dem Wagen und der Erde braucht also nicht betrachtet zu werden. Daher gehört die Erde dem abgeschlossenen System nicht an.

Lässt man den Wagen los, wird er um so schneller, je mehr sich die Feder entspannt. Hier nimmt also seine Bewegungsenergie zu und die "Spannenergie" der Feder ab. Nachdem der Wagen die Ruhelage passiert hat, wird die Feder wieder gespannt (zusammengedrückt) und der Wagen wird langsamer. Die Bewegungsenergie des Wagens nimmt also wieder ab und die Spannenergie der Feder nimmt wieder zu. Ist die Feder um die gleiche Strecke zusammengedrückt, wie sie zuvor gespannt war, beginnt der Bewegungsablauf von neuem.

Auch bei dieser Bewegung nimmt also eine Energieform immer auf Kosten der anderen zu. Die Gesamtenergie, die sich aus der Summe der beiden Energieformen Bewegungsenergie und Spannenergie ergibt, bleibt dabei konstant. Deshalb schwingt die Schraubenfeder immer mit der gleichen maximalen Auslenkung um die Ruhelage herum.

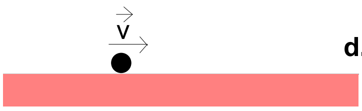


Abb. 7.4: Abgeschlossenes System "bewegte Kugel, bei der die Summe aller Kräfte 0 ist.

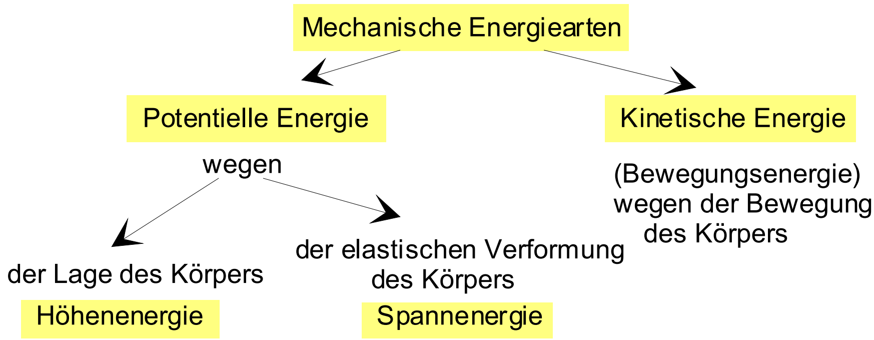
d. **Das abgeschlossene mechanische System "bewegte Kugel, bei der die Summe aller Kräfte 0 ist"** (Abb. 7.4).

Da sich in diesem Fall die Bewegungsenergie in keine andere Energieart umwandeln kann und die Gesamtenergie (hier nur Bewegungsenergie) in dem abgeschlossenen System konstant bleibt, kann sich der Betrag der Geschwindigkeit des Körpers nicht verändern. Diese Aussage ist ein Teil des Trägheitssatzes von Newton, den wir in der 8. Klasse kennengelernt haben.

Anmerkung:
Es kommt sehr häufig vor, dass eine physikalische Größe in einem abgeschlossenen System konstant ist. Man ist sich dessen nur nicht bewußt. Betrachten wir dazu folgendes Beispiel: Ein geschlossenes Gefäß, in dem sich etwas Wasser befindet, wird erhitzt. Dabei verdampft ein Teil des Wassers. Der Wasserspiegel in dem Gefäß sinkt. Die Wassermenge bleibt also nicht konstant. Dass die Wassermoleküle beim Verdampfen nicht einfach verschwunden sind, wird klar, wenn man das Gefäß wieder abkühlt. Der Wasserspiegel steigt wieder auf den ursprünglichen Wert. Da sich hier die Wassermenge verändert, fragt man sich natürlich, was hier die Erhaltungsgröße ist. In diesem Fall ist es so: Die Anzahl der Wassermoleküle, die sich zum einen in der flüssigen und anderen in der gasförmigen Phase befinden, bleibt immer gleich. Bei diesem Beispiel ist also die Teilchenzahl die Erhaltungsgröße.

1.2 Die verschiedenen energetischen Größen in der Mechanik

In der Mechanik werden zwei verschiedenartige Energiearten unterschieden:



1.2.1 Potentielle Energie E_p

Potentielle Energie hat ein Körper aufgrund seiner Lage, oder weil er elastisch verformt wurde.

1.2.1.1 Höhenenergie E_h:

Ein Körper besitzt aufgrund seiner Lage Höhenenergie.

Untersuchen wir erst einmal, ob die Höhenenergie von dem Weg abhängt, den ein Körper beschreibt, wenn sich seine Lage um die Höhe h ändert. Wir lassen eine Kugel auf einer flexiblen Rennbahn eine bestimmte Höhendifferenz h herunterrollen. Die kinetische Energie und damit die Geschwindigkeit der Kugel nach dem Herunterrollen um die Höhe h ist von der Form der Bahn unabhängig. Um dies experimentell zu überprüfen, messen wir bei unterschiedlicher Form der Bahn die Momentangeschwindigkeit, die die Kugel nach dem Überwinden der Höhe h jeweils hat. Die Momentangeschwindigkeit v erhält man, indem man die Zeit t mißt, in der die Kugel (Durchmesser d) die Lichtschranke beim Vorbeirollen verdunkelt. Es gilt dann: $v = \frac{d}{t}$. Es zeigt sich im Versuch,

dass bei unterschiedlichen Formen der Bahn immer wieder die gleiche Momentangeschwindigkeit gemessen wird. Wählen wir eine andere Höhendifferenz und messen - bei unterschiedlichen Formen der Rennbahn - erneut die Momentangeschwindigkeit, ist auch diese von der Form der Rennbahn unabhängig.
Die Versuche zeigen, dass die Höhenenergie unabhängig von dem Weg ist, den ein Körper bei der Lageänderung um die Höhe h beschreibt. Das bedeutet aber, dass die Höhenenergie nicht von dem individuellen Weg abhängt, der beim Heben eines Körpers beschrieben wird, sondern von der sich ergebenden Höhendifferenz h.

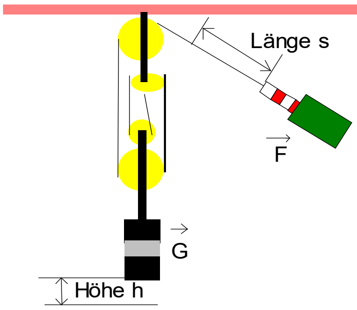


Abb. 9.1: Flaschenzug

Um die Formel für die Höhenenergie E_h herzuleiten, überlegen wir uns, wie man die Höhenenergie eines Körpers um einen ganz bestimmten Wert ändern kann. Das erreichen wir, indem der Körper um einen bestimmte Höhe h angehoben wird. Gehoben werden kann der Körper zum Beispiel mit Hilfe eines Faschenzugs (siehe Abb. 9.1).

Zugkraft am Seil: $F = \frac{1}{4}G$ (Das Gewicht der Rollen wird vernachlässigt.)

Gezogene Seillänge: $s = 4h$

$$F \cdot s = \frac{1}{4} G 4h = G \cdot h$$

Im Gegegsatz zu F und s ist das Produkt aus G und h von der Anzahl der Rollen unabhängig. Nimmt man einen Flaschenzug mit einer anderen Anzahl von festen und losen Rollen, kommt man zum selben Ergebnis. Da das Produkt aus G und h keine Größen enthält, die angeben, wie der Körper um die Höhe h gehoben wurde, ist anzunehmen, dass die Höhenenergie E_h das Produkt aus der Gewichtskraft G und der Höhe h ist.

$$E_h = G \cdot h$$

Wenn wir von der Höhe eines Körpers sprechen, müssen wir immer angeben, von welchem Bezugsniveau aus wir die Höhe des Körpers messen. Die Wahl des Bezugsniveaus ist uns freigestellt, wir müssen nur bei der Angabe des Energiewerts mit angeben, auf welches Bezugsniveau wir es beziehen. Daher ergibt sich für die Höhenenergie:

Höhenenergie: $E_h = Gh$
h: von einem (beliebig festgelegten) Bezugsniveau aus gemessene Höhe.
Meßeinheit: $[E_h] = 1$ J (Joule)
1 J = 1Nm

Anmerkung: Ein Körper hat nur dann Höhenenergie, wenn er von einem anderen Körper aufgrund der Gravitation angezogen wird. In der obigen Formel drückt sich diese Tatsache durch den Ortsfaktor g (bei $G = m \cdot g$) aus. Ist der gleiche Körper jeweils einen Meter von der Mond- bzw. Erdoberfläche entfernt, so ist die Höhenenergie auf dem Mond wegen $g_{Mond} = \frac{1}{5} g_{Erde}$ nur $\frac{1}{5}$ der Höhenenergie auf der Erde.

Aufgaben:

1. Ein Koffer des Gewichts 100 N steht auf einem 2,0 m hohen Schrank.
   a. Berechne die Höhenenergie, wenn als Bezugsniveau der Zimmerboden angenommen wird.
   b. Berechne die Höhenenergie, wenn als Bezugsniveau die Platte eines 1,2 m hohen Tischs genommen wird.

2. a. Berechne die Höhenenergie eines Aktenordners der Masse 1,5 kg, der 50 cm vom Erdboden entfernt ist.
   b. Berechne die Höhenenergie einer Schultasche der Masse 10 kg, die 50 cm vom Erdboden entfernt ist.

3. Ein Gewichtheber hat ein Gewicht der Masse 130 kg hochgehoben. Die Höhenenergie des Massenstücks beträgt 1,9 kJ.
   Wie hoch hat der Gewichtheber das Massenstück gehoben?

4. Gazellen können mit allen vier Beinen gleichzeitig in die Luft springen. Die Sprünge sind dazu da, die Aufregung auf andere Tiere zu übertragen. Bei einem solchen Prellsprung erreicht ein Gazellenbock eine Höhe von 3,1 m. Seine Höhenenergie ändert sich dabei um 1,5 kJ Berechne die Masse des Gazellenbocks.

5. Eine Raumkapsel der Masse 1,7 t ist von der Erdoberfläche 1,4 km entfernt. Wie weit ist sie dann von der Marsoberfläche ($g_{Mars} = 3{,}8\ \frac{N}{kg}$) entfernt, wenn sie die gleiche Höhenenergie wie auf der Erde hat?

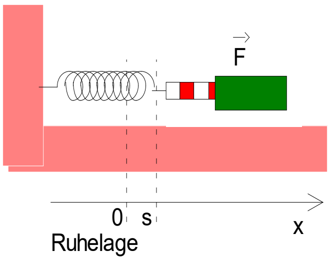


Abb. 10.1: Spannenergie einer Schraubenfeder

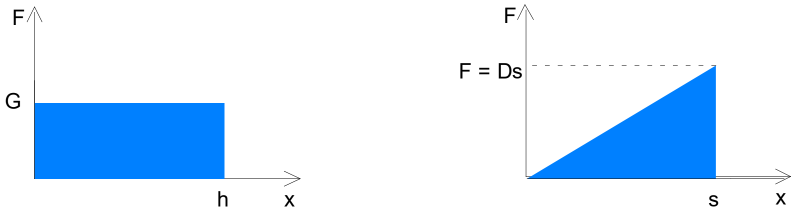
1.2.1.2 Spannenergie E_S:

Ein elastisch verformter Körper hat aufgrund seiner Verformung Energie gespeichert (siehe Abb. 10.1).

Zur Erinnerung: Bei einer Schraubenfeder gilt das Hooksche Gesetz:

$F = D \cdot s$
D: Federhärte
s: Elongation (Auslenkung aus der Ruhelage)

Vergleichen wir die Spannenergie einer Schraubenfeder und die Höhenenergie eines Körpers miteinander.



$E_h = G * h$ — Wir vermuten: E_S muß auch hier gleich der Fläche unter dem Graphen sein.

E_h ist die Fläche unter dem Graphen.

$E_S = \frac{1}{2} s \cdot (Ds)$

$E_S = \frac{1}{2} Ds^2$

Wenn die Vermutung richtig ist, dass die Fläche unter dem Graphen bei einem x-F-Diagramm gleich der Energie ist, ergibt sich: die Spannenergie ist gleich dem halben Produkt aus der Federhärte D und dem Quadrat der Elongation s.

Spannenergie:	$E_s = \frac{1}{2} Ds^2$
	D: Federhärte
	s: Elongation
	Meßeinheit: $[E_s] = 1\ J$

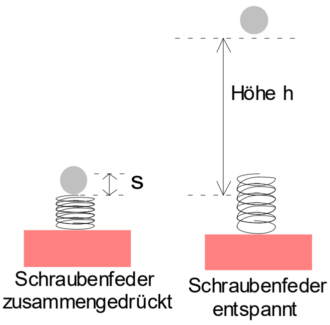


Abb. 11.1: Nachprüfen der Formel für die Spannenergie

Mit dem folgenden Versuch überprüfen wir die Formel für die Spannenergie experimentell.
Wir katapultieren mit Hilfe einer zusammengedrückten Schraubenfeder ($D = 0{,}49\,\frac{N}{cm}$) eine Kugel der Masse 14,3 g nach oben (siehe Abb. 11.1). Wenn die Kugel den oberen Umkehrpunkt erreicht hat, muß sich nach dem Energieerhaltungssatz die Spannenergie $E_{s;Feder}$ der Feder vollständig in Höhenenergie $E_{h;Kugel}$ der Kugel umgewandelt haben. Daher gilt: $E_{s;Feder} = E_{h;Kugel}$.

Experiment: Stauchung der Feder: s = 4,0 cm ;
Höhe der Kugel: h = 27 cm.

$$E_{s;Feder} = \frac{1}{2}Ds^2 = \frac{1}{2} \cdot 0{,}49\,\frac{N}{cm} \cdot 16\,cm^2 = 39{,}2\,Ncm \approx 0{,}039\,J.$$

$$E_{h;Kugel} = mgh = 0{,}0143\,kg \cdot 9{,}81\,\frac{N}{kg} \cdot 27\,cm = 37{,}87..Ncm \approx 0{,}038\,J$$

Das Experiment ergibt: $E_{s,Feder} = E_{h,Kugel}$.
Der Versuch bestätigt die Formel für die Spannenergie.

Aufgaben:

1. Eine Feder der Federhärte $2{,}70\,\frac{N}{m}$ wird um 5 cm zusammengedrückt.
   Berechne die Spannenergie.
2. a. Wie ändert sich die Spannenergie, wenn die Federhärte D einer Feder verdreifacht wird?
   b. Wie ändert sich die Spannenergie, wenn die Auslenkung s einer Feder verdreifacht wird?
3. Wie weit muß man eine Feder ($D = 7{,}5\,\frac{N}{cm}$) auseinanderziehen, damit sie eine Spannenergie von 39 J besitzt?
4. Welche Federhärte hat eine Feder, die bei einer Stauchung um 4,0 cm eine Spannenergie von 0,189 J besitzt?
5. Man hängt an eine senkrecht aufgehängte Feder der Länge 10,0 cm Feder ($D = 2{,}50\,\frac{N}{cm}$) ein Massenstück von 120 g (siehe Abb. 11.2).
   a. Berechne die Länge der gespannten Feder.
   b. Berechne die Spannenergie der gespannten Feder.

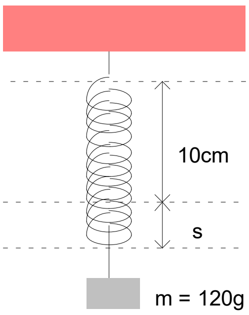
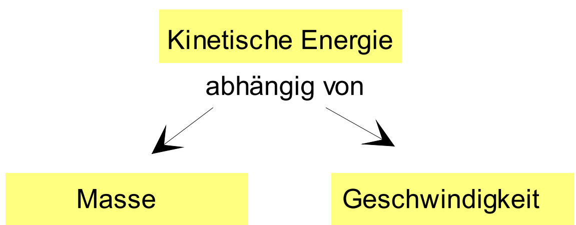


Abb. 11.2: Zur Aufgabe 5

1.2.2 Die kinetische Energie E_K

Unter kinetischer Energie versteht man die Energie, die in einem Körper aufgrund seiner Bewegung gespeichert ist.



E_k in Abhängigkeit von der Masse:

Um den Zusammenhang von kinetischer Energie und Masse herzuleiten, betrachten wir n zunächst ruhende Körper mit gleichen Massen m, die die Höhe h nach unten fallen. Da sich die Höhenenergien der Körper um den gleichen Wert ändern, sind die kinetischen Energien E_k der Körper aufgrund des Energieerhaltungssatzes gleich. Die n Körper der Gesamtmasse $n \cdot m$ haben also eine gesamte kinetische Energie von $n \cdot E_k$.

Eine Ver-n-fachung der Masse m eines Körpers führt unter sonst gleichen Bedingungen zu einer Ver-n-fachung der kinetischen Energie E_k. Daraus folgt:

I. $E_k \sim m$

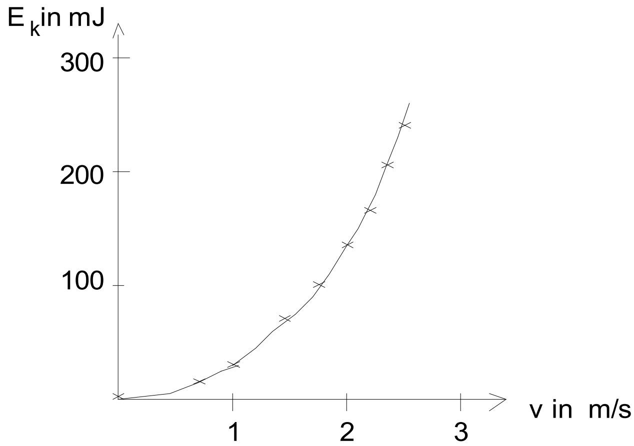
E_k in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit:

Um den Zusammenhang von kinetischer Energie und Geschwindigkeit experimentell herzuleiten, machen wir folgenden Versuch: Wir lassen einen Gummiball aus unterschiedlichen Höhen fallen und messen die Durchschnittsgeschwindigkeit, die er kurz vor Erreichen des Bodens hat.
Da in diesem abgeschlossenen System die Gesamtenergie konstant ist, lässt sich der Wert der kinetischen Energie am Boden wie folgt berechnen:
$E_k = E_h = G \cdot h$.
Die Durchschnittsgeschwindigkeit v erhält man, indem man die Zeit t misst, die der Gummiball benötigt, um zwei sehr dicht hintereinander liegende Lichtschranken (Abstand d) nacheinander beim Vorbeifliegen zu verdunkeln. Es gilt dann: $v = \frac{d}{t}$.

E_k (= E_h) in mJ	0	17	34	69	103
v in $\frac{m}{s}$	0	0,7	1,0	1,4	1,7

E_k (= E_h) in mJ	137	172	206	240
v in $\frac{m}{s}$	2,0	2,2	2,4	2,6

Um den Zusammenhang zwischen E_k und v zu erkennen, zeichnet man ein v-E_k-Diagramm.



Der Graph ist eine Parabel. Daraus folgt: **II. $E_k \sim v^2$**

Aufgrund der Abhängigkeit der kinetischen Energie von der Masse und der Geschwindigkeit des Körpers ergibt sich aus den Formeln I und II:

$$E_k \sim mv^2$$

Nach dem Einsetzen einer Proportionalitätskonstanten A erhält man folgende Formel: $E_k = Amv^2$

Mit Hilfe eines Messwertes bestimmen wir die Proportionalitätskonstante.

