



SS/~~WS~~ 20.10.../.....

Praktikum: (~~P1~~/P2) (~~Mo/Di~~/Mi/Do) Gruppe-Nr: Do-01

Name: ..... Lapp ..... Vorname: ..... Johanna .....

Name: ..... Hetzel ..... Vorname: ..... Patrick .....

Versuch: ... Ideales und reales Gas (P2-47) ... (mit/ohne) Fehlerrechnung

Betreuer: ..... Lukas Pfaffmann ..... Durchgeführt am: ...17.06.2010...

Abgabe am: 24.06.10 .....

Rückgabe am: .....

Begründung:

2. Abgabe am: .....

Ergebnis: (+ / 0 / -)

Fehlerrechnung: ja / nein

Datum: 28.06.10 .....

Handzeichen: PF .....

Bemerkungen: keine; Quellenangaben sind immer dabei -> sehr gut :-)



Sinn dieses Experimentes ist es, durch Anschauung das Verständnis für Begriffe aus der Wärmelehre zu fördern. Experimentell kommt es vor allem darauf an, die notwendigen Versuchsbedingungen (z.B. 'adiabatisch' oder 'Gleichgewichtszustand') einzuhalten und notwendige Korrekturen zu erkennen und bei der Auswertung zu berücksichtigen (z.B. beim Gasthermometer).

**Hinweis:**

- 1) Die Glasgeräte, ganz besonders die Gasthermometer-Kapillare und die Dampfdruckapparatur, aber auch die Schwingungsröhre, sind sehr bruchempfindlich. Bitte sehr vorsichtig handhaben!
- 2) Nicht bei Feuchtigkeit in den eingeschalteten Heizpilz fassen. Keine perfekte Isolierung.
- 3) Der Versuch darf erst nach Erläuterungen durch den Betreuer begonnen werden.

**Aufgaben:**

1. Bestimmen Sie mit dem Jollyschen Gasthermometer den Spannungskoeffizienten  $\alpha$  für Luft, und berechnen Sie daraus die Celsius-temperatur des absoluten Nullpunkts.

Die Fehler durch thermische Ausdehnung und schädlichen Raum des Gasthermometers sind mit Hilfe einer weiteren Messung zu eliminieren. Wenn sich das Gasthermometer abkühlt, muß das bewegliche Manometerrohr bis zum Anschlag nach unten geschoben werden, da sonst Quecksilber in das Gefäß überfließt. Ein Diagramm 'Siedetemperatur des Wassers bei reduziertem Barometerstand' befindet sich am Arbeitsplatz. Verwenden Sie destilliertes Wasser. Vergessen Sie nicht, das Barometer abzulesen.

- 2.1 Bestimmen Sie für Luft das Verhältnis der spezifischen Wärmen,  $\kappa = c_p/c_v$ , nach der Methode von Clement-Desormes.

Skizzieren Sie den Prozeß im p-V-Diagramm. Ablesungen dürfen nur vorgenommen werden, wenn sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Bis zu 15 Minuten Wartezeit müssen eingehalten werden. Zum Erzeugen von Überdruck (geringem! Nicht die Flüssigkeit aus dem U-Rohr treiben! Welcher Überdruck ist sinnvoll?) Dreiwegehahn am Blasebalg in Stellung 'vorn' bringen. Zur Messung Hahn um  $180^\circ$  drehen. Messungen zu den Aufgaben 2.1 und 2.2 können schon neben solchen zu Aufgabe 1 ausgeführt werden.

- 2.2 Überzeugen Sie sich durch einige Vergleichsmessungen mit verschieden schnellem Druckausgleich davon, daß bei der Messung in Aufgabe 2.1 die Entspannung ausreichend adiabatisch erfolgt.

- 2.3 Bestimmen Sie dasselbe Verhältnis  $\kappa$  nach der Methode von Rüchard aus der Schwingungsdauer einer Stahlkugel, die im Glasrohr auf einem Luftpolster schwingt.

Die Qualität der Messung hängt sehr stark von folgenden Bedingungen ab:

- a) Das Glasrohr muß innen extrem sauber sein.
- b) Alle Stopfen müssen dicht schließen.
- c) Das Glasrohr muß recht gut senkrecht stehen. Das kann durch Drehen des Stopfens gut erreicht werden.
- d) Die Stahlkugel muß sehr sauber sein. Schon kleine Verunreinigungen führen zu starker Bremsung. Die Kugel deshalb vor jeder Messung mit fusselfreiem Tuch (kein Zellstoff) reinigen. Bis zu 17 Schwingungen sind erreicht worden.

Die Schwingungsdauer muß sorgfältig bestimmt werden. Sie geht quadratisch in das Ergebnis ein.

