

Kapitel 1

Wärmelehre

K A P I T E L Z I E L E :

- Sie wissen, wie die drei Temperaturskalen Celsius, Fahrenheit und Kelvin festgelegt wurden und Sie sind in der Lage, die Gedanken, welche für die Festlegung der Kelvin – Temperaturskala gemacht wurden, wiederzugeben.
- Sie sind in der Lage, den Zusammenhang zwischen den drei Temperaturskalen mathematisch zu formulieren (auch die Herleitungsschritte, um die Umrechnungsformel selber aufzustellen) und Sie können von einer Temperaturskala in eine andere Temperaturskala umrechnen.
- Sie können mindestens je eine Eigenschaft für die drei Zustände (fest, flüssig und gasförmig) auf mikroskopischer und auf makroskopischer Ebene nennen.
- Sie verstehen den Unterschied zwischen den Begriffen "Temperatur", "Wärme" und "innere Energie" und können anhand eines Beispiels diese Begriffe erläutern. Auch können Sie die korrekte Definition von der "Temperatur" und von der "Wärme" wiedergeben.
- Sie sind in der Lage, die Begriffe "Wärmeleitung", "Konvektion" und "Wärmestrahlung" anhand eines Beispiels zu erklären, einige Eigenschaften zu nennen und je ein Beispiel zu geben.
- Sie verstehen die Bedeutung und den Gültigkeitsbereich der Formel für die Berechnung der Wärmemenge Q und können sie auf verschiedene Aufgaben korrekt anwenden.
- Sie können eine korrekte Gleichung bei Mischungsproblem – Aufgaben aufstellen, nach der gesuchten Grösse umformen und die Lösung korrekt darstellen.
- Sie verstehen die Bedeutung der Formeln für die Berechnung der Schmelz-/Erstarrungswärme und Verdampfungs-/Kondensationswärme. Auch sind Sie in der Lage, Mischungsproblem – Aufgaben zu lösen, falls Aggregatzustandsänderungen auftreten.
- Sie können die Formeln für die Längenausdehnung sowie für die Volumenausdehnung auf konkrete Situationen anwenden.
- Sie sind in der Lage, die Annahmen wiederzugeben, um ein ideales Gas von einem realen Gas zu unterscheiden.
- Für ein gegebenes Problem können Sie entscheiden, ob die Änderung der Grössen unter konstantem Druck p , oder unter konstantem Volumen V , oder unter konstanter Temperatur T stattgefunden hat und Sie sind in der Lage, das entsprechende Gesetz (das Gesetz von Gay – Lussac, das Gesetz von Boyle – Mariotte und das Gesetz von Amontons) korrekt anzuwenden.
- Sie sind in der Lage, das ideale Gasgesetz auf unterschiedliche Probleme anzuwenden, eine korrekte Gleichung aufzustellen und nach der gesuchten Grösse umzuformen.

1.1 Temperatur und Wärme

Der Begriff *Temperatur* stammt vom griechischen Wort "thermos" ab, was "warm" bedeutet. Erst mit der Erfindung des Thermometers konnte man genauere Aussagen über die Temperatur machen. Doch was ist die "Temperatur" überhaupt? Das wird in diesem Kapitel genauer untersucht!

Die ersten Thermometer stammen aus dem 17. Jahrhundert (Barock). Das rechts abgebildete Thermometer (Abbildung 1.1) stammt aus dieser Zeit. Unten im Hohlraum war Alkohol eingefüllt. Dehnt sich die Flüssigkeit durch die Erwärmung aus, so steigt sie in dem spiralförmig aufgewickelten dünnen Rohr auf. Wenn die Thermometer verschiedene dicke Steigrohre oder unterschiedlich geteilte Skalen hatten, konnten die Messungen der einzelnen Thermometer nicht miteinander verglichen werden. Diese Thermometer hatten noch keine Skalen mit Zahlenwerten, sondern sie unterschieden grob in Temperaturstufen, die in Worten unterscheidet wurden: "magnus frigidus" (grosse Kälte), "aer frigidus" (kalte Luft), "aer subfrigidus" (etwas kalte Luft), "aer temperatus" (milde Luft), "aer subcalidus" (etwas heisse Luft), "aer calidus" (heisse Luft) und "magnus calor" (grosse Hitze).

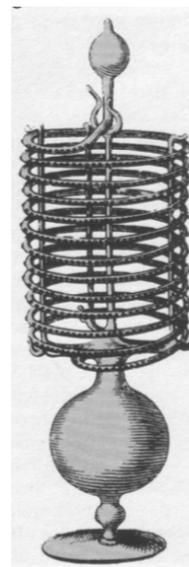


Abbildung 1.1:
Das erste Thermometer.

Gesucht wurde also eine Vorschrift, wie die Temperatur in vergleichbaren Zahlenwerten gemessen werden kann, das bedeutet: eine geeignete Skala für die Temperaturmessung.

1.1.1 Temperaturskalen

1.1.1.1 Celsius

Der aus Uppsala stammende schwedische Astronom Anders Celsius (1701 – 1744) griff die Idee auf, die Schmelztemperatur von Eis und die Siedetemperatur von Wasser als Temperaturfixpunkte zu verwenden. Er schlug 1742 vor: Der Abstand zwischen den Markierungen der beiden Fixpunkte soll in 100 gleiche Teile eingeteilt werden; dabei ist Quecksilber als Thermometerflüssigkeit zu verwenden. Allerdings betrug bei Celsius die Siedetemperatur des Wassers 0 Grad und die Schmelztemperatur von Eis 100 Grad. Erst später wurde die Skala umgedreht. Die beiden Fixpunkte sind damit allerdings noch nicht genau definiert: Man muss noch angeben, unter welchem Druck der Siede- und Schmelzpunkt betrachtet werden. Man hat sich auf einen Druck von 1013 mbar geeinigt.

1.1.1.2 Réaumur

Nach dem Franzosen René-Antoine Réaumur (1683 – 1757) ist eine Thermometerskala benannt, bei welcher der Abstand zwischen dem Siedepunkt und dem Schmelzpunkt des Wassers in 80 gleiche Teile unterteilt ist. Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts wurden Temperaturen oft in °R (Grad Réaumur) angegeben. Die Réaumurskala wird heute nicht mehr verwendet.

1.1.1.3 Fahrenheit

In den USA und in Jamaika (und nur noch teilweise in Grossbritannien und Kanada) ist heute noch die Fahrenheitskala im Gebrauch. Diese wurde noch vor der Celsiusskala, nämlich um 1714, von Daniel Gabriel Fahrenheit (1686 – 1736) aus Danzig (damals Deutschland, heute Polen) entwickelt. Fahrenheit verbrachte den grössten Teil seines Lebens in Holland (Amsterdam, Den Haag) und baute seine Thermometer in der heute noch üblichen Form und füllte einige mit Quecksilber, andere mit Alkohol. Er gilt als der Erfinder des Alkoholthermometers (1709) und des Quecksilberthermometers (1714). Offenbar angeregt durch einen Besuch bei Olaf Römer suchte er nach Temperaturfixpunkten für seine Messskala. Als einen Fixpunkt und als Nullpunkt seiner Thermometerskala wählte er die Temperatur einer Mischung aus Eis, festem Salmiak und Wasser ("Kältemischung", -17.7°C); diese Temperatur soll auch die tiefste

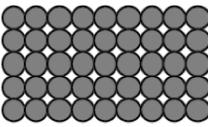
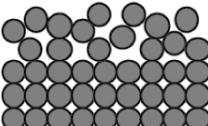
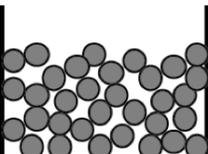
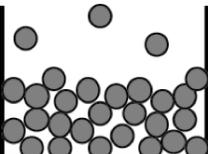
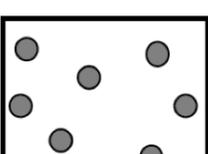
Temperatur	mikroskopische Modelle		makroskopische Eigenschaften
„niedrig“		idealer Festkörper Die Teilchen werden durch gegenseitige Kräfte an festen Plätzen gehalten. Sie schwingen leicht um die Gleichgewichtslage.	Ideale Festkörper sind starr. Festkörper dehnen sich bei Erwärmung geringfügig aus. Kristalle zeigen zusätzlich eine regelmässige äussere Struktur.
Schmelzpunkt , bzw. Erstarrungspunkt		Bei genügend heftiger thermischer Bewegung können sich die Teilchen vom ursprünglichen Platz im Festkörper entfernen.	Phasenübergänge schmelzen und erstarren
		ideale Flüssigkeit Die thermische Bewegung ist gerade so stark, dass sich die Teilchen einerseits gegeneinander (reibungsfrei) verschieben können, andererseits einander noch fast berühren.	Ideale Flüssigkeiten sind reibungsfrei, inkompressibel und passen sich jeder Gefässform an. Flüssigkeiten bilden eine horizontale Oberfläche und vergrössern bei Erwärmung ihr Volumen.
Siedepunkt, bzw. Kondensationspunkt		Bei starker Zunahme der thermischen Bewegung können die Teilchen mit genügend heftiger Bewegung den Teilchenverband ganz verlassen.	Phasenübergänge verdampfen und kondensieren
„hoch“		ideales Gas Die thermische Bewegung ist so heftig, dass die Abstände zwischen den Teilchen sehr gross sind und somit sich die Teilchen zwischen den elastischen Zusammenstössen frei und geradlinig bewegen können.	Gase können leicht zusammengepresst werden, sind flüchtig, füllen jeden Raum aus, sind sehr leicht und vermischen sich von selbst. Bei Erwärmung vergrössert sich der Druck auf die Gefässwände oder vergrössert sich dessen Volumen.