Masse des Balls: $m = 0{,}071$ kg, $E_k = 0{,}034$ J, $v = 1{,}0\,\frac{m}{s}$

$E_k = Amv^2$

$A = \frac{E_k}{mv^2} \approx 0{,}49$

Genaue Messungen ergeben: $A = \frac{1}{2}$.

Die kinetische Energie ist somit das halbe Produkt aus der Masse m des Körpers und dem Quadrat seiner Geschwindigkeit v.

Kinetische Energie:	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$ m: Masse des Körpers v: Geschwindigkeit des Körpers Meßeinheit. $[E_k] = 1$ J 1 J = 1 kg m²/s²

Aufgaben:

1. a. Ein Leichtathlet macht einen 100-Meter-Lauf. Er hat eine Masse von 70 kg und rennt mit einer Geschwindigkeit von $10\,\frac{m}{s}$.
   Berechne seine kinetische Energie.
   b. Der Gepard ist ein ausgesprochener Sprinter. Man hat bei einem Gepard (m = 60 kg) einmal für eine Strecke von 640 m eine Zeit von 20 s gestoppt. Berechne seine kinetische Energie.

2. Berechne die kinetische Energie eines Autos (1,2 t) bei folgenden Geschwindigkeiten:
   a. $50\,\frac{km}{h}$ (Höchstgeschwindigkeit in der Stadt),
   b. $120\,\frac{km}{h}$ (Geschwindigkeit auf der Autobahn).

3. a. Wie ändert sich bei einem Fahrradfahrer die kinetische Energie, wenn er seine Geschwindigkeit verdoppelt?
   b. Um das wievielfache müsste ein Autofahrer seine Geschwindigkeit erhöhen, wenn er seine kinetische Energie verneunfachen möchte?

4. Furchenwale können so schnell schwimmen, dass sie mit modernen Fahrgastschiffen mithalten können. Ursache dafür ist ihre federnde Haut, die beim Schwimmen die Bildung von Wasserwirbeln und damit große Reibung verhindert. Die kinetische Energie eines Furchenwals der Geschwindigkeit $24{,}0\,\frac{km}{h}$ beträgt 2,89 MJ.
   Berechne seine Masse.

5. Ein Flugzeug der Masse 3,4 t fliegt mit konstanter Geschwindigkeit und hat eine kinetische Energie von 5,6 MJ.
   Berechne seine Geschwindigkeit sowohl in $\frac{m}{s}$, als auch in $\frac{km}{h}$.

1.3 Energieumwandlungen

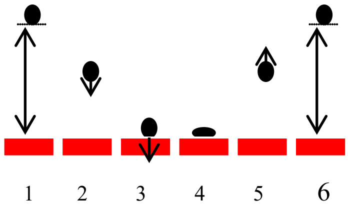


Abb. 14.1: Gummiball

Wie die ständige Auf- und Abbewegung des hüpfenden Gummiballs zeigt, können die verschiedenen Energieformen ineinander umgewandelt werden (siehe Abb. 14.1).
In den verschiedenen Positionen 1 bis 6 haben E_h, E_k und E_S unterschiedliche Werte. Die Gesamtenergie des abgeschlossenen Systems "Gummiball mit Erde" bleibt aber erhalten.

	E_h	E_K	E_S
1	am größten	0	0
2	nimmt ab	nimmt zu	0
3	0	am größten	0
4	0	0	am größten
5	nimmt zu	nimmt ab	0
6	am größten	0	0

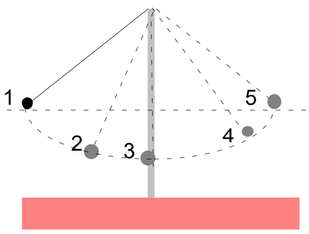


Abb. 14.2: Fadenpendel

Als weiteres Beispiel für Energieumwandlung betrachten wir das abgeschlossene System "Fadenpendel mit Erde" (siehe Abb. 14.2).
In den verschiedenen Positionen 1 bis 5 haben E_h und E_K ebenfalls unterschiedliche Werte. Auch hier bleibt die Gesamtenergie erhalten.

	E_h	E_K
1	am größten	0
2	nimmt ab	nimmt zu
3	0	am größten
4	nimmt zu	nimmt ab
5	am größten	0

Wie diese Beispiele zeigen, kann der Energieerhaltungssatz folgender-maßen genauer formuliert werden:
In einem abgeschlossenen mechanischen System können die einzelnen Energiearten ineinander umgewandelt werden. Die Gesamtenergie bleibt dabei erhalten.

Energieerhaltungssatz:
In einem abgeschlossenen mechanischen System gilt

$$E = E_k + E_p \quad \text{ist konstant,}$$

$$\text{bzw.} \quad E = E_k + (E_h + E_s) \quad \text{ist konstant.}$$

Die einzelnen Energiearten können ineinander umgewandelt werden.

Bei der Energieumwandlung sollten wir noch mal an das Beispiel mit den beiden Kindern denken, die sich um die Bausteine (Energie) streiten. Wir dürfen hier nicht aus den Augen lassen, dass jedes Kind (entspricht einer Energieform) zwar eine unterschiedliche Anzahl von Bausteinen (entspricht der Energie) haben kann, dass aber die Gesamtzahl von Bausteinen (entspricht der Gesamtenergie) konstant bleibt.

Das letzte Beispiel ist das abgeschlossene System "zwei Körper auf der Fahrbahn". Bei ihm wird kinetische Energie von einem Körper auf einen anderen übertragen. Dazu fahren zwei Körper unterschiedlicher Massen (m_1 und m_2) und Geschwindigkeiten (v_1 und v_2) aufeinander zu, stoßen gegeneinander und bewegen sich dann wieder voneinander mit den Geschwindigkeiten v_1' und v_2' weg.

Da die Gesamtenergie erhalten bleibt, muss gelten:

$$E_{K,1} + E_{K,2} = E_{k,1}' + E_{K,2}'$$

Experimentelle Überprüfung:

$m_1 = 100\ \text{g}$, $m_2 = 150\ \text{g}$,$v_1 = 0{,}25\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $v_2 = 0{,}14\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $v_1' = 0{,}11\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$,$v_2' = 0{,}23\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$E_{K,1} + E_{K,2} = \frac{1}{2}\cdot 100\text{g}\cdot(0{,}25\ \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 + \frac{1}{2}\cdot 150\ \text{g}\cdot(0{,}14\ \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \approx 4{,}6\ \text{mJ}$$

$$E_{k,1}' + E_{K,2}' = \frac{1}{2}\cdot 100\text{g}\cdot(0{,}11\ \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 + \frac{1}{2}\cdot 150\ \text{g}\cdot(0{,}23\ \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \approx 4{,}6\ \text{mJ}$$

Das Experiment bestätigt also unsere Erwartung.

Aufgaben:

1. Ein Kind wirft einen Ball senkrecht nach oben.
   a. Beschreibe die Energieumwandlungen des Balls, nachdem er die Hand des Kindes verlassen hat, in Form einer Tabelle.
   b. Welche Höhe erreicht der Ball, wenn das Kind den Ball mit einer Anfangsgeschwindigkeit von $12{,}0\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ hochwirft?

2. Ein Lachs der Masse 24 kg springt eine 2,3 m hohe Stromschnelle hinauf.
   a. Beschreibe die Energieumwandlungen in Form einer Tabelle.
   b. Welche Geschwindigkeit hat der Lachs mindestens, wenn er gerade das Wasser verlässt?
   c. Welche Anfangsgeschwindigkeit hat ein 12 kg schwerer Lachs, der die gleiche Stromschnelle überwinden muß?

3. Ein Kind schießt mit einer Federpistole der Federhärte $5{,}0\ \frac{\text{N}}{\text{cm}}$ eine 4 g schwere Erbse senkrecht nach oben.
   a. Beschreibe die Energieumwandlungen in Form einer Tabelle.
   b. Wie weit wird die Feder zusammengedrückt, wenn die Erbse 2,4 m hochfliegt?
   c. Welche Geschwindigkeit hat die Erbse beim Verlassen des Pistolenlaufs?
   d. Welche Geschwindigkeit hat die Erbse, wenn sie bereits 1,0 m weit nach oben geflogen ist?

4. Ein Tennisball (40 g) trifft mit einer Geschwindigkeit von $110\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$ waagrecht auf die Bespannung eines Tennisschlägers. In grober Näherung verhält sich die Bespannung wie eine Feder der Federhärte $770\ \frac{\text{N}}{\text{cm}}$.
   a. Beschreibe die Energieumwandlungen in Form einer Tabelle.

b. Wie weit wird die Bespannung eingedrückt?
c. Wie hoch würde der Tennisball fliegen, wenn er mit der angegebenen Geschwindigkeit senkrecht nach oben geschossen wird?

5. Die Feder (0,5 g) eines Kugelschreibers wird mit einer Kraft von 0,9 N um 0,5 cm zusammengedrückt.
   a. Berechne die Federhärte.

   Jetzt wird die Feder so losgelassen, dass sie senkrecht nach oben fliegt.

   b. Beschreibe die Energieumwandlungen in Form einer Tabelle.
   c. Berechne die maximale Spannenergie der Feder.
   d. Welche maximale kinetische Energie hat die Feder?
   e. Wie hoch fliegt die Feder?

6. Ein Skifahrer (80 kg) fährt in einer Schussfahrt reibungsfrei eine 300 m lange Piste herunter. Er überwindet dabei eine Höhendifferenz von 40 m.
   a. Beschreibe die Energieumwandlungen in Form einer Tabelle.
   b. Berechne die Endgeschwindigkeit des Skifahrers.

7. Ein Kunstspringer (70 kg) springt von einem 5-Meter-Brett in das Schwimmbecken.
   a. Welche Geschwindigkeit hat er nach 2 m Flugstrecke?
   b. Aus welcher Höhe muß er abspringen, um die Geschwindigkeit $v = 20\ \frac{m}{s}$ beim Auftreffen zu haben?
   c. Auf das wievielfache müßte er seine Absprunghöhe steigern, um die 4-fache Endgeschwindigkeit zu erreichen?

8. Ein Schimpanse (40 kg) springt 10 m tief von einem Baum zu einem anderen.
   a. Berechne die Endgeschwindigkeit des Schimpansen.
   b. Berechne die Höhenenergie (bezogen auf den Erdboden) und die Geschwindigkeit, nachdem er vom Baum 4,0 m heruntergesprungen ist.

9. Mit Hilfe eines Bogens wird ein Pfeil (120 g) aus 1,3 m Höhe senkrecht nach oben geschossen. Er steigt dann 15 m nach oben und fällt anschließend auf den Boden.
   a. Beschreibe die Energieumwandlungen in Form einer Tabelle.
   b. Berechne die Spannenergie.
   c. Wie groß ist die Geschwindigkeit des Pfeils, nachdem er 5,4m nach oben geflogen ist?
   d. Wie groß ist die Geschwindigkeit des Pfeils beim Berühren des Bodens?

10. Der Schützenfisch lebt in den Gewässern Südostasiens. Er jagt nach Insekten, indem er seine Schnauze aus dem Wasser streckt und mit einem Wasserstrahl nach ihnen schießt. Um die Brechung der Lichtstrahlen an der Wasseroberfläche möglichst gering zu halten, stellt sich der Schützenfisch möglichst senkrecht unter das Insekt.
    a. Wie hoch schießt der Fisch einen 5,0 g schweren Wasserstrahl, der zu Beginn eine Geschwindigkeit von $2{,}6\ \frac{m}{s}$ hat?
    b. Der Fisch hat ein Insekt der Masse 1,5 g getroffen, gerade als das Wassertröpfchen seinen höchsten Punkt erreicht hat. Welche Geschwindigkeit hat das Insekt mitsamt dem Wassertröpfchen beim Auftreffen auf die Wasseroberfläche?

1.4 Das Perpetuum mobile erster Art

(perpetuus, lat.: unaufhörlich ; mobilis, lat.: beweglich)

Immer wieder wurde der Versuch unternommen, Maschinen zu entwickeln, die mechanische Energie aus dem "Nichts" - d.h. ohne die Beteiligung einer Energieumwandlung - erzeugen sollen. Man hätte also eine unerschöpfliche Energiequelle! Der Energieerhaltungssatz lehrt uns aber, dass es solche Maschinen nicht geben kann. Der Wert einer Energieart kann nur durch Umwandlung in andere Energiearten verändert werden, die Gesamtenergie bleibt dabei erhalten.

Abb. 17.1: Eschers Bild zeigt uns eine unmögliche Welt, in der ein Perpetuum Mobile möglich ist.
(M. C. Escher: 1898 –1972, holländischer Graphiker)

2. Die Arbeit W

(W ist die Abkürzung für work, engl.: Arbeit)

Der Energieerhaltungssatz sagt aus, dass verschiedene Energiearten ineinander umgewandelt werden können und dass die Summe der verschiedenen Energiewerte in einem abgeschlossenen System immer gleich bleibt. Er gibt keine Antwort auf die Fragen, wie die Änderung der Energiewerte überhaupt möglich ist und wie nicht abgeschlossene mechanische Systeme zu behandeln sind.

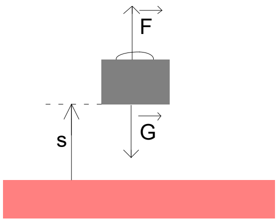


Abb. 18.1: Heben eines Koffers

Um diese Fragen zu beantworten, betrachten wir, was geschieht, wenn man einen Koffer des Gewichts $\vec{G}$ um die Höhe s anhebt (siehe Abb. 18.1). Die Höhenenergie des Koffers nimmt dabei um $E_h = G \cdot s$ zu. Das Anwachsen der Höhenenergie hat seine Ursache im Angreifen der Kraft $\vec{F}$ am Koffer. In unserem alltäglichen Sprachgebrauch sagt man: Beim Hochheben des Koffers wird Arbeit verrichtet. Die physikalische Sprechweise ist da etwas genauer. Man sagt: Die Kraft $\vec{F}$ hat an dem Körper Arbeit verrichtet.
Wird der Koffer mit konstanter Geschwindigkeit gehoben, ändert sich seine kinetische Energie nicht. In diesem Fall sind zwar die Richtungen von $\vec{F}$ und $\vec{G}$ entgegengesetzt, die Beträge aber gleich. Ansonsten würde der Koffer beim Heben noch beschleunigt.

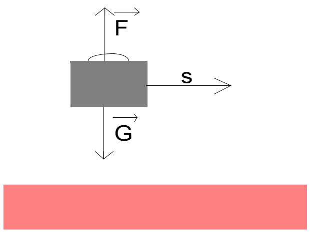


Abb. 18.2.: Tragen eines Koffers auf einem waagrechten Weg.

Ergebnis: I. Die Änderung des Energiewertes ΔE eines Körpers kann durch Arbeit zustande kommen. Dabei muß gelten: $\Delta E = W$.
Da sich bei unserem Beispiel der Wert der Höhenenergie um $G \cdot s$ erhöht hat und $G = F$ ist, gilt: $W = F \cdot s$.
Dies gilt gleichermaßen für abgeschlossene und nicht abgeschlossene Systeme.

Wenden wir unsere physikalische Vorstellung von der Arbeit gleich auf das folgende Beispiel an:
Trägt man einen Koffer der Gewichtskraft $\vec{G}$ auf einem waagrechten Weg der Länge s (siehe Abb. 18.2), so ändert sich der Wert der Höhenenergie des Koffers nicht. Es wird also von der Kraft $\vec{G}$ keine Arbeit geleistet! Worin liegt dann der Unterschied zwischen dem vorherigen Beispiel und dem jetzigen, dass man so völlig unterschiedliche Ergebnisse erhält?
Im Gegensatz zum vorherigen Beispiel sind hier Kraft und Weg nicht parallel, sondern senkrecht zueinander.

Ergebnis: II. Arbeit kann nur von der Kraftkomponente geleistet werden, die entlang (d. h. parallel) des Weges angreift.

Schauen wir uns das zweite Beispiel noch etwas genauer an. Es ist doch überraschend, dass man sich beim waagrechten Tragen eines schweren Koffers ganz schön anstrengen muss, dabei aber im physikalischen Sinn keine Arbeit verrichtet. Das kann man erst verstehen, wenn man die Vorgänge in einem angespannten Muskel genauer betrachtet. Wird ein Muskel angespannt, sind nicht immer alle Fibrillen (kleinste Muskeleinheiten) gespannt. Vielmehr spannen und entspannen sich die einzelnen Fibrillen immer wieder. Bei jedem Spannungs-Entspannungs-Vorgang wird chemische Energie in andere Energieformen umgewandelt und nimmt deshalb ab. Wir haben deshalb das Gefühl, dass es ganz schön anstrengend ist, einen schweren Koffer zu tragen und uns wird beim Tragen eines schweren Koffers warm. Wenn wir den Koffer hochheben, wird ein Teil der chemischen Energie in mechanische Energie umgewandelt. Beim waagrechten Tragen des Koffers wird die chemische

Energie nicht in mechanische Energie, sondern vollständig in eine uns noch unbekannte Energieform umgewandelt.
Bei einem Muskel werden im allgemeinen 15% der chemischen Energie in mechanische Energie umgewandelt. Durch Training kann dieser Prozentsatz auf etwas mehr als 30% gesteigert werden.
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Arbeit mit der Formel $W = F \cdot s$ berechnet werden kann (Ergebnis I.); die Kraft F ist dabei die Kraftkomponente entlang des Weges (Ergebnis II.).

Es gilt:

Arbeit: W = Kraftkomponente entlang des Weges · Weg
W = Fs
Meßeinheit: [W] = 1 J (Joule)

Anmerkungen:
1. W ist die Abkürzung für das Wort work, engl.: Arbeit.
2. Der Wert einer Energie E kann in der Mechanik nur durch Verrichten einer Arbeit W geändert werden. Dabei gilt für die Änderung des Energiewertes: $\Delta E = W$.
3. Bei der Angabe der Arbeit ist immer die zugehörige Kraft zu nennen.
4. Ein Körper besitzt nur Energie und keine Arbeit! Grund dafür ist, dass die Arbeit keine Energieart, wie zum Beispiel die kinetische oder potentielle Energie ist. Vielmehr gibt die Arbeit nur an, um welchen Wert sich die Energie eines Körpers geändert hat.

Im Folgenden betrachten wir einige Beispiele, bei denen Arbeit verrichtet wird.

1. Das abgeschlossenes System "Gummiball mit Erde".

Bei allen Beispielen zur Energie wurde immer von abgeschlossenen Systemen ausgegangen. Wir wollen nun untersuchen, welche Rolle die Arbeit in solch einem abgeschlossenen System spielt. Was geschieht also, wenn ein Gummiball des Gewichts G aus einer Höhe h auf den Boden fällt?

Beschleunigungsarbeit, von der Gravitationskraft verrichtet: $W_a = G \cdot h$

Erhöhung der kinetischen Energie um: $\Delta E_k = W$

$\Delta E_k = G \cdot h$

Verringerung der potentiellen Energie um: $\Delta E_p = W$

$\Delta E_p = G \cdot h$

Die Arbeit gibt also in diesem Beispiel an, um wieviel sich der Wert der einzelnen Energiearten geändert hat. Die Gesamtenergie bleibt erhalten.

