

I.) Thermische Ausdehnung

Alle Stoffe dehnen sich beim Erwärmen (in der Regel) aus. Unter gleichen Umständen dehnen sich Flüssigkeiten stärker aus als Festkörper, und Gase noch stärker als Flüssigkeiten.

1.) Wärmeausdehnung von Festkörpern:

Für geringe Temperaturunterschiede ist die Wärmedehnung meist mit sehr guter Näherung zur Temperatur proportional, d.h. doppelter Temperaturunterschied bedeutet doppelte Längenänderung usf., als Formel ausgedrückt:

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta t$$

$\Delta l = l(t_1) - l(t_0) = \text{Längenänderung}$
(bei Erwärmung oder auch bei Abkühlung)

$l_0 = l(t_0) = \text{Länge bei der Temperatur } t_0$
(meistens wird als $t_0 = 0^\circ\text{C}$ gewählt)

$l_1 = l(t_1) = \text{Länge bei der Temperatur } t_1$

$\alpha = \text{linearer Ausdehnungskoeffizient}$
in m/mK

Versuch: Unterschiedliche Längendehnung von Festkörpern

Material	$\alpha \text{ [K}^{-1}\text{]} \times 10^6$
Aluminium	24
Kupfer	17
Messing	19
Zink	29
Eisen (Stahl)	12
Beton	14
Stahlguß	14
Quarz	0,5
Porzellan	3
Eis	37

Volumsdehnung:

Man kann statt der Längenänderung auch die Volumsänderung beim Erwärmen (bzw. Abkühlen) betrachten und die Wärmedehnung eines Materials durch den sogenannten **kubischen Ausdehnungskoeffizienten** β charakterisieren.

Es gilt die einfache Beziehung:

$$\beta = 3\alpha$$

Tabelle: Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Stoffe

Versuch:**Wärmeausdehnung einer Metallkugel****Aufbau:**

Laut nebenstehender Abbildung

Versuchsdurchführung:

Kugel durch den Ring gleiten lassen. Danach kurz mit nicht leuchtender Flamme erhitzen und mit einem Lappen oder einer Zange auf den Ring setzen.

Versuchsergebnisse:

Durch die Erwärmung dehnt sich die Kugel so stark aus, daß sie nicht mehr durch den Ring gleitet. Bei Abkühlung verringert sich wieder das Volumen.

2.) Wärmeausdehnung von Flüssigkeiten:

Bei der Ausdehnung von Flüssigkeiten gelten dieselben Beziehungen der vorigen Seite, meistens verwendet man aber nur den Volumsausdehnungskoeffizienten.

Material	$\alpha_V [K^{-1}] \times 10^6$
Quecksilber	182
Spiritus	1100
Alkohol	1100
Öl	
Wasser (4°-5°C)	8
Wasser (12°-13°C)	121
Wasser (19°-20°C)	200

Tabelle: Volumsausdehnungskoeffizienten von Flüssigkeiten

Wasser zeigt ein besonders merkwürdiges Verhalten, das man als **Anomalie des Wassers** bezeichnet: Beim Erwärmen im Bereich von 0°C bis 4°C steigt das Volumen nicht an, sondern sinkt überraschenderweise ab. Ab 4°C dehnt sich das Wasservolumen mit zunehmender Temperatur stärker aus.

Versuch:**Thermometermodell****Versuchsanordnung:**

Siehe nebenstehende Abbildung

Versuchsdurchführung:

Das enge Glasrohr (oder Kunststoffrohr) soll einen kleinen Durchmesser von ca. 8mm aufweisen. Der Erlenmeyerkolben (100ml) wird mit gefärbtem Wasser oder gefärbtem Alkohol gefüllt. Beim Verschließen muß man darauf achten, dass

sich keine Luft mehr im Kolben befindet.

Für quantitative Versuche kann durch ein zweites Loch im Rohr ein Temperaturmeßfühler oder einfach ein Thermometer eingeführt werden. Zur Eichung eines Thermometers können die beiden Fixpunkte 0°C (eine Mischung aus Eisstücken und Wasser ungefähr zu gleichen Teilen) und der Siedepunkt des Wassers herangezogen werden.

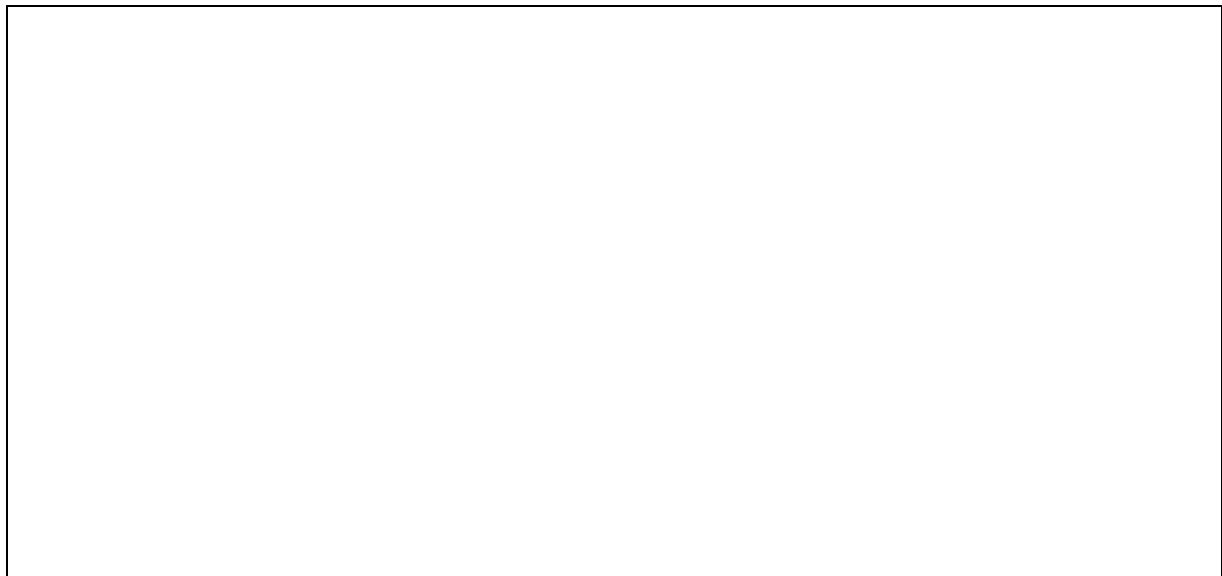
3. Ausdehnung von Gasen

Gase sind im Gegensatz zu Flüssigkeiten kompressibel, d.h. zusammendrückbar. Deshalb muß man bei der Erwärmung von Gasen, den Einfluß des Druckes auf die Ausdehnung beachten. Während die Ausdehnung fester und flüssiger Stoffe bei Erwärmung um 1°C je nach Art sehr verschieden ist, dehnen sich alle (idealen) Gase bei konstantem Druck bei einer Temperaturerhöhung um $\frac{1}{273}$ ihres Volumens aus, d.h. der kubische Ausdehnungskoeffizient