Abbildung 1.2: Die mikroskopischen und makroskopischen Eigenschaften für verschiedene Temperaturen.

1.1.5 Temperatur vs. Wärme

Die Temperatur ist für den Menschen primär eine Empfindungsqualität. Wir können dank den Sinneszellen in der Haut wärmere und kältere Körper unterscheiden. Diese Empfindung erlaubt es dem menschlichen Körper, seine ideale Temperatur von knapp 37°C aufrechtzuhalten. Entsprechend verfügt die menschliche Haut über Kältesensoren, die im Bereich 20°C bis 34°C besonders empfindlich sind, und über Wärmesensoren, die zwischen 37°C und 40°C ansprechen. Die Beurteilung der Temperatur nach dem Gefühl ist allerdings ziemlich unsicher, weil die Wärmeempfindung des Menschen nicht auf der physikalischen Temperatur, sondern auf dem Wärmestrom beruht und die "gefühlte Temperatur" deshalb erheblich von der tatsächlichen Temperatur abweichen kann.

Die Temperatur ist eine physikalische Grösse, die den Wärmezustand (den thermodynamischen Zustand) eines Körpers beschreibt: der Körper ist wärmer oder kälter; besser: der Körper hat eine höhere oder eine tiefere Temperatur. Deshalb bezeichnet man die Temperatur auch als eine *Zustandsgrösse*.

Demgegenüber ist die Wärme eine *Prozessgrösse*, die den Vorgang der Erwärmung oder Abkühlung eines Körpers beschreibt. Die Wärme muss einem Körper von aussen zugeführt werden, um ihn zu erwärmen, also um seine Temperatur bzw. seine sogenannte innere Energie zu erhöhen. Die Wärme wird dem Körper bei einer Abkühlung entzogen, er wird kälter, seine Temperatur nimmt ab und damit auch seine innere Energie.

Berühren sich zwei Materialien mit unterschiedlichen Temperaturen, so gleichen sich die Temperaturen aus, wie es in Abbildung 1.3 und in Abbildung 1.4 dargestellt wurde.

Das heisse Material sich ab, seine innere Energie wird und das kühle Material sich, seine innere Energie

Die aufgrund der Temperaturdifferenz übertragene Energie heisst [.....] =

Die Wärme beschreibt einen

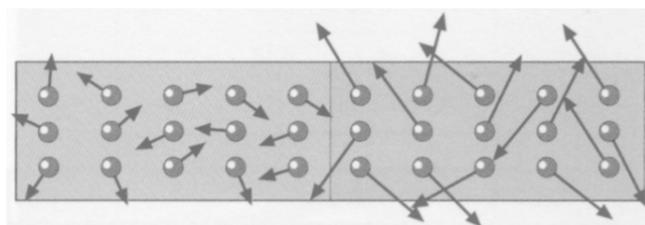


Abbildung 1.3: Wärme(energie) fliesst vom heissen System (rechts) zum kalten System (links),...

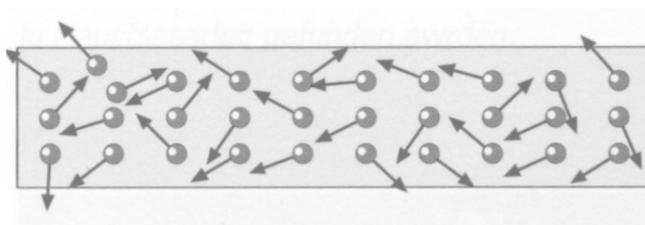


Abbildung 1.4: ... bis beide Systeme dieselbe Temperatur haben und keine Wärme mehr fliesst.

1.2 Spezifische Wärmen

1.2.1 Wärmetransport

Im letzten Kapitel haben Sie den Unterschied zwischen der Temperatur und der Wärme kennengelernt. Nun betrachten wir, wie die Wärme transportiert werden kann. Die Wärme kann grundsätzlich auf drei verschiedene Arten transportiert werden.

1.Art:

Darunter versteht man den Wärmetransport innerhalb eines Körpers oder durch die Kontaktfläche zweier Körper. Sie sorgt vor allem in Festkörpern (siehe Abbildung 1.5 für die Temperaturangleichung, während sie bei Flüssigkeiten und Gasen zwar auch vorkommt, aber fast immer durch die Konvektion (siehe unten) dominiert wird.

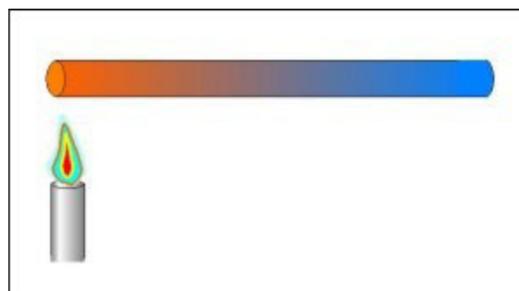


Abbildung 1.5: 1.Art des Wärmetransports

Sind in einem Festkörper unterschiedliche Temperaturen vorhanden, so heisst das, dass sich die Moleküle verschieden stark bewegen. Beim Stoss von raschen Molekülen gegen langsamere, wird im Durchschnitt der Stösse Bewegungsenergie auf die langsamere übertragen: die

die

Temperaturen gleichen sich an, es liegt ein thermisches Gleichgewicht vor. Genau das gleiche passiert, wenn wir einen heissen Gegenstand berühren: Unsere Hautmoleküle werden zu stärkeren Schwingungen gebracht, die Wärmesensoren melden das ans Gehirn und wir erfahren eine Wärmeempfindung.

Die Wärmeleitung passiert umso schneller, je grösser der Temperaturunterschied ΔT ist. Das heisst, dass die Menge an transportierter Wärme pro Zeit proportional zum Temperaturunterschied ansteigt. Die Wärmeleitung ist ebenfalls materialabhängig: so leitet beispielsweise das Glas die Wärme rund 10-mal besser als Kunststoffschäum. Die geringste Wärmeleitfähigkeit wird in Gasen beobachtet.

2.Art: _____:

In Flüssigkeiten und Gasen ist die Konvektion der wirkungsvollste Ausgleichsprozess, siehe Abbildung 1.6. In der Technik unterscheidet man die erzwungene von der Autokonvektion. Erstere wird mit Pumpen (z.B. in Heiz- und Kühlkreisen) oder Ventilatoren steuerbar eingesetzt. Die Autokonvektion äussert sich am eindrucksvollsten im täglichen Wettergeschehen und läuft nach folgendem Prinzip ab: Eine lokale Erwärmung in einer Flüssigkeit oder in einem Gas führt mit der damit verbundenen Ausdehnung zu einer lokal kleineren Dichte und damit weiter zu einer Auftriebskraft, die nun ihrerseits eine Zirkulation in Gang setzt. Der erwärmte Stoff steigt auf und nimmt die in den schnelleren Molekülen deponierte Energie mit sich (Wärmemitführung). Kühlerer Stoff aus der Umgebung fliesst nach und wird nun seinerseits erwärmt.

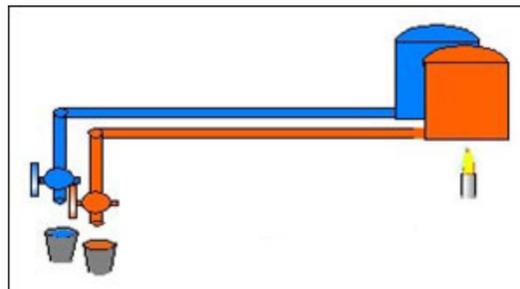


Abbildung 1.6: 2.Art des Wärmetransports

Beispiele: Lokale Aufwinde (für Gleitschirm- und Segelflieger), Abend- und Morgenwinde an Seeufern, die Erwärmung eines mit Heizkörpern ausgestatteten Raums durch die Konvektion der Luft, Wärmetransport durch die Zirkulation des Füllgases zwischen den zwei Scheiben einer Doppelverglasung. Wichtig ist die erzwungene Konvektion unseres Blutkreislaufs, welche neben anderen Funktionen die Körperwärme auf die Körperoberfläche transportiert.