Das Luftvolumen unter der Kugel beträgt 10,58 Liter  $\pm 0,3\%$ .

**3. Messen Sie die Dampfdruckkurve einer Flüssigkeit zwischen Zimmertemperatur und 0°. Berechnen Sie aus der Dampfdruckkurve die Verdampfungswärme der Flüssigkeit.**

Achten Sie darauf, daß zu Beginn im Gefäß keine Flüssigkeit außerhalb des Temperaturbades niedergeschlagen ist. Das kugelförmige Gefäß muß immer kälter sein als die anderen Teile der Apparatur. Vor der Messung Gleichgewicht abwarten. Die Meßkurven müssen für fallende und für steigende Temperatur übereinstimmen. Die Verdampfungswärme kann aus der Dampfdruckkurve graphisch ermittelt werden (Clausius-Clapeyron-Gleichung mit  $V_{\text{Flüss}} \ll V_{\text{Dampf}}$  und mit  $pV = RT$ , integriert).

Bei der Flüssigkeit handelt es sich um n-Hexan. Warmes Wasser bereiten Sie mit dem Gerät von Versuch 1. Verwenden Sie destilliertes Wasser.

**Stichworte:**

Ideales Gas und reales Gas, Zustandsgleichungen, Thermodynamische Definition der Temperatur, spezifische Wärmen  $c_p$  und  $c_v$ , Isotherme, Adiabate, Polytrope, Kreisprozeß, Gleichgewichtszustände zwischen verschiedenen Phasen, Dampfdruckkurve, Tripelpunkt, Clausius-Clapeyron-Gleichung.

**Zubehör:**

Jollysches Gasthermometer,  
Kathetometer für die Ablesung,  
Heizpilz (320 W),  
Becherglas, Rührer,  
2 Glasflaschen, 10 Liter,  
U-Rohr-Manometer,  
Blasebalg-Gummiball zur Überdruckerzeugung,  
Dreiwegehahn,  
Dampfdruckgefäß mit n-Hexan-Füllung und Hg-Manometer,  
Thermometer 0-50 Grad Celsius,  
2 Liter-Wassergefäß,  
Präzisionsglasrohr (60cm lang) mit gut passender Stahlkugel (16mm $\varnothing$   $\pm 0,5\%$ ; 16,68g  $\pm 0,1\%$ ),  
Barometer (mit Bedienungsanweisung) im Versuchsraum.

**Literatur:**

Walcher: *Praktikum der Physik*  
Krafft: GfK-Fortbildungskurs *Physikalische Grundlagen der Vakuumtechnik*  
Pohl: *Mechanik, Akustik, Wärmelehre*  
Gerthsen, Kneser, Vogel: *Physik*  
Westphal: *Physikalisches Praktikum*  
Falk: *Theoretische Physik*, Bd. IIa

Ideales und reales Gas

P2-47

Vorbereitung

Johanna Lapp und Patrick Hetzel

Gruppe Do-01

11. Juli 2010

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Jollysches Gasthermometer</b>	<b>4</b>
<b>2 Bestimmung von <math>\kappa = c_p/c_v</math> für Luft</b>	<b>6</b>
2.1 Methode von Clement-Desormes . . . . .	6
2.2 Vergleichsmessungen . . . . .	8
2.3 Methode von Rüchard . . . . .	8
<b>3 Dampfdruckkurve von n-Hexan</b>	<b>10</b>

## 0 Einführung

Wir beschäftigen uns in diesem Versuch mit einigen grundlegenden Begriffen der Thermodynamik. Diese sollen hier zunächst etwas erläutert werden.

In der Thermodynamik verwendet man üblicherweise die Kelvin-Temperaturskala. Bei  $T = 0K$  liegt der **absolute Nullpunkt**. In der Celsius-Temperaturskala entspricht dies einem Wert von  $\vartheta = -273,15^\circ C$ .

Beim **idealen Gas** wird angenommen, dass die einzelnen Gasteilchen außer elastischen Stößen nicht miteinander wechselwirken, sie werden als punktförmige Massepunkte angenommen. Es gilt dann die Zustandsgleichung für ideale Gase:

$$pV = nRT \quad (1)$$

wobei  $p$  der Druck,  $V$  das Volumen,  $T$  die absolute Temperatur,  $n$  die Stoffmenge und  $R$  die universelle Gaskonstante ist.