$$\delta\Omega = \frac{1}{273} = 0,00366 \text{ [K}^{-1} \text{]}$$

Qualitative Versuche:

Einige Handversuche, die die Ausdehnung der Gase (Luft) bei Erwärmung zeigen:



Quantitativer Versuch

Volumenänderung von Gasen durch Temperaturänderung bei konstantem Druck (Gesetz von Gay-Lussac)

Man mißt die Volumenänderung der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur bei konstantem Druck. Hieraus wird der räumliche Ausdehnungskoeffizient für Gase bestimmt, der für alle Gase gleich ist.

Vorsicht bei Arbeiten mit Quecksilber:

Quecksilberdämpfe sind giftig! Schon geringe Quecksilberdampfkonzentrationen in Räumen rufen bei längerer Einatmung akute und chronische Vergiftungserscheinungen hervor (Kopfweg, Zahnfleischrötung, Zahnausfall, Händezittern, Gedächtnisschwäche). Man sollte daher grundsätzlich folgende Punkte beachten:

- Alle Arbeiten mit Quecksilber grundsätzlich über einer großen Wanne ausführen
- Vorratsgefäße stets gut verschlossen halten. Nach der Entnahme von Quecksilber für einen Versuch sofort wieder gut verschließen.

- Starke Vorratsgefäße aus Glas, keine schnellen Bewegungen ausüben
- Grundsätzlich nur so viel Quecksilber bereit stellen, wie zur Durchführung des Versuchs notwendig ist.
- Verstreutes Quecksilber mit einer Spezial-Löffelzange einsammeln, feinste Tröpfchen mit einem Schaumstoffsammler auflesen
- Quecksilberbindende oder -umsetzende Substanzen sind z.B. Schwefelblume, Zinkstaub und Jod-Aktivkohle
- Eventuell Schutzhandschuhe tragen

Versuchsanordnung:

Laut nebenstehender Abbildung

In das offene Rohrende (6mm) einige Tropfen Quecksilber einfüllen. Das Rohr so neigen, daß unter entweichen von Luftblasen der ca. 2cm lange Quecksilberfaden sich bei ca. 5cm vor das senkrechte Rohrende im Reagenzglas schiebt. Reagenzglas in den bis ca. 7cm unter den Rand mit Leitungswasser gefüllten Stehkolben (500ml) so tief wie möglich eintauchen.

Versuchsdurchführung:

Nullpunkt des Quecksilberfadens markieren. Temperatur des Wasserbades (Umrühren) bestimmen und mit kleiner Flamme das Wasser erwärmen. Werte für Temperatur und Stand des Quecksilberfadens (Länge) abmessen:



Temperatur	°C								
Stand Hg	cm								
ϑV	cm ³								
ϱ	°C ⁻¹								

Das Volumen ϑV wird rechnerisch aus der Längenänderung ermittelt. Das eingeschlossene Luftvolumen wird mittels eines Meßzylinders durch Auslitern bestimmt. Der Ausdehnungskoeffizient wird mit der Formel $\Delta V = \beta \cdot V_0 \cdot \Delta t$ berechnet.

Gasthermometer:(siehe nebenstehende Abbildung)

Wer für vorigen Versuch ein Gasthermometer zur Verfügung hat, soll besser dieses Gerät verwenden: Das Thermometer besteht aus einer einseitig geöffneten Glaskapillare (Innendurchmesser 2,7 mm), in der mittels eines kleinen Quecksilbertropfens ein Gasvolumen variabler Größe eingeschlossen werden kann. Die Länge des eingeschlossenen Gasvolumens kann auf einer an der



Glaskapillare angebrachten Millimeterskala abgelesen werden. In einer Ausbuchtung am offenen oberen Ende des Gasthermometers befindet sich Silika-Gel zur Trocknung der in die Kapillare eintretende Luft, außerdem wird durch eine gasdurchlässige Fritte verhindert, daß Quecksilber austreten kann. Mit diesem Gesetz kann auch das **Boyle-Mariotte'sche Gesetz** (Isotherme Zustandsänderung: $pV=\text{konstant}$), sowie die **isochore** ($V=\text{konstant}$) Zustandsänderung, also die Druckzunahme durch Temperaturerhöhung gemessen werden.

Versuch: Druckänderung bei konstantem Volumen

Versuchsbeschreibung:

Aufbau gemäß nebenstehender Abbildung. In das Manometerrohr wird zunächst bei offenem Hahn Quecksilber bis A gefüllt, nach Schließen bis zur Marke S.

Messung:

Die Luft in der Glaskugel K wird erwärmt, indem man die Kugel in einem Wasserbad erwärmt. Dabei wird jeweils die Temperatur und der Druck am Manometerrohr, das einen verschiebbaren Maßstab trägt, abgelesen.

Temperatur	°C			
Temperatur	K			
Druck	mmHg			
Druck	Pa			
Druck/Temp.	Pa/K			

Meßergebnis:

Um die Meßergebnisse auswerten zu können, soll man zuerst folgende Umrechnungsbeziehungen für die SI-Einheiten benutzen:

$$t \text{ (K.)} = t \text{ (°C.)} + 273$$

$$1 \text{ mmHg} = 133,32 \text{ Pa}$$

Als bekanntes Meßergebnis soll folgendes Gasgesetz herauskommen:

Die Druckzunahme eines Gases ist bei konstantem Volumen zur Temperaturzunahme proportional, also als Formel:

$$\frac{p}{T} = \textit{kons tan t} \quad \text{bzw.} \quad \Delta p = p_o \cdot \gamma \cdot \Delta t$$

wobei γ_o als Spannungskoeffizient bezeichnet wird und p_o wiederum auf 0°C bezogen wird. Die Messung sollte für γ_o ungefähr einen Wert von 0,004 ergeben.