2. Das nicht abgeschlossene System "Körper mit Erde":

Wir betrachten nun zum ersten mal ein nicht abgeschlossenes System. Das heißt Kontakte (zum Beispiel Berühren oder Anstoßen) des Systems "Körper mit Erde" mit der Umgebung werden zugelassen. Was geschieht also, wenn ein Körper der Masse m wird um die Höhe h gehoben wird?

Hubarbeit, von der Muskelkraft verrichtet: $W_h = G \cdot h = mgh$

Erhöhung der Höhenenergie um: $\Delta E_h = W$

$\Delta E_h = G \cdot h = mgh$

Auch hier gibt die Arbeit an, um wieviel sich der Wert der einzelnen Energiearten geändert hat. Die Gesamtenergie des Systems "Körper mit Erde" hat sich dadurch, dass Arbeit an ihm verrichtet wurde, um $W = G \cdot h$ erhöht.

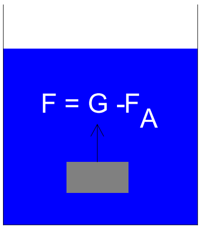


Abb. 20.1: Heben eines Körpers in einer Flüssigkeit

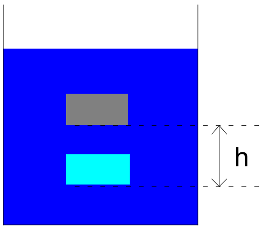


Abb. 20.2: Ein um die Höhe h gehobener Körper. Das hellblaue Flüssigkeitsvolumen wurde dabei um die Höhe h nach unten geschoben.

3. Wagen wir uns nun an ein etwas komplizierteres System. Ein Körper befindet sich in einer Flüssigkeit und wird um die Höhe h gehoben (siehe Abb. 20.1 und 20.2).
   Hubarbeit, von der Kraft der Muskeln verrichtet: $W_h = (G_{Körper} - F_A)\cdot h$
   F_A ist dabei die Auftriebskraft, die an dem Körper angreift.
   Bei der Angabe von ΔE_p kann vereinfacht angenommen werden, dass zum einen der Körper mit dem Volumen V gehoben wird (E_p wird größer), zum andern ein gleich großes Flüssigkeitsvolumen um die Höhe h gesenkt wird (E_p wird kleiner). Daraus folgt:
   $$\Delta E_p = G_{Körper}\cdot h - G_{Flüssigkeit}\cdot h$$
   Mit $\Delta E_p = W_h$ ergibt sich: $(G_{Körper} - F_A)\cdot h = G_{Körper}\cdot h - G_{Flüssigkeit}\cdot h$
   Durch Umformungen ergibt sich: $F_A = G_{Flüssigkeit}$

Die letzte Gleichung besagt, dass die Auftriebskraft gleich der Gewichtskraft der von dem Körper verdrängten Flüssigkeit ist. Das ist gerade das archimedische Prinzip, das wir in der 8. Klasse kennengelernt haben!

Man unterscheidet verschiede Arten der Arbeit:

Art der Arbeit	Beispiel	Kraft, die angreift	Energieart, deren Wert sich verändert
Hubarbeit W_h	Ein Körper wird mit der Hand hochgehoben.	Kraft der Muskeln	Höhenenergie E_h
Spannarbeit W_s	Dehnen einer Schraubenfeder mit der Hand	Kraft der Muskeln	Spannenergie E_s
Beschleunigungsarbeit W_a (a ist die Abkürzung für acceleration, eng.: Beschleunigung)	Ein Körper beschleunigt beim Herunterfahren von einer schiefen Ebene.	Hangabtriebskraft	Kinetische Energie E_k
Reibungsarbeit W_R	Die Reibung verändert die Geschwindigkeit eines Körpers.	Reibungskraft	Kinetische Energie E_k

Aufgaben:

1. Ein Gewichtheber stemmt eine Hantel (120 kg) 1,8 m hoch.
   a. Berechne die von dem Gewichtheber verrichtete Hubarbeit.
   b. Wieviel Höhenenergie hat die Hantel dazugewonnen?
   c. Berechne die von dem Gewichtheber umgewandelte chemische Energie, wenn 32% der chemischen Energie in mechanische Energie umgewandelt wurden.
   Der Gewichtheber lässt nun die Hantel von oben herunter fallen.
   d. Welche kinetische Energie und welche Geschwindigkeit hat die Hantel beim Auftreffen auf den Boden?

2. Ein Leopard schleppt seine 40 kg schwere Beute 3,2 m hoch auf einen Baum, um sie vor Löwen in Sicherheit zu bringen. Berechne die von dem Leoparden an seiner Beute verrichtete Hubarbeit.

3. Der afrikanische Schmutzgeier schleudert zum Öffnen eines Straußeneis einen 300 g schweren Stein 20 cm hoch. Anschließend fällt der Stein nach einer Höhendifferenz von 30 cm auf das Ei.
   a. Berechne die Beschleunigungsarbeit, die der Schmutzgeier an dem Stein verrichtet.
   b. Der Stein schlägt ein Loch in das Ei und dringt 1,0 cm in das Ei ein. Berechne die mittlere Kraft, die bei der Deformation an dem Ei angreift.

4. Ein Tennisball der Masse 40 g fällt von einem 1,2 m hohen Tisch.
   a. Berechne die von der Gravitationskraft insgesamt verrichtete Beschleunigungsarbeit.
   b. Beim Auftreffen des Tennisballs auf den Boden gehen 40% der kinetischen Energie durch Reibungsarbeit und Verformungsarbeit in uns noch unbekannte nicht mechanische Energiearten über. Wie weit springt der Tennisball nun nach oben?

5. Ein Auto (m = 1,2 t) der Geschwindigkeit 100 $\frac{km}{h}$ wird auf einem Bremsweg von 90 m bis zum Stillstand heruntergebremst.
   a. Berechne die mittlere Bremskraft.
   b. Wie lange wäre der Bremsweg gewesen, wenn das Auto bei gleicher Bremskraft halb so schnell gewesen wäre (keine Rechnung)?

6. Ein Bierfass (56 kg) rollt eine 4,5 m lange schiefe Ebene herunter. Die Reibung wird vernachlässigt.
   Wie groß ist die Hangabtriebskraft, wenn das Bierfass am Schluss eine Geschwindigkeit von 5 $\frac{m}{s}$ hat?

7. Ein Vater zieht den Schlitten (m = 10,1 kg) seines Sohnes auf horizontaler Strecke mit konstanter Geschwindigkeit (μ_R = 0,400).
   a. Mit welcher Kraft muss er den Schlitten ziehen?
   b. Mit welcher Kraft muss er am Schlitten ziehen, wenn die Auflagefläche des Schlittens doppelt so groß ist?
   c. Wie weit hat der Vater den Schlitten mit dem darauf sitzenden Sohn (m_S = 40 kg) gezogen, wenn er eine Arbeit von 96 kJ verrichtet hat?
8. Eine Kugel mit der Masse 100 g prallt waagrecht mit einer Geschwindigkeit von 10,0 $\frac{m}{s}$ auf eine Feder (D = 250 $\frac{N}{m}$).
   a. Berechne die Spannarbeit, die beim Zusammendrücken der Feder verrichtet wird.
   b. Um welche Strecke wurde die Feder zusammengepresst?

9. Um einen beladenen Einkaufswagen auf einem waagrechten Weg 80 m weit mit konstanter Geschwindigkeit zu schieben, ist bei einer Reibungszahl von 0,010 eine Zugarbeit von 0,31 kJ nötig.
   a. Berechne die zum Schieben benötigte Kraft.
   b. Berechne das Gewicht der eingeladenen Waren, wenn der Wagen eine Masse von 14 kg besitzt.

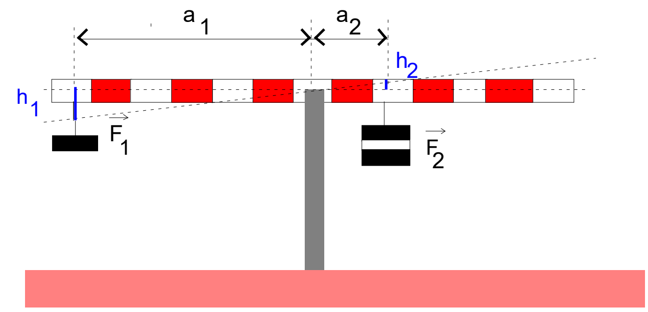
10. Im Britischen Museum ist eine Schiffsplanke ausgestellt, in die das Schwert eines Schwertfisches 56 cm tief eingedrungen ist.
    Wie schnell war der Schwertfisch (580 kg) vor dem Zusammenstoß, wenn sein Schwert mit einer mittleren Kraft von 323 kN in die Schiffsplanke eindrang?

3. Kraftwandler und Wirkungsgrad

Bereits in der Antike wurden Maschinen erfunden, mit denen man schwere Lasten heben konnte. Man nennt diese Maschinen Kraftwandler. Einige dieser Maschinen, nämlich der Flaschenzug, der Hebel und die Hydraulische Presse wurden bereits in der 8. Klasse untersucht. Im folgenden schauen wir uns einige dieser Kraftwandler unter den Gesichtspunkten Arbeit und Energie genauer an.

a. Der Hebel

Der Hebel befindet sich im Gleichgewicht. Durch eine vernachlässigbar geringe Kraft wird der Hebel auf der linken Seite leicht nach unten gedrückt. Dadurch wird das Massenstück (Gewicht F_1) auf der linken Seite um die Höhe h_1 gesenkt und das Massenstück (Gewicht F_2) auf der rechten Seite um die Höhe h_2 nach oben gehoben.



Betrachten wir die Veränderung der Energiewerte anhand eines Energieflussdiagramms:

Beim Massenstück auf der linken Seite verringert sich die Höhenenergie um $\Delta E_1 = F_1 \cdot h_1$

Der Hebel ist starr, also nimmt er keine Spannenergie auf. Der Hebel wird reibungsfrei bewegt, an ihm wird daher keine Arbeit verrichtet. Im Hebel kann somit keine Energie gespeichert werden.

Beim Massenstück auf der rechten Seite erhöht sich die Höhenenergie um $\Delta E_2 = F_2 \cdot h_2$

Wie das Energieflussdiagramm zeigt, kann der Hebel keine Energie speichern. Somit gilt aufgrund des Energieerhaltungssatzes:

$$\Delta E_1 = \Delta E_2$$

$$\text{bzw.} \quad F_1 \cdot h_1 = F_2 \cdot h_2 \quad \text{(I.)}$$

Da h_1 und h_2 parallel zueinander sind, gilt mit dem Strahlensatz:

$$\frac{h_1}{a_1} = \frac{h_2}{a_2} \qquad \mid \cdot a_1$$

$$h_1 = \frac{a_1 \cdot h_2}{a_2}.$$

Setzen wir diese Gleichung in die obige Energie-Arbeitsgleichung (I.) ein, ergibt sich:

$$F_1 \cdot \frac{a_1 \cdot h_2}{a_2} = F_2 \cdot h_2 \qquad \mid \cdot \frac{a_2}{h_2}$$

$$F_1 \cdot a_1 = F_2 \cdot a_2$$

Diese Gleichung ist genau die Hebelgleichung, die wir im letzten Jahr experimentell hergeleitet haben!

Ist der Kraftarm a_1 kleiner a_2, so ist die Kraft F_2, die zum Heben des Massenstücks notwendig ist, kleiner als die Gewichtskraft F_1 des Massenstücks. Daher nennt man diese Maschine "Kraftwandler".

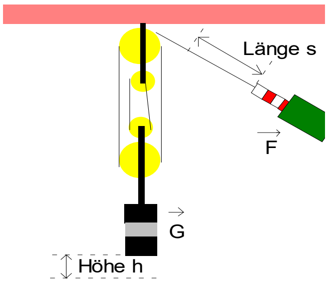


Abb. 23.1: Flaschenzug

b. Der Flaschenzug (siehe Abb. 23.1)
Hebt man ein Massenstück (Gewichtskraft G) mit Hilfe eines Flaschenzugs um die Höhe h, so nimmt seine Höhenenergie um $E_h = G \cdot h$ zu. Die Zugkraft F verrichtet die Zugarbeit $W = F \cdot s$. Bei einem reibungsfrei bewegten Flaschenzug gilt, unter der Annahme, dass die Rollen gewichtslos sind, aufgrund des Energieerhaltungssatzes:

$$E_h = W$$

$$\text{bzw.} \quad G \cdot h = F \cdot s$$

Da bei dem Flaschenzug die gezogene Seillänge größer ist als die Höhe h, ist die Zugkraft F geringer als die Gewichtskraft G des gehobenen Massenstücks. Also ist auch diese mechanische Maschine ein Kraftwandler.

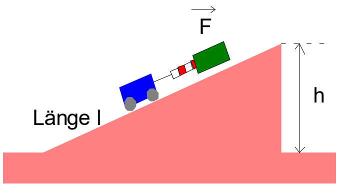


Abb. 23.2: Schiefe Ebene

c. Die schiefe Ebene (siehe Abb. 23.2)
Hebt man ein Massenstück (Gewichtskraft G) mit Hilfe einer schiefen Ebene der Länge l um die Höhe h, so nimmt seine Höhenenergie um $E_h = G \cdot h$ zu. Die Zugkraft F verrichtet hierbei die Arbeit $W = F \cdot s$.
Dabei gilt: $E_h = W$

$$\text{bzw.} \quad G \cdot h = F \cdot l$$

Da bei der schiefen Ebene die Länge l, um die gezogen wird, größer ist als die Höhe h, ist die Zugkraft F geringer als die Gewichtskraft G des gehobenen Massenstücks. Also ist auch diese mechanische Maschine ein Kraftwandler.

Wirkungsgrad:
Man muß sich bewusst sein, dass bei allen besprochenen Kraftwandlern immer die Reibung und beim Flaschenzug zusätzlich das Gewicht der Rollen vernachlässigt wurde. Bei realen Experimenten dürfen diese Vereinfachungen sehr oft nicht gemacht werden.
Betrachten wir daher nochmals den Flaschenzug, wobei sowohl die Reibung als auch das Gewicht der Rollen nicht vernachlässigt werden.
Dann steht der genutzten Arbeit

$$W_{nutz} = W_{h,\ Massenstück}$$

eine aufgewendete Arbeit

$$\begin{aligned} W_{aufgewendet} &= W_{h;Massenstück} + W_{h;Rollen} + W_{Reibung} \\ &= W_{nutz} + W_{h;Rollen} + W_{Reibung} \end{aligned}$$

gegenüber.
Wie man erkennt, gilt stets: $W_{nutz} \leq W_{aufgewendet}$

$$\text{bzw.} \quad \frac{W_{nutz}}{W_{aufgewendet}} \leq 1.$$

Grund dafür ist der Energieerhaltungssatz. Eine Maschine kann nicht mehr Energie abgeben (genutzte Arbeit) als sie erhalten hat (aufgewendete Arbeit).

Die Güte jedes Kraftwandlers kann man mit Hilfe des Quotienten aus W_{nutzt} und $W_{aufgewendet}$ angeben. Diesen Quotienten nennt man Wirkungsgrad η.

Zur Beurteilung der Güte einer Maschie dient der Wirkungsgrad η.

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{W_{\text{nutzt}}}{W_{\text{aufgewendet}}}$$

$$\eta = \frac{W_n}{W_a}$$

Es gilt stets: $\eta \leq 1$

Dass der Wirkungsgrad höchstens den Wert 1 haben kann, drückt man in der "goldenen Regel der Mechanik" aus:
Bei einer idealen Maschine (ohne Reibung etc.) ist die zum Betreiben der Maschine aufgewendete Arbeit $W_{aufgewendet}$ gleich der genutzten Nutzarbeit W_{nutz}.

Aufgaben:

1. Ein Waldarbeiter hebt den Schwerpunkt eines Baumstamms (150 kg) mit Hilfe eines Hebels um 30 cm an.
   a. Berechne die von ihm verrichtete Hubarbeit.
   b. Mit welcher Kraft muss der Waldarbeiter den Hebel nach unten drücken, wenn er das Ende des Hebels dabei um 1,2 m nach unten drückt?
   c. Wie lang ist der Kraftarm Baumstamm-Hebeldrehpunkt, wenn der Kraftarm Waldarbeiter-Hebeldrehpunkt 2,4 m lang ist?

2. Um eine Last mit dem reibungsfreien Flaschenzug aus zwei festen und zwei losen Rollen um 6,0 m hochzuziehen, ist eine Kraft F von 375 N erforderlich.
   Welche Arbeit verrichtet die Person am Flaschenzug?

3. Mit Hilfe eines Flaschenzuges mit 5 festen und 5 losen Rollen (die losen Rollen sind untereinander fest verbunden) soll ein Klavier (G = 2,1 kN) von der Straße aus in den 4. Stock gehoben werden.
   a. Berechne die Höhe, um die das Klavier gehoben werden kann, wenn die Hubarbeit 28 kJ beträgt. Dabei werden sowohl die Reibung, als auch das Gewicht der Rollen vernachlässigt.
   b. Berechne die erforderliche Zugkraft unter Vernachlässigung des Gewichts der Rollen sowie der Reibung.

   Bei den folgenden Teilaufgaben wird die Gewichtskraft der losen Rollen mit berücksichtigt.

   c. Die Zugkraft beträgt nun (Gewichtskraft der losen Rolle mit berücksichtigt) 0,40 kN. Berechne die Gewichtskraft einer losen Rolle, wenn die Reibung vernachlässigt werden kann.
   d. Berechne für die Aufgabe c. den Wirkungsgrad.

4. Ein Auto (1,3 t) fährt mit konstanter Geschwindigkeit einen 120 m langen Weg hinauf und bewältigt dabei eine Höhendifferenz von 20 m. Der Weg kann näherungsweise als schiefe Ebene betrachtet werden.
   a. Berechne die Rollreibungskraft, wenn das Auto mit einer Normalkraft von ca. 2,1kN auf den Weg drückt und die Rollreibungszahl 0,010 beträgt.
   b. Berechne die Arbeit, die der Motor bei einem Wirkungsgrad von 38% beim Hinauffahren verrichtet.

5. Ein Wagen der Gewichtskraft 300 N wird über eine 0,40 km lange schiefe Ebene mit konstanter Geschwindigkeit auf eine Höhe von h = 20 m gezogen.
   a. Berechne die Zugkraft, wenn die Reibung vernachlässigt werden kann.
   b. Wie groß ist die aufzuwendende Arbeit (in kJ), wenn man nun die auftretende Reibungskraft von 5,0 N mit berücksichtigt?
   c. Berechne den Wirkungsgrad (in %) der schiefen Ebene.

4. Leistung P

In der Physik versteht man unter dem Begriff Leistung genau das gleiche wie im Alltag. Man sagt, dass jemand eine höhere Leistung erbringt, wenn er die gleiche Arbeit in einer kürzeren Zeit verrichtet, oder wenn er in einer bestimmten Zeit mehr Arbeit verrichtet. Daher hat man in der Physik den Begriff der Leistung folgendermaßen definiert:

Leistung P (engl. power: Vermögen, Macht):

$$P = \frac{W}{t}$$

W: verrichtete Arbeit
t: dazu benötige Zeit
Meßeinheit: [P] = 1 W (Watt)
früher: 1PS (Pferdestärke) = 736 W

Anmerkung: 1. Die Leistung P ist um so größer, je kürzer die Zeit t für eine bestimmte zu verrichtende Arbeit W ist.
2. Die Leistung P ist um so größer, je mehr Arbeit W in einer bestimmten Zeit verrichtet wird.