In der Realität gilt dies nur für einige Moleküle in Näherung, für **reale Gase** gibt es verschiedene Ansätze. Der wohl wichtigste ist dabei die Van-der-Waals-Gleichung:

$$\left( p + \frac{an^2}{V^2} \right) \cdot (V - nb) = nRT \quad (2)$$

Dabei ist der Druck um den Binnendruck  $\frac{an^2}{V^2}$  ergänzt, der die gegenseitige Anziehung der Gasteilchen berücksichtigt. Der Term  $nb$  wird als Ko- oder Eigenvolumen bezeichnet, er steht also für die Ausdehnung der Gasteilchen.

Trägt man die Isothermen eines solchen Van-der-Waals-Gases - unter Berücksichtigung der Maxwell-Korrektur - in ein p-V-Diagramm ein, so erhält man folgendes Bild:

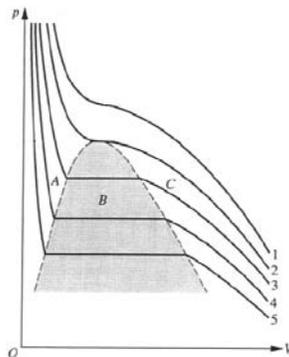


Abb. 1: p-V-Diagramm <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Quelle: [http://grephysics.net/ans/probs/pi/9277\\_46.gif](http://grephysics.net/ans/probs/pi/9277_46.gif)

1 ist hier die Isotherme bei der höchsten Temperatur und 5 die bei der niedrigsten Temperatur. Unterhalb der kritischen Temperatur (2) gibt es drei Bereiche. Im Bereich A liegt der Stoff flüssig vor, im Bereich C gasförmig. Verringert man bei gleicher Temperatur das Volumen, so hat das in diesen Bereichen eine Druckerhöhung zur Folge. Im Bereich B wird das Gas dagegen langsam verflüssigt, der Druck bleibt dabei gleich. Es liegen hier gesättigter Dampf und Kondensat im Gleichgewicht vor, daher spricht man hier auch vom Sattedampfdruck  $p_s$ , der stark temperaturabhängig ist.

Die Temperaturabhängigkeit dieses Sattedampfdrucks ist durch die **Clausius-Clapeyron-Gleichung** gegeben:

$$\frac{dp_s}{dT} = \frac{1}{T} \cdot \frac{H_v}{V_D - V_K} \quad (3)$$

Dabei ist  $H_v$  die Verdampfungsenthalpie,  $V_D$  und  $V_K$  sind die Volumina des Dampfes und des Kondensats.

Als **adiabatischen Prozess** bezeichnet man einen Prozess, bei dem kein Stoff- oder Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, d.h.  $\Delta Q = 0$ . Es gilt hier die Adiabaten-Gleichung:

$$p \cdot V^\kappa = \text{const.} \quad (4)$$

$$T \cdot V^{\kappa-1} = \text{const.} \quad (5)$$

$\kappa$  ist der sogenannte Adiabatenexponent. Er ist gerade der Quotient der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck  $c_p$  und bei konstantem Volumen  $c_v$ :  $\kappa = c_p/c_v$ .

## 1 Jollysches Gasthermometer

In diesem ersten Versuch soll der Spannungskoeffizient  $\alpha$  für Luft bestimmt werden und daraus die Celsiusstemperatur des absoluten Nullpunktes. Dazu wird ein Jollysches Gasthermometer verwendet (Abb. 2).

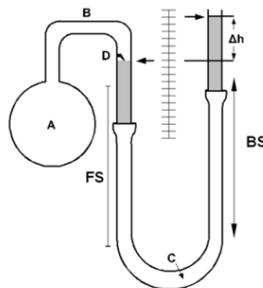


Abb. 2: Jollysches Gasthermometer<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Quelle: <https://elearning.mat.univie.ac.at/physikwiki/index.php/LV005:LV-Uebersicht/Materialien/Gasthermometer>

Es besteht aus dem Rezipient A, in dem sich das zu untersuchende Gas (hier Luft) befindet. Dieser ist über eine Kapillare B mit einem Quecksilbermanometer verbunden. Der feste Schenkel FS bleibt während dem Versuch unverändert, während der bewegliche Schenkel BS jeweils nach oben bzw. unten bewegt wird, so dass der Quecksilbermeniskus im FS immer am Dorn D ist, der die Nullmarke darstellt.

A wird nun zunächst in Eiswasser, dann in ein Dampfbad über siedendem Wasser gebracht. Beide Male soll die Höhendifferenz  $\Delta h$  der Quecksilberröhre bestimmt werden und daraus die Druckdifferenz  $\Delta p$ . Mit dem barometrischen Luftdruck  $b$  ergibt sich dann:

$$p_i = b + \Delta p_i$$

Für eine isochore Zustandsänderung, wie wir sie hier vorliegen haben, gilt für den Druck:

$$p = p_0(1 + \alpha \vartheta_b)$$

$p$  bezeichnet hierbei den Druck bei der Temperatur  $\vartheta_b$ ,  $p_0$  ist der Druck bei  $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  der zu bestimmende Spannungskoeffizient und  $\vartheta_b$  die Siedetemperatur des Wassers, die vom barometrischen Druck abhängt.