Der Druck aller (idealen) Gase steigt bei Erwärmung bei konstantem Volumen gleichartig an.

4. Gaskinetische Deutung der Wärmeerscheinungen:

Die Moleküle eines idealen Gases sind voneinander so weit entfernt, daß zwischen ihnen kaum mehr Kohäsionskräfte wirken können. Die Moleküle des Gases schwirren in unregelmäßiger Bewegung durcheinander (ungeordnete Molekularbewegung). Sie stoßen dabei oftmals gegeneinander und gegen die Gefäßwände. Diese Stöße sind völlig elastisch, sodaß kein Energieverlust eintritt.

Versuch: **Computersimulation**

Mit dieser Computersimulation kann das Verhalten von Gasteilchen demonstriert werden und die Gasgesetze gaskinetisch erklärt werden:

- Die Temperatur eines Körpers ist umso höher, je heftiger sich seine Moleküle bewegen:
- Boyle Mariotte'sches Gesetz: Bei gleichbleibender Geschwindigkeit (=Temperatur) der Gasteilchen wird bei doppelter Belastung (Druck) das Volumen halbiert.
- Ausdehnung der Körper beim Erwärmen : Die immer heftiger schwingenden Moleküle brauchen mehr Platz, das Gas dehnt sich aus.
- Absoluter Nullpunkt: Es muß eine tiefste Temperatur geben (-273°C), nämlich dann, wenn die Moleküle überhaupt keine Bewegung mehr ausführen.
- Druckerhöhung bei Erwärmen: Die Stöße werden durch die raschere Bewegung der Gasmoleküle heftiger.
- Die meisten Wärmeerscheinungen lassen sich mit dem gaskinetischen Modell erklären und verstehen.

Tabelle: Mittlere Geschwindigkeiten einiger Gase bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	Wasserstoff v [m/s]	Stickstoff v [m/s]	Sauerstoff v [m/s]
0	1843	493	461
100	2155	576	539
200	2427	649	607
300	2671	714	668
400	2895	774	724
500	3102	829	776

Bemerkung 1:

Bei Festkörpern und Flüssigkeiten wirken zusätzlich zur thermischen Bewegung Kohäsionskräfte (zwischenmolekulare Kräfte).

Eine Temperaturerhöhung bewirkt ein heftigeres Schwingen der Moleküle, bei Gasen

erhöht sich die durchschnittliche Geschwindigkeit der Moleküle.

Bemerkung 2:

Die mittlere kinetische Energie der Gasmoleküle ist proportional der Temperatur.

Bemerkung 3:

Wir können uns ein ideales Gas vorstellen, dessen Moleküle punktförmig klein sind und daher kein Volumen haben und aufeinander keinerlei Kräfte ausüben. In der Praxis: Je weiter ein Gas von der Verflüssigungstemperatur entfernt ist, desto „idealer“ ist es.

II.) Wärmübertragung

1.) Wärmeleitung

Die Wärme breitet sich in Stoffen aus, sie wird weitergeleitet, aber nicht alle Stoffe leiten die Wärme gleich gut. Die unterschiedliche Wärmeleitung der Stoffe wird durch die sogenannte Wärmeleitfähigkeit λ beschrieben. Für die transportierte Wärmeleistung gilt:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot \Delta t$$

$\dot{Q} = \frac{Q}{t}$ = Wärmemenge pro Zeit

A = Querschnittsfläche

λ = Wärmeleitfähigkeit

d = Abstand, Dicke

Δt = Temperaturunterschied

Versuche Unterschiedliche Wärmeleitung in Metallen

Versuchsaufbau:

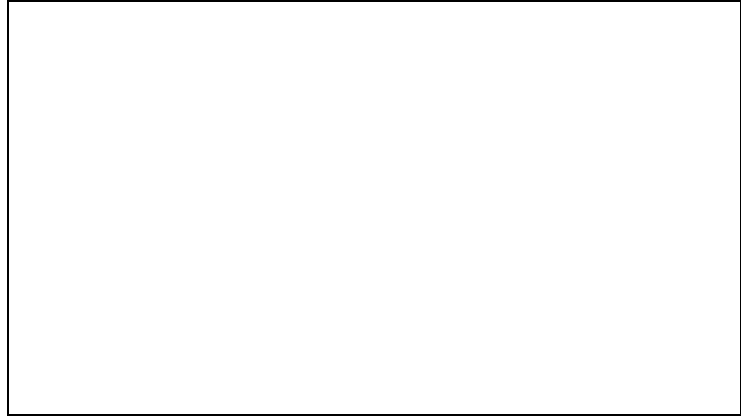
Ein aus verschiedenen Metallen zusammengenietetes Kreuz wird in seinem Mittelpunkt erhitzt und die Auswirkung auf die Streichhölzer beobachtet. (laut untenstehender Abbildung).

Versuchsergebnis:

Die Streichhölzer entzündeten sich der Reihe nach am Kupfer-, Messing- und Eisenstreifen.

Stoff	λ [W/Km]
Wasser (20°C)	0,598
Öl (20°C)	0,144
Luft (20°C)	0,0255
Wasserdampf (100°C)	0,0242
Eisen (Stahl)	71
Kupfer	372
Mineralische und pflanzliche Wärmedämmstoffe	0,035-0,050
Fichtenholz	0,14
Ziegel (je nach Rohdichte und Art der Steine)	0,35-1,05
Beton	0,75-2,1
Holzbeton	0,35-0,45
Bims-, Gas-, Schaumbeton	0,14-0,50
Zementmörtel	1,4
Kalkmörtel	0,87

Tabelle: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffe



Gleich lange und gleich dicke Stäbe werden in die Flamme gehalten: z.B. Silber, Kupfer, Eisen, Glas

2. Wärmeströmung

In Gasen (Luft) und Flüssigkeiten (Wasser) treten durch Temperaturunterschiede Strömungen auf, die erwärmten Teile steigen auf, die kühlen sinken ab. Bei der Wärmeströmung erfolgt der Wärmetransport und damit die Energieübertragung durch die strömende Masse (Wärmekonvektion).