Aufgaben:

1. Ein Gewichtheber hebt im Reißen 110 kg in 1,35 s auf eine Höhe von 2,15 m.
   Wie groß ist die Hubleistung?

2. Wieviel Liter Wasser fördert eine Pumpe der Leistung 3,50 kW in zehn Minuten aus einem überschwemmten Keller, wenn der Wasserspiegel im Keller 1,5 m tiefer als der Abfluss der Pumpe liegt?

3. Eine Aufzugkabine mit Leergewicht von 20 kN befördert 6 Personen mit einer durchschnittlichen Masse von 75 kg pro Person mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1,0 $\frac{m}{s}$ um 34 m nach oben.
   a. Berechne die Leistung, die der Motor abgibt.
   b. Der Wirkungsgrad des Motors beträgt 65%.
   Berechne die Leistung, die der Motor aufnimmt.

4. Ein Auto hat bei einer Geschwindigkeit von 160 $\frac{km}{h}$ eine Leistung von 53 kW.
   Berechne seine Zugkraft.

III. Wärmelehre

In dem vorhergehenden Kapitel "Mechanische Energie und Arbeit" wurde gezeigt, wie wichtig der Energieerhaltungssatz in der Mechanik ist.

Zur Wiederholung:
In einem abgeschlossenen mechanischen System ist die Gesamtenergie E eine Erhaltungsgröße (d.h. sie ist konstant).

Abgeschlossenes mechanisches System bedeutet, dass die Reibung vernachlässigt wird. In vielen Naturvorgängen ist die Vernachlässigung der Reibung jedoch nicht erlaubt! Was geschieht dann mit der mechanischen Energie, wenn sie durch Reibungsarbeit verringert wird? Gilt der Energieerhaltungssatz der Mechanik hier nicht mehr? Die Beantwortung dieser Frage führt uns zu einer weiteren Energieform, die wir im folgenden näher untersuchen.

1. Die innere Energie

1.1 Definition der inneren Energie und Erweiterung des Energieerhaltungssatzes

Abb. 26.1: Umwandlung von mechanischer Energie in innere Energie

Wir befestigen einen Körper der Masse 2 kg an einer Schnur. Indem wir die Schnur durch die Hand nach unten gleiten lassen, bewegt sich der Körper langsam auf den Boden zu (siehe Abb. 26.1).
Das folgende Diagramm zeigt, wie bei diesem Vorgang verschiedene Energieformen ineinander umgewandelt werden.

Mechanische Energie des 2 kg Körpers:
Der Körper verliert auf dem Weg nach unten seine gesamte mechanische Enerige.

Reibungsarbeit:
Wandelt die Energieformen ineinander um.

Innere Energie der Hand und der Schnur:
Die Hand und die Schnur erwärmen sich. Ihre "inneren Energien" werden mit zunehmender Erwärmung größer.

Unter der inneren Energie versteht man diejenige Energie, die übrig bleibt, wenn man von der Gesamtenergie des Systems die äußere, rein mechanische Energie (kinetische oder potentielle) Energie abzieht.

Die Änderung der inneren Energie zeigt sich durch eine Temperaturänderung oder durch eine Volumenänderung (siehe später).
Die Reibung vernichtet also keine Energie, sondern wandelt die mechanische Energie in innere Energie um. Der Energieerhaltungssatz muß somit um diese Energieform erweitert werden.

Enegieerhaltungssatz:
In einem abgeschlossenen System ist die Gesamtenergie E eine Erhaltungsgröße (d.h. sie ist konstant).

$$E_{mechanisch} + E_{innen} = \text{konstant}, \quad \text{bzw.}$$

$$E_k + E_p + E_i = \text{konstant.}$$

Bei der Einführung des Energieerhaltungssatzes der Mechanik wurde die Gesamtenergie mit einer festen Menge von Bauklötzen, um die sich zwei Kinder stritten, verglichen. Wir greifen diesen Vergleich nochmals auf. Nachdem die beiden Kinder den ganzen Tag um die Bauklötze gestritten haben, werfen sie diese, um ihre Eltern zu ärgern, in die mit einem

Schaumbad gefüllte Badewanne. Die Eltern merken aber an dem gestiegenen Wasserspiegel sofort, dass die Bauklötze in die Badewanne geworfen wurden Es folgt also, dass die Anzahl der Klötze auch hier konstant bleibt, ihre Erscheinungsform hat sich jedoch grundlegend geändert. So geht es uns gerade mit der Energie. Die Gesamtenergie bleibt auch bei Reibungsprozessen erhalten. Die Energie tritt hier nur in einer uns bisher unbekannten Form, der inneren Energie auf.

Um die innere Energie besser verstehen zu können, müssen wir zum einen klären, wie man die Erwärmung eines Körpers messen kann. Zum andern benötigen wir eine Vorstellung davon, was im Inneren eines Körpers bei seiner Erwärmung geschieht.

1. 2 Die Temperatur und der nullte Hauptsatz der Wärmelehre

Die Aussage "ein Körper hat sich erwärmt", gibt leider keine Auskunft darüber, wie stark sich dieser Körper erwärmt hat. Um dies angeben zu können, benötigt man die physikalische Größe Temperatur.

1.2.1 Grundlagen der Temperaturmessung

Bevor wir die Temperatureinheit und die Temperaturmessung betrachten, untersuchen wir erst einmal, auf welchen physikalischen Grundlagen die Temperaturmessung beruht.
Aus der alltäglichen Erfahrung weiß man, dass bei Körpern im Kontakt ein Temperaturenangleich stattfindet. Dabei nimmt die Temperatur des Körpers mit der höheren Anfangstemperatur so lange ab und die Temperatur des Körpers mit der geringeren Anfangstemperatur so lange zu, bis die Temperaturen beider Körper gleich sind. Diese Endtemperatur liegt dann zwischen der höheren und der geringeren Anfangstemperatur beider Körper. Die Körper sind dann im thermischen Gleichgewicht. Diese Erfahrung fasst man im nullten Hauptsatz der Wärmelehre zusammen.

Nullter Hauptsatz der Wärmelehre:
Befinden sich Körper untereinander im thermischen Gleichgewicht, haben sie die gleiche Temperatur.

Dieser Satz ist deshalb so wichtig, weil nur aufgrund seiner Aussage eine Temperaturmessung möglich ist! Bringt man ein Thermometer mit einem Körper in Kontakt, ändern sich durch den Austausch von innerer Energie die Temperaturen beider Körper. Dabei kühlt sich ein Körper ab und einer erwärmt sich. Wenn das Thermometer und der Körper nach einiger Zeit im thermischen Gleichgewicht sind, sind nach dem nullten Hauptsatz ihre Temperaturen gleich. Die Endtemperatur liegt dabei zwischen der höheren und der niedrigeren Anfangstemperatur. Jetzt kann man an dem Thermometer seine eigene Temperatur und somit auch die Temperatur des Körpers ablesen.

Daraus ergibt sich, dass bei Temperaturmessungen auf folgendes zu achten ist:

1. Nach Beginn des thermischen Kontakts Körper-Thermometer muß man einige Zeit warten, bis sich die Temperatur von Körper und Thermometer angeglichen haben.
2. Der Körper, dessen Temperatur man messen möchte, muß sehr viel größer sein, als das Thermometer. Damit ist gewährleistet, dass sich die innere Energie und damit die Temperatur des Körpers beim thermischen Kontakt mit dem Thermometer nur unwesentlich ändert.

Nach der Betrachtung der physikalischen Grundlagen der Temperaturmessung beschäftigen wir uns nun mit der Temperaturmessung und der Temperatureinheit.

1.2.2 Verschiedene Thermometer; Temperatureinheit und Temperaturskala

Unsere Haut ist als Temperaturmesser nur sehr bedingt geeignet. Nimmt man ein Stück Metall und ein Stück Wolle aus dem Kühlschrank, fühlt sich das Metall kälter als die Wolle an, obwohl beide Körper nach dem nullten Hauptsatz die gleiche Temperatur, nämlich die Innentemperatur des Kühlschranks, haben.
Unserer Temperatursinn ist in einen Wärmesinn und einen Kältesinn geteilt. Da die Wärmepunkte tiefer unter der Haut liegen, kann man sie nicht so gut lokalisieren wie die Kältepunkte. Besonders viele Kältepunkte haben die Nase und die Augenlider (13 bis 15 Kältepunkte pro cm^2), besonders wenig Kältepunkte haben die Finger (0 bis 3 Kältepunkte pro cm^2). Das kann man in einem einfachen Experiment zeigen. Dazu nimmt man ein Metallstück, das Zimmertemperatur hat. An ein Augenlid gehalten fühlt es sich kälter an, als wenn man es an einen Finger hält.

Zur Temperaturmessung besser geeignet ist das Volumen verschiedener Stoffe. Denn bei manchen Stoffen gibt es bei Temperaturänderungen sehr starke Volumenänderungen und diese können sehr leicht abgelesen werden.


Abb. 28.1: Fuge einer Brücke


Abb. 28.2: Rollenlagerung einer Brücke

Beispiele:
1. Festkörper: Erwärmt man eine Eisenkugel, so passt sie nicht mehr durch einen zuvor passgenauen kreisrunden Ausschnitt einer Metallplatte. Da Brücken wegen der temperaturabhängigen Ausdehnung im Sommer länger sind als im Winter, haben lange Brücken an ihren Enden Fugen und sind auf Rollen gelagert (siehe Abb. 28.1 und 28.2).
2. Flüssigkeit: Erwärmt man Alkohol in einem Glas, so steigt die Höhe der Flüssigkeit deutlich an.
3. Gas: Erwärmt man die Luft in einem Luftballon, indem man den Luftballon in heißes Wasser taucht, so nimmt das Luftvolumen in dem Luftballon zu und der Luftballon wird größer.

Die Versuche zeigen außerdem, dass Gase, Flüssigkeiten und Festkörper ein unterschiedliches Ausdehnungsverhalten haben.
In der Regel dehnen sich Gase bei Erwärmung stärker aus als Flüssigkeiten. Flüssigkeiten wiederum dehnen sich bei Erwärmung stärker aus als Festkörper.

Betrachten wir nun zwei Arten von Thermometer, die mittels des temperaturabhängigen Volumens Temperaturen anzeigen: Flüssigkeits- und Bimetallthermometer.

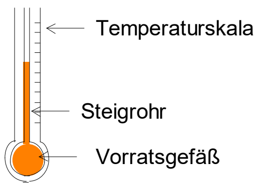


Abb. 28.3: Flüssigkeits-thermometer

Flüssigkeitsthermometer:
Ein Flüssigkeitsthermometer besteht aus einem Vorratsgefäß und einem Steigrohr (siehe Abb. 28.3). Erwärmen wir ein solches Thermometer, so steigt bei zunehmender Erwärmung der Flüssigkeitsspiegel (meist Alkohol oder Quecksilber) in dem Steigrohr an. Da bei den benutzten Flüssigkeiten das Volumen mit zunehmender Erwärmung sehr viel schneller anwächst als die Ausdehnung des Glasgefäßes zunimmt, kann die Ausdehnung des Gefäßes vernachlässigt werden.
Der schwedische Astronom Anders Celsius (1701 -1744) benutzte zur Einführung seiner Temperatureinheit ein Quecksilberthermometer.

Er nahm zwei Fixpunkte des Wassers zu Hilfe, um die uns gebräuchliche Temperaturskala und Temperatureinheit einzuführen.

1. Eispunkt des Wassers: Jede Mischung aus Wasser und Eis hat unabhängig davon, wieviel Wasser bzw. Eis sie besitzt, bei normalem Luftdruck von 1013 mbar, immer die gleiche Temperatur. Celsius wies dieser Temperatur den Wert 0° C zu.
2. Siedepunkt des Wassers: Bringt man Wasser bei normalem Luftdruck von 1013 mbar zum Sieden, so hat das Wasser unabhängig von seiner Masse immer die gleiche Temperatur. Celsius wies dieser Temperatur den Wert 100° C zu.

Nachdem Celsius die beiden Werte an das von ihm benutzte Thermometer angetragen hatte, teilte er den Abstand zwischen den beiden Temperaturmarken in 100 gleich große Teile ein. Den Abstand zwischen zwei so entstandenen benachbarten Markierungen nennt man 1° C (ein Grad Celsius).

Fassen wir zusammen:

Die Celsius - Temperaturskala:
Die Temperaturskala wird bestimmt durch:
0 °C: Eispunkt des Wassers
100 °C: Siedepunkt des Wassers
Der hundertste Teil der Temperaturerhöhung zwischen dem Eispunkt und dem Siedepunkt des Wassers führt zur
Einheit der Temperatur ϑ (theta): $[\vartheta] = 1\,^0C$ (1 Grad Celsius)

Einige markante Temperaturen:

- 219° C:	Schmelztemperatur von Sauerstoff
0° C:	Eispunkt des Wassers
37° C:	Körpertemperatur eines gesunden Menschen
200° C:	Motorblock eines Autos im Betrieb
1 535° C:	Schmelztemperatur von Eisen
6 000° C:	Oberflächentemperatur der Sonne
20 000 000° C:	Temperatur im Sonneninneren
300 000 000° C:	Bei einer 1993 in Princeton durchgeführten kontrollierten Kernfusion erzeugte Temperatur

Einsatzbereich verschiedener Flüssigkeitsthermometer:

Quecksilberthermometer:	-30° C bis 200° C
Galliumthermometer:	- 30° C bis 2000° C
Äthylalkohol:	-100° C bis 70° C

Beispiele für Flüssigkeitsthermometer:

Fieberthermometer

Das Fieberthermometer ist ein Maximumthermometer, d.h. es zeigt die höchste gemessene Temperatur an.
Bei einem Fieberthermometer ist das Vorratsgefäß über ein dünnes Rohr mit dem Steigrohr verbunden. Beim Messen der Körpertemperatur steigt der Quecksilberspiegel in dem Steigrohr an. Wird das Thermometer nach dem Messen der kühleren Umgebungsluft ausgesetzt, zieht sich das Quecksilber wieder zusammen. Dabei reißt der Quecksilberfaden in dem dünnen Rohr ab, somit bleibt das Quecksilberniveau im Steigrohr erhalten. Da sich das Quecksilber in dem Steigrohr beim Kontakt mit der Umgebungsluft nicht wieder in das Vorratsgefäß zurückziehen kann, ist das Ablesen der Körpertemperatur möglich. Durch Schütteln wird das Quecksilber, welches sich im Steigrohr befindet, in das Vorratsgefäß zurückgedrängt.

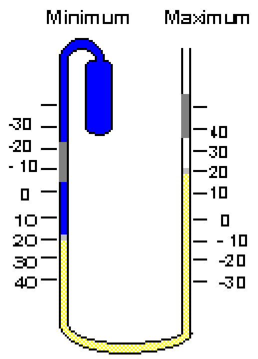


Abb. 30.1: Maximum-Minimum-Thermometer
Thermometerflüssigkeit: blau
Quecksilber: gelb
minimale Temperatur: - 3 °C
maximale Temperatur: 36 °C
momentane Temperatur: 20 °C

Maximum-Minimum-Thermometer
In dem Thermometer befinden sich zwei Flüssigkeiten (siehe Abb. 30.1) : Alkohol, die eigentliche Thermometerflüssigkeit und Quecksilber. Letzteres hat die Aufgabe, die links und rechts befindlichen Metallstifte zu verschieben. Die Ausdehnung des Quecksilbers wird gegenüber der Ausdehnung des Alkohols vernachlässigt.
Erhöhung der Temperatur: Die Thermometerflüssigkeit schiebt die Quecksilbersäule von links nach rechts.
Verringerung der Temperatur: Die Thermometerflüssigkeit zieht die Quecksilbersäule von rechts nach links.

Trifft die Quecksilbersäule auf einen der beiden Metallstifte, schiebt sie ihn vor sich her. Die Metallstifte zeigen somit die maximale bzw. minimale Temperatur an. Die momentane Temperatur ist sowohl links als auch rechts an dem Quecksilberniveau abzulesen.
Um eine neue Messung der Maximum- und Minimumtemperatur zu ermöglichen, werden die Metallstifte mit Hilfe eines Magneten bis zum Quecksilberniveau nach unten verschoben.

Abb. 30.2: Bimetallthermometer beim Erwärmen

Abb. 30.3:Bimetallthermometer beim Abkühlen

Bimetallthermometer:
Bimetallthermometer bestehen aus zwei zusammengewalzten Blechen mit unterschiedlichem Ausdehnungsverhalten.
Erhöhung der Temperatur: Das Metall, dessen Volumen und damit dessen Länge sich bei einer Temperaturänderung stärker verändert, ist nun länger als das andere Metall. Daher biegt sich das Blech, und zwar in die Richtung des Metalls, dessen Länge sich bei einer Temperaturänderung weniger verändert (siehe Abb. 30.2).
Verringerung der Temperatur: Das Metall, dessen Volumen und damit dessen Länge sich bei einer Temperaturänderung stärker verändert, ist nun kürzer als das andere Metall. Daher biegt sich das Blech, und zwar in die Richtung des Metalls, dessen Länge sich bei einer Temperaturänderung mehr ändert (siehe Abb. 30.3).

1.2.3 Anomalie des Wassers

Im allgemeinen dehnen sich Stoffe bei einer Temperaturerhöhung aus. Eine der wenigen Ausnahmen ist Wasser im Temperaturbereich von 0° C bis 4 °C. Erwärmt man 1000 cm^3 Eis der Masse 917,28 g, so zeigt das Volumen folgende Temperaturabhängigkeit:

Temperatur in °C	Volumen in cm^3	Dichte in $\frac{g}{cm^3}$
0 (Eis)	1000	0,971 728
0 (Wasser)	917,43	0,999 841
1	917,38	0,999 900
2	917,34	0,999 941
3	917,32	0,999 965
4	917,31	0,999 973
5	917,32	0,999 965
6	917,34	0,999 941
7	917,38	0,999 902
8	917,42	0,999 849
9	917,49	0,999 782
10	917,56	0,999 701

Erwärmt man Wasser von 0º C auf 4º C, so nimmt sein Volumen ab. Dieses Phänomen nennt man Anomalie des Wassers.
Weiterhin gilt, dass Eis von 0º C ein um 9 % größeres Volumen als die gleiche Masse Wasser von 0º C hat.

Die Abhängigkeit der Dichte von der Temperatur hat zur Folge, dass ein See immer von oben her zufriert. Hat das Wasser an seiner Oberfläche aufgrund der Abkühlung durch die Umgebungsluft eine Temperatur von 4º C, sinkt es nach unten. Bei zunehmender Abkühlung des Sees befindet sich das Wasser mit 4º C (der größten Dichte) am Boden, Wasser mit 0º C (einer kleineren Dichte) an der Oberfläche des Sees. Dieses Oberflächenwasser kann bei einer weiterem Abkühlung zu Eis werden.

Die Tatsache der Temperaturschichtung lässt sich sehr leicht in einem Schulversuch zeigen. Gibt man Eis in ein Glas Wasser, stellt sich sehr schnell eine Temperaturschichtung ein. An der Wasseroberfläche hat das Wasser 0º C, die Temperatur des Wassers erreicht mit 4º C am Boden des Glases seinen höchsten Wert.