Stellt man diese Gleichung nach  $\alpha$  um, so erhält man:

$$\alpha = \frac{p - p_0}{p_0} \cdot \frac{1}{\vartheta_b}$$

Diese Gleichung setzt jedoch voraus, dass die Temperatur im gesamten Luftvolumen konstant ist. Dies ist hier nicht gegeben, weshalb man folgende Korrektur ansetzen muss:

$$\alpha = \frac{p - p_0}{p_0} \cdot \frac{1}{\vartheta_b} + \frac{p}{p_0} \cdot \left( \gamma + \frac{v}{V} \cdot \frac{1}{T_Z} \right) \quad (6)$$

wobei  $\gamma$  den thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Glases bezeichnet,  $T_Z$  die thermodynamische Zimmertemperatur, sowie  $\frac{v}{V}$  den relativen "schädlichen Raum", der abgeschätzt werden soll. Zur Bestimmung von  $T_Z$  soll eine zusätzliche Messung bei Zimmertemperatur durchgeführt werden. Es gilt dabei:

$$\frac{p(Z)}{p_0} = \frac{T_Z}{273,15 \text{ K}}$$

## 2 Bestimmung von $\kappa = c_p/c_v$ für Luft

Es soll in diesem Versuch das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten  $\kappa = c_p/c_v$  bestimmt werden. Dazu verwenden wir zwei verschiedene Verfahren, das von Clement-Desormes und das von Rüchard.

### 2.1 Methode von Clement-Desormes

Es wird bei dieser Methode folgende Versuchsanordnung verwendet:

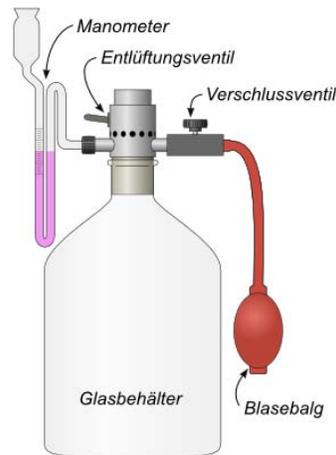


Abb. 3: Methode von Clement-Desormes<sup>3</sup>

In dem Glasbehälter befindet sich das zu untersuchende Gas (hier wieder Luft). Er ist zum einen mit einem U-Manometer, das mit Öl gefüllt ist, und zum anderen über einen Dreiwegehahn wahlweise mit einem Blasebalg oder der Umgebungsluft verbunden. Der Versuch verläuft in 4 Schritten.

1. Zunächst wird der Rezipient mit dem Blasebalg verbunden. Mit diesem erzeugt man einen Überdruck von  $\Delta p_1$  von ca.  $100\text{mm}$  Ölsäule.

Der Druck im Glasbehälter beträgt dann  $p = b + \Delta p_1$ , wobei  $b$  wieder der Umgebungsdruck ist.

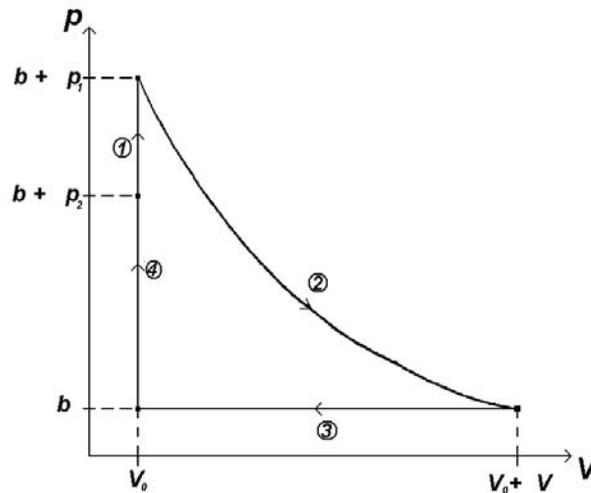
2. Nun wird der Rezipient mit der Umgebung verbunden. Der Druck gleicht sich dem äußeren Druck an, was eine Volumenzunahme um  $\Delta V$  und eine Temperaturabnahme um  $\Delta T$  zur Folge hat.

3. Sobald der Druckausgleich vollendet ist ( $\approx 1\text{s}$ ), wird das Gefäß abgesperrt.

4. Die Temperatur der Luft im Gefäß gleicht sich jetzt durch Wärmeaustausch mit der Umgebung wieder der Zimmertemperatur (also ihrer Anfangstemperatur) an. Bei diesem isochoren Prozess steigt der Druck um  $\Delta p_2$  an.