Versuch

Wärmeströmung in Wasser

Aufbau:

Siehe nebenstehende Abbildung

Veruschedurchführung:

Ein Teil des Wasser vorsichtig einfärben und an der mit Drahtnetz umwickelten Stelle erwärmen.

Ergebnis:

Das erwärmte Wasser dehnt sich aus, wird dadurch spezifisch leichter und steigt nach oben. Durch die Strömung des Wassers erfolgt ein Transport der Wärme.

Versuch

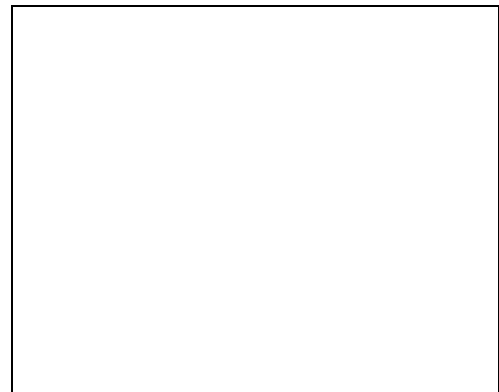
Wärmeströmung bei Gasen

Aufbau:

Siehe nebenstehende Abbildung

Ergebnis:

Die erwärmte Luft steigt auf (Schlierenbildung)



Versuch

Umgekehrte Konvektion

Bei flüssigem Stickstoff (-186°C) sieht man eine umgekehrte Konvektionsströmung: die kalte Luft strömt nach unten.

Der Wärmeaustausch zwischen Gasen bzw. Flüssigkeiten und einer festen Oberfläche (z.B. Wand) läßt sich durch folgende Gleichung erfassen:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta t$$

$\dot{Q} = \frac{Q}{t}$ = Wärmemenge pro Zeit

A = Querschnittsfläche

α = Wärmeübergangszahl

Δt = Temperaturunterschied

Bemerkung zur Tabelle: Die Tabelle enthält nur grobe

Richtwerte, für die genaue Berechnung der Wärmeübergangszahlen von Flüssigkeiten und Gasen ist besonders der Unterschied zwischen einer freien (laminaren) und erzwungener (turbulenter) Strömung entscheidend.

Strömung	α [W/m ² K]
Wandflächen innen bei natürlicher Luftbewegung	8
Wandflächen außen (v= 2m/s)	23
Wasser ruhend	350-580
Wasser bewegt	580-3500
Wasser siedend	4600-6900

3. Wärmestrahlung

Jeder Körper tauscht mit seiner Umgebung Wärme aus. Dieser Austausch erfolgt auch, wenn er sich in einem evakuierten Raum befindet, so daß Wärmeleitung und Wärmekonvektion ausscheidet. Die Energieaufnahme erfolgt hier durch Emission oder Absorption von Strahlung. Die Strahlung hängt von der Temperatur des Strahlers (Infrarot, sichtbares Licht, UV-Licht) und auch von der Beschaffenheit seiner Oberfläche ab.

Versuch

Abhängigkeit von der Oberfläche

Aufbau:

Laut Abbildung. Das Manometer wird mit färbigem Wasser gefüllt. Die Öffnungen des Leslie-Würfels gut verschließen (Schlauchanschluß für das Manometer in der Mitte, seitlich das Thermometer).

Messung:

Die unterschiedliche Absorption der Flächen verspiegelt, weiß, matt und schwarz wird durch Ablesen der Temperatur und des Druckanstieges gemessen.

Ergebnis:

Matte, schwarze Oberflächen absorbieren Wärmestrahlen stärker als helle glänzende Oberflächen.

Versuch: Strahlungsmessung

Aufbau:

Siehe nebenstehendes Bild. Die abgestrahlte Wärme wird mit einer Thermosäule gemessen und der Wert am Meßgerät angezeigt (Drehspulinstrument und eventuell dazu Verstärker).

Messung:

Bei verschiedenen Wassertemperaturen und Oberflächen messen. Zimmertemperatur messen und bei ihr den entsprechenden Ausschlag als Nullpunkt definieren.

Ergebnis:

Je höher der Temperaturunterschied, desto stärker die Strahlung.

Strahlungszahlen:

Eine Oberfläche gibt um so mehr Wärme durch Strahlung ab, je größer die Strahlungszahl der Fläche ist. Die höchstmögliche Strahlungszahl besitzt der absolut schwarze Körper, der alle auf ihn auffallende Strahlung absorbiert, gleichzeitig besitzt dieser Körper aber auch das höchste Wärmeabstrahlungsvermögen (Emissionsvermögen).

Stoff und Oberfläche	Strahlungszahl [W/m ² K ⁴]
absolut schwarzer Körper	5,77
Silber poliert	0,12-0,17
Aluminium walzblank	0,23
Glas	5,4
Holz	5,4
Porzellan	5,4
Ziegel, Mörtel, Putz	5,4
Aluminiumbronzeantsrich	1,2-1,3
Emaillack schwarz	5,2
Heizkörperlack	5,4
beliebige Lacke, Ölfarben	4,9-5,5

Bei den im Bauwesen vorkommenden Temperaturen besteht kein wesentlicher Unterschied im Absorptions- bzw. Emissionsvermögen der nichtmetallischen Stoffe (auch nicht die Farbe). Lediglich Metalle mit blanker Oberfläche zeigen hohes Reflexionsvermögen.

Daher können zur Berechnung des Wärmeüberganges durch Strahlung im Bauwesen Richtwerte für die Wärmeübertragung durch Strahlung angegeben werden.