1. 3 Mikroskopische Betrachtung

Abb. 31.1:Modellversuch zur Molekularbewegung

Um ein tieferes Verständnis der inneren Energie eines Körpers zu erhalten, muß man die Atome bzw. Moleküle betrachten, aus denen der Körper aufgebaut ist. Der folgende Versuch gibt uns modellhaft einen Einblick, wie sich die Atome bzw. Moleküle eines Körpers verhalten.
Betrachtet man eine Milch-Wasser-Emulsion unter dem Mikroskop, so ist zu sehen, dass die Fetttröpfchen der Milch eine unregelmäßige, ständige d.h. mit der Zeit nicht nachlassende Zitterbewegung ausführen. Diese Bewegung heißt zu Ehren des Biologen Brown, der sie erstmals beschrieben hat, Brownsche Molekularbewegung. Heute kennt man den Grund für diese Zitterbewegung: Stoßen mehrere Wassermoleküle unregelmäßig, aber fast gleichzeitig von einer Seite gegen die Fetttröpfchen, so bewirken diese Stöße eine Richtungsänderung der Fetttröpfchen. Die Bewegung der Fetttröpfchen ist ein Spiegelbild der unregelmäßigen, ständigen Bewegung der Wassermoleküle.
Dies zeigt auch folgender Modellversuch: In einem Glasgefäß befinden sich kleine Plexiglaskugeln, die den Wassermolekülen entsprechen, und eine größere Styroporkugel, die einem Fetttröpfchen entspricht (siehe Abb. 31.1). Werden die Plexiglaskugeln mit Hilfe eines Motors in Bewegung versetzt, stoßen sie immer wieder an die Styroporkugel und lassen diese die Zitterbewegung (Brownsche Molekularbewegung) ausführen.

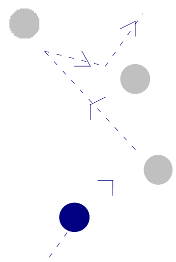


Abb. 31.2: Stoß eines Wassemoleküls (blau) mit anderen Molekülen.

Versuchen wir nun die Brownsche Molekularbewegung der Wassermoleküle zu verstehen.
Unregelmäßigkeit der Bewegung: Im Wasser befinden sich unzählige Wassermoleküle dicht beieinander. Diese Wassermoleküle stoßen immer wieder aneinander und können dadurch ihre Richtung ändern (siehe Abb. 31.2). Das führt zur Unregelmäßigkeit der Zitterbewegung.
Beständigkeit der Bewegung: Da sich die Wassermoleküle bewegen, müssen sie kinetische Energie besitzen. Die kinetische Energie dieser Wassemoleküle ist jedoch nur ein Teil der inneren Energie der

Milch-Wasser-Emulsion. Um den anderen Teil der inneren Energie zu finden, müssen wir uns daran erinnern, dass es in der Mechanik neben der kinetischen Energie noch die potentielle Energie gibt. In einem Körper ist die potentielle Energie die Energie, die die Atome bzw. Moleküle aufgrund ihrer Molekularkräfte besitzen. Das folgende Schaubild zeigt zusammenfassend, aus welchen Teilen sich die innere Energie eines Körpers zusammensetzt.

Innere Energie

setzt sich zusammen aus

Summe der kinetischen Energien aller Wassermoleküle aufgrund der ungeordneten Teilchenbewegung.	Summe der potentiellen Energien aller Wassermoleküle aufgrund der Molekularkräfte.

Von dem einführenden Experiment der Wärmelehre wissen wir, dass eine Temperaturerhöhung eine Erhöhung der inneren Energie nach sich zieht. Nimmt die innere Energie zu, nimmt auch die kinetische Energie aller Atome bzw. Moleküle zu und somit auch die ungeordnete Bewegung dieser Atome bzw. Moleküle.

Fassen wir das Wesentlichsten über die Brownschen Molekularbewegung zusammen:

1. Atome und Moleküle von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern führen eine ständige, unregelmäßige Zitterbewegung aus. Man nennt diese Bewegung "Brownsche Molekularbewegung" oder "thermische Bewegung".
2. Je höher die Temperatur ist, desto größer ist die kinetische Energie aller Atome und Moleküle und damit auch die Geschwindigkeit der ungeordneten Bewegung der Atome und Moleküle eines Stoffes.

Was geschieht nun, wenn man die Temperatur eines Festkörpers immer mehr verringert?
Dann nimmt die innere Energie und somit auch die mittlere kinetische Energie der Atome bzw. Moleküle immer mehr ab. Der Temperaturpunkt, bei dem man die kinetische Energie der Atome bzw. Moleküle nicht mehr verringern kann, ist bei -273,15 °C. Eine Temperatur, die unterhalb dieses Temperaturpunktes liegt, kann es nicht geben.
Es liegt nahe, eine neue Temperaturskala einzuführen, die der tiefsten the

Die Klevin-Temperaturskala:
Die Temperaturskala wird bestimmt durch:

0 K: Absoluter Nullpunkt
273,15 K: Eispunkt des Wassers

Meßeinheit: [T] = 1K

Ändert sich die Temperatur eines Körpers um 1 K, so ändert sie sich auch um 1 °C.

Zusammenhang der Kelvin- und der Celsiusskala:

$$\frac{T}{K} = \frac{\vartheta}{{}^{o}C} + 273{,}15$$

Anmerkung: Auch am absoluten Temperatur-Nullpunkt hat jeder Körper noch etwas kinetische Energie. Diese kinetische Energie kann den Körpern jedoch nicht mehr entzogen werden.

Mit Hilfe der Brownschen Bewegung kann man auch den Zusammenhang zwischen der Reibung und der Erhöhung der inneren Energie verstehen. Betrachten wir dazu nochmals das einführende Experiment der Wärmelehre. Ein Körper der Masse 2 kg war an einer Schnur befestigt. Indem wir die Schnur durch die Hand gleiten ließen, bewegte sich der Körper langsam auf den Boden. Mikroskopisch betrachtet kommt die Reibung zwischen der Hand und dem Seil durch Verzahnungen der beiden Oberflächen zustande. Bewegt sich das Seil mit dem Körper nach unten, reißt es aufgrund der Verzahnungen immer wieder an Molekülen der Haut und erhöht daher die Bewegung der Teilchen. Durch Stöße der Teilchen untereinander erhöht sich auch die Bewegung der Teilchen in Inneren der Hand. Dadurch erhöht sich die innere Energie der Hand und somit auch ihre Temperatur.

Aufgaben:

1. Rechne folgende Temperaturen in K um:
   a. 21^{o} C: angenehme Zimmertemperatur
   b. 180^{o} C: durchschnittliche Temperatur beim Kuchenbacken
   c. 57,8^{o} C: Höchste gemessene Lufttemperatur in Al Aziziyah, Libyen (21.07.1922)
   d. 1535^{o} C: Schmelztemperatur von Eisen

2. Rechne folgende Temperaturen in ^{o}C um:
   a. 90 K: Siedetemperatur von Sauerstoff
   b. 183,95 K: Niedrigste Lufttemperatur gemessen in der antarktischen Station Wostok (21.07.1983)
   c. 297 K: Temperatur des Mittelmeers im Sommer
   d. 1336 K: Siedetemperatur von Gold

1. 4 Spezifische Wärmekapazität

Die bisherigen Überlegungen haben gezeigt, dass mit der Temperaturänderung eines Körpers auch eine Änderung seiner inneren Energie einher geht. Wir werden im folgenden eine Formel herleiten, mit der man die Änderung der inneren Energie bei gegebener Temperaturänderung berechnen kann.

Änderung der inneren Energie ΔE_i eines Körpers

abhängig von

Masse des Körpers | Temperaturänderung des Körpers | Material des Körpers

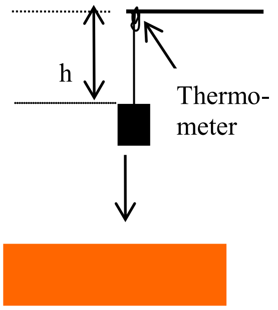


Abb. 34.1: Umwandlung von Höhenenergie in innere Energie

ΔE_i in Abhängigkeit von der Temperaturänderung des Thermometers:

Um den Zusammenhang zwischen der Änderung der inneren Energie und der Temperaturänderung herzuleiten, machen wir folgenden Versuch:
Wir binden ein Massenstück (1 kg) an eine Schnur und wickelnd ein Teil dieser Schnur um ein Thermometer (Thermoelement) der Masse m. Damit die Reibung groß genug ist, wird die Schnur mit samt dem Thermometer zwischen zwei Styroporteile eingeklemmt. Das Massenstück läßt man nun langsam nach unten gleiten. Gemessen wird der Weg h, den das Massenstück zurückgelegt hat und die am Thermometer angezeigte Temperaturerhöhung. Unter der Annahme, dass die gesamte Höhenenergie des Massenstücks in innere Energie des Thermometers übergeht, gilt für die Änderung der inneren Energie $\Delta E_i = E_h$.

h in cm	0	5	10	15	20
ΔE_i in J	0	0,49	0,98	1,47	1,96
$\Delta\vartheta$ in °C	0	0,6	1,2	1,8	2,3

Es folgt: I. $\Delta E_i \sim \Delta\vartheta$

ΔE_i in Abhängigkeit von der Masse m des Thermometers:

Bei n gleichen Anordnungen (gleiche Massen der durch Reibung erwärmten Thermometer, gleiche ΔE_H) wird bei jeder der n Anordnungen die innere Energie der Thermometer um $\Delta E_i^{(k)}$ (k = 1, 2, 3 .. n) geändert, insgesamt also um $\Delta E_i = n \cdot \Delta E_i^{(k)}$. Bei den n Thermometern mit Gesamtmasse $n \cdot m$ wurde die innere Energie also insgesamt um $n \cdot \Delta E_i^{(k)}$ geändert.

Daraus folgt II. $\Delta E_i \sim m$.

Aufgrund der Abhängigkeit der Änderung der inneren Energie von der Masse und der Temperatur des Körpers ergibt sich aus den Formeln I und II:

$$\Delta E_i \sim m\,\Delta\vartheta$$

Wir setzen nun eine Proportionalitätskonstante c ein, die von der Beschaffenheit des jeweiligen Materials abhängt.

Tab. 35.1: Beispiele für verschiedene Wärmekapazitäten:

Stoff:	c in $\frac{kJ}{kgK}$
Festkörper:	
Beton:	0,84
Eis (0° C)	2,1
Eisen:	0,45
Granit:	0,75
Gold:	0,13
Holz:	2,5
Sand (trocken):	0,84
Flüssigkeiten:	
Olivenöl:	1,97
Wasser:	4,2
Gas:	
Luft (bei 1bar):	1,0

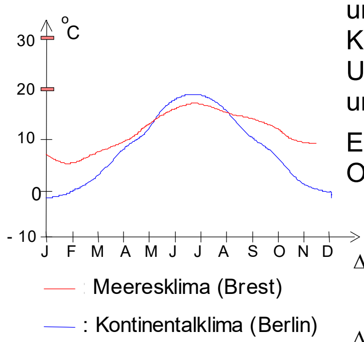


Abb. 35.1: mittlere jährliche Temperaturen

Änderung der inneren Energie: $\Delta E_i = cm\Delta\vartheta$
c: spezifische Wärmekapazität in $\frac{kJ}{kg\,K}$
m: Masse des Körpers
$\Delta\vartheta$: Temperaturänderung des Körpers
$[\Delta E_i] = 1\text{ J}$ (Joule)

Anmerkung: Mit Hilfe der obigen Formel lassen sich nur Änderungen der inneren Energie berechnen.

Die Formel sollte aber nicht zu der Annahme verleiten, dass bei einem Körper, dessen Temperatur sich nicht ändert ($\Delta\vartheta = 0$), die innere Energie den Wert 0J hat. Vielmehr ist richtig, dass jeder Körper eine von der Temperatur abhängige innere Energie besitzt. Diese setzt sich aus der Summe der kinetischen und potentiellen Energien der Atome bzw. Moleküle des Körpers zusammen.

Die unterschiedlichen Werte der spezifischen Wärmekapazität von Wasser und Gestein sind für die Unterschiede des Meeresklimas und des Kontinentalklimas verantwortlich.

Untersuchen wir dazu, wie stark sich die Temperaturen von 1 kg Wasser und 1kg Granit bei einer Energiezufuhr von $\Delta E_i = 4{,}2$ kJ erhöhen. Diese Energie gibt die Sonne im Sommer an einen Stein, bei dem 60 cm^2 der Oberfläche beschienen werden, in zirka 50 Minuten ab.

$$\Delta\vartheta_{Wasser} = \frac{\Delta E_i}{c_{Wasser} m} = 1°C$$

$$\Delta\vartheta_{Granit} = \frac{\Delta E_i}{c_{Granit} m} = 5{,}6°C$$

Wie wir an diesem Rechenbeispiel sehen, weist das Kontinentalklima bei gleichem Breitengrad und damit gleicher Energiezufuhr durch die Sonne, im Laufe des Jahres stärkere Temperaturschwankungen auf als das Meeresklima. Die Abb. 35.1 zeigt einen Vergleich der mittleren Temperaturen von Brest und Berlin, die annähernd auf dem gleichen Breitengrad liegen.

Aufgaben:

1. 18 °C warmes Wasser (1,0 kg) wurde auf 22 °C erwärmt.
   Berechne die Änderung der inneren Energie.

2. 18 °C warme Wolle (1 kg, c = 1,5 $\frac{kJ}{kgK}$) wurde auf 22 °C erwärmt.

   Berechne die Änderung der inneren Energie.

3. Bei einem 2,00 kg schweren Ziegelstein hat sich durch Abkühlen um 6,50 K die innere Energie um 10,92 kJ verringert.
   Berechne die spezifische Wärmekapazität des Ziegelsteins.

4. Eine 1,0 kg schwere Bleikugel (c = 0,129 $\frac{kJ}{kgK}$) fällt aus einer Höhe von

   1,2 m auf den Boden. 30 % der Höhenenergie werden in innere Energie der Kugel umgewandelt.
   Berechne die Temperaturerhöhung der Kugel.

5. Das Wasser (200 kg) einer Badewanne wird von 15 °C auf 38 °C erwärmt.
   Welche Geschwindigkeit hätte das Wasser, wenn man die zugeführte Energie zum Beschleunigen des Wassers hergenommen hätte?

2. Änderung der inneren Energie

In diesem Kapitel untersuchen wir, wie man die innere Energie eines Körpers verändern kann.

2. 1 Änderung der inneren Energie durch Verrichten von Arbeit

In allen bisherigen Versuchen wurde der Wert der inneren Energie immer nur durch Arbeit verändert. Betrachten wir dazu nochmals einige Beispiele:

1. Fährt man mit einem Finger mehrmals über die Tischoberfläche, so wird der Finger wärmer.

Reibungsarbeit wird verrichtet → Innere Energie der Hand nimmt zu

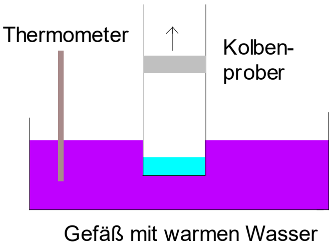


Abb. 36.1: Verringern der inneren Energie um Arbeit zu verrichten

2. Wir stellen einen Kolbenprober, in dem sich etwas Wasser befindet, in ein Gefäß mit heißem Wasser (siehe Abb. 36.1). Die Temperatur des heißen Wassers wird kontinuierlich mit einem Thermometer gemessen. Wir beobachten, dass mit der Temperaturabnahme des heißen Wassers ein Anstieg des Kolbens vom Kolbenprober einher geht. Daraus folgt, dass das warme Wasser einen Teil seiner inneren Energie an den Kolbenprober abgibt. Dort wird die dazugewonnene innere Energie zum Teil in mechanische Arbeit umgewandelt, der Kolben steigt hoch.

Innere Energie des warmen Wassers nimmt ab. → Hubarbeit am Kolben

Wie die Beispiele zeigen, kann durch das Verrichten von Arbeit die innere Energie sowohl erhöht als auch verringert werden.

2. 2 Änderung der inneren Energie durch Wärmeaustausch

Aus der alltäglichen Erfahrung weiß man, dass sich die Temperatur und damit auch die innere Energie eines Körpers nicht nur durch Arbeit verändern kann. Eine Temperaturänderung ist auch möglich, indem zwei Körper durch thermischen Kontakt innere Energie untereinander austauschen. Die dabei ausgetauschte innere Energie nennt man Wärme Q.

Für Körper gibt es drei Möglichkeiten, Wärme untereinander auszutauschen:

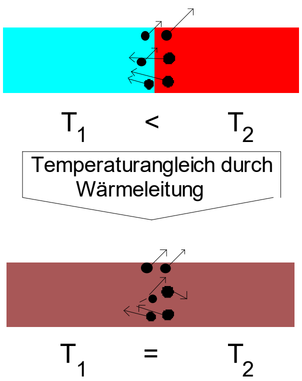


Abb. 36.2: Wärmeleitung

1. Wärmeaustausch durch Wärmeleitung:

a. Bringt man zwei Körper unterschiedlicher Temperatur in direkten Kontakt, so stoßen an ihren Berührungsflächen die Atome bzw. Moleküle aneinander. Die dabei übertragene innere Energie wird auch innerhalb der jeweiligen Körper durch Stöße der Atome bzw. Moleküle weitergegeben und somit im Laufe der Zeit auf den gesamten Körper verteilt. Bei den Stößen wird so lange Energie ausgetauscht, bis die Körper die gleiche Temperatur besitzen (siehe Abb. 36.2).

Es folgt: Wärmeleitung kommt durch gegenseitiges Anstoßen von Atomen bzw. Molekülen zustande.

b. Auf einen Metallstab werden in gleichmäßigen Abständen kleine Wachstropfen aufgebracht und dieser an einem Ende in die Flamme eines Bunsenbrenners gehalten. Sie schmelzen nacheinander ab.

Es folgt: Die Ausbreitung der Temperaturänderung mittels Wärmeleitung benötigt eine gewisse Zeit.

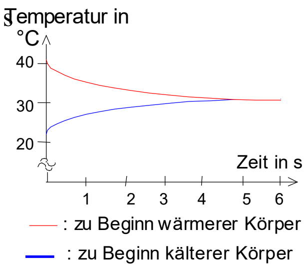


Abb. 37.1: Temperaturverlauf bei der Wärmeübertragung

c. Zwei mit Farbe überzogene Bleiplatten unterschiedlicher Temperatur werden aufeinandergelegt. Anschließend mißt man einige Minuten lang ihre Temperaturen (Temperaturverlauf siehe Abb. 37.1).
Die Temperatur des Körpers mit der höheren Anfangstemperatur nimmt immer mehr ab, die des Körpers mit der geringeren Anfangstemperatur immer mehr zu. Nach geraumer Zeit haben sich ihre Temperaturen angeglichen.

Es folgt: Es wird so lange Wärme vom dem Körper höherer Temperatur auf den Körper geringerer Temperatur übertragen, bis beide Körper die gleiche Temperatur besitzen. Dann kommt der Wärmeübergang zum Stillstand.

d. Auf einem Metallstück und einem Wattestück befindet sich jeweils ein Stück Wachs. Beides wird auf eine Heizplatte gelegt. Während das Wachs auf dem Metallstück kurz nach dem Anschalten der Heizplatte schmilzt, verändert sich das Wachs auf der Wolle überhaupt nicht.

Es folgt: Die Wärmeleitung ist vom Material abhängig. Es gibt gute und schlechte Wärmeleiter.