<sup>3</sup>Quelle: <https://ip.uni-goettingen.de/get/text/3639>

Die einzelnen Schritte in einem p-V-Diagramm dargestellt:



Der Schritt 1 → 2 erfolgt wegen seiner Kürze näherungsweise adiabatisch, es gelten also Gleichung (4) und (5):

$$(b + \Delta p_1) \cdot V_0^\kappa = b \cdot (V_0 + \Delta V)^\kappa$$

$$(T_0 - \Delta T) \cdot (V_0 + \Delta V)^{\kappa-1} = T_0 V_0^{\kappa-1}$$

Daraus folgt mit der Näherung  $\Delta V \ll V_0 \Rightarrow (V + \Delta V)^\kappa \approx V_0^\kappa + \kappa V_0^{\kappa-1} \Delta V$  :

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{\kappa - 1}{\kappa} \cdot \frac{\Delta p_1}{b} \quad (7)$$

Für den Schritt 3 → 4 erhält man unter Verwendung der Zustandsgleichung idealer Gase (1) :

$$\frac{b}{b + \Delta p_2} = 1 - \frac{\Delta T}{T_0}$$

Setzt man hier Gleichung (7) ein, so ergibt sich für  $\kappa$ :

$$\kappa = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_2} \quad (8)$$

## 2.2 Vergleichsmessungen

Es sollen hier ein paar Vergleichsmessungen mit verschieden schnellem Druckausgleich durchgeführt werden, um sich davon zu überzeugen, dass der Prozess  $1 \rightarrow 2$  in Versuch 2.1 ausreichend adiabatisch verläuft.

## 2.3 Methode von Rüchard

Es soll nun dasselbe Verhältnis  $\kappa$  erneut bestimmt werden, diesmal aber nach dem Verfahren von Rüchard. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4 dargestellt.

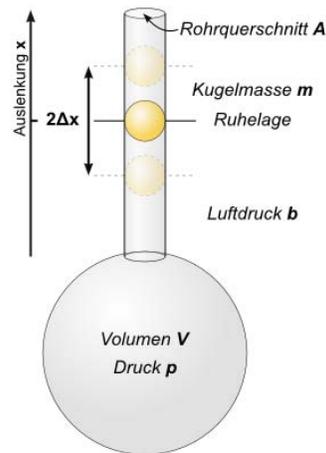


Abb. 4: Methode von Rüchard<sup>4</sup>

Man nehme dazu ein Gefäß mit einem Glasrohr, in das eine Stahlkugel genau eingepasst ist. In dem Gefäß befindet sich das zu untersuchende Gas, also hier wieder Luft. Nun wird die Kugel durch einen Stoß vertikal ausgelenkt. Sie schwingt dann um die Ruhelage, wobei das Gas im Gefäß abwechselnd komprimiert und wieder expandiert wird. Dadurch verändert sich das Volumen des Gefäßes um  $\Delta V = A \cdot \Delta x$ . Wir können nun wieder Gleichung (4) verwenden:

$$p_0 V_0^\kappa = (p_0 + \Delta p) \cdot (V_0 + \Delta V)^\kappa$$

Mit derselben Näherung wie in 2.1 erhalten wir folgende Gleichung:

$$\Delta p = -\kappa \cdot p_0 \cdot \frac{\Delta V}{V_0}$$

Die rücktreibende Kraft, die dadurch auf die Kugel wirkt, erhält man durch Multiplikation mit dem Querschnitt  $A$  der Röhre:

$$\Rightarrow \Delta F = -\kappa \cdot \frac{p_0}{V_0} \cdot A^2 \Delta x$$

<sup>4</sup>Quelle: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/3639>

und damit die Richtkraft

$$D = -\frac{\Delta F}{\Delta s} = \kappa \cdot \frac{p_0}{V_0} \cdot A^2$$

Man bestimmt im Experiment die Schwingungsdauer  $T$  der Kugel, für die gilt:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{D}}$$

Damit lässt sich dann  $\kappa$  leicht berechnen:

$$\kappa = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{mV_0}{A^2 p_0} \quad (9)$$

Die Messung der Schwingungsdauer  $T$  soll einige Male wiederholt und der Mittelwert genommen werden, um den Fehler möglichst gering zu halten. Außerdem ist zu beachten, dass sowohl das Rohr als auch die Kugel gut gereinigt sind.