Tabelle: Strahlungszahlen verschiedener Oberflächen bei Temperaturen zwischen 0°C und 100°C

Temp.[°C]	ϱ_s [W/m ² K]
0 bis 10	4,7
10 bis 20	5,0
20 bis 50	6,4
50 bis 100	10,5

Versuch:**Nachweis der Wärmestrahlung****Aufbau:**

Tabelle: Wärmeübergangszahlen bei nichtmetallischen Flächen

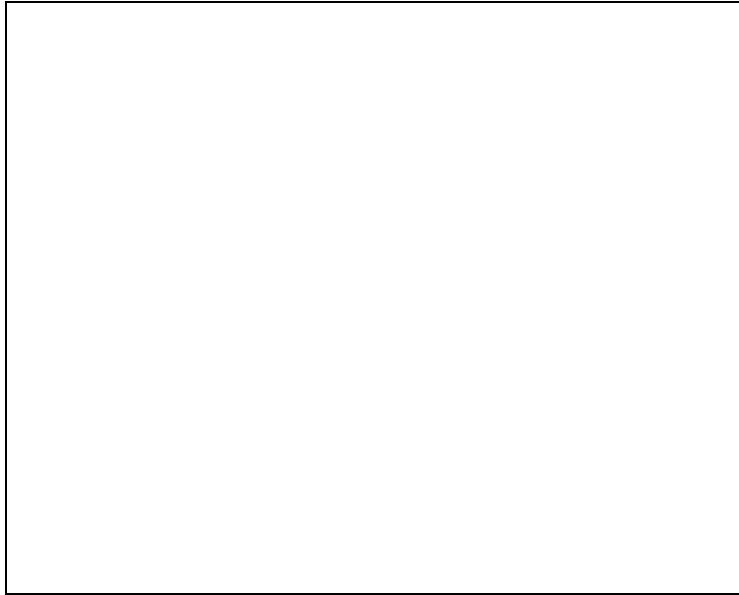
Aufbau laut Abbildung. Lampe und Thermometer in die Brennpunkte geben. Zur Abschirmung der direkten Strahlung Karton zwischen Lampe und Thermometer stellen.

Versuchsdurchführung:

Vor Einschalten der Lampe rechten Spiegel entfernen und Thermometer beobachten. Dann den Spiegel montieren und Temperatur am Thermometer ablesen.

Ergebnis:

Der Temperaturanstieg kann nur durch die Wärmestrahlung verursacht worden sein, Leitung und Konvektion scheiden aus. Für die Ausbreitung der Wärmestrahlung gelten die Gesetze der geometrischen Optik.

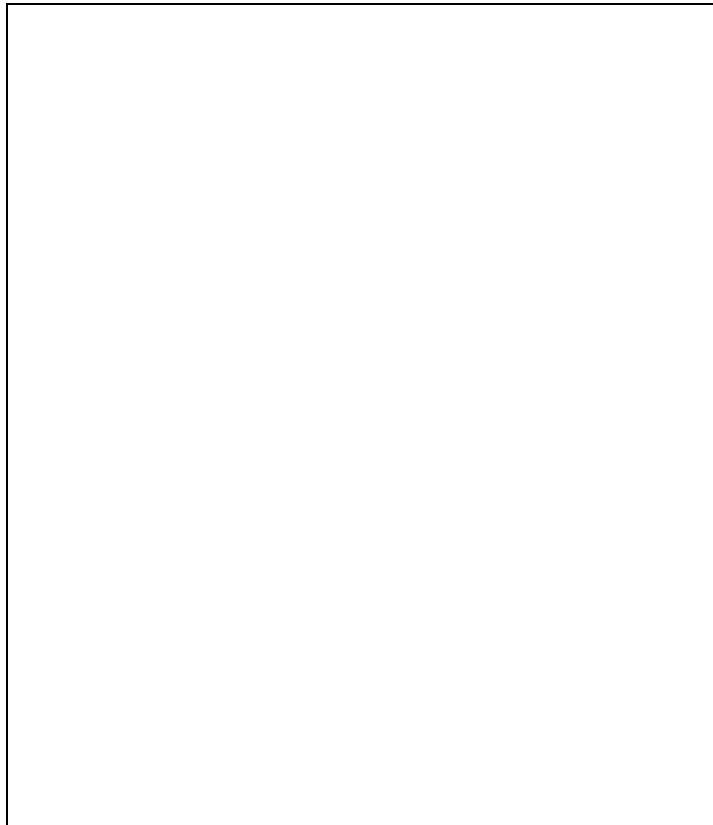


Laborübung 1

Bimetall

Aufbau:

Laut Abbildung

**Durchführung:**

Der Abstand zum Brenner beträgt etwa 10cm. Beobachtung des Verhaltens des Bimetallstreifens. Nach Entfernung des Brenners, weitere Beobachtung des Streifens. Nach Abkühlung wird der Bimetallstreifen umgekehrt eingespannt.

Ergebnis:

Bei Erwärmung krümmt sich der Bimetallstreifen, weil sich die gemusterte Seite stärker ausdehnt als die blanke.

Notizen:

Laborübung 2

Ausdehnung von Luft durch Erwärmung (qualitativ)

Aufbau:

Laut Abbildung



Durchführung:

Die Luft im Erlenmeyerkolben (100ml) wird mit kleiner Flamme erwärmt. Dabei wird das Ende des Plastikschauches im Wasser beobachtet. Nicht zu stark erhitzen. Nach Entfernung des Brenners wieder beobachten. Die Abkühlung kann man mit kaltem Wasser beschleunigen.

Ergebnis:

Luft dehnt sich beim Erwärmen viel stärker aus als Flüssigkeiten oder feste Stoffe. Beim Abkühlen verringert sich wieder das Volumen.

Notizen:

Laborübung 3

Volumsdehnung von Gasen (quantitativ)

Aufbau:

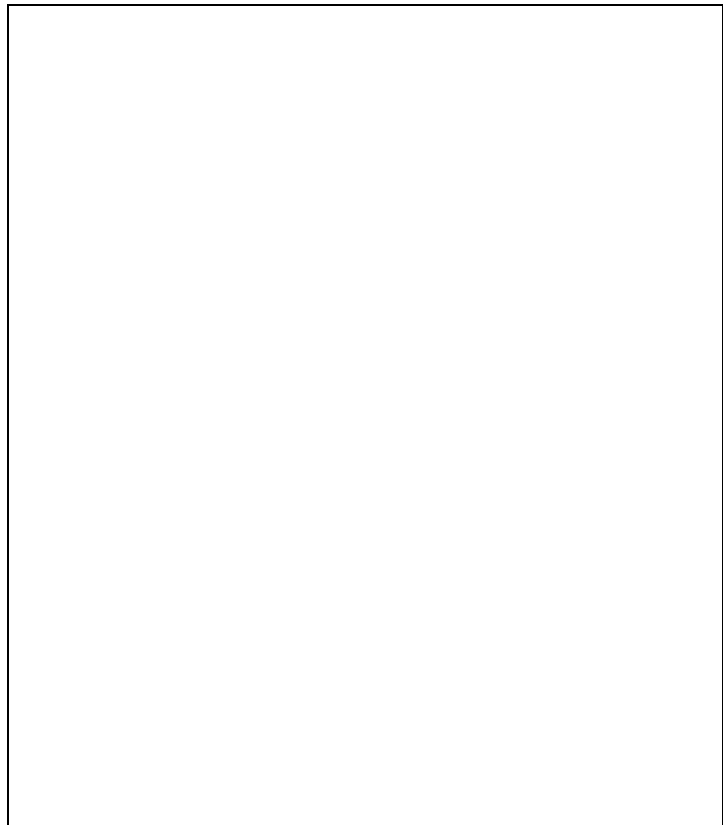
Laut Abbildung:

In das offene Rohrende
(Radius= mm)

einige Tropfen gefärbtes Wasser einfüllen. Das Rohr so neigen, daß unter entweichen von Luftblasen der ca. 2cm lange Flüssigkeitsfaden sich bei ca. 5cm vor das senkrechte Rohrende im Reagenzglas schiebt. Reagenzglas in den bis ca. 7cm unter den Rand mit Leitungswasser gefüllten Stehkolben (500ml) so tief wie möglich eintauchen.

Versuchsdurchführung:

Nullpunkt des Flüssigkeitsfadens markieren. Temperatur des Wasserbades (Umrühren) bestimmen und mit kleiner Flamme das Wasser erwärmen. Werte für Temperatur und Stand des Flüssigkeitsfadens (Länge) abmessen:



Temperatur	°C								
Stand H ₂ O	mm								
$\varnothing V$	mm ³								
\varnothing	°C ⁻¹								

Das Volumen $\varnothing V$ wird rechnerisch aus der Längenänderung ermittelt.

Das eingeschlossene Luftvolumen wird mittels eines Meßzylinders durch Auslitern bestimmt.

$$V_0 = \dots\dots\dots\text{mm}^3$$

Der Ausdehnungskoeffizient wird mit der Formel $\Delta V = \beta \cdot V_0 \cdot \Delta t$ berechnet.

Notizen:

Laborübung 4

Druckänderung von Luft bei konstantem Volumen

Aufbau:

Laut Abbildung.

Aus den Plastikrohren und den Schläuchen werden die Verbindungen hergestellt und das Manometer mit färbigem Wasser gefüllt. Ein Erlenmeyerkolben (100ml) wird in das mit Wasser gefüllte Kalorimeter gestellt und mittels Gummistopfen mit dem Manometer verbunden.



Durchführung:

Gemessen wird zuerst die Temperatur des Wassers:

$$T_1 = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$$

Der Wasserstand im Manometer wird angezeichnet.

Das Wasser im Kalorimeter wird mit dem Gasbrenner erwärmt (ca. 1 Minute). Nach Entfernung des Brenners steigt die Temperatur noch an, weil für die Wärmeübertragung noch Zeit benötigt wird.

Ablesen der Temperatur $T_2 = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$

Das Manometer zeigt eine Erhöhung des Druckes an. Um jedoch bei gleichem Volumen messen zu können, wird das nicht mit dem Schlauch verschlossene Manometerrohr soweit an, daß wiederum das ursprüngliche Gasvolumen hergestellt wird (die Manometerflüssigkeit erreicht im verschlossenen Rohr wieder die angezeichnete Höhe).

Der Höhenunterschied zwischen den beiden Wassersäulen wird gemessen (jeweils vom Tisch aus messen):

Der Höhenunterschied beträgt $\dots\dots\dots\text{cm}$

Es gilt 1cm Wassersäule entspricht ungefähr einem Druck von 1 mbar

Ergebnis:

Die Druckerhöhung durch Erwärmung beträgt bei Luft $\dots\dots\dots\text{mbar}/^\circ\text{C}$

Notizen:

Laborübung 5

Wärmeleitung (qualitativ)

Aufbau:

Laut Abbildung.

Die beiden Rohre sind aus Aluminium und aus Eisen, sind gleich lang und dick. Auf die beiden Enden der Rohre werden Wachskügelchen geklebt (im Abstand von einigen Zentimetern) bzw. Thermochromfarben aufgebracht.

Durchführung:

Die Berührungsstelle der beiden Metallrohre werden erwärmt. Dabei wird beobachtet, in welcher Reihe die Wachskügelchen herabfallen, bzw. wie unterschiedlich die Verfärbung der Thermochromfarben erfolgt.

Ergebnis:

Aluminium ist ein besserer Wärmeleiter als Eisen.

Notizen:

Laborübung 6

Wärmeströmung (qualitativ)

Aufbau:

Laut Abbildung.

Durchführung:

Versuchsordnung 1:

Zwei mit Wasser verschiedener Temperatur gefüllte Flaschen werden übereinandergestülpt.

Versuchsordnung 2:

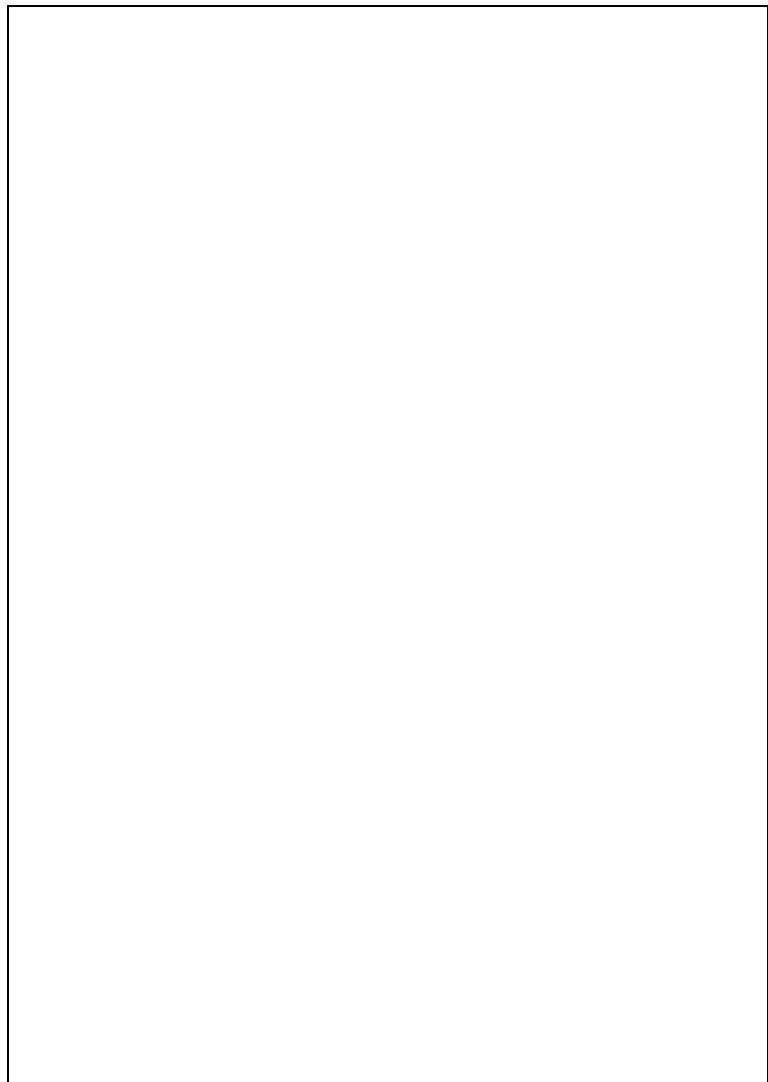
Mit einer Pipette wird ein Tropfen gefärbten Wassers in den Inhalt der Wanne gebracht.

Versuchsordnung 3:

Ein Tintenfaß mit gefärbtem Wasser wird auf den Boden der wassergefüllten Wanne gestellt.

Ergebnis:

Warmes Wasser steigt auf, weil es spezifisch leichter ist, es kommt zur Wärmekonvektion.

Notizen:

III.) Wärme

Wärme ist eine Form von Energie (**1. Hauptsatz der Wärmelehre**). Wärme ist innere Bewegungsenergie eines Körpers. Unter der **spezifischen Wärme** c_p eines Stoffes bei konstantem Druck versteht man jene Wärmemenge, die zur Erwärmung von 1kg dieses Stoffes um 1°C (bei konstantem Druck) nötig ist.

Stoff	c_p [kJ/kgK]
Wasser(20°C)	4,183
Luft	1,005
Eisen	0,480
Beton	0,880
Ziegel	0,785
Öl	1,630
Porzellan	0,800

Versuch:**Messung der spezifischen Wärme von Wasser****Aufbau:**

Siehe nebenstehende Abbildung

Versuchsdurchführung:

Das Leergewicht des Dewargefäßes bestimmen. Dann mit einer Wassermenge von 0,1kg füllen und dessen Temperatur bestimmen. Heizelement einschalten, das Wasser dauernd umrühren. Nach jeweils 30 Sekunden Temperatur ablesen. Strom I und Spannung U an den Meßinstrumenten ablesen.

Ergebnisse:

Für die elektrische Energie (Arbeit) gilt:

$$W = U \cdot I \cdot t$$

U.....Spannung in Volt

I.....Stromstärke in Ampere

t.....Zeit in Sekunden

W.....Elektrische Energie in J (=Ws)

Für die Erwärmung des Wassers gilt

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t$$

m.....Masse des Wassers (in kg)

c_pSpezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck (in J/kgK)

ΔtTemperaturdifferenz in °C

Q.....Wärmemenge (in J)

Unter Vernachlässigung der Verluste dient die hineingesteckte elektrische Energie zur Erwärmung des Wassers; somit kann man beide Energiewerte gleichsetzen und c_p aus den Meßwerten berechnen. ($c_p = 4186 \text{ J/kgK}$)

Bemerkung:

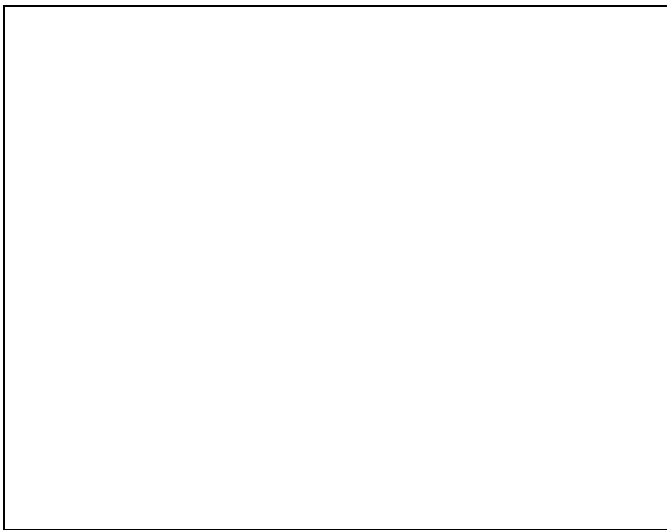
Die quantitative Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von anderen Flüssigkeiten und Festkörpern bringt man den Stoff in ein Kalorimeter mit Wasser unterschiedlicher Temperatur und berechnet aus der sich einstellenden Mischtemperatur die Wärmekapazität.

IV.) Aggregatzustandsänderungen

Beim Sieden verdampft eine Flüssigkeit unter Entwicklung von Dampfblasen innerhalb der Flüssigkeit, aber auch unterhalb der Siedetemperatur verdampft eine Flüssigkeit an ihrer freiliegenden Oberfläche (Verdunsten). Der mit einer Flüssigkeit im dynamischen

Gleichgewicht stehende Dampf wird als gesättigter Dampf bezeichnet. Sein Druck heißt Sättigungsdampfdruck oder kurz Dampfdruck.

Der Dampfdruck steigt mit der Temperatur



Versuch: Sieden bei Unterdruck

Aufbau:

Siehe nebenstehende Abbildung. Zur Erzeugung des Unterdruckes wird eine Wasserstrahlpumpe verwendet.

Durchführung:

Das Wasser wird auf ca 80°C erwärmt, dann die Vakuumpumpe angeschlossen.

Ergebnis:

Das Wasser siedet bei erniedrigtem Druck früher. Zum Verdampfen ist

Energie notwendig (Verdampfungswärme).

Tabelle: Zustandsgrößen für Sattdampf

Druck (bar)	Siedetemp. (°C)	Dichte (kg/m ³)
0,02	17,51	0,015
0,20	60,09	0,131
0,60	85,95	0,366
0,80	93,51	0,479
1,00	99,63	0,591
1,20	104,81	0,700
10,00	179,88	5,144
221,29	374,15	315,000



Versuche mit flüssigem Stickstoff (-186°C)

- Auch Luft (Stickstoff) wird flüssig
- Quecksilber wird fest (Schmelzpunkt bei -39°C)
- Die Eigenschaften der Stoffe ändern sich bei tiefen Temperaturen

Vorsicht: Bei Arbeiten mit Stickstoff ist wegen der tiefen Temperatur Vorsicht geboten. Die Erfrierungen schmerzen wie Verbrennungen und werden auch so behandelt.

Zustandsdiagramm von Wasser

V.) Strömungslehre: Strömung von Gasen und Flüssigkeiten

1. Druck

Die Strömungslehre beschreibt das Verhalten bewegter Gase und Flüssigkeiten. In einer stationären Strömung tritt durch den Querschnitt einer Stromröhre dieselbe Menge pro Sekunde, es gilt die sogenannte Kontinuitätsgleichung (siehe Abbildung):

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

ρDichte [kg/m³]

A.....Strömungsquerschnittsfläche [m²]

v.....Geschwindigkeit [m/s]

Außerdem gilt die Bernoullische Gleichung:

$$p + \rho gh + \rho \frac{v^2}{2} = \text{konstant}$$

p.....Kolbendruck

ρghHydrostatischer Druck

$\rho \frac{v^2}{2}$ Hydrodynamischer Druck

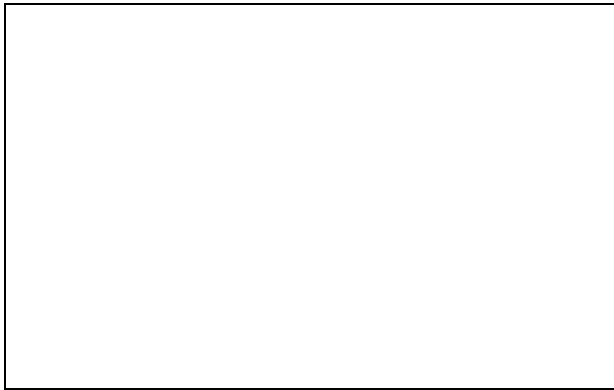
Bemerkung:

Für konstante Höhe oder geringem Höhenunterschied (vor allem bei Gasen) kann der hydrostatische Druck entfallen.

Versuch:
Messung an
Gasströmungen

Aufbau:

Laut Abbildung. Zur Anzeige der Druckunterschiede eignet sich ein Feinmanometer mit geneigter Skala und gefärbter Flüssigkeit.



Zur Druckmessung verwendet man ein Prandtl-Staurohr (siehe nebenstehende Abbildung):

Es besteht aus einem Doppelrohr zur Messung des Staudruckes p_0 , jenem Druck bei dem die Geschwindigkeit 0 wird (Innenrohr), des statischen Druckes in der Strömung (Außenrohr) und des Gesamtdruckes in Luftströmungen (Differenz). Die Skala des Manometers ist auch für entsprechende Geschwindigkeiten geeicht, sodaß man direkt die Strömungsgeschwindigkeiten ablesen kann.

Prandtlrohr:

a.) Schema

b.) Schnitt

Versuchsdurchführung:

Mit dieser Messanordnung könne alle Versuche für stationäre Gasströmungen durchgeführt werden, wie z.B.:

- Kontinuitätsgleichung
- Geschwindigkeitsmessungen
- Gasdurchsätze mittels des Strömungsquerschnittes und der Geschwindigkeit
- Der Druck in einer Strömung ist umso kleiner, je größer die Strömungsgeschwindigkeit wird. (Hydrodynamisches Paradoxon)
- Druckverluste in Rohrleitungen
- Strömungswiderstände (mit Hilfe eines Kraftmessers)

Bemerkung: Der Druckverlust innerhalb eines Rohres und von Formstücken kann durch

folgende Formel berechnet werden: $\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$ mit $\zeta = \frac{\lambda \cdot l}{D}$

- ζ Widerstandszahl
□ Dichte
● Rohrreibungszahl
v Geschwindigkeit
D Rohrlinnendurchmesser
l Rohrlänge

Die Rohrreibungszahl ist bei Laminarströmung nur von der Reynoldszahl, sonst auch von der Rauigkeit der Rohrwand abhängig (und meistens aus Nomogrammen abzulesen).

Widerstandszahlen von Leitungsteilen

Laborübung 7

Messung der Wärmekapazität

Aufbau: Laut Abbildung

Versuchsdurchführung:
100ml Wasser (0,1kg) füllen und dessen Temperatur bestimmen. Heizelement einschalten, das Wasser dauernd umrühren. Nach jeweils 30 Sekunden Temperatur ablesen. Strom I und Spannung U an den Meßinstrumenten ablesen.

Ergebnisse:

Für die elektrische Energie (Arbeit) gilt:

$$W = U \cdot I \cdot t$$

Für die Erwärmung des Wassers gilt

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t$$

m =kg

t₀ =(°C)

	t(s)	t(°C)	I(A)	U(V)	W (J.)	Δt (°C)	c _p (J/kgK)
Nr.1							
Nr.2							
Nr. 3							
Nr. 4							
Nr. 5							
Nr. 6							

Unter Vernachlässigung der Verluste dient die hineingesteckte elektrische Energie zur Erwärmung des Wassers; somit kann man beide Energiewerte gleichsetzen und c_p aus den Meßwerten berechnen.(c_p = 4186 J/kgK)

Laborübung 8

Flüssiger Stickstoff

Folgende Phänomene werden untersucht:

- Erstarrung von Quecksilber
- Quecksilber erstarrt vor Wasser (wegen der kleineren spezifischen Wärme)
- Elektrischer Widerstand sinkt mit der Temperatur
- Einfluß der Temperatur auf die Elastizität