Die Konvektion ist ein Beispiel einer natürlichen Wärmekraftmaschine. Eine Temperaturdifferenz ist Ursprung einer mechanisch geordneten Bewegung – der Zirkulationsströmung des Mediums –, der eine entsprechende makroskopische Bewegungsenergie zugeordnet werden kann. Diese wird zum Beispiel in Windenergieanlagen genutzt.

3.Art: _____:

Dass durch Strahlung Energie übertragen wird, ist uns von der Sonnenstrahlung her geläufig, wie in Abbildung 1.7 zu sehen ist. Vielleicht haben Sie auch schon die Strahlung eines heissen Zimmerofens oder eines heissen Motors gespürt. Dass wir selber auch Energie abstrahlen (emittieren), ist bereits weniger bekannt, kann aber sofort überzeugend nachgewiesen werden: Halten Sie die offenen Hände in etwa 1 cm Abstand vor die Wangen. An ihren Wangen spüren Sie die Strahlung der Hände und in den Handflächen die Strahlung der Wangen.

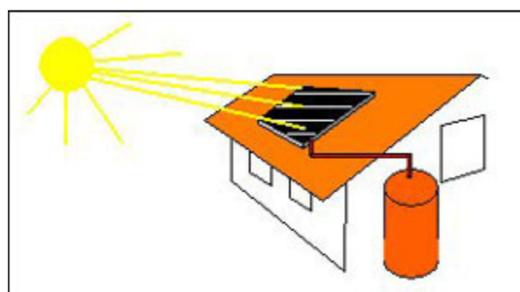


Abbildung 1.7: 3.Art des Wärmetransports

Alle Körper strahlen Energie ab, unabhängig davon, ob ein anderer Körper in der Umgebung vorhanden

1.2.3 Aggregatzustandsänderung und latente Wärme

Zu den interessantesten Erscheinungen der Wärmelehre gehört die Änderung der Zustandsform oder auch "Phase" eines Stoffes. Jeder Stoff kann grundsätzlich in drei verschiedenen Zustandsformen auftreten: fest, flüssig oder gasförmig (Aggregatzustände). Welche Zustandsform jeweils tatsächlich vorliegt, ist für einen bestimmten Stoff eine Frage der Temperatur und des Drucks. Die Änderung der Zustandsform findet also nur bei ganz bestimmten Temperaturen und Drücken statt, die von Stoff zu Stoff verschieden sind. Neben den erwähnten drei Zustandsformen gibt es noch zusätzliche Möglichkeiten: Ein fester Körper kann, bevor er flüssig wird, seine Kristallstruktur ändern, wobei seine Moleküle eine andere gegenseitige Stellung erhalten. Bei sehr hohen Temperaturen werden ausserdem alle mehratomigen Moleküle von Gasen oder Dämpfen in die einzelnen Atome gespalten (plasmaförmiger Zustand).

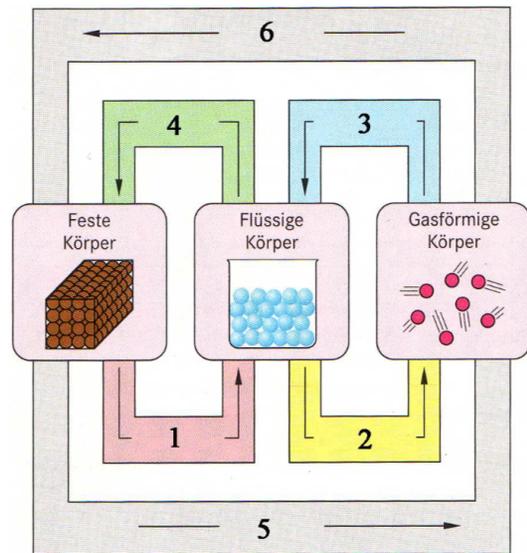


Abbildung 1.10: Übergang zwischen den verschiedenen Zuständen.

Benennen Sie in der folgenden Grafik (siehe Abbildung 1.10) die Änderung des Phasenzustands!

Übergang 1:

Übergang 4:

Übergang 2:

Übergang 5:

Übergang 3:

Übergang 6:

Wird einer Substanz Wärme zugeführt, so steigt normalerweise deren Temperatur an. Bei bestimmten Temperaturen (Schmelz- und Siedetemperatur) erhöht sich jedoch trotz Wärmezufuhr die Temperatur kurzzeitig nicht! Der Grund dafür sind Phasenübergänge. Bei den Phasenübergängen ändert sich der Zustand der Substanz. Im festen Zustand sind die Teilchen gitterförmig angeordnet; die Teilchen können sich nicht bewegen (sie zittern nur ein bisschen um ihre mittlere Position herum). Wenn genügend Energie zugeführt wird (\Rightarrow Schmelzwärme), so wird die Gitterstruktur zerstört und die Teilchen können sich bewegen: Die Substanz wird flüssig. Die Teilchen haben aber immer noch einen relativ kleinen Abstand zueinander. Beim Verdampfen erhalten die Teilchen soviel Energie (\Rightarrow Verdampfungswärme), dass sie sich von den benachbarten Teilchen entfernen können: Der Abstand zu den Nachbarteilchen ist nun sehr gross und die Teilchen stossen nur noch wenig zusammen. Die Substanz ist nun gasförmig. Die Erfahrung zeigt auch, dass die Schmelztemperatur = Erstarrungstemperatur, resp. die Siedetemperatur = Verflüssigungstemperatur ist.

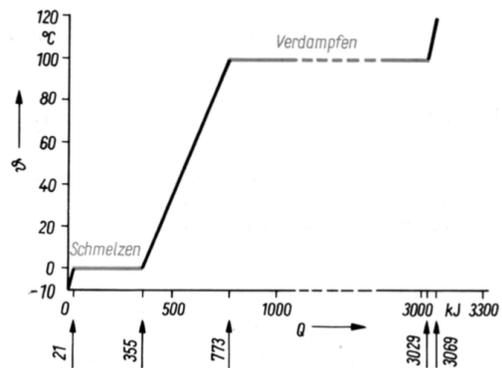


Abbildung 1.11: Temperaturverlauf für 1 kg Eis (resp. Wasser), dem Wärme zugeführt wird.

Das folgende Diagramm (siehe Abbildung 1.11) zeigt den Temperaturverlauf für 1 kg Eis (resp. Wasser), dem Wärme zugeführt wird.

Umgekehrt kann die innere Energie U eines Systems natürlich auch abnehmen, wenn das System mechanische Arbeit W verrichtet und/oder Wärme Q abgibt. In diesem Fall müssen Sie die Arbeit W und die Wärme Q als negative Größen zählen. Die Änderung der inneren Energie ist in diesem Fall negativ $\Delta U < 0$ und die innere Energie U wird kleiner.

Die Arbeit W und die Wärme Q müssen jedoch nicht immer das gleiche Vorzeichen besitzen, sondern können auch entgegengesetzt gerichtet sein. Wird dem System beispielsweise Wärme zugeführt, aber gleichzeitig vom System Arbeit verrichtet (ihm Arbeit entzogen), so ist die Wärme Q positiv, die Arbeit W negativ. Ob die innere Energie U in diesem Fall zu- oder abnimmt, hängt davon ab, welche der beiden Größen den grösseren Betrag besitzt: wird dem System wie z.B. in Abbildung 1.12 (d) mehr Wärme zugeführt als von ihm Arbeit verrichtet wird (mathematisch gilt $Q > |W|$), so nimmt die innere Energie zu. Wird vom System dagegen mehr Arbeit verrichtet als Wärme zugeführt wird, gilt also hier mathematisch $W > |Q|$, so nimmt die innere Energie des Systems ab.

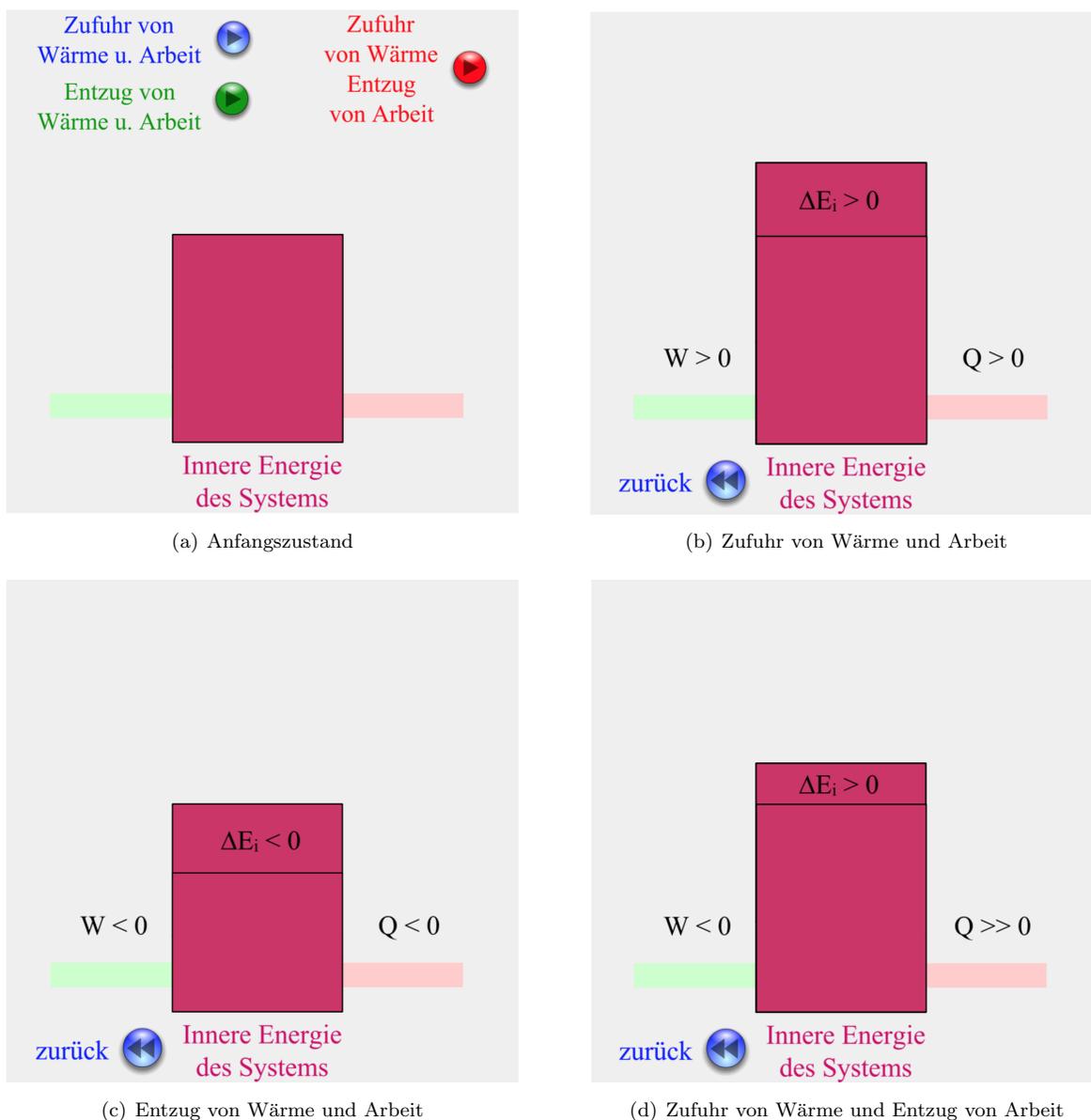


Abbildung 1.12: Screenshot der Animation auf <https://www.leifiphysik.de/waermelehre/innere-energie-waermekapazitaet/grundwissen/erster-hauptsatz-der-waermelehre>.

1.3.3 Arbeit und Wärme als Prozessgrößen

Sowohl die Arbeit W als auch die Wärme Q sind sogenannte Prozessgrößen (Transfergrößen). Prozessgrößen treten immer dann auf, wenn die Veränderung des Zustands eines Systems betrachtet wird. Mithilfe der Prozessgrößen kann man die auftretenden Veränderungen genau beschreiben. In unserem Beispiel beschreiben die Prozessgrößen Arbeit und Wärme die Veränderung der inneren Energie eines Systems. Im Gegensatz dazu bezeichnet man die innere Energie als Zustandsgröße. Zustandsgrößen beschreiben den statischen Zustand eines Systems.

1.3.4 Spezialfall des Energieerhaltungssatzes

Da es sich bei der Wärme und der Arbeit um übertragene Energie handelt, stellt der 1. Hauptsatz der Wärmelehre nichts anderes dar, als eine spezielle Formulierung des Energieerhaltungssatzes. Diese – für uns fast selbstverständliche – Erkenntnis war lange Zeit nicht möglich, da man erst im Laufe des 19. Jahrhunderts darauf kam, dass Wärme eine Form übertragener Energie ist.

1.4 Therm. Ausdehnung von Festkörpern und Flüssigkeiten

Bei Erwärmung dehnen sich Flüssigkeiten aus. Dasselbe gilt auch für Gase und für Festkörper. So haben Brücken je nach Temperatur eine leicht unterschiedliche Länge. Daher ändern die Platten der Überbauten einer Brücke, die Fahrbahn, ihre Form fortwährend und dürfen deshalb nicht starr eingespannt, sondern müssen beweglich auf die sogenannten Brückenlager (Abbildung 1.13 (a)) aufgelegt werden. Brückenlager haben die Aufgabe, die mechanischen Kräfte der Überbauten, unabhängig von der herrschenden Temperatur, möglichst "zwangsfrei" auf die Unterbauten der Brücke zu übertragen.

Auch Eisenbahnschienen dehnen sich aus, wenn sie erwärmt werden. Damit sich die Gleise dabei nicht verkrümmen, verlegte man die Schienen noch bis in die Sechzigerjahre des vergangenen Jahrhunderts mit einem kleinen Zwischenraum, dem sogenannten Schienenstoss (Abbildung 1.13 (b)). Dies führte bei Eisenbahnfahrten zu einem charakteristischen monotonen Geräusch; daneben zu einer starken Abnutzung von Eisenbahnradern und Schienenstößen. Heute vermeidet man Schienenstöße, indem man aufeinanderfolgende Schienen zusammenschweisst und diese fest mit den Schwellen verschraubt, so dass Haftkräfte die Ausdehnung der Schienen verhindern. Dabei treten sehr hohe Spannungen auf, die der verwendete Werkstoff (Stahl) aushalten muss. In Ländern mit extremen Temperaturunterschieden zwischen Sommer und Winter, etwa in Russland, wird die Schienenstosstechnik noch heute eingesetzt.

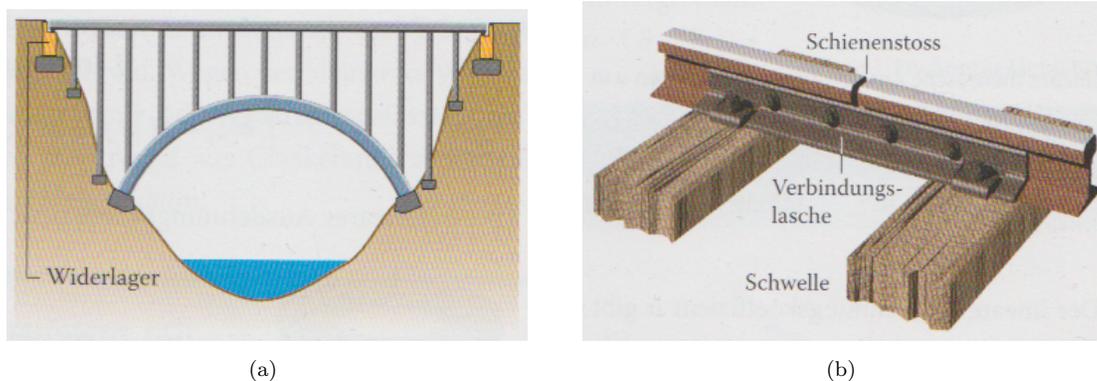


Abbildung 1.13: (a) Brücke auf Widerlager, (b) Schienenstoss

1.4.1 Längenausdehnung

Ändert sich die Temperatur eines festen Körpers um einen bestimmten Betrag, so ändert sich entsprechend auch seine Länge beziehungsweise seine Fläche und sein Volumen. Mit steigender Temperatur nimmt die Länge zu, mit sinkender Temperatur nimmt die Länge ab.

Die obengenannte Formel gilt nicht nur für Festkörpern, sondern auch für Flüssigkeiten; so beträgt der räumliche Ausdehnungskoeffizient für Quecksilber $\gamma = 182 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (Grundlage des Quecksilberthermometers).

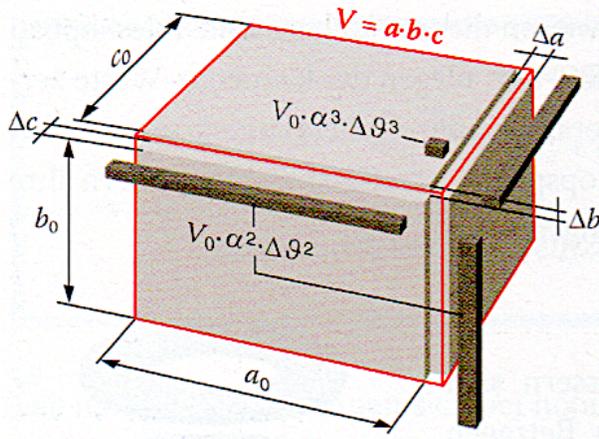
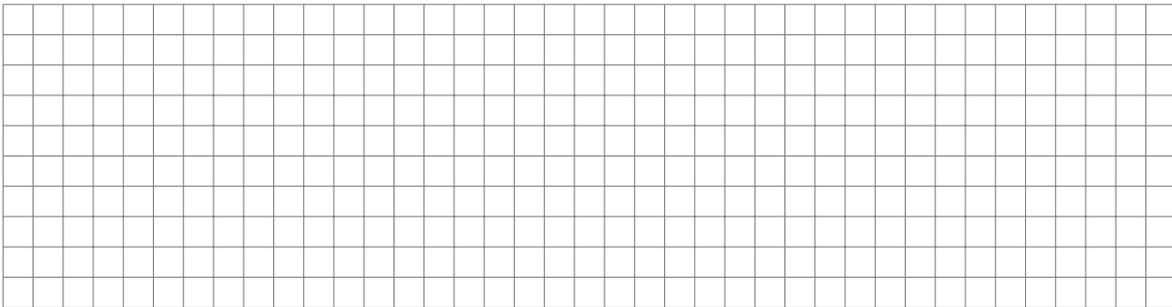


Abbildung 1.14: Volumenausdehnung

Beispiel 26: Ein Öltank aus Stahlblech mit einem Fassungsvermögen von $V_0 = 5000$ Liter wird bei 20°C unvorsichtigerweise vollständig mit Heizöl gefüllt. Was geschieht, wenn die Temperatur auf 35°C ansteigt? ($\gamma_{\text{Heizöl}} = 8.9 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$).



1.4.3 Anomalie des Wassers

Durch die Erwärmung wird die thermische Bewegung von Molekülen bzw. Atomen verstärkt. Sie stoßen heftiger gegeneinander und schieben sich dadurch etwas auseinander. Dabei müssen die anziehenden Molekularkräfte überwunden werden. Da diese Kräfte in Flüssigkeiten wesentlich kleiner sind als in Festkörpern, dehnen sich Flüssigkeiten bei gleicher Erwärmung stärker aus als Festkörper, ihre relative Volumenänderung $\Delta V/V_0$ ist pro Grad Celsius wesentlich grösser.

Die Graphen in Abbildung 1.15 illustrieren diesen Sachverhalt anhand einiger Festkörper und Flüssigkeiten. Der Volumenausdehnungskoeffizient $\gamma = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta T}$ ist die Steigung dieser Graphen: Er nimmt von Quarzglas über Eisen, Quecksilber und Ethanol (Alkohol) sehr stark zu. Für Quarzglas, Eisen und Quecksilber, nicht aber für Alkohol, sind die Graphen in guter Näherung Geraden.

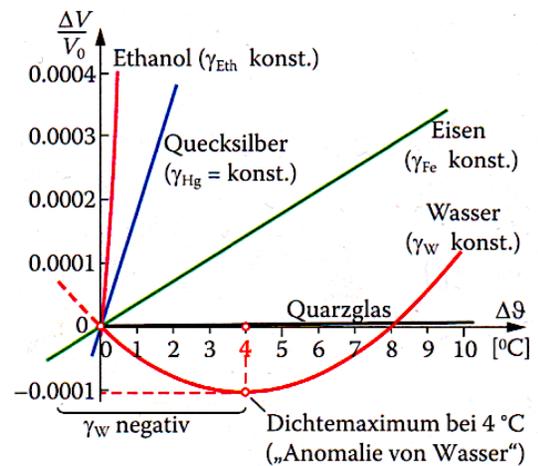


Abbildung 1.15: Volumenänderung $\Delta V/V_0$ verschiedener Materialien in Funktion der Temperatur.

Besonders merkwürdig verhält sich das Wasser, dessen relative Volumenänderung in Funktion der Temperatur stark nicht-linear ist (roter Graph in Abbildung 1.15), von 0°C bis 4°C ab- und dann wieder zunimmt. Das Dichtemaximum liegt bei 4°C . Dieses eigenartige Verhalten bezeichnet man als *Anomalie des Wassers*. Entgegen der Erwartung bildet sich in reinem Wasser zudem unterhalb von 0°C nicht sofort Eis, sondern es kann bis gegen -20°C abgekühlt werden, ohne zu gefrieren. Bei dieser Abkühlung nimmt das Volumen dauernd zu. Diese Unterkühlung ist ein labiler Zustand; bei Erschütterung des Gefässes kann das Wasser schlagartig gefrieren, wobei die Temperatur auf 0°C ansteigt. Die Anomalie des Wassers steht in engem Zusammenhang mit der Form der Wassermoleküle (siehe Abbildung 1.16). Diese sind winkelförmig aufgebaut, wobei die Elektronen etwas zum Sauerstoffatom hin verschoben sind. Dadurch ergibt sich dort ein geringfügiger negativer Ladungsüberschuss, dem ein positiver Ladungsüberschuss bei den beiden Wasserstoffatomen gegenübersteht.

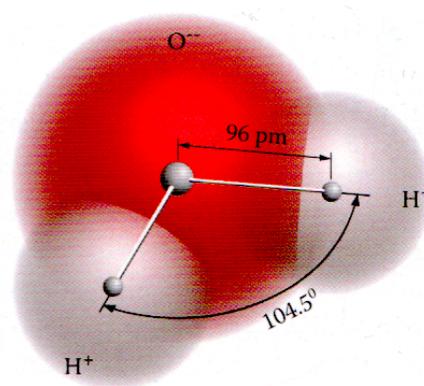
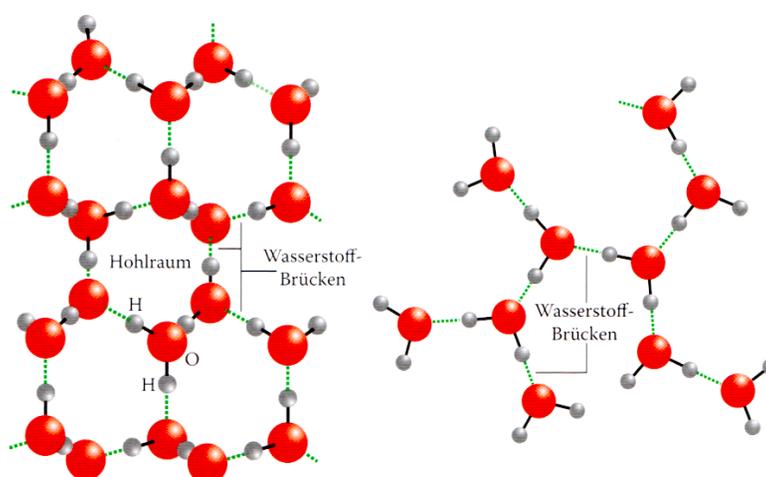


Abbildung 1.16: Wassermolekül.

Das Wassermolekül wird dadurch zu einem elektrischen Dipol mit positivem und negativem Ende. Im festen Eis sind die Wassermoleküle nun so ausgerichtet, dass ihre negativ und positiv geladenen Enden möglichst nahe beisammen liegen.

Dies führt zur charakteristischen hexagonalen Kristallform des Eises, die sich makroskopisch in der regelmässigen, sechseckigen Form der Eiskristalle zeigt (Abbildung 1.17 links). Zwischen den einzelnen Molekülen bleibt dabei viel Zwischenraum, so dass die Dichte von Eis fast 10% geringer ist als diejenige von Wasser. Eis schwimmt im Wasser, wobei etwa 10% des Eisvolumens über die Wasseroberfläche ragen.

Beim Schmelzen geht die gegenseitige Orientierung der Wassermoleküle verloren, es bilden sich H_2O -Clusters, welche durch Wasserstoffbrücken zusammengehalten werden und in die Hohlräume der ursprünglichen Eisstruktur eindringen (Abbildung 1.17 rechts). Dadurch nimmt das Volumen pro Kilogramm ab, die Dichte steigt an und erreicht bei 4°C ihren grössten Wert. Bei weiterer Erwärmung steigt der Raumbedarf der Wassermoleküle wegen der zunehmenden thermischen Bewegung wieder an, so dass das Wasservolumen grösser wird.

Abbildung 1.17: Links: Kristallografische Struktur von Eis. Rechts: H_2O -Cluster im flüssigen Wasser.

Die Anomalie des Wassers ist für die Lebewesen im Wasser von grösster Bedeutung. Sie ist die Ursache dafür, dass Seen selbst im tiefsten Winter niemals bis zum Grund zufrieren (siehe Abbildung 1.18).

1.5.3 Das Gesetz von Amontons

Im Experiment untersuchen wir, wie sich der Druck eines idealen Gases verhält, wenn man die Temperatur des Gases verändert. Im Experiment verwenden wir Luft, welche sich bei nicht allzu hohen Drücken ähnlich verhält wie ein ideales Gas. Das Gas bzw. die Luft befindet sich in einem abgeschlossenen Rundkolben (siehe Abbildung 1.21). Dies stellt sicher, dass sich das Volumen des Gases während dem Experiment nicht verändert. Dann erhöhen wir die Temperatur des Wasserbads, in welches der (mit Luft gefüllte) Rundkolben getaucht ist, und messen den Luftdruck im Rundkolben.

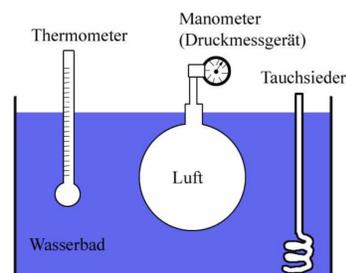


Abbildung 1.21: Experiment für die Bestimmung der Abhängigkeit zwischen dem Druck p und der Temperatur T .

Messung:

Temperatur T (in $^{\circ}\text{C}$)	Temperatur T (in K)	Druck p (in hPa)

Tabelle 1.1: Messwerte für das Gesetz von Amontons.

Graphische Auswertung:

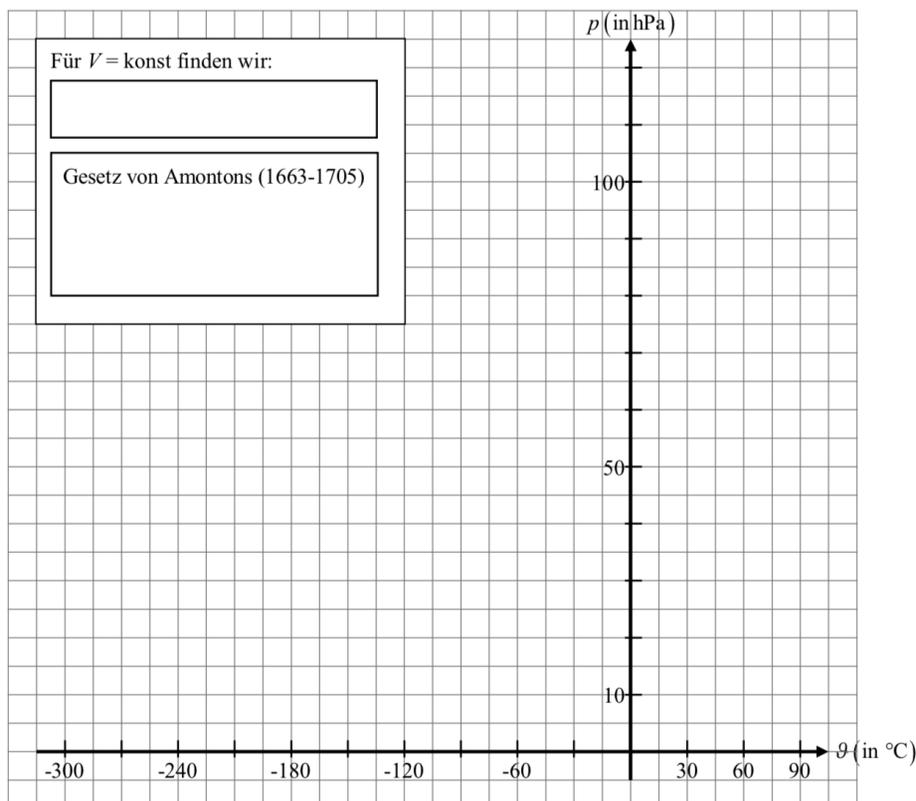


Abbildung 1.22: Graphische Auswertung der Messergebnisse.

1.6 Aufgaben

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf das Kapitel 1.1 *Temperatur und Wärme*.

- 1) Fahrenheit eichte seine Skala anhand seiner Körpertemperatur. Wie hoch war seine Körpertemperatur offenbar? Geben Sie diese Temperatur in °C und in Kelvin an.
- 2) 0°F soll die tiefste Temperatur des bitterkalten Winters von 1709 gewesen sein. Geben Sie diese Temperatur in °C und in Kelvin an.
- 3) Weshalb erwärmt sich ein Geldstück, wenn wir es starken Hammerschlägen aussetzen?
- 4) Bei welchen Temperaturen in °C und Kelvin gefriert resp. kocht das Wasser?
- 5) Welche Energieform(en) beeinflusst/beeinflussen die Temperatur eines Körpers? Kinetische Energie, Potentielle Energie, Rotationsenergie, Vibrationsenergie oder alle von diesen?
- 6) Im Schulzimmer hat es Stühle, Tische und Menschen. Welche dieser Körper haben eine Temperatur, die
 - a) tiefer als
 - b) höher als oder
 - c) gleich

der Temperatur der Luft ist?

- 7) Was hat eine höhere innere Energie:
 - a) ein Eisberg oder
 - b) eine Tasse heißen Kaffee?

Begründen Sie Ihre Antwort.

- 8) Sie berühren einen kalten Stein. Fließt die Kälte vom Stein in Ihre Hand? Erklären Sie!
- 9) Temperatur und Wärme sind zwei Begriffe, die in der Alltagssprache oft die gleiche Bedeutung haben. In der Physik ist dies nicht der Fall.
 - a) Welcher der beiden Begriffe beschreibt, wie warm ein Körper ist?
 - b) Welcher der beiden Begriffe beschreibt die Energie, die ein Körper aufnimmt oder abgibt, wenn er aufgeheizt oder abgekühlt wird?

- 10) Vervollständigen Sie diesen Text:

- a) Die innere _____ eines Körpers kann verändert werden, in dem man ihn erhitzt oder _____.
- b) Die Moleküle in einer heißen Kartoffel haben im Durchschnitt mehr _____ als die _____ in einer _____ Kartoffel.
- c) Zwei heiße Steine haben zusammen mehr _____ als ein heißer Stein alleine.
- d) Um einen Stein zu erwärmen, braucht es _____.

- 11) Die Temperatur eines Körpers ist eine seiner fundamentalen physikalischen Eigenschaften.

- a) Weshalb gibt es eine untere Grenze für die Temperatur?
- b) Geben Sie die tiefstmögliche Temperatur in °C und K an.

12) Rechnen Sie die folgenden Temperaturen der einen Skala in die andere Skala um.

- a) $20\text{ }^\circ\text{C}$, $100\text{ }^\circ\text{C}$, $-25\text{ }^\circ\text{C}$, $0\text{ }^\circ\text{C}$
- b) 0 K , 100 K , 300 K

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf das Kapitel 1.2.2.1 Temperaturänderung.

- 13) Warum ist im Sommer der Sand heisser als die Wasserpflütze nebenan?
- 14) Wie viel Energie braucht es, um einen 500 g schweren Aluklotz von $20\text{ }^\circ\text{C}$ auf $25\text{ }^\circ\text{C}$ zu erwärmen?
- 15) Aus welcher Höhe müsste ein Turmspringer der Masse 70 kg mindestens springen, damit er ein Wasserbecken von 1000 m^3 um $0.15\text{ }^\circ\text{C}$ erhitzen könnte?
- 16) Bei welchem (welchen) der folgenden Beispiele aus der Technik verwendet man Materialien mit möglichst hoher bzw. möglichst kleiner spezifischer Wärmekapazität?
 - a) Kühlflüssigkeit bei Automotoren
 - b) Thermoskanne
 - c) elektrische Speicheröfen
- 17) Zum Warmhalten von Speisen werden gelegentlich Wärmeplatten eingesetzt, die in einem Ofen aufgeheizt werden. Wärmeplatten mit den vorgegebenen Massen $1.5 \times 15 \times 30\text{ cm}^3$ sollen bei gleicher Temperaturdifferenz möglichst viel Wärme abgeben. Welches von diesen Materialien erfüllt diese Bedingung am besten: Aluminium, Blei, Eisen oder Kupfer?
- 18) In einem Boiler werden 400 l Wasser von $25\text{ }^\circ\text{C}$ auf $60\text{ }^\circ\text{C}$ aufgeheizt. Wie viel Energie in Joule werden dafür benötigt? Was kostet das Aufheizen, wenn der Preis für 1 kWh in der Nacht 8 Rp. beträgt?
- 19) Im Frühling ist das Wasser in der Badi manchmal noch sehr kalt und man fragt sich, weshalb die Betreiber das Wasser nicht elektrisch aufheizen.
 - a) Berechnen Sie die elektrische Energie, die man aufwenden müsste, um das Wasser ($50\text{ m} \times 25\text{ m} \times 2\text{ m}$) von $16\text{ }^\circ\text{C}$ auf $25\text{ }^\circ\text{C}$ aufzuheizen.
 - b) Was würde das bei einem Kilowattstundenpreis von 17 Rp./kWh kosten?
- 20) Wie viel Energie muss einem Liter Wasser zugeführt werden, um ihn zum Kochen zu bringen ($20\text{ }^\circ\text{C}$ auf $98\text{ }^\circ\text{C}$)? Auf welche Höhe könnte man das Wasser mit dieser Energie hochheben?
- 21) Wie viel Energie ist nötig, um 85 cm^3 Ethylalkohol (Ethanol) von $-5\text{ }^\circ\text{C}$ auf $55\text{ }^\circ\text{C}$ zu erwärmen? Die Wärmekapazität finden Sie in der Formelsammlung!

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf das Kapitel 1.2.2.2 Mischungsprobleme.

- 22) Manchmal gelangen die Gläser in der Mensa direkt aus dem Geschirrspüler ($T_G = 70\text{ }^\circ\text{C}$) wieder zum Gebrauch auf die Auslage. Nehmen wir an, so ein Glas ($m = 180\text{ g}$) sei immer noch $40\text{ }^\circ\text{C}$ warm, wenn man 1 dl Wasser der Temperatur $20\text{ }^\circ\text{C}$ (Raumtemperatur) einfüllt. Welche Mischtemperatur T_M stellt sich nach kurzer Zeit ein? (Der Wärmeaustausch mit der Umgebung soll vernachlässigt werden).
- 23) In einer Badewanne befinden sich 60 Liter Wasser der Temperatur von $16\text{ }^\circ\text{C}$. Wie viel warmes Wasser der Temperatur von $50\text{ }^\circ\text{C}$ muss eingefüllt werden, um eine Badetemperatur von $37\text{ }^\circ\text{C}$ zu erreichen? (Dazu gehen wir von einer idealen Wanne, ohne Wärmeverlust, aus).

- 24) Ein Wärmespeicher aus Wasser soll im Sommer durch Kollektoren aufgeheizt werden und im Winter durch Wärmeabgabe ein Haus heizen. Welche Masse Wasser muss der Speicher umfassen, wenn im Winter durch eine Temperaturverminderung von 50°C auf 35°C eine Wärmemenge abgegeben werden soll, die dem Heizwert¹ von 3000 kg Heizöl entspricht?
- 25) In manchen Restaurants werden heisse Speisen auf vorgewärmte Tellern serviert. Ohne diese Massnahme kühlen die heissen Speisen schon beim Anrichten stark ab. Die Suppe (= Wasser) zum Beispiel hat im Topf eine Temperatur von 95°C . Von ihr werden 240 g auf einen Porzellanteller (hat die gleichen thermischen Eigenschaften wie Glas) mit einer Masse von 610 g gegeben. Welche Anfangstemperatur müsste der Teller haben, damit sich allein durch den Temperatureausgleich zwischen der Suppe und dem Teller eine Temperatur von 80°C einstellen würde?
- 26) Jedes Thermometer, das in eine Flüssigkeit getaucht wird, verändert die Temperatur, die eigentlich gemessen werden soll (ausser wenn es zufällig die gleiche Temperatur wie die Flüssigkeit hat). Untersuchen Sie am folgenden realen Beispiel, wie gross dieser Effekt ist:
Ein Stabthermometer, das nur aus Glas und Quecksilber besteht, hat eine Anfangstemperatur von 22.3°C . Es wird in 110 g Wasser von 60.0°C getaucht. Dabei werden 6.38 g Quecksilber und 1.26 g Glas des Thermometers erwärmt. Welche Temperatur zeigt das Thermometer maximal an?

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf das Kapitel 1.2.3 Aggregatzustandsänderung und latente Wärme.

- 27) Ein -18°C kalter Eisklotz der Masse 26.9 g wird in 954 g warmes Wasser der Temperatur 53.3°C geworfen. Der Eisklotz schmilzt komplett und es stellt sich eine Mischtemperatur von 49.4°C ein. Berechnen Sie daraus die spezifische Schmelzwärme L_S von Eis.
- 28) An einem heissen Nachmittag wollen Sie 1.5 Liter Sirup für die ganze Familie zubereiten. Der Sirup hat nach dem Mischen mit dem kalten Leitungswasser eine Temperatur von 14°C und ist wenig erfrischend. Sie geben deshalb 100 g Eiswürfel von -10°C hinzu. Wie kühl werden die Familienmitglieder im günstigen Fall den Sirup geniessen können?
- 29) Zu Sylvester machen Sie in fröhlicher Runde "Bleigiessen". Ihr Figürchen, das Sie schmelzen, hat eine Masse von 14.8 g. Sie giessen das flüssige Blei bei seiner Schmelztemperatur in 135 g Wasser mit der Anfangstemperatur 22.1°C . Auf welchen Wert steigt die Wassertemperatur höchstens an?
- 30) Jemand erzählt Ihnen, er hätte bei normalem Luftdruck ein festes, glühendes Stück Eisen von ca. 120 g in einem Liter Wasser geworfen. Dabei sei rund 20% des Wassers verdampft. Ist das möglich? Führen Sie notwendige Abschätzungen und die entsprechenden Berechnungen durch, um die Frage zu beantworten.
- 31) Eine 10 cm dicke Eisschicht schmilzt an der Sonne. Wie viele Stunden Sonnenschein sind notwendig, um 1 m^2 dieser Schicht vollständig zu schmelzen? (20% der einfallenden Energie werden vom Eis absorbiert, der Rest wird zurückgestrahlt. Die Solarkonstante S gibt an, welche Wärmeleistung pro m^2 abgegeben wird. Siehe Konstante im Fundamentum)

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf das Kapitel 1.3 Erster Hauptsatz der Wärmelehre.

- 32) Einem System werden 45 J mechanische Arbeit und 125 J Wärme zugeführt. Machen Sie mithilfe einer Rechnung eine quantitative Aussage über die Änderung der inneren Energie des Systems bei diesem Prozess.
- 33) Ein System verrichtet eine mechanische Arbeit von 200 J, gleichzeitig soll sich die innere Energie des Systems aber um 50 J vergrössern. Machen Sie mithilfe einer Rechnung eine quantitative Aussage über die Wärme bei diesem Prozess.

¹Der Heizwert ist eine physikalische Grösse, die angibt, wie viele Joule Energie frei werden, wenn man ein Kilogramm des betreffenden Stoffs verbrennt, Tabelle hierzu auf S.102 im Fundamentum.

- 34) Bei einem Vorgang verliert ein System 200 J innere Energie und gibt 150 J Wärme ab. Machen Sie mithilfe einer Rechnung eine quantitative Aussage über die mechanische Arbeit bei diesem Prozess.

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf das Kapitel 1.4 Therm. Ausdehnung von Festkörpern und Flüssigkeiten.

- 35) Um wie viel verkürzt sich ein Messingstab ($\alpha_M = 18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) von 1 m Länge, wenn seine Temperatur um 20°C sinkt?
- 36) Wie gross ist die Längenänderung einer 120 m langen Eisenbahnschiene ($\alpha_E = 12.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) bei einer Erwärmung um 50.0°C ?
- 37) Goldvermehrung: Um wie viele cm^3 vergrössert sich ein Goldwürfel, der bei 10°C eine Seitenlänge von 50 mm besitzt, bei der Erwärmung auf 100°C ? ($\alpha_G = 14.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)
- 38) Ein Metallrohr besitzt bei einer Temperatur von 21.5°C eine Länge von 50 cm. Bei der Erwärmung auf 98°C verlängert es sich auf 50.046 cm. Berechnen Sie den Längenausdehnungskoeffizienten α . Um welches Metall könnte es sich handeln?
- 39) Schienen werden in einer Länge von 120 m gewalzt. Wie gross ist die Längenausdehnung einer Eisenbahnschiene zwischen Sommer und Winter? Die Temperatur der Schiene variere zwischen -20°C und 50°C .
- 40) Damit die Fahrleitung bei der Bahn immer gleich stark durchhängt, baut man Spannvorrichtungen. Eine solche Spannvorrichtung ist in der Skizze unten dargestellt. Der Abstand der Masten beträgt 35 m. Die Fahrleitung besteht aus Kupfer. Um wie viel $^\circ\text{C}$ hat sich die Leitung erwärmt, wenn sich der Körper um die Höhe $h = 9.0 \text{ mm}$ abgesenkt hat?

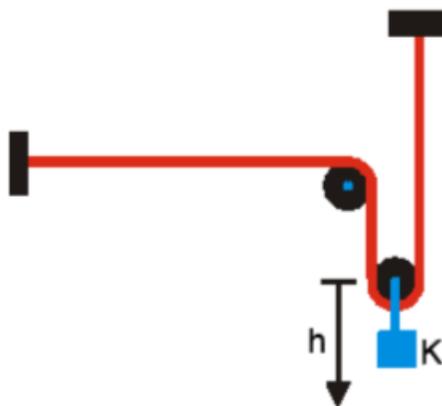


Abbildung 1.24: Fahrleitung bei der Bahn.

- 41) Präzisionsmesswerkzeuge für mechanische Werkstätten werden üblicherweise bei 20°C geeicht. Die Bearbeitungstoleranz bei der Bearbeitung von Werkstücken liegt oftmals bei $\frac{1}{100} \text{ mm}$.
- Ein Messingstab hat bei 20°C eine Länge von 50.00 mm. Auf welche Temperatur darf er maximal erwärmt werden, damit er sich um nicht mehr als $\frac{1}{100} \text{ mm}$ ausdehnt?
 - Eine bei 20°C geeichte Schublehre aus V2A – Stahl ist versehentlich auf einem Heizkörper liegen geblieben und dadurch auf 40°C erwärmt worden. Wie lang ist ein Werkstück tatsächlich, wenn eine Messung mit dieser Schublehre den Wert 163.35 mm ergeben hat?
 - Weshalb ist es besser solche Werkzeuge aus Invar herzustellen?
- 42) Die Ganggeschwindigkeit einer Pendeluhr hängt von der Pendellänge ab: Lange Pendel schwingen langsamer als kurze. Bei steigender Temperatur wird das Pendel länger und damit die Uhr langsamer. Temperaturschwankungen stören also die Genauigkeit. Durch Verwendung verschiedener

geeigneter Metalle und spezieller Konstruktionsweisen kann jedoch erreicht werden, dass sich die temperaturbedingten Veränderungen gegenseitig aufheben und die Pendelstange gleich lang bleibt. So kann der Temperaturfehler korrigiert werden. Die Erfindung geht auf John Harrison (um 1725) zurück. Die Skizze unten zeigt schematisch den Aufbau eines solchen Kompensationspendels: Zwischen zwei Eisenstäben der Länge l_1 befindet sich ein Zinkstab der Länge l_2 . In welchem Verhältnis müssen die beiden Längen stehen, damit die Gesamtlänge s bei einer Temperaturänderung erhalten bleibt?

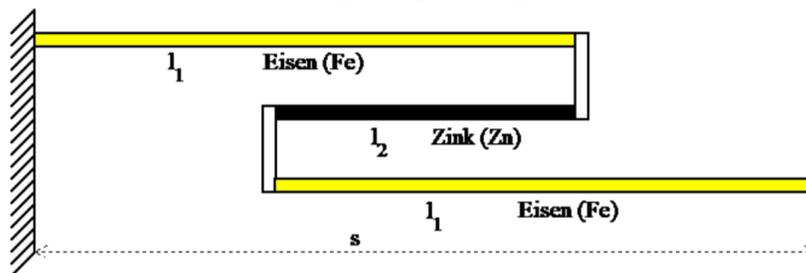


Abbildung 1.25: Spezielle Konstruktionsweise bei einer Pendeluhr.

- 43) Wird von einer Klimaerwärmung von 2°C und einem Meeresspiegelanstieg von 30 cm gesprochen, denkt jeder zuerst an die Gletscher und die Polareiskappen, die wegschmelzen. Dass aber fast die Hälfte des Anstiegs allein auf die Ausdehnung des Meereswassers zurückzuführen ist, können Sie mit einer vereinfachenden Abschätzung selbst nachrechnen: Die Ozeane bedecken rund 70% unserer Erdoberfläche. Die Wasserschicht, die sich bei einer globalen Erwärmung erwärmen würde, ist ca. 300 m dick. Tiefer liegende Schichten bleiben aufgrund ihres Salzgehalts und der viel tieferen Temperaturen praktisch unbeeinflusst. Gehen Sie bei Ihrer Abschätzung von einem festen, rechteckigen Meeresbecken aus.
- 44) Eine 40W-Glühbirne im Sockel einer Lavalampe erwärmt grün gefärbten Benzylalkohol der Dichte $1045 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Dieser steigt in grösseren oder kleineren Tropfen im klaren Salzwasser auf, das den Rest der Lampe ausfüllt. Nach einer gewissen Zeit jedoch sinkt es wieder in interessanten Gebilden auf den Grund. Erklären Sie, weshalb der Benzylalkohol die beobachtete Bewegung ausführt.



Abbildung 1.26: Lavalampe

- 45) Baden im See, das macht allen Spass! Doch haben Sie sich auch schon einmal gewundert, weshalb das kühlere Flusswasser nicht an der Seeoberfläche bleibt, sondern glücklicherweise absinkt? Das kalte Wasser muss eine grössere Dichte haben als das warme. Das Flusswasser habe eine Temperatur von 14°C , das Seewasser eine von 20°C . In der Formelsammlung finden Sie leider nur die Dichte für Wasser bei 20°C . Doch können Sie mit dem Volumenausdehnungskoeffizienten die Dichte des kälteren Wassers abschätzen. Welche Dichte hat das Flusswasser?

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf das Kapitel 1.5 *Das Verhalten von (idealen) Gasen*.

- 46) Eine Taucherflasche mit einem Volumen von 20l ist mit Luft gefüllt. Der Luftdruck in der Flasche beträgt 200 bar, die Temperatur 30°C . (Information: Luft ist oberhalb der kritischen Temperatur von -140.7°C nicht durch Druckerhöhung verflüssigbar. Somit ist die Luft in der Taucherflasche immer noch gasförmig).
- Wie gross ist der Druck in der Taucherflasche bei 50°C ?
 - Bei welcher Temperatur beträgt der Druck 190 bar?
- 47) Ein Autopneu mit konstantem Volumen wird bei einer Temperatur von 20.0°C aufgepumpt. Das Messgerät zeigt einen Überdruck (bzw. den Umgebungsdruck) von 2.20 bar an (ca. 2.20 atü). Der Umgebungsluftdruck beträgt 1.00 bar. Wie gross ist der Überdruck im Pneu, wenn die Temperatur auf 60.0°C steigt?
- 48) Ein schwarzer grosser Sack wird mit 350 Liter Luft bei 22.0°C gefüllt und verschlossen. Die Sonne erwärmt die eingeschlossene Luft auf 48.0°C . Die Hülle bleibt dabei schlaff. Welches Volumen hat der Sack nach dem Erwärmen?
- 49) Ein kugelförmiger Luftballon enthält Luft von 20.0°C bei einem Druck von 1020 mbar. Der Durchmesser des Ballons beträgt 28.4 cm. Der Ballon wird ins Freie gebracht, wo eine Temperatur von -6.00°C herrscht. Auf welchen Durchmesser wird der Ballon dabei schrumpfen?
- 50) Eine Gasmenge hat bei 293.15 K (20°C) und 1025 mbar das Volumen 25 cm^3 . Welches Volumen hat das Gas bei Normbedingungen, also bei 0°C und 1013 mbar?
- 51) Welches Volumen bekommt ein mit Wasserstoff gefüllter Ballon, der bei 1012 mbar und 15°C ein Volumen von 150 m^3 hat, wenn in grosser Höhe ein Druck von 350 mbar und eine Temperatur von -50°C herrschen?
- Folgefrage: Welcher Einfluss überwiegt, der des Drucks oder der der Temperatur? Nehmen Sie dabei an, dass die Hülle des Ballons so beschaffen ist, dass zwischen Aussen- und Innendruck kein Unterschied besteht.