### 3 Dampfdruckkurve von n-Hexan

In diesem letzten Versuch soll die Dampfdruckkurve von n-Hexan im Bereich  $0^{\circ}\text{C}$  bis Zimmertemperatur gemessen werden und daraus die molare Verdampfungsenthalpie bestimmt werden. Dazu wird folgender Versuchsaufbau verwendet:

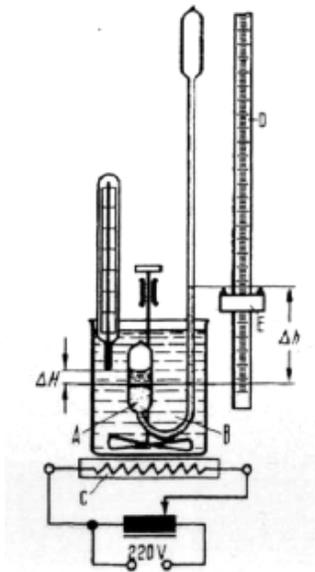


Abb. 5: Versuchsaufbau zur Dampfdruckkurve von n-Hexan<sup>5</sup>

Das Quecksilbermanometer B ist im kurzen Schenkel zu einem Gefäß A erweitert. In diesem Gefäß befindet sich der zu untersuchende Stoff, hier n-Hexan. Das untere Ende des Manometers wird soweit in ein Glas mit Wasser eingetaucht, dass sich das Gefäß A vollständig unter Wasser befindet. Das Wasser kann über eine regelbare Heizplatte C erhitzt werden. Den Quecksilberstand  $\Delta h$  kann man mit Hilfe einer Skala D ablesen. Man kann nun den Sattdampfdruck einmal bei steigender und einmal bei fallender Temperatur jeweils in Abhängigkeit dieser ablesen. Trägt man nun den gemessenen Druck über die Temperatur auf, wobei der Mittelwert der beiden Messreihen genommen wird, so erhält man die Dampfdruckkurve von n-Hexan. Die Verdampfungswärme  $H_v$  lässt sich dann wie folgt berechnen. Nach Gleichung (3) gilt für  $H_v$ :

$$H_v = \frac{dp_s}{dT} \cdot T \cdot (V_D - V_K)$$

Verwendet man nun Gleichung (1) für  $V_D$ :

$$V_D = \frac{nRT}{p}$$

<sup>5</sup>Quelle: Vorbereitungsmappe

und geht man davon aus, dass das Volumen des Dampfes wesentlich größer ist als das Volumen des Kondensats  $V_K$ , so erhält man:

$$H_{v,mol} = \frac{dp_s}{dT} \cdot \frac{R \cdot T^2}{p}$$

Diese Gleichung kann man nun durch Trennung der Variablen integrieren, unter der Voraussetzung dass  $H_{v,mol}$  ausreichend druck- und temperaturunabhängig ist.

$$\begin{aligned} \frac{H_{v,mol}}{R} \cdot \int \frac{1}{T^2} dT &= \int \frac{1}{p} dp \\ \Rightarrow \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) &= -\frac{H_{v,mol}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) \Leftrightarrow \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = \text{const} - \frac{H_{v,mol}}{R \cdot T} \end{aligned} \quad (10)$$

Trägt man also  $\ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$  über  $\frac{1}{RT}$  auf, so erhält man als Steigung die molare Verdampfungsenthalpie.

# P2-41 Ideales und reales Gas - Messprotokoll

## Versuch 1

Nullmarke: 2,8

Länge Kapillare, Durchmesser  
 $l = 52,5 \text{ cm}$   $d = 2 \text{ mm}$

$\vartheta$ (°C)	24	0	100
$h$ (cm)	9,4	2,5	30

$b = 997 \text{ mbar}$

## Versuch 3

<del><math>\vartheta</math> (°C)</del>	<del>0</del>
<del><math>\Delta h</math> (cm)</del>	<del>10,475</del>
<del><math>h_e</math> (cm)</del>	<del>24,355</del>
<del><math>h_r</math> (cm)</del>	<del>34,830</del>

$\vartheta$ (°C)	$h_e$ (cm)	$h_r$ (cm)	$\Delta h$ (cm)
0	24,355	34,830	10,475
<del>3</del>	<del>24,215</del>		
2	24,100	35,085	10,985
6	24,600	34,085	9,985
8,1	25,060	33,165	9,065
10,0	25,435	32,415	8,315
12,0	25,920	31,445	7,345
14,0	25,930	31,425	7,325
16,0	26,910		5,365
18,0	26,840		5,505
20,0	27,200		4,785
22,6	27,995		3,195
25,1	28,515		2,155

## Versuch 2.1

$h_{L1}$ (cm)	$h_{r,1}$ (cm)	$\Delta h_1$ (cm)	$h_{L2}$ (cm)	$h_{r,2}$ (cm)	$\Delta h_2$ (cm)
14,0	6,4	7,6	11,2	9,4	1,8
14,0	6,4	7,6	10,8	9,6	1,2
12,6	7,85	4,75	10,6	9,9	0,7
11,3	9,2	2,1	10,35	10,1	0,25
17,4	3,0	14,4	11,75	8,6	3,15
11,5	8,9	2,6	10,5	9,9	0,6
13,4	7,0	6,4	10,95	9,5	1,45
14,4	6,0	8,4	10,7	9,65	1,05

V2.2  
Druckausgleich  
 $\approx 15s$

## Versuch 2.3

$t = 11,49s$  (10 Schwingungen)

$t = 11,37s$  (10 " )

$t = 8,12s$  (8 " )

$t = 10,52s$  (10 " )

$t = 5,53s$  (5 " )

$t = 5,45s$  (5 " )

Ideales und reales Gas

P2-47

Auswertung

Johanna Lapp und Patrick Hetzel

Gruppe Do-01

24. Juni 2010

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Jollysches Gasthermometer</b>	<b>3</b>
<b>2 Bestimmung von <math>\kappa = c_p/c_v</math> für Luft</b>	<b>4</b>
2.1 Methode von Clement-Desormes . . . . .	4
2.2 Vergleichsmessung . . . . .	5
2.3 Methode von Rüchard . . . . .	5
<b>3 Dampfdruckkurve von n-Hexan</b>	<b>5</b>

## 0 Einführung

Alle folgenden Berechnungen wurden mit MS Excel durchgeführt.

## 1 Jollysches Gasthermometer

Zur Bestimmung des Spannungskoeffizienten  $\alpha$  von Luft wurden 3 Messungen mit dem Jollyschen Gasthermometer durchgeführt. Einmal bei Zimmertemperatur, sowie in Eiswasser getaucht und in kochendem Wasser. Zum Ablesen des jeweiligen Drucks wurde die Quecksilbersäule so verschoben, dass der linke Meniskus gerade den Dorn berührte und dann die Höhendifferenz zum rechten Meniskus abgelesen. Aus der Höhendifferenz in  $mm$  erhält man den Druck in  $Torr$ . Nach Umrechnen in  $kPa$  und addieren des Umgebungsdrucks  $b = 99,7 kPa$  ergibt sich also folgende Tabelle:

$\vartheta [^{\circ}C]$	0	25,3	100
$p [kPa]$	99,30	108,50	135,96

Die thermodynamische Zimmertemperatur wurde hierbei mit Hilfe der Druckmessung bestimmt mittels der Formel:

$$\frac{p(Z)}{p_0} = \frac{T_Z}{273,15 K}$$

$$\Rightarrow T_Z = 273,15 K \cdot \frac{108,5 Pa}{99,3 Pa} = 298,46 K$$

wobei  $p(Z)$  der Druck bei Zimmertemperatur und  $p_0$  der Druck bei  $0^{\circ}C$  ist. Daraus ergibt sich dann durch Abziehen von  $273,15 K$  die Temperatur in  $^{\circ}C$ .

Aus den Werten bei  $\vartheta_0 = 0^{\circ}C$  und bei  $\vartheta_b = 100^{\circ}C$  lässt sich nun leicht  $\alpha$  bestimmen:

$$\alpha = \frac{p - p_0}{p_0} \frac{1}{\vartheta_b} = \frac{136,0 kPa - 99,3 kPa}{99,3 kPa} \frac{1}{100^{\circ}C} = 3,696 \frac{1}{^{\circ}C}$$

Wir wollen diesen Wert noch korrigieren, indem wir zum Einen die thermische Ausdehnung des Glases und zum Anderen das Volumen der Kapillare berücksichtigen, das ja nicht mit erhitzt bzw. abgekühlt wurde. Wir benötigen also den thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Glases:  $\gamma = 1,47 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}C}$ , sowie den relativen schädlichen Raum  $\frac{v}{V}$ . Dazu wurde der Radius der Kapillare zu  $r_{Ka} = 1 mm$ , die Länge derselben zu  $l = 52,5 cm$  und der Radius der Kugel zu  $r_{Ku} = 3 cm$  abgeschätzt. Das Gesamtvolumen der Kugel ist damit  $V = \frac{3}{4} \pi r_{Ku}^3 = 113,1 cm^3$  und das schädliche Volumen  $v = l \pi r_{Ka}^2 = 1,65 cm^3$ .

Setzt man nun alle diese Werte in Gleichung (6) aus der Vorbereitung ein, so erhält man den korrigierten Spannungskoeffizienten  $\alpha_{korrr}$ :

$$\begin{aligned}\alpha_{korrr} &= \frac{p - p_0}{p_0} \cdot \frac{1}{\vartheta_b} + \frac{p}{p_0} \cdot \left( \gamma + \frac{v}{V} \cdot \frac{1}{T_Z} \right) \\ &= \frac{136,0 \text{ Pa} - 99,3 \text{ Pa}}{99,3 \text{ Pa}} \cdot \frac{1}{100^\circ\text{C}} + \frac{136,0 \text{ Pa}}{99,3 \text{ Pa}} \cdot \left( 1,47 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}} + \frac{1,65 \text{ cm}^3}{113,1 \text{ cm}^3} \cdot \frac{1}{25,3^\circ\text{C}} \right) \\ &= 4,506 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}\end{aligned}$$

Der Literaturwert beträgt  $\alpha = 3,651 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ . Unser korrigiertes Ergebnis weicht davon um 23,4% ab. Seltsamerweise weicht der nicht korrigierte Wert deutlich weniger stark vom Literaturwert ab (nur 1,23%). Das könnte daran liegen, dass das schädliche Volumen etwas zu groß abgeschätzt wurde.

## 2 Bestimmung von $\kappa = c_p/c_v$ für Luft

### 2.1 Methode von Clement-Desormes

Der Versuch wurde wie in der Vorbereitung bereits beschrieben durchgeführt. Wir wiederholten den Versuch einige Male, um den Fehler möglichst gering zu halten. Wir bildeten dann den Mittelwert für den Adiabatenexponenten  $\kappa$ , der sich nach folgender Formel berechnet:

$$\kappa = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_2}$$

Man erhält folgende Tabelle:

$\Delta p_1$ [kPa]	$\Delta p_2$ [kPa]	$\kappa$
10,13	2,40	1,31
10,13	1,60	1,19
6,33	0,93	1,17
2,80	0,33	1,14
19,20	4,20	1,28
3,47	0,80	1,30
8,53	1,93	1,29

Der Mittelwert beträgt  $\kappa = 1,24$ . Damit haben wir hier eine Abweichung von 11,4% vom Literaturwert, der bei  $\kappa = 1,4$  liegt. Dies ist recht akzeptabel wenn man bedenkt, dass unsere Messwerte relativ stark streuen. Mögliche

Fehlerquellen liegen bei dem Versuch schon im Versuchsaufbau. Möglicherweise war die Apparatur nicht ganz dicht. Dies würde sich auf das  $\Delta p_2$  auswirken, insofern dass es kleiner würde, da hier länger gewartet wurde mit Ablesen als bei  $\Delta p_1$ , dadurch würde auch  $\kappa$  kleiner. Des Weiteren ist es natürlich auch möglich, dass nicht genau oder zu früh abgelesen wurde.

## 2.2 Vergleichsmessung

Um sicher zu sein, dass Versuch 2.1 auch hinreichend adiabatisch verlaufen ist, wurde noch ein Vergleichsmessung durchgeführt. Dazu haben wir einfach den Hahn in Schritt 2, also beim Druckausgleich mit der Umgebung, ungefähr 15s aufgelassen, also deutlich länger als bei den anderen Messungen. Dabei kommen wir auf  $\kappa = 1,14$ .

Dieser Wert entspricht dem vorher kleinsten gemessenen Wert, der auch gleichzeitig der schlechteste war. Es ist also davon auszugehen, dass der Versuch im Allgemeinen ausreichend adiabatisch ablief.

## 2.3 Methode von Rüchard

Wir ließen hier, wie in der Vorbereitung bereits beschrieben, eine Stahlkugel in ein Rohr fallen, das mit einem Glasgehäuse verbunden war. Durch den Gegendruck wurde die Kugel in Schwingung versetzt. Mit einer Stoppuhr wurde die Schwingungsdauer der Kugel gemessen. Wir konnten dabei bis zu 10 Schwingungen messen. Die einzelnen Werte befinden sich im Messprotokoll. Mit dem Mittelwert der Periodendauer  $T$  und den geometrischen Daten der Versuchsanordnung konnten wir dann  $\kappa$  berechnen:

$$\kappa = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{mV_0}{A^2 p_0} = \left(\frac{2\pi}{1,09\text{ s}}\right)^2 \frac{16,68\text{ g} \cdot 10,58\text{ l}}{(2,01\text{ cm}^2)^2 \cdot 997\text{ mbar}} = 1,45$$

Diesmal beträgt die Abweichung vom Literaturwert ( $\kappa = 1,4$ ) nur 3,57%. Dies ist sehr zufriedenstellend und man sieht schnell ein, dass die