Gute Wärmeleiter: Metall

Schlechte Wärmeleiter: Watte, Holz, Eis, Beton, Glas, Wasser, Schamott (wird beim Bau von Kaminen verwendet), Luft (extrem schlecht)

Denken wir in diesem Zusammenhang noch einmal an das Experiment "Watte und Metallstück aus dem Kühlschrank". Obwohl die beiden Körper die gleiche Temperatur besaßen, fühlte sich die Watte wärmer an als das Metall. Das liegt daran, dass die Watte wesentlich schlechtere Wärmeleiteigenschaften besitzt als das Metallstück. Beim Kontakt der Hand mit der Watte nahm die Temperatur der Watte aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit nur auf der Watteoberfläche schnell zu. Im Inneren war die Watte immer noch kalt. Eine Verringerung der Handtemperatur fand daher kaum statt. Somit fühlte sich die Watte warm an. Das Metallstück leitete die von der Hand abgegebene Wärme jedoch schnell in sein Inneres weiter. Die Oberflächentemperatur des Metalls erhöhte sich daher nicht so stark wie bei der Watte. Das führte wiederum dazu, dass die Handtemperatur stärker verringert wurde als bei dem Kontakt mit der Watte. Daher fühlte sich das Metall kalt an.

e. Den Unterschied zwischen guten und schlechten Wärmeleitern machen sich viele Tiere zunutze. So haben Glattwale eine Fettschicht, die durchschnittlich 50 cm dick ist. Bei Bauwalen ist die Fettschicht zwischen 4 cm und 8 cm dick. Sie schützen sich so gegen die geringen Wassertemperaturen. Betrachten wir das unterschiedliche Wärmeleitverhalten von mageren Fleisch und reinem Fett. Wir legen dazu gleich dicke Scheiben Fleisch und Fett auf einen Eisblock und messen die Oberflächentemperaturen der beiden Scheiben. Die Oberflächentemperatur des mageren Fleisches nimmt sehr viel schneller ab als die Oberflächentemperatur des Fettes. Also ist mageres Fleisch ein besserer Wärmeleiter als Fett.

2. Wärmeaustausch durch Konvektion:

Betrachten wir dazu einige Beispiele:

a. Wir stellen ein Glas Wasser, in dem sich ein Körnchen Kaliumpermanganat befindet, auf eine Heizplatte. Das Kaliumpermanganat färbt kontinuierlich das Wasser in seiner Umgebung lila. Dadurch ist es möglich zu untersuchen, welche Strömungen im Wasser auftreten. Schalten wir die Heizplatte ein, so tritt die Temperaturerhöhung zuerst beim Wasser am Boden auf. Da das erwärmte Wasser eine geringere Dichte als das kältere Wasser der Umgebung hat, steigt das erwärmte Wasser nach oben. Wir können das Aufsteigen des Wassers anhand der vom Kaliumpermanganat ausgehenden, langsam nach oben ziehenden, lila Schlieren sehen. Zum Ausgleich strömt kälteres Wasser, das eine höhere Dichte hat, von oben her nach unten. Der Transport von Wärme ist hier mit einem Massentransport verbunden. Man nennt dieses Phänomen Konvektion.

   Es folgt: Da für die Konvektion immer ein Massentransport nötig ist, ist die Konvektion nur in Flüssigkeiten und Gasen möglich.

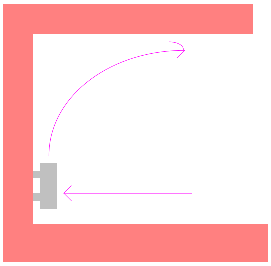


Abb. 38.1: Konvektion durch einen Heizkörper

b. Ist ein Heizkörper in einem Raum in Betrieb (siehe Abb. 38.1), so wird die Luft in der Umgebung des Heizkörpers erwärmt. Die Dichte der erwärmten Luft ist geringer als die der Umgebung und daher steigt die erwärmte Luft nach oben. Dort verdrängt sie kühlere Luft, die aufgrund ihrer größeren Dichte nach unten hin abfällt und dann vom Heizkörper erwärmt wird. Die Luft zirkuliert somit im Raum.

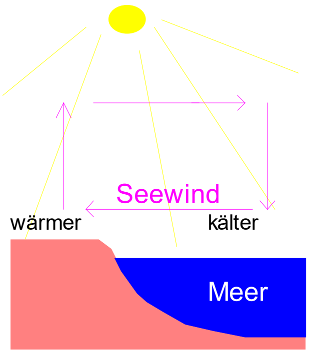


Abb. 38.2: Land-Seewind-System durch Konvektion

c. Beim sogenannten Land-Seewind-System (siehe Abb.38.2) wird aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Wärmekapazitäten von Erde und Wasser das Land tagsüber stärker erwärmt als das Wasser. Wenn keine Großwetterlagen stören, bildet sich wegen der einsetzenden Konvektion der Luft vom Wasser aufs Land hin ein Seewind aus.

3. Wärmeaustausch durch Wärmestrahlung:

Abb. 38.3: Nachweis der Wärmestrahlung im Vakuum

Betrachten wir dazu einige Beispiele:

a. Wir legen ein heißes Metallstück, an das ein Thermometer angebracht wurde, auf ein Stück Styropor (schlechter Wärmeleiter). Die Versuchsanordnung wird von einem Glasgefäß umgeben. Nachdem wir die Luft aus dem Glasgefäß gepumpt haben, befindet sich das Metallstück im Vakuum (siehe Abb. 38.3). Trotz fehlender Konvektion und Wärmeleitung nimmt die Temperatur des Metallstücks ab!

   Es folgt: Das Metallstück gibt Energie ab, ohne dass zur Wärmeübertragung irgendeine Materie benötigt wird. Das Metallstück strahlt Energie ab, da seine Temperatur größer ist als die der Umgebung. Diese Art der Wärmeübertragung nennt man Wärmestrahlung.

b. Die Erwärmung der Erde durch die Sonne erfolgt ausschließlich durch die Wärmestrahlung. Nashörner schützen sich vor der Wärmestrahlung dadurch, dass sie sich im Schlamm oder Staub suhlen und auf diese Weise eine Schutzschicht auf ihre Haut aufbringen.

   Beim Menschen findet ein Teil des Wärmeaustausches durch Wärmestrahlung statt. Steckt man eine Hand in eine Blechdose, stellt sich aufgrund der von der Hand abgegebenen Wärmestrahlung sehr schnell ein Wärmegefühl ein.

Für alle drei Arten der Wärmeübetragung (Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung) gilt:

1. Es findet so lange ein Wärmeübergang von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper geringerer Temperatur statt, bis beide Körper die gleiche Temperatur besitzen.
2. Der Wärmeaustausch pro Zeiteinheit ist bei größerer Temperaturdifferenz größer als bei geringerer Temperaturdifferenz (siehe Abb. 37.1).
3. Der Wärmeaustausch eines Körpers ist um so geringer, je kleiner seine Oberfläche ist. Daher rollen sich die Tiere beim Winterschlaf auch zusammen.

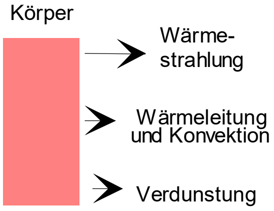


Abb. 39.1: Relative Menge der Wärmeabgabe beim Menschen; Luft 20^{o}C, Himmel bedeckt

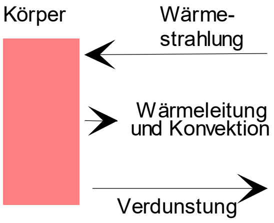


Abb. 39.2: Relative Menge der Wärmeabgabe beim Menschen; Luft 30^{o}C, sonnig

Der Mensch wandelt bei biochemischen Prozessen ein Teil der chemische Energie in innere Energie um. Würde man einen Menschen so einpacken, dass er keine Wärme mehr abgeben kann, nähme seine Temperatur in der Stunde um etwa 1^{o} C zu. Nach fünf Stunden hätte sich seine Körpertemperatur lebensbedrohlich erhöht. Daran sieht man, wie wichtig die Abgabe von Wärme für die Regulation der Körpertemperatur ist. Zur Wärmeabgabe werden in der Nähe der Haut die Durchmesser der Arterien und der Venen vergrößert. Dies führt zu einem verstärkten Transport von warmem Blut aus dem Körperinneren an die Körperoberfläche. Man erkennt dies an der zunehmenden Rötung der Backen oder der Ohrläppchen. Da durch diesen Trick die Hauttemperatur und damit die Temperaturdifferenz Haut-Umgebung angestiegen ist, kann der Körper in der gleichen Zeit mehr Wärme abgeben.
Der menschliche Körper gibt Wärme ab in Form von Wärmestrahlung, Wärmeleitung, Konvektion und Verdunstung (siehe Abb. 39.1 und 39.2). Die Wärmestrahlung der Haut kann man sehr leicht beobachten. Hält man eine Handfläche ganz nah an eine Backe, stellt sich schon nach kurzer Zeit ein Wärmegefühl ein.

2. 3 Der erste Hauptsatz der Wärmelehre

Wie wir in den beiden vorhergehenden Kapiteln gesehen haben, kann die Änderung der inneren Energie eines Körpers sowohl durch Arbeit, als auch durch Wärme erfolgen. Dieses Ergebnis wird in folgendem Satz zusammengefasst.

Erster Hauptsatz der Wärmelehre:
Die innere Energie ΔE_i eines Körpers kann durch Arbeit W und Wärme Q verändert werden.

$$\Delta E_i = W + Q$$

Ein diesem Zusammenhang ist noch folgendes wichtig:

Ein Körper hat Energie; er hat weder Arbeit noch Wärme.

Unter Arbeit und Wärme versteht man die übertragene Energiemenge.

2.4 Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre

Bei allen Versuchen zur Wärmeübertragung ging die Wärme immer von einem Körper höherer Temperatur auf einen Körper geringerer Temperatur über. Es ist nie beobachtet worden, dass Wärme von selbst von einem Körper niedrigerer Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur überging. Wenn dies möglich wäre, könnte zum Beispiel ein Glas Wasser so lange Wärme an die wärmere Umgebung abgeben, bis das Wasser zu Eis wird. Ein solcher Vorgang wurde aber noch nie beobachtet.
Diese Tatsache faßt man im folgenden Satz zusammen:

> Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre:
> Wärme kann von selbst nur von einem Körper höherer Temperatur auf einen Körper geringerer Temperatur übergehen.

Anmerkung:
1. Nach dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre kann immer so lange ein Wärmeübergang zwischen zwei Körpern stattfinden, bis sich ihre Temperaturen angeglichen haben.
2. Im Alltag gibt es durchaus Beispiele, wo diese Gesetzmäßigkeit bei oberflächlicher Betrachtung nicht zu stimmen scheint. Das beste Beispiel für solch einen Prozeß ist der Kühlschrank. Hier wird dem Inneren eines Kühlschranks mit Hilfe eines Kühlaggregats Wärme entzogen und der Umgebungsluft zugeführt. Dabei ist die Temperatur im Kühlschrank geringer als die der Umgebungsluft. Der entscheidende Unterschied ist hier aber, dass die Wärme nicht von selbst von einem Körper auf den anderen Körper übergeht. Eine Maschine, in diesem Fall ein Kühlaggregat, leistet im Kühlschrank Arbeit, damit Wärme von einem Körper niedrigerer Temperatur (Luft im Kühlschrank) auf einen Körper höherer Temperatur (Luft der Umgebung) übertragen werden kann.

Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre betrifft Vorgänge, die von selbst nur in eine Richtung verlaufen. Solche Vorgänge nennt man irreversibel (nicht umkehrbar). Ein Beispiel dafür ist das Mischen zweier unterschiedlicher Flüssigkeiten gleicher Temperatur in einem Becher. Diese beide Flüssigkeiten werden sich von selbst nicht mehr entmischen.

Betrachtet man mechanische Vorgänge, wie zum Beispiel die Hin- und Herbewegung eines Pendels, so wiederholt sich dieser Bewegungsablauf , wenn keine Reibung vorhanden ist, immer wieder. Vorgänge, die von selbst auch in der umgekehrten Richtung laufen können, nennt man reversibel (umkehrbar).

Fast alle Systeme, die wir in der Mechanik betrachten, sind mit Reibung behaftet. Bei diesen wandelt sich stets ein Teil der mechanischen Energie durch Reibungsarbeit in innere Energie um. Dadurch sind die reibungsbehafteten mechanischen Vorgänge irreversibel! Diese Irreversibilität hat zur Folge, dass in der reibungsbehafteten Mechanik alle Vorgänge von selbst nur in eine Richtung laufen. Kommt zum Beispiel ein angestoßenes Fadenpendel zur Ruhe, läuft der Vorgang von selbst nicht wieder in der umgekehrten Reihenfolge ab. Das heißt, dass ein ruhendes Fadenpendel aufgrund der irreversiblen Umwandlung von mechanischer Energie in innere Energie nie von selbst zu schwingen beginnt. Die dafür notwendige Energie könnte es ja - ohne den ersten Hauptsatz zu verletzen - durch Umwandlung von innerer Energie der Umgebung in mechanische Energie der Schwingung gewinnen.

Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre hat also zum Inhalt, dass fast alle Vorgänge in der Natur irreversibel sind.

Aufgaben:

1. Hält man Kaffee in einem Metallbecher oder einem Styroporbecher besser warm?
2. Warum stellt man einen Metallöffel in ein heißes Getränk, damit das Getränk schneller abkühlt?
3. Warum kühlt im Frühjahr die Erde bei einer sternklaren Nacht stärker ab, als wenn der Himmel wolkenbedeckt ist?
4. Ein Fahrrad wird durch eine konstante Kraft von 12,1 N längs einer Strecke von 12 m zum Stehen gebracht. Berechne die Temperaturerhöhung des Bremsbackens (m = 15 g; $c = 1{,}4\ \frac{kJ}{kg \cdot K}$), wenn 27,9 % der Arbeit zur Erhöhung der inneren Energie führt.
5. Bei den folgenden beiden Teilaufgaben wird angenommen, dass sich 100 % der Arbeit in innere Energie umwandeln.
   a. Aus welcher Höhe fällt ein Kugelschreiber ($c = 2{,}43\ \frac{kJ}{kg \cdot K}$, m = 10 g), damit sich seine Temperatur um 0,004 K erhöht?
   b. Aus welcher Höhe muss eine 8,5 kg schwere Schultasche fallen, damit ihre Temperaturerhöhung ebenfalls 0,004 K beträgt?
6. Die Luft in einem Arbeitszimmer (l = 4,0 m, b = 3,5 m, h = 2,4 m) wird durch die Wärmestrahlung der Sonne von 20^o C auf 26^o C erwärmt. Berechne die Änderung der inneren Energie der Luft.
7. In eine Porzellantasse ($c = 0{,}80\ \frac{kJ}{kg \cdot K}$, m = 100 g) der Temperatur 20 °C werden 150 ml Tee ($c = 4{,}1\ \frac{kJ}{kg \cdot K}$) gegossen, der eine Temperatur von 80 °C hat. Berechne die Mischungstemperatur.

8. In einer Badewanne befinden sich 170 l Wasser der Temperatur 42° C.
   a. Wieviel Wasser der Temperatur 16° C muss eingeleitet werden, damit die Mischungstemperatur 35° C beträgt?
   b. Erkläre, warum mehr kaltes Wasser zugegeben werden muss, als man in der Teilaufgabe a. berechnet hat.

9. a. Drei Eisenquader gleicher Grundfläche und den Massen von 100 g, 300 g und 700 g haben eine Temperatur von 200° C. Sie werden gleichzeitig auf einen Eisblock gestellt.
   Welcher der Eisenquader sinkt am meisten ein?
   b. Drei Metallquader gleicher Grundfläche, gleicher Masse und der spezifischen Wärmekapazitäten $c_{Blei} = 0{,}129 \frac{kJ}{kg \cdot K}$, $c_{Eisen} = 0{,}452 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ und $c_{Titan} = 0{,}52 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ haben eine Temperatur von 200° C. Sie werden gleichzeitig auf einen Eisblock gestellt.
   Welcher der Quader sinkt am meisten ein?

10. Die spezifische Wärmekapazität von Körpern kann sehr einfach durch Mischungsversuche bestimmt werden.
    Gibt man 10 g Silber der Temperatur 200° C in 200ml Wasser der Temperatur 20,0° C, ergibt sich nach einiger Zeit eine Mischtemperatur von 20,5° C.
    Berechne die spezifische Wärmekapazität von Silber.

11. Bei einem Schülerversuch werden 200 ml Wasser der Temperatur 20° C und 100 ml Wasser der Temperatur 85° C in einen Styroporbecher geschüttet. Die Mischungstemperatur beträgt 39° C.
    Berechne um wieviel sich die innere Energie des Wassers im Styroporbecher erhöht hat.

12. Wie verhält sich das Land-Seewind-System bei einer sternklaren Nacht?

13. Eine Kugel rollt reibungsfrei eine schiefe Ebene hinunter und anschließend waagrecht weiter. Wie muß man den Versuch gestalten, damit der Vorgang reversibel ist, das heißt die Kugel anschließend den gleichen Weg die schiefe Ebene wieder hinauf rollt?

14. Schiebt man einen Wagen auf einer waagrechten Unterlage kurz an, so nimmt seine Geschwindigkeit aufgrund der Reibung immer mehr ab und er kommt schließlich zur Ruhe.
    a. Ist der Vorgang reversibel oder irreversibel? (Begründung)
    b. Wie muß der Versuch gestaltet werden, damit der Wagen aus der Ruhe wieder auf die Anfangsgeschwindigkeit beschleunigt wird?
    (Tip: äußere Kräfte sind zugelassen.)

3. Die Änderung des Aggregatzustandes

Bei den bisherigen Versuchen wurde die Temperatur von Körpern immer nur soweit geändert, dass sie während des Versuchs jeweils fest, flüssig oder gasförmig blieben. Das heißt, ihr Aggregatzustand hat sich nicht verändert.
Bevor wir untersuchen, was bei einer Änderung des Aggregatzustandes geschieht, betrachten wir das Teilchenmodell bei festen, flüssigen und gasförmigen Körpern etwas näher.

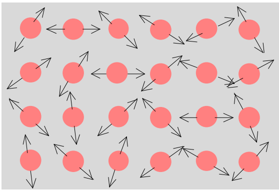


Abb. 43.1: fester Aggregatzustand

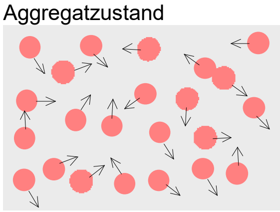


Abb. 43.2: flüssiger Aggregatzustand

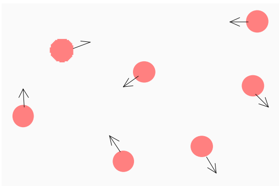


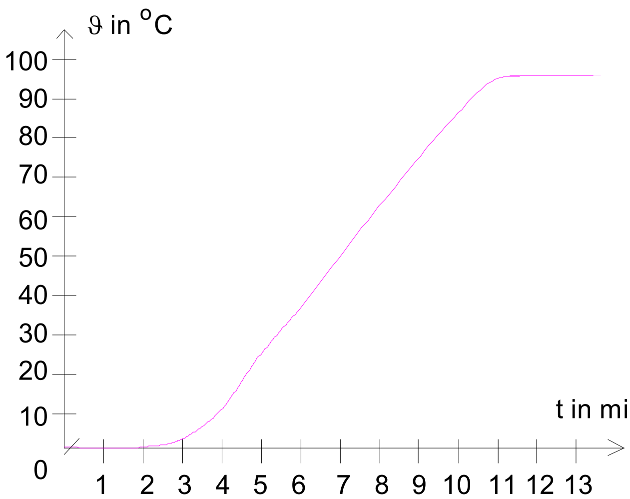
Abb. 43.3: gasförmiger Aggregatzustand

Fester Aggregatzustand (siehe Abb. 43.1):
Ein Festkörper hat einen regelmäßigen gitterförmigen Aufbau. Dabei sind die Teilchen (Atome oder Moleküle) fest an ihre Gitterplätze gebunden. Sie führen um diese Gitterplätze herum Schwingungen aus.
Flüssiger Aggregatzustand (siehe Abb. 43.2):
Eine Flüssigkeit hat keinen regelmäßigen Aufbau. Die Teilchen sind nur leicht an andere Teilchen gebunden. Sie können sich in der gesamten Flüssigkeit bewegen.
Gasförmiger Aggregatzustand (siehe Abb. 43.3):
Auch ein Gas weist keinen regelmäßigen Aufbau auf. Die Bindung mit anderen Teilchen ist sehr viel geringer als in Flüssigkeiten. Sie können meist vernachlässigt werden. Die Teilchen können sich im gesamten Gasraum frei bewegen.

Untersuchen wir nun, was geschieht, wenn sich der Aggregatzustand eines Körpers ändert. Dazu stellen wir einen Becherglas, in dem sich ein Eis-Wasser-Gemisch der Temperatur 0° C befindet, auf eine Heizplatte und messen in festen Zeitabständen die Temperatur.

Zeit t in min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ϑ in °C	0	0	0	2	14	26	38	50	62	74	86	96	96

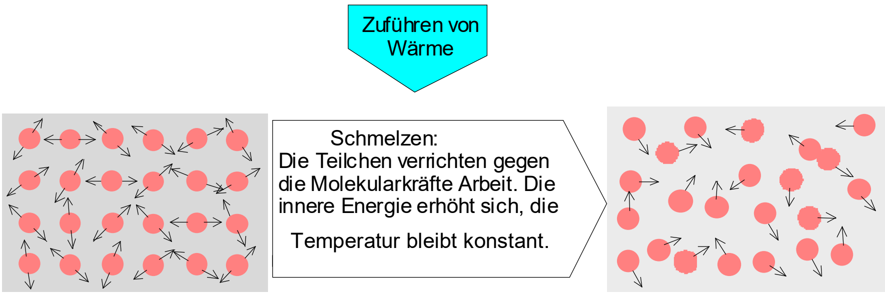
t-ϑ-Diagramm:



Das t-ϑ-Diagramm zeigt, dass bei 0° C (Schmelztemperatur von Wasser) und bei 96° C (Siedetemperatur von Wasser) die Temperatur für einige Zeit konstant bleibt, obwohl die Heizplatte kontinuierlich Wärme an das Eis bzw. Wasser abgibt. Um dieses Phänomen zu erklären betrachten wir die Änderung der Aggregatzustände und der damit verbundenen energetischen Prozesse mit Hilfe des Teilchenmodells.

3.1 Das Schmelzen

Wird einem festen Körper kontinuierlich Wärme zugeführt, beginnt er zu schmelzen. Er geht dabei vom festen in den flüssigen Aggregatzustand über. Betrachten wir den Schmelzvorgang unter Zuhilfenahme des Teilchenmodells genauer.



fester Aggregatzustand flüssiger Aggregatzustand

Die Energie, die man zum Schmelzen eines Körpers benötigt, nennt man Schmelzenergie E_s. Da jedes Teilchen beim Schmelzen im Mittel die gleiche Arbeit verrichten muß, ist die Schmelzenergie direkt proportional zur Teilchenanzahl und somit auch zur Masse des Körpers.
Der Quotient aus Schmelzenergie E_s und Masse m ist eine Materialkonstante. Man nennt ihn spezifische Schmelzenergie s.

Tab. 44.1:

Stoff	Schmelz-temperatur in °C	spezifische Schmelz-energie in $\frac{kJ}{kg}$
Ethanol	-114	108
Queck-Silber	-38,9	11,8
Eis	0	334
Blei	327	23
Gold	1063	65,7

Spezifische Schmelzenergie: $s = \frac{E_s}{m}$

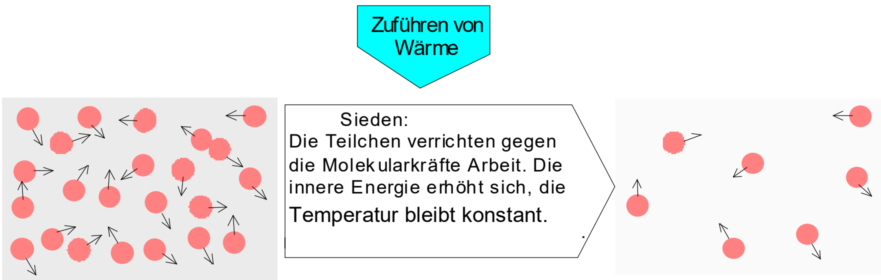
Meßeinheit: [s] = $1 \frac{kJ}{kg}$

3.2 Das Erstarren

Beim Übergang vom flüssigen in den festen Aggregatzustand wird Energie frei. Man nennt sie Erstarrungsenergie E_E. Da beim Erstarren genausoviel Energie frei wird, wie zum Schmelzen aufgewendet werden muss, ist die spezifische Erstarrungsenergie eines Körpers genauso groß wie seine spezifische Schmelzenergie.

3.3 Das Sieden

Wird einem flüssigen Körper kontinuierlich Wärme zugeführt, beginnt er zu sieden, die Flüssigkeit beginnt zu verdampfen. Der Körper geht dabei vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand über. Betrachten wir den Siedevorgang unter Zuhilfenahme des Teilchenmodells genauer.



flüssiger Aggregatzustand gasförmiger Aggregatzustand

Tab. 44.1:

Stoff	Verdampfungstemperatur in °C	spezifische Verdampfungsenergie in $\frac{kJ}{kg}$
Ethanol	78,3	840
Queck-Silber	356,9	285
Wasser	100	2256
Blei	1750	8600
Gold	2677	1650

Die Energie, die man zum Verdampfen eines Körpers benötigt, nennt man Verdampfungsenergie E_V. Da jedes Teilchen beim Verdampfen im Mittel die gleiche Arbeit verrichten muß, ist die Verdampfungsenergie direkt proportional zur Teilchenanzahl und somit auch zur Masse des Körpers. Der Quotient aus Verdampfungsenergie E_V und Masse m ist eine Materialkonstante. Man nennt ihn spezifische Verdampfungsenergie r.

Spezifische Verdampfungsenergie: $r = \frac{E_V}{m}$

Meßeinheit: $[r] = 1\frac{kJ}{kg}$

3.4 Das Kondensieren

Beim Übergang vom gasförmigen in den flüssigen Aggregatzustand wird Energie frei. Man nennt sie Kondensationsenergie E_K. Da beim Kondensieren genausoviel Energie frei wird, wie zum Verdampfen aufgewendet werden muß, ist die spezifische Kondensationsenergie eines Körpers genauso groß wie seine spezifische Verdampfungsenergie.

3.5 Das Verdunsten

Teilchen einer Flüssigkeit können auch unterhalb der Siedetemperatur vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand übergehen. Man nennt diesen Vorgang Verdunsten. Beim Verdunsten müssen die Teilchen der Flüssigkeit zum einen Arbeit gegen die Molekularkräfte verrichten, zum andern verrichten sie auch Ausdehnungsarbeit gegen den herrschenden Luftdruck. Somit können nur Teilchen, die eine deutlich höhere kinetische Energie als die meisten anderen Flüssigkeitsmoleküle haben, die Flüssigkeit verlassen. Daraus resultiert aber, dass sich die mittlere kinetische Energie der restlichen Flüssigkeitsteilchen verringert und die Temperatur in der Flüssigkeit abnimmt.
Dies zeigt auch folgender Versuch: Wir umhüllen das Vorratsgefäß eines Thermometers mit Watte und träufeln auf die Watte etwas Spiritus. Dass der Spiritus verdampft, erkennt man daran, dass das Thermometer eine stetig fallende Temperatur anzeigt und außerdem nach kurzer Zeit der gesamte Raum nach Spiritus riecht.
Die folgenden Beispiele zeigen, dass das Phänomen Verdunsten häufig in unserem Alltag vorkommt.

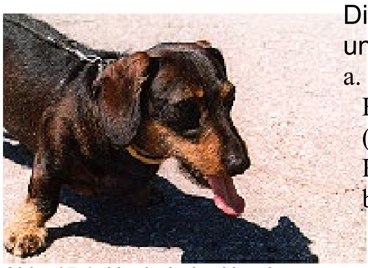


Abb. 45.1: Hechelnder Hund

a. Die Tiere verdunsten Wasser um sich abzukühlen. So verdunstet der Hund beim Hecheln Wasser auf der Zunge, den Atemwegen und der Lunge (siehe Abb. 45.1). Die größte Wärmeabgabe erfolgt dabei über die großflächige Riechschleimhaut, an der der warme Atem vorbeiströmt. Die Verdunstungskälte bewirkt eine Abkühlung des Tieres.

b. Auch der Mensch verdunstet Wasser, um sich abzukühlen. Die Haut gibt durch Schweißbildung in etwa die gleiche Wassermenge ab wie beim Ausatmen.

Wie wichtig die Verdunstung für die Regulation der Körpertemperatur ist, zeigt der 1798 von Blagden, einem Sekretär der Royal Society, durchgeführte Versuch. Er begab sich eine dreiviertel Stunde lang in einen Raum, dessen Luftemperatur 126 °C betrug und in dem die Luftfeuchtigkeit sehr gering war. Anschließend verließ er den Raum ohne gesundheitliche Folgen, hatte aber großen Durst. Ein zum Vergleich mitgeführtes Beefsteak war in der Dreiviertelstunde so gegart worden, dass es ganz hart war.

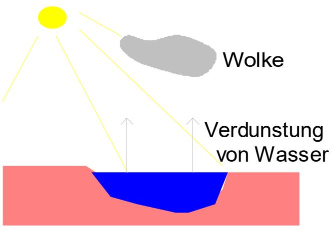


Abb. 46.1: Wolkenbildung durch Verdunsten

c. Der Waldstorch brütet auf Baumwipfeln und ist daher stark der Sonnenstrahlung ausgesetzt. Um sich abzukühlen, uriniert er häufig auf seine Beine. Der verdunstende Urin bewirkt eine Abkühlung des Vogels.

d. Bei Gewässern verdunstet kontinuierlich ein Teil des Wassers (siehe Abb. 46.1). Die Wassermoleküle sammeln sich in der Atmosphäre und sind so für die Wolkenbildung verantwortlich.

Aufgaben:

1. In einen Gefrierschrank wird 20 ml Wasser der Temperatur 20° C gegeben.
   a. Wieviel Wärme wird dem Wasser entzogen, bis es eine Temperatur von 0° C hat?
   b. Wieviel Wärme wird dem Wasser entzogen, bis es ganz zu Eis erstarrt ist?

2. 0,5 l Wasser der Temperatur 100° C sollen durch Wärmezufuhr verdampft werden.
   a. Berechne die dazu benötigte Wärmemenge.
   b. Wieviel Liter Wasser könnte man mit der in Teilaufgabe 2.a berechneten Wärmemenge von 20° C auf 100° C erwärmen?

3. Zur Kühlung gibt man in 200 ml Limonade der Temperatur 23° C 10 g Eis der Temperatur 0° C.
   Berechne die Mischtemperatur.

4. Beim Öffnen eines Kochtopfes strömt Wasserdampf aus. 0,2 g dieses Wasserdampfes kondensieren im Gesicht der Köchin, die dem Topf zu nahe gekommen ist.
   a. Berechne die freigewordene Wärme, wenn das kondensierte Wasser am Ende die Körpertemperatur angenommen hat.
   b. Wieviel Liter Wasser müssen von 45° C auf 37° C heruntergekühlt werden, damit die gleiche Wärme frei wird, wie in der Aufgabe 4.a berechnet?

5. Warum bläst man über die Oberfläche einer Suppe, wenn man sie schnell abkühlen möchte?

6. Warum hechelt ein Hund bei großer Hitze?

4. Das ideale Gas

Bei den meisten Wärmekraftmaschinen wie zum Beispiel der Gasturbine oder dem Benzinmotor, wird mit Hilfe eines Gases innere Energie in mechanische Arbeit umgewandelt.
Bevor wir in den nächsten Kapiteln die technischen Bestandteile dieser Wärmekraftmaschinen betrachten, untersuchen wir näher, wie sich Gase bei Druck-, Temperatur- und Volumenänderungen verhalten. Dabei beschränken wir uns der Einfachheit halber auf ideale Gase. Das sind Gase, deren anziehende Molekularkräfte so gering sind, dass man diese Kräfte vernachlässigen kann. Wir können uns also unter einem idealen Gas viele harte Kugeln vorstellen die im Raum herum fliegen. Die Kugeln ändern ihre Flugbahn nur dann, wenn sie entweder auf andere Kugeln oder auf einen Gegenstand treffen.

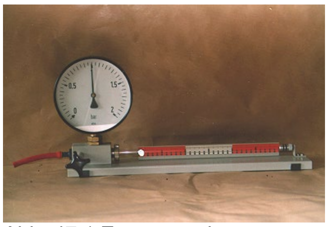


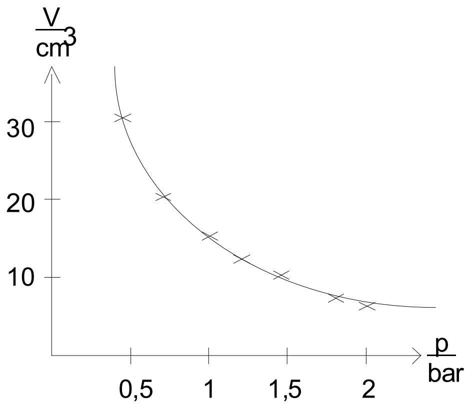
Abb. 47.1 Zusammenhang von Volumen und Druck beim idealen Gas.

Um eine bestimmte Menge des idealen Gases beschreiben zu können, benötigt man folgende Größen: Volumen, Druck und Temperatur des Gases. Wie diese Größen voneinander abhängen, wird im folgenden untersucht.

Zusammenhang von Volumen und Druck:
Wir verändern bei konstant gehaltener Temperatur den Druck p eines idealen Gases (hier Luft) und messen, wie sich sein Volumen V verändert (siehe Abb. 47.1). Die Gasmenge wird während des gesamten Versuchs konstant gehalten.

p/bar	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0
V/cm^3	30	21	15	13	10	8,7	7,4

Um den Zusammenhang zwischen p und V zu erkennen, zeichnet man ein p-V-Diagramm.



Der Graph ist eine Hyperbel. Daraus folgt:

I. $V \sim \frac{1}{p}$ bei konstanter Temperatur T

Das ist das Boyle-Mariottesche Gesetz.

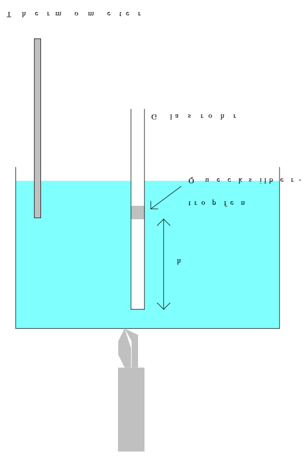


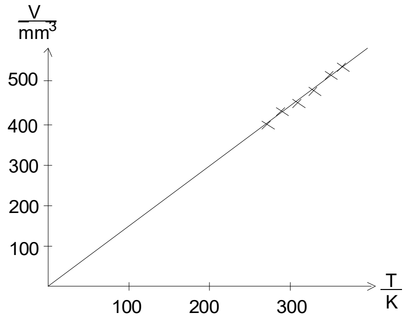
Abb. 47.2: Zusammenhang von Volumen und Temperatur bei einem idealen Gas

Zusammenhang von Volumen und Temperatur:
Wir verändern bei konstantem Druck die Temperatur T eines Gases und messen, wie sich sein Volumen V verändert. Dazu geben wir ein unten geschlossenes Glasrohr, das innen eine Querschnittsfläche von 4 mm^2 hat und von einem Quecksilbertropfen verschlossen ist, in ein Wasserbad (siehe Abb. 47.2). Das Wasserbad wird nun so langsam erwärmt, dass die

Temperatur T des Gases stets gleich der Temperatur des Wassers ist. Bei der Erwärmung des Gases erhöht sich sein Volumen gerade so weit, dass der Druck des Gases gleich der konstanten Summe aus Atmosphärendruck und Schweredruck des Quecksilbertropfens ist. Der Druck bleibt also konstant. Neben dem Druck wird auch die Gasmenge während des gesamten Versuchs konstant gehalten.
Das Volumen V des Gases berechnet sich bei diesem Versuch folgendermaßen: $V = 4mm^2 \cdot h$.

T / K	273	293	313	333	353	368
V / mm^3	400	430	459	491	518	538

Um den Zusammenhang zwischen T und V zu erkennen, zeichnet man ein T-V-Diagramm.



Der Graph ist eine Gerade. Daraus folgt:

II. $V \sim T$ bei konstantem Druck p
Das ist das Gay-Lussacsche Gesetz.

Aufgrund der Abhängigkeit des Volumens vom Druck und der Temperatur ergibt sich aus I und II.: $V \sim \frac{T}{p}$

bzw. $\frac{p \cdot V}{T} = \text{konstant}.$

Ändert man also den Zustand einer bestimmten Menge des idealen Gases, so bleibt der Quotient pV/T immer konstant. Wird also eine bestimmte Menge Gas von einem Anfangszustand (bezeichnet mit dem Index 1) in einen Endzustand gebracht (bezeichnet mit dem Index 2), so ergibt sich folgende Gleichung:

Zustandsgleichung des idealen Gases:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

1: Anfangszustand des Gases
2. Endzustand des Gases

Anmerkung: 1. Weitere Versuche ergeben, dass die oben angegebene Zustandsgleichung für alle idealen Gase gilt.

2. Die Zustandsgleichung des idealen Gases gilt für das Gas nur dann, wenn seine Menge während des Versuchs konstant bleibt.

Aufgaben:

1. Eine leere verschlossene Mineralwasserflasche wird von einem Raum der Lufttemperatur 21 °C (p = 1,02 bar) in die Sonne gestellt und erwärmt sich auf eine Temperatur von 31 °C.
   Berechne den Luftdruck in der Flasche.

2. Im sechzehnten Jahrhundert wurde die Luftpumpe entwickelt.
   Welcher Druck ist in einer Kugel (V_K = 0,11 m^3), wenn bei der Luftpumpe (V_P = 1,2 dm^3) 18 Kolbenzüge gemacht wurden und am Anfang in der Kugel ein Luftdruck von 1,013 bar herrschte?

3. Ein Dorsch wird mit einem Schleppnetz sehr schnell aus einer Tiefe von 270 m an die Wasseroberfläche gebracht. Durch die Ausdehnung des Gases in der Schwimmblase (20 cm^3 in 270 m Tiefe) drückt es ihm den Darm aus dem Maul heraus.
   Berechne das Volumen des Gases in der Schwimmblase, wenn der Dorsch an die Wasseroberfläche gelangt ist.

4. Die Tiefsee ist der Bereich, der sich mehr als 200 m unter dem Meeresspiegel befindet. Dort gibt es Fischarten, die in der Nacht bis an die Wasseroberfläche steigen.
   Ein Tiefseefisch schwimmt bei konstanter Körpertemperatur aus einer Tiefe von 600 m an die Wasseroberfläche. Wieviel Luft muss ein Fisch, ablassen, wenn seine Schwimmblase ein (konstantes) Volumen von 5 cm^3 hat?
   Nimm zur Vereinfachung an, dass der Fisch erst an der Wasseroberfläche die Luft aus der Luftblase abgibt.

5. Die Luft in einem Backofen (l = 40 cm, b =40 cm, h = 30 cm) wird von 20 °C auf 200 °C aufgewärmt. Der Luftdruck beträgt 1,0 bar.
   a. Berechne den Druck im Inneren des Herdes, wenn bei der Erwärmung keine Luft aus dem Herd strömen kann.
   b. Berechne das Volumen der Luft, die aus dem Herd strömt, wenn der Innenraum des Herdes nicht luftdicht ist.

6. Im Jahr 1891 stieg Berson mit einem Ballon auf eine Höhe von 10 km. Der Ballon konnte maximal 8400 m^3 Gas fassen. Die Temperatur auf dem Erdboden betrug 30 °C, es herrschte ein Luftdruck von 1,0 bar. In 10 km Höhe betrug die Temperatur - 30 °C, bei einem Luftdruck von 0,28 bar.
   Welches Volumen Gas war auf dem Erdboden in dem Ballon, wenn in der genannten Höhe der Ballon voll gespannt war?

5. Die technische Nutzung der inneren Energie


Abb. 50.1: Windmühle

Die uns von der Natur zur Verfügung stehende mechanische Energie kann häufig technisch genutzt werden. Denken wir nur an die Windmühlen, bei denen die kinetische Energie der Luft benutzt wird, um Mahlsteine anzutreiben (siehe Abb. 50.1). Oder betrachten wir einmal eine an einem Fluß liegende Mühle. Hier wird die kinetische Energie des Wassers zum Antreiben von Wasserrädern benutzt, die wiederum Mahlsteine antreiben. Diese Maschinen haben jedoch zwei wesentliche Nachteile. Zum einen können sie nur dort aufgestellt werden, wo die Natur im ausreichenden Maß Energie in Form von Wind zur Verfügung stellt. Zum andern steht die von der Natur zur Verfügung gestellte technisch nutzbare mechanische Energie nur im begrenzten Maß zur Verfügung.
Diese Nachteile treten bei der Verbrennung fossiler Energieträger wie zum Beispiel Holz, Kohle oder Erdöl nicht auf. Durch die Verbrennung kann an jedem Ort beliebig viel innere Energie zur Verfügung gestellt werden, die zum Teil in mechanische Energie umgewandelt werden kann. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe hat auch Nachteile. So ist zum Beispiel das bei der Verbrennung entstehende Kohlendioxyd zum Teil für den Treibhauseffekt verantwortlich.
Wir untersuchen nun, wie man mit Hilfe von Wärmekraftmaschinen die innere Energie in mechanische Energie umwandeln kann.

5.1. Physikalische Grundlagen der Wärmekraftmaschinen; das Perpetuum mobile zweiter Art

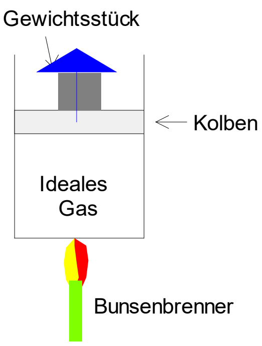


Abb. 50.2: Erwärmen eines idealen Gases

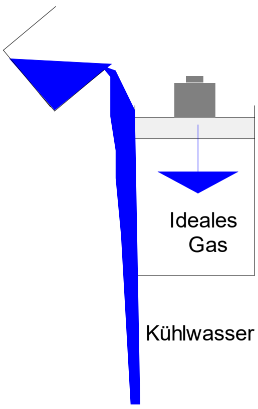
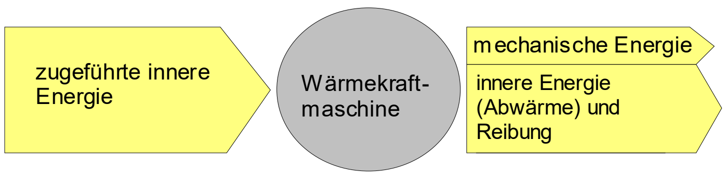


Abb. 50.3: Abkühlen eines idealen Gases

Alle Wärmekraftmaschinen arbeiten nach dem gleichen Prinzip.
Zuerst wird an ein Gas kurzzeitig Wärme übertragen (siehe Abb. 50.2). Dadurch erhöht sich seine innere Energie und damit auch die Temperatur des Gases. Wie wir aus der Gleichung des idealen Gases leicht ablesen können, steigt dadurch der Druck des Gases an. Das Gas drückt somit den Kolben entgegen dem äußeren Druck nach oben. Durch das Verschieben des Kolbens leistet das Gas Arbeit. Aufgrund des Energieerhaltungssatzes erfolgt eine Abnahme der inneren Energie und somit auch der Temperatur. Der Kolben wird um so weiter heraus gedrückt, je höher die Temperatur des erwärmten Gases ist. Das Gas leistet dann mehr Arbeit.
Da man es bei einer Wärmekraftmaschine nicht bei einer einmaligen Verschiebung des Kolbens belassen möchte, ist es notwendig den Kolben in seine Ursprungsstellung zurückzuführen. Dazu kühlt man das Gas mit Hilfe einer Kühlflüssigkeit ab (siehe Abb. 50.3). Wie wir auch hier sehr leicht an der Gleichung des idealen Gases sehen können, sinkt der Druck des Gases ab. Da nun der von außen auf den Kolben angreifende Druck größer ist als der Druck des Gases, wird der Kolben zurückgedrängt. Je geringer die Temperatur des abgekühlten Gases ist, desto weiter schiebt sich der Kolben in den Zylinder zurück.
Nun kann der gesamte Prozeß wieder von vorne beginnen. Wir haben damit eine periodisch arbeitende Maschine erhalten, die zum einen Teil die ihr zugeführte innere Energie in mechanische Arbeit umwandelt, zum andern den Rest der ihr zugeführten inneren Energie in Form von Abwärme an die Kühlflüssigkeit abgibt. Dieser Zusammenhang soll mit dem untenstehenden Energie-Fluss-Diagramm nochmals verdeutlicht werden.



In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu erkennen, dass jede Wärmekraftmaschine, um periodisch arbeiten zu können, innere Energie in Form von Abwärme abgibt. Bei dem von uns gewählten Beispiel wäre ohne diese Form der Energieabgabe das Zurückdrängen des Kolbens in seine ursprüngliche Lage nur unter der Aufwendung von Arbeit möglich. Die dazu aufzuwendende Arbeit ist aber genau so groß wie die Arbeit, die zuvor von dem Gas verrichtet wurde. In der Summe stünde uns also keine Arbeit zur Verfügung.
Dabei muß nach dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre die Temperatur des Gases in dem Kolben höher sein als die Temperatur der Kühlflüssigkeit. Die Abwärme kann aufgrund ihrer geringen Temperatur nicht mehr zur anschließenden Erwärmung des Gases im Kolben herangezogen werden. Die innere Energie, die in der Abwärme steckt, kann von der Maschine nicht mehr genutzt werden. Somit ist bei einer periodisch arbeitenden Wärmekraftmaschine eine vollständige Umwandlung von innerer Energie in mechanische Energie nicht möglich. Diese Aussage ist gleichwertig mit der bereits bekannten Aussage des zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre. Also kann man den zweiten Hauptsatz der Wärmelehre auch folgendermaßen formulieren:

> Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre:
> Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die nichts anderes bewirkt als die Umwandlung von innerer Energie in mechanische Energie und die Abkühlung eines Wärmereservoirs.

Anmerkungen: 1. Für den Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine gilt:

$$\eta = \frac{\text{mechanische Energie}}{\text{zugeführte innere Energie}} = \frac{\text{zugeführte innere Energie} - \text{(Abwärme und Reibung)}}{\text{zugeführte innere Energie}} = 1 - \frac{\text{Abwärme und Reibung}}{\text{zugeführte innere Energie}}$$

Da nach dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre bei einer periodisch arbeitenden Maschine immer Abwärme entsteht, ist ihr Wirkungsgrad nach oben hin beschränkt. Er ist somit immer kleiner als 1. Für die Beschränkung des Wirkungsgrades sind also nicht technische Unzulänglichkeiten, sondern der zweite Hauptsatz der Wärmelehre verantwortlich.

2. Wir hatten festgestellt, dass der Kolben um so weiter herausgetrieben wird, je höher die Temperatur des erwärmten Gases im Kolben ist und dass der Kolben um so weiter in den Zylinder zurückgedrängt wird, je geringer die Temperatur des abgekühlten Gases ist. Das heißt aber, dass die von der Wärmekraftmaschine verrichtete Arbeit und damit auch ihr Wirkungsgrad um so größer ist, je höher die Temperaturdifferenz zwischen der höchsten und der geringsten Temperatur des Gases in dem Kolben ist.
3. Die Abwärme kann aufgrund ihrer geringen Temperatur nicht mehr zum Antrieb der Wärmekraftmaschine benutzt werden. Sie erwärmt die Umwelt. Man sagt: Die durch die Abwärme technisch nicht genutzte innere Energie ist entwertet.
4. Eine periodisch arbeitende Maschine, die innere Energie vollständig in mechanische Energie umwandeln kann, nennt man Perpetuum mobile zweiter Art. Der zweite Hauptsatz besagt, dass das Perpetuum mobile zweiter Art nicht existieren kann.

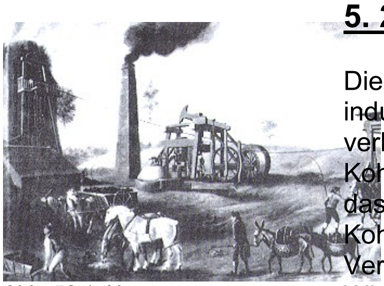
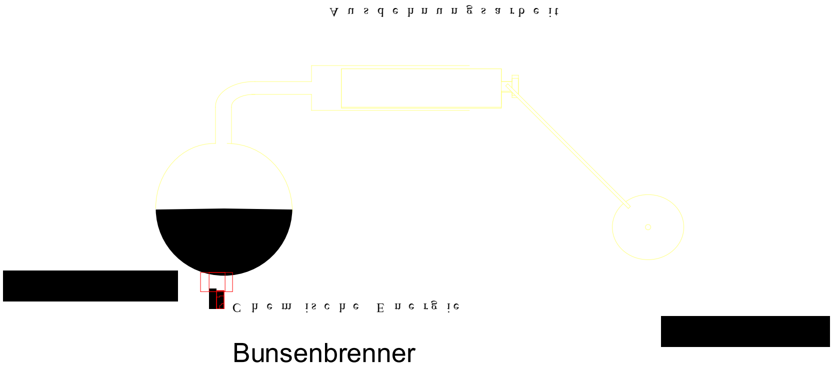


Abb. 52.1: Newcomen - Dampfmaschine 1682

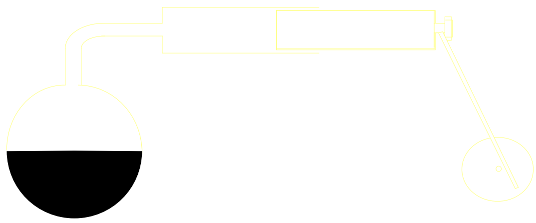
5. 2 Die atmosphärische Dampfmaschine

Die atmosphärische Dampfmaschine ist untrennbar mit dem Beginn der industriellen Revolution am Anfang des achtzehnten Jahrhunderts verbunden (siehe Abb. 51.1). Sie wurde dazu benutzt, das Wasser aus Kohlengruben zu pumpen. Ihr Wirkungsgrad von 1 % war so schlecht, dass über sie gewitzelt wurde, man bräuchte für ihren Betrieb eine eigene Kohlengrube. Verständlicherweise drang man sehr schnell auf Verbesserungen, so dass diese Art der Dampfmaschine bald veraltet war. Wir betrachten sie deshalb genauer, weil sich mit ihr sehr gut die teilweise Umwandlung von innerer Energie in mechanische Arbeit zeigen lässt.

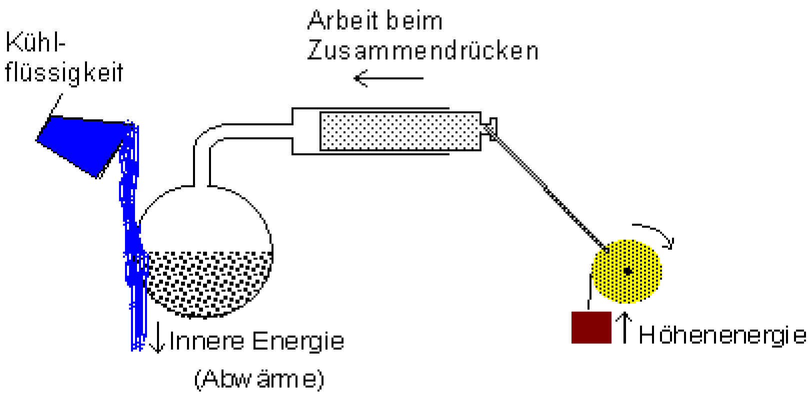
Die folgenden Abbildungen zeigen den prinzipiellen Aufbau und die Funktionsweise einer atmosphärischen Dampfmaschine.



Dem Wasser im Glaskolben wird durch Verbrennung Wärme zugeführt. Dadurch verdampft ein Teil des Wassers. Der entstehende Wasserdampf drückt den Kolben des Kolbenprobers nach rechts. Über eine feste Rolle wird ein Massenstück hochgehoben. Dabei wird Hubarbeit verrichtet.



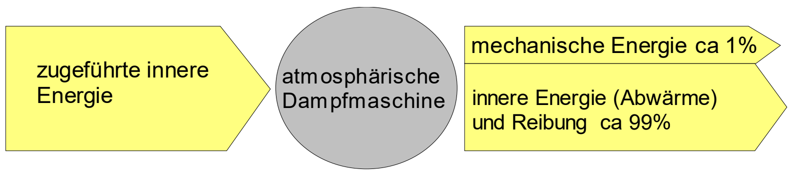
Wenn der Kolben des Kolbenprobers genügend weit nach rechts geschoben wurde führt man dem Wasser keine Wärme mehr zu.



Wenn man das Wasser im Glaskolben abkühlt, wird ihm Wärme entzogen. Dadurch kondensiert der Wasserdampf, so dass in dem Glaskolben und dem Kolbenprober ein Unterdruck entsteht. Daher schiebt der Atmosphärendruck den Kolben wieder nach links. Über eine feste Rolle wird das Massenstück wiederum hochgehoben. Dabei wird Hubarbeit verrichtet.
Die atmosphärische Dampfmaschine hat ihren Namen aufgrund der Tatsache, dass der Atmosphärendruck den Kolben beim Abkühlvorgang in den Kolbenprober zurückdrängt.

Wiederholt man den Vorgang des Erhitzens und des anschließenden Abkühlens immer wieder, erhält man eine periodisch arbeitende Maschine.

Betrachten wir nun noch die innere Energie-mechanische Energiebilanz der atmosphärischen Dampfmaschine:



5.3 Verbrennungsmotoren

Bei Verbrennungsmotoren wird die bei der Verbrennung frei werdende innere Energie zum Teil in mechanische Energie umgewandelt.

Der Viertakt-Ottomotor:
Wir betrachten nun den weitverbreitetsten Automotor, nämlich den Viertakt-Ottomotor. Bei ihm unterscheidet man vier Arbeitstakte.

1. Ansaugtakt (siehe Abb. 53.1): Das vom Vergaser kommende Benzin-Luft-Gemisch wird durch das geöffnete Einlaßventil vom Kolben angesaugt.
2. Verdichtungstakt (siehe Abb. 53.2): Nachdem das Einlaßventil geschlossen wurde, drückt der Kolben das Benzin-Luft-Gemisch zusammen. Dabei erwärmt sich das Benzin-Luft-Gemisch.
3. Arbeitstakt (siehe Abb. 53.3): Das zusammengedrückte Benzin-Luft-Gemisch wird von der Zündkerze entzündet. Chemische Energie wird in innere Energie umgewandelt. Das entstandene Verbrennungsgas hat aufgrund der hohen Temperatur einen großen Druck und drückt daher den Kolben wieder nach unten. Dabei verrichtet das Verbrennungsgas Arbeit und verringert dadurch seine Temperatur.
4. Auspufftakt (siehe Abb. 53.4). Das Verbrennungsgas wird wegen des sich nach oben bewegenden Kolbens, durch das geöffnete Auslaßventil in die Auspuffanlage gedrückt.

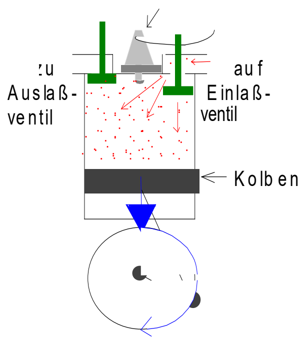


Abb. 53.1: Ansaugtakt

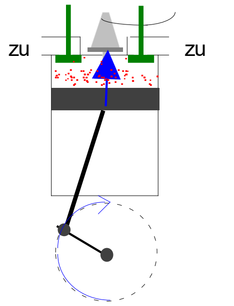


Abb. 53.2: Verdichtungstakt

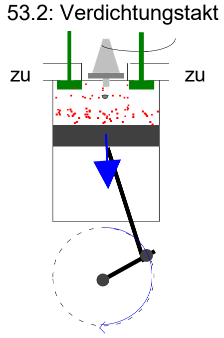


Abb. 53.3: Arbeitstakt

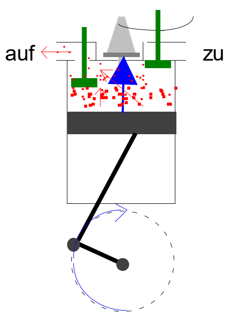


Abb. 53.4: Auspufftakt

Anschließend beginnt der Vorgang mit dem Ansaugtakt von neuem.

Der Kolben ist mit der Kurbelwelle verbunden. Diese setzt die Bewegung des Kolbens in eine Drehbewegung um. Da nur beim einem der vier Takte, nämlich dem Arbeitstakt, Arbeit verrichtet wird, würde ein Motor mit einem Ventil nicht gleichmäßig laufen. Daher werden bei Autos mehrere Zylinder verwendet, deren Takte zeitlich gegeneinander versetzt sind.

Der Viertakt-Dieselmotor:
Der Dieselmotor hat keine Zündkerzen und keinen Vergaser. Bei ihm wird die im Ansaugtakt angesaugte Luft im Verdichtungstakt zusammengedrückt. Dadurch wird die Luft auf bis zu 900 °C erwärmt. Nun spritzt man das Dieselöl ein, das sich bei den hohen Temperaturen selbst entzündet.

Der Wirkungsgrad eines Ottomotors beträgt ungefähr 25%, der eines Dieselmotors zwischen 35% und 46%. Im Vergleich dazu erreichen die Muskeln von Hochleistungssportlern einen Wirkungsgrad von etwas über 30%. Sowohl bei den Motoren als auch bei den Muskeln wird der Teil der zur Verfügung gestellten inneren Energie, der nicht in mechanische Arbeit umgewandelt wird, in Form von Abwärme und Reibung abgegeben.