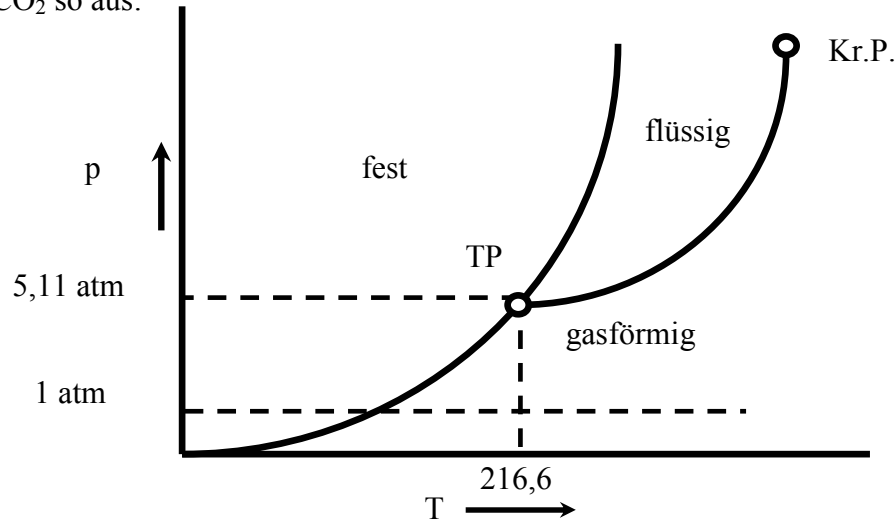


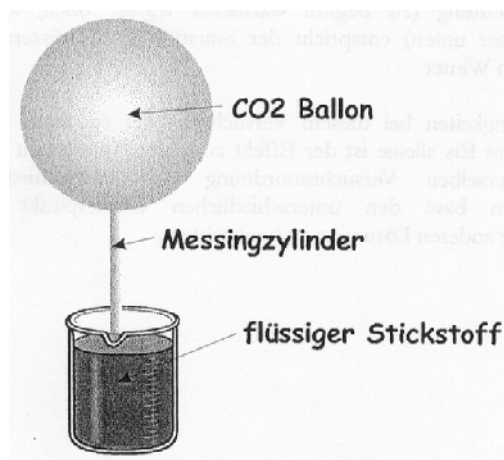
# Sublimation von CO<sub>2</sub>

Es können bekanntlich Stoffe in drei verschiedene Phasen vorkommen, nämlich: fest, flüssig und gasförmig. Bei Festkörper können wir je nach Kristallstruktur zusätzlich noch verschiedene feste Phasen unterscheiden. Das Phasengleichgewicht zwischen diesen drei Phasen kann in einem p,T- Diagramm durch Phasengrenzkurven dargestellt werden. Dies sieht für CO<sub>2</sub> so aus:



Die Kurven in derartigen Diagrammen trennen die Bereiche fest, flüssig und gasförmig. Sie schneiden sich in einem Punkt, dem Tripelpunkt. Nur bei diesem Temperatur- und Druckwert können beliebige Mengen aller drei Phasen im Gleichgewicht nebeneinander bestehen. Beim Punkt Kritischen Punkt endet die Gleichgewichtskurve der flüssigen und gasförmigen Phase. Jenseits der Kr.P. gibt es keinen derartigen Phasenübergang mehr, dann gibt es nur mehr die sogenannte „fluide“ Phase (das Gas ist nicht mehr von der Flüssigkeit zu unterscheiden). Anhand des Phasendiagramms erkennt man, dass CO<sub>2</sub> bei Atmosphärendruck nur fest oder gasförmig sein kann. Das bedeutet, dass bei genügender Abkühlung CO<sub>2</sub> vom gasförmigen in den festen Zustand übergeht. Dieser Vorgang wird als Resublimation bezeichnet, der umgekehrte als Sublimation.

## Aufbau des Versuchs:

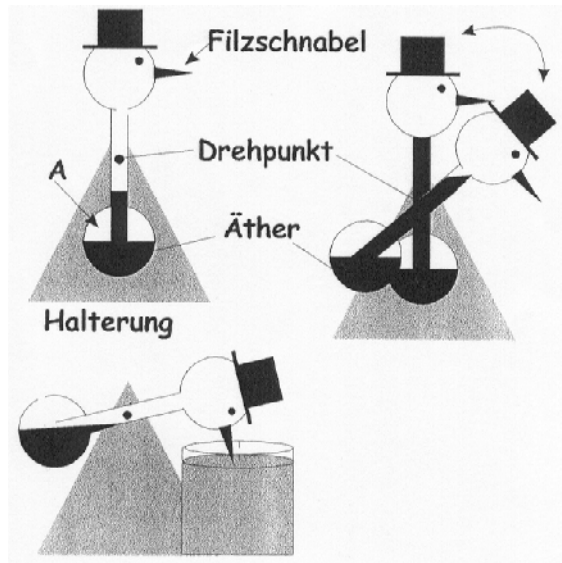


## Ausführung des Versuchs:

Ein Gummiballon wird mit CO<sub>2</sub> gefüllt und am Auslass des Ballons ein Messingzylinder angesteckt. Dieser wird in flüssigen Stickstoff (77K) getaucht, woraufhin das CO<sub>2</sub> resublimiert, sich im Messingkolben anlagert und der Ballon in sich zusammenfällt. Der CO<sub>2</sub>-Schnee kann herausgeklopft werden und sublimiert bei Raumtemperatur wieder.

## Demonstration zur Verdunstungskälte

Durch die Verdunstungskälte des angefeuchteten Schnabels der „trinkenden Ente“ wird durch den entstehenden Unterdruck eine leicht verdampfende Flüssigkeit (z.B. Äther) in ihren Hals bzw. Kopf hochgesaugt. Sobald dieser das Übergewicht bekommt, kippt die Ente in die Horizontale (sie „trinkt“), wodurch die untere Öffnung des Steigrohres freigelegt wird und die Flüssigkeit in den Bauch der Ente zurückfließen kann. Dadurch richtet sie sich wieder auf, und das Spiel beginnt von neuem. Die Energie für diese Bewegungen wird aus der Umgebungswärme geliefert.



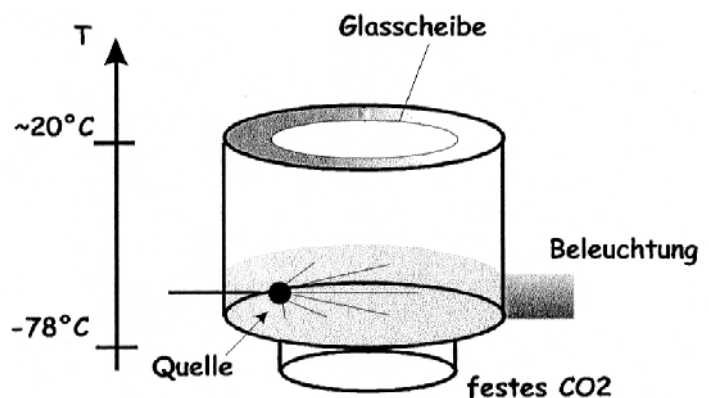
## Wilson'sche Nebelkammer

Die Nebelkammer besteht aus einem Glaszylinder auf einer Grundplatte und einem Glasdeckel als Sichtfenster. In der Nebelkammer befindet sich gesättigter Alkoholdampf (d.h.: der in dem Dampf enthaltene Anteil an Alkoholmolekülen hat den sich von allein einstellenden Maximalwert erreicht; dieser ist temperaturabhängig). Mit festem  $\text{CO}_2$  („Trockeneis“) wird der Alkoholdampf im unteren Teil der Nebelkammer gekühlt. Da der

Maximalwert für die Konzentration von Alkoholmolekülen mit sinkender Temperatur auch sinkt, die Konzentration im Dampf aber gleich bleibt, erhält man übersättigten Dampf (Man nennt diesen Vorgang „Unterkühlung“). Dieser Zustand stellt so etwas wie ein labiles Gleichgewicht dar, und der Alkoholdampf neigt dazu zu kondensieren.

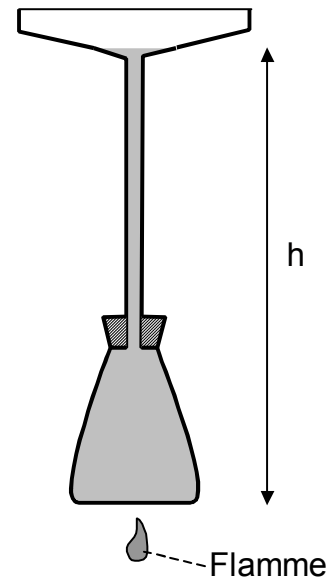
Aus Mangel an Kondensationskeimen findet jedoch keine Kondensation statt

(Kondensationsverzug). Bringt man nun einen  $\alpha$ -Strahlers in die Kammer, so ionisieren die von ihm ausgesendeten He-Kerne Luftmoleküle des Alkoholdampfes. An diesen Ionen kann der Dampf kondensieren und es bilden sich kleine Wassertröpfchen an denen das einfallende Licht der Beleuchtungsquelle gestreut wird. So wird die Spur des  $\alpha$ -Teilchens sichtbar!



# Der Geysir

Geysire sind tiefe, enge, vertikale Erdlöcher die in regelmäßigen Zeitabständen Wasser unter gleichzeitiger Dampfentwicklung herausschleudern (z.B. im Yellowstone National Park, „Old Faithful“, Tiefe: 21m, siehe: [www.web-net.com/jonesy/oldfaith.htm](http://www.web-net.com/jonesy/oldfaith.htm) ). Die Abbildung zeigt das Modell eines Geysirs: Der unten liegende, mit Wasser gefüllte Kolben wird erhitzt. Da sich über dem Kolben ein langes, ebenfalls mit Wasser gefülltes Glasrohr befindet, liegt die Siedetemperatur, bedingt durch den Druck der Wassersäule ( $h = 1\text{m}$ ), bei  $102.6^\circ\text{C}$ . Beginnt das Wasser zu siedern, so wird durch die aufsteigenden Dampfblasen das Wasser aus dem Rohr geschleudert. Dies bewirkt eine Druckverminderung und deshalb explosionsartiges Sieden mit heftiger Dampfentwicklung, während die Siedetemperatur und die Temperatur des Wassers auf  $100^\circ\text{C}$  zurückgeht. Sobald sich das herausgeschleuderte Wasser wieder im Glasrohr sammelt, erhöht sich der Druck wieder und das Sieden hört auf. Nach einiger Zeit ist das Wasser wieder auf  $102.6^\circ\text{C}$  erhitzt und der Vorgang wiederholt sich.



## Adiabatische Zustandsänderung

Bei diesem Prozess mit einem idealen Gas wird Wärme weder zu- noch abgeführt. Es darf also kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfinden ( $dQ = 0$ ).

Dafür liefert der 1. Hauptsatz:  $dU = dW + dQ$

$$dU = dW \quad \text{bzw} \quad c_v \cdot dT = -p \cdot dV$$

Für den Druck  $p = RT / V$  eingesetzt:

$$c_v \cdot dT + R \cdot T / V \cdot dV = 0$$

Umgeformt ergibt sich:

$$c_v / (R \cdot T) \cdot dT + 1 / V \cdot dV = 0$$

Integration liefert:

$$c_v / R \cdot \ln T + \ln V = \text{const.} \quad \text{bzw.} \quad T^{c_v/R} \cdot V = \text{const.}$$

Unter Verwendung des Adiabatenexponenten  $\kappa = c_p / c_v$  und  $R = c_p - c_v$  folgt:

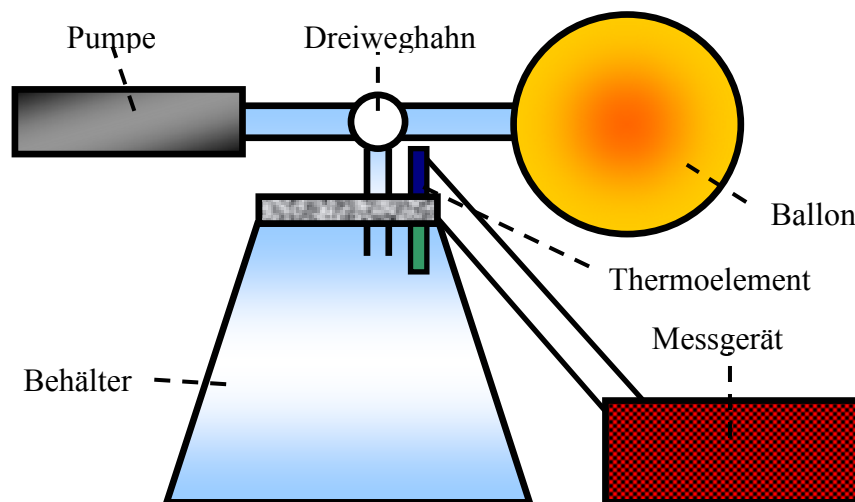
$$c_v / R = c_v / (c_p - c_v) = 1 / (\kappa - 1) \quad \text{bzw.} \quad T \cdot V^{\kappa-1} = \text{const.}$$

Oder mit  $RT = pV$  folgt :

$$p \cdot V^\kappa = \text{const.}$$

# Experiment zur adiabatischen Zustandsänderung

Versuchsaufbau: Ein geschlossener Behälter ist mit einem Ballon und mit einer Pumpe über einen Dreiweghahn verbunden. Weiters befindet sich innerhalb und außerhalb des Behälters jeweils ein Thermoelement, die den Temperaturunterschied zwischen Innenluft und Außenluft messen und in eine Spannung umwandeln, welche ein Messgerät anzeigt. Nun wird der Dreiweghahn so gedreht, dass man den Ballon mit der Pumpe aufblasen kann. Nachdem der Ballon groß genug ist, schließt man den Hahn und entfernt die Pumpe. Im Ballon befindet sich jetzt gegenüber dem Behälter ein Überdruck.

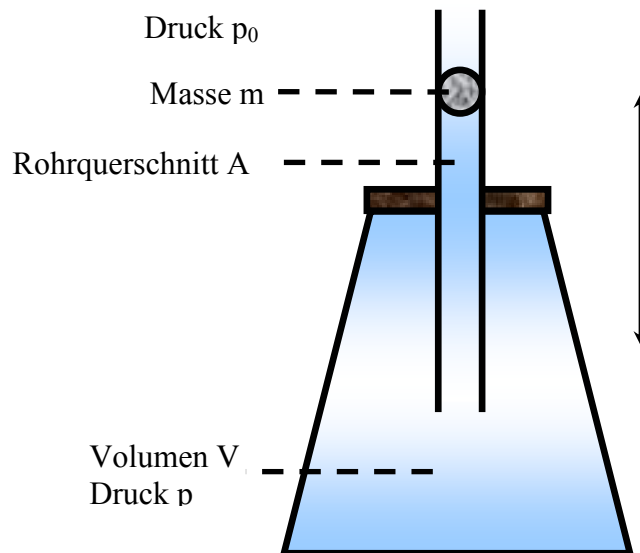


Versuchsdurchführung: Man dreht nun den Dreiweghahn in die Stellung, sodass die Luft durch den Überdruck aus dem Ballon in den Behälter strömt. Durch diese rasche Kompression erwärmt sich die Luft im Behälter, weil ja keine Zeit für einen Wärmeaustausch vorhanden ist. Diese Erwärmung kann recht deutlich mit dem Messgerät veranschaulicht werden. Da nach einiger Zeit ein Druck- und Temperatúrausgleich stattgefunden hat, kann man durch Drehen des Hahns in geeignete Stellung (Behälter und Außenraum verbunden) eine adiabatische Ausdehnung bzw. Abkühlung der Luft im Behälter zeigen.

## Berechnung von $\kappa$ nach Rüchardt

Versuchsaufbau: Eine Flasche ist mit einem senkrecht nach oben gerichteten Rohr mit ihrer Umgebung verbunden. Zusätzlich hat man eine Kugel, die genau in die Öffnung des Rohres passt. Man kennt die Masse der Kugel, den Rohrquerschnitt, das Volumen der Flasche und den Luftdruck.

Daten: Masse der Kugel  $m = 16,7 \text{ g}$   
Querschnitt des Rohres  $A = 2,01 \text{ cm}^2$   
Volumen der Flasche  $V = 6 \text{ Liter} = 6 \text{ dm}^3$   
Druck außerhalb der Flasche  $p_0 = \text{ca. } 1 \text{ bar}$   
Druck innerhalb der Flasche  $p = \text{ca. } 1 \text{ bar}$



Versuchsdurchführung: Nun lässt man die Kugel in die Öffnung des Rohres fallen. Man beobachtet, dass die Kugel Schwingungen ausführt. Der Vorgang erfolgt so rasch, dass dies einer periodischen adiabatischen Kompression bzw. Expansion der Luft entspricht.

Das Gleichgewicht der Kugel wäre:  $p = p_0 + p_k$   
 $p = p_0 + m \cdot g / A$

Die Schwingung der Kugel führt zu einer Druckänderung  $dp$  innerhalb der Flasche.  
 Die Bewegungsgleichung einer harmonischen Bewegung lautet:

$$F_g = F_p$$

$$m \cdot d^2x/dt^2 = A \cdot dp$$

Da es sich um einen adiabatischen Prozess handelt gilt:

$$p \cdot V^\kappa = \text{const.}$$

Abgeleitet ergibt dies:  $V^\kappa \cdot dp + \kappa \cdot p \cdot V^{\kappa-1} \cdot dV = 0$   
 Daraus folgt für  $dp$ :  $dp = -\kappa \cdot p / V \cdot dV$   
 wobei  $dV = A \cdot x$

Somit folgt für die Bewegungsgleichung der Kugel im Rohr:

$$m \cdot d^2x/dt^2 = -\kappa \cdot p \cdot A^2 \cdot x / V$$

d.h.  $\omega^2 = \kappa \cdot p \cdot A^2 / (V \cdot m)$   
 es gilt:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi / T$   
 somit folgt:  $T^2 = 4 \cdot \pi^2 \cdot V \cdot m / (\kappa \cdot p \cdot A^2)$   
 und schließlich:  $\kappa = 4 \cdot \pi^2 \cdot V \cdot m / (T^2 \cdot p \cdot A^2)$

Setzt man die Werte ein:  $\kappa = 0,979 \cdot 1 / T^2 = 0,979 /$  =

# Wärmeübertragung

Es gibt prinzipiell zwei Möglichkeiten um Wärme zu übertragen:

## Wärme(ab)strahlung

Dabei wird die von einem Körper abgestrahlte Wärmeleistung wie folgt berechnet:

$$P = e\sigma A(T^4 - T_0^4)$$

- e Emissionsgrad (gleich groß wie Absorptionsgrad, Werte zwischen 0 und 1)
- $\sigma$  Stefan-Boltzmann Konstante ( $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )
- A Oberfläche des strahlenden Körpers
- T absolute Temperatur des Körpers
- $T_0$  Umgebungstemperatur

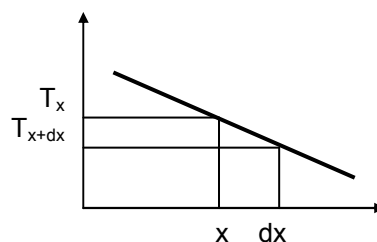
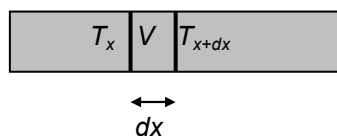
## Wärmeleitung

Wenn man einen Körper an zwei Enden unterschiedlich stark erwärmt, so fließt gemäß dem nullten Hauptsatz der Thermodynamik Wärme vom heißeren zum kälteren Ende, und zwar so lange, bis beide Enden die gleiche Temperatur haben. Dabei nimmt die Temperatur zwischen den beiden Enden stetig ab. Man spricht von einem Temperaturgefälle oder einem Temperaturgradienten.

Wird am heißeren Ende konstant Wärme zugeführt, bzw. am kälteren abgenommen so stellt sich nach einiger Zeit ein konstantes Temperaturgefälle ein. Ist der Körper homogen und ist sein Querschnitt überall gleich, so ist dass Temperaturgefälle sogar linear.

Die in der Zeit  $dt$  durch das Volumenelement  $V$  hindurch tretende Wärmemenge  $dQ/dt$  ist proportional der Querschnittsfläche  $A$ , der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  (materialspezifisch,  $[\lambda] = \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) und dem Temperaturgefälle (!)  $-dT/dx$  :

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{dT}{dx}$$



Doch welche *physikalischen Mechanismen* stehen hinter dieser *Wärmeübertragung*?

## Gitterschwingungen (Festkörper)

Die Atome in einem Festkörper sind fix an ihre Position gebunden und schwingen um ihre Ruhelage. Je wärmer ein Material ist, desto mehr schwingen die Atome. Wird nun ein Ende eines Materials erwärmt, so beginnen die Atome an dieser Stelle stärker zu schwingen als im Rest des Körpers. Diese regen nun ihre Nachbaratome an (wie ein getriebener, gedämpfter Oszillator) und diese wieder ihre Nachbaratome usw. Hierbei wird die Wärmeenergie ohne Materialtransport weitergeleitet.

Je fester die Atome aneinander gebunden sind und je homogener ein Stoff ist, desto besser leitet er Wärme (inhomogen  $\rightarrow$  unterschiedliche Atome mit unterschiedlicher Bindungsstärke)  $\rightarrow$  unterschiedliche Resonanzfrequenzen; z.B.: Diamant (homogen und sehr feste Bindung) und Wackelpudding).

## freie Elektronen (Metalle, leitende Flüssigkeiten)

Durch Erwärmen beginnen die freien Elektronen des erwärmten Bereichs eines Stoffes sich schneller zu bewegen (höhere thermische Bewegung, bzw. kinetische Energie). Diese Energie wird durch Stöße mit (nahegelegenen, „benachbarten“) Elektronen niedrigerer kinetischer Energie bzw. durch Stöße mit Atomen/Molekülen weitergeben. Die so angeregten Teilchen geben nun ihrerseits auch wieder kinetische Energie durch Stöße weiter.

Auch hier findet ein (Wärme-) Energietransport ohne Stofftransport statt!

In Stoffen mit freien Elektronen übernehmen diese den Hauptteil der Wärmeleitung.

## Atom- / Molekül- Stöße (Gase, Flüssigkeiten)

Da sich in Gasen bzw. Flüssigkeiten die Atome/Moleküle frei bewegen können, können sie (wie Elektronen in Leitern) die Wärmeenergie durch erhöhte thermische Bewegung (kinetische Energie) und Stöße mit anderen Atomen/Molekülen übertragen.

Bemerkung: Der Hauptteil der Wärmeleitung in Gasen und Flüssigkeiten wird allerdings durch Konvektionsströmungen bewirkt. Erwärmt man z.B. Wasser in einem Gefäß auf dem Herd, so beginnt warmes Wasser vom Boden des Gefäßes aufzusteigen und kaltes Wasser von oben herabzusinken.

### Tabelle einiger Wärmeleitzahlen $\lambda$ :

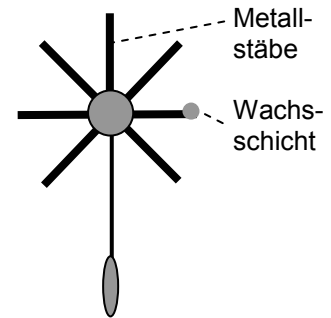
Als Faustregel gilt:  $\lambda_{\text{Metallen}} > \lambda_{\text{Isolatoren}} > \lambda_{\text{Flüssigkeiten}} > \lambda_{\text{Gasen}}$

Stoff	$\lambda$	Stoff	$\lambda$
Aluminium	221	Holz	0,13
Eisen	67	Eis	2,2
Gold	314	Wasser	0,6
Kupfer	393	Luft	0,026
Glas	0,8	CO <sub>2</sub>	0,015

(Werte bei 20°C)

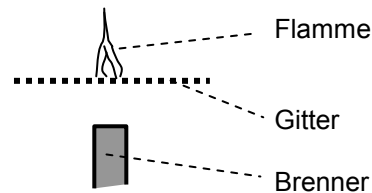
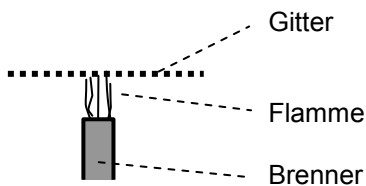
## unterschiedliche Wärmeleitung von Metallen

Die sternförmig angeordneten Metallstäbe werden an ihren äußeren Enden mit einer dünnen Wachsschicht umkleidet, die zu schmelzen beginnt, wenn genügend Wärme vom Zentrum nach außen transportiert wird. Nun wird im Zentrum dieses „Metallstäbesterns“ Wärme durch eine Flamme zugeführt. Es lässt sich beobachten, dass das Wachs an den Stäben unterschiedlich viel Zeit braucht bis es beginnt zu schmelzen. Das liegt daran, dass Metalle unterschiedlich gut Wärme leiten.



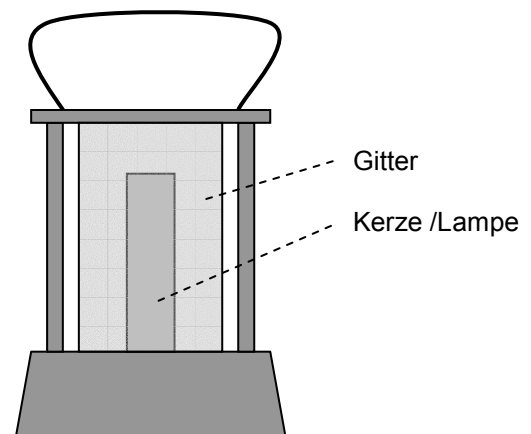
## Drahtnetz über einer Flamme

Durch das große  $\lambda$  des Drahtnetzes wird soviel Wärme abgeleitet, dass oberhalb bzw. unterhalb des Netzes die Entzündungstemperatur nicht erreicht wird.



## Grubenlampe (Davy, 1815)

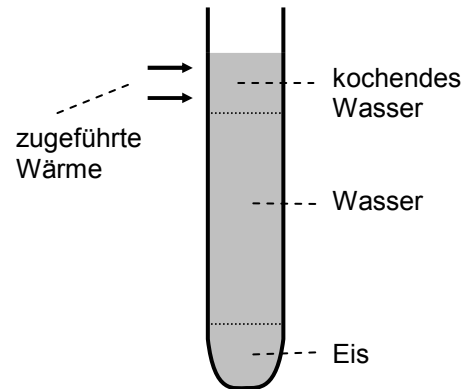
Die Davy'sche Grubenlampe ist eine Anwendung des oben gezeigten Phänomens. Die Kerze / der Docht der Grubenlampe ist mit einem Drahtnetz umgeben. Kommt man nun in „schlagendes Wetter“ (Kohlenwasserstoff beladene Atmosphäre), so entzünden sich diese explosiven bzw. brennbaren Gase außerhalb der Lampe dank der Wärme(ab)leitung des Drahtnetzes nicht, und gleichzeitig wird durch das vermehrte Aufflammen innerhalb des Drahtnetzes das Vorhandensein gefährlicher (brennbarer) Gase angezeigt.





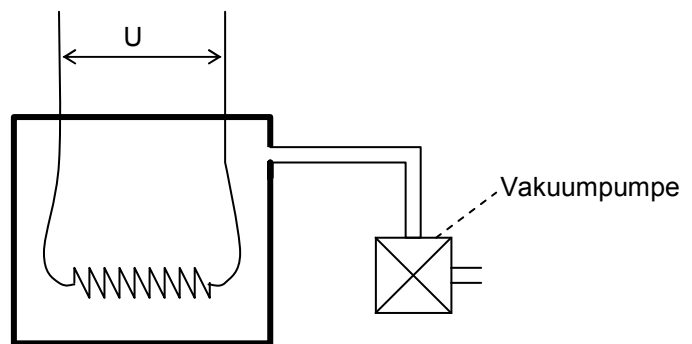
## Geringe Wärmeleitung des Wassers

In einer Eprovette mit Eis (das Eis wird durch ein Gitter am Auftauchen gehindert) wird der obere Teil des Wassers zum Sieden gebracht. Trotzdem schmilzt das Eis auf der untern Seite nicht, weil Wasser ein niederes  $\lambda$  besitzt! (Die Eprovette sollte aufrecht stehen Konvektionsströmungen im Wasser zu vermeiden.)



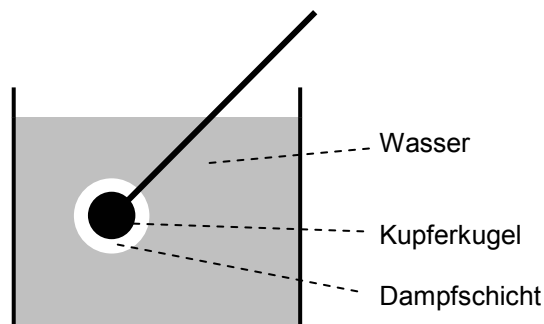
## Wärmeleitung in Luft

Ein Draht wird unter Luft und Vakuum mittels einer Spannung  $U$  zum Glühen gebracht. In der Luft glüht der Draht nicht so stark, da diese Wärme ableitet.



## Leidenfrost'sches Phänomen

Eine glühende Kupferkugel wird in Wasser eingetaucht. Durch die hohe Temperatur der Kugel bildet sich kurzzeitig eine isolierende Dampfschicht um die Kugel. Erst danach, wenn die Kugel in Kontakt mit dem Wasser kommt, hört sie auf zu glühen. (gleiches Phänomen auch bei: Wassertropfen die auf heißer Herdplatte auf einer Dampfschicht gleiten, kurzzeitiges Eintauchen der Hand in eine heiße Flüssigkeit ohne Verbrennungen zu erleiden)

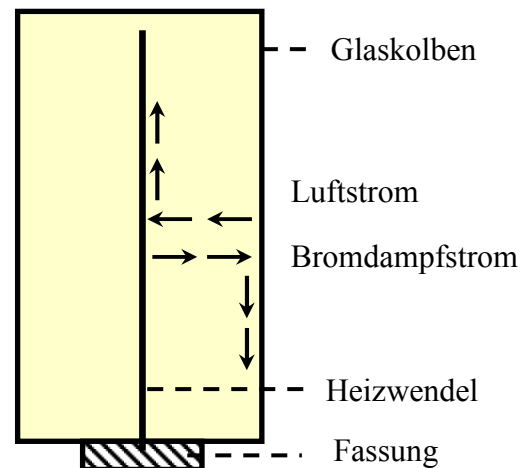


# Thermodiffusion

Thermodiffusion bedeutet Trennung der Komponenten in einer Mischung aufgrund eines Temperaturgefälles. Das leichtere Gas diffundiert zur Wärmequelle, das schwerer weg.

Versuchsaufbau: Demonstriert wird diese anhand eines Glaskolbens, in dessen Mitte sich eine Heizwendel befindet, und der am Ende mit einer Fassung versehen ist, um diese mit Elektrizität zu versorgen. In der Röhre befindet sich ein Luft/Bromdampfgemisch von bräunlicher Farbe.

Versuchsdurchführung: Beim Einschalten der Heizwendel diffundiert der Bromdampf zur Außenwand des Kolbens, die Luft zur Heizwendel. Die Luft erwärmt sich an der Heizwendel und strömt nach oben, während sich der Bromdampf sich abkühlt und nach unten sinkt. So kann man eine deutliche Trennung der beiden Komponenten beobachten.



Bemerkung:

Auf den selben Effekt beruht die Schwärzung von Wänden hinter Heizungsrohren.

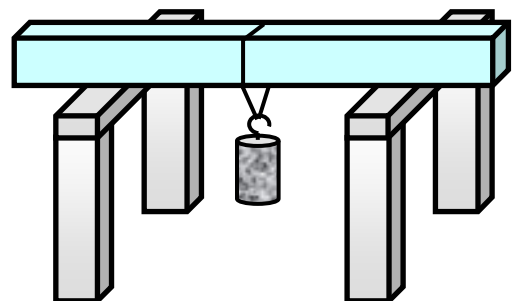
## Regelation des Eises

Beim Schmelzen des Eises findet im Gegensatz zu den meisten anderen Stoffen keine Volumsvergrößerung, sondern eine Zusammenziehung statt (um rund 8%).  $dT/dp$  ist daher negativ. Der Schmelzpunkt des Eises sinkt mit steigendem Druck. Diese Tatsache ist auch dem Zustandsdiagramm von Wasser zu entnehmen.

Dieser Sachverhalt kann folgendermaßen veranschaulicht werden.

Versuchsaufbau: Ein Eisblock wird auf ein Gestell gelegt, eine dünne Drahtschlinge um ihn geschlungen und an dieser ein etwa 3kg schweres Gewicht angehängt.

Versuchsdurchführung: Unter der Drahtschlinge entsteht ein so hoher Druck, dass das Eis unter der Schlinge schmilzt und diese in das Eis einsinkt. Über der Schlinge, wo kein Druck mehr vorhanden ist, gefriert das Wasser wieder. Wenn das Gewicht die Schlinge durch den ganzen Block hindurchgezogen hat, ist das Eis nicht wie erwartet in zwei Teile getrennt worden, sondern ganz geblieben.



Diese Erscheinung beruht auf der Regelation des Eises.

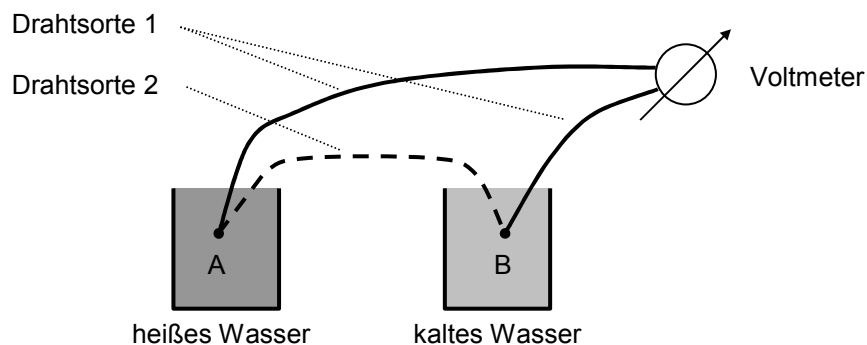
Sie liefert auch die Erklärung für die Talwanderung der Gletscher und die Beweglichkeit der Schlittschuhläufer.

## Thermoelement

Wenn an einer metallischen Probe (Drahtsorte 2) ein Temperaturgradient (Temperaturgefälle) anliegt und man andererseits experimentell dafür sorgt, dass kein elektrischer Strom fließt (zwischen A, Voltmeter und B; durch hohen Ohm'scher Widerstand im Voltmeter), dann muss sich zwischen den Enden der Probe ein elektrisches Feld aufbauen und als Spannung zwischen den Enden gemessen werden können. Zwischen diesem elektrischen Feld und diesem es verursachenden Temperaturgradienten besteht im einfachsten Fall wieder ein linearer Zusammenhang:

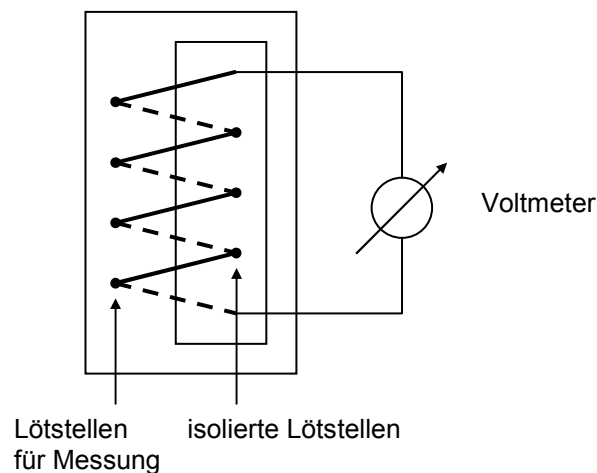
$$E = s \cdot \frac{dT}{dx} \quad s \dots \text{Seebeck Koeffizient}$$

(nach: „*Theoretische Festkörperphysik*“, Gerd Czycholl)



# Die Thermosäule

Sie besteht aus vielen in Serie geschalteten Thermoelementen um eine Verstärkung des Effektes zu erreichen und schon sehr kleine Temperaturänderungen messen zu können. (z.B.: die Nähe einer Handfläche.)



# Heat Pipe

Die auf der linken Seite (H) zugeführte Wärme bringt eine Flüssigkeit zum Verdampfen. Der Dampf (a) breitet sich im Rohr aus und kondensiert an der kälteren Seite (K), wo die Wärme von außen abgeführt wird. Die kondensierte Flüssigkeit wird in Folge der Kapillarwirkung eines Doctes (b) (oder eines Drahtmaschennetzes und der Rohrwand), der sich auf der Innenseite des Rohres befindet, wieder nach links befördert, wo sie erneut verdampft. Um unterwegs Wärmeabgabe zu verhindern ist das Rohr nach außen isoliert (c). Erwärmt man ein Ende des Rohres genügend stark, so beginnt das ganze Rohr zu glühen, was einer Wärmeleitfähigkeit die um  $10^3$  bis  $10^4$  mal höher als die der besten Wärmeleiter ist entspricht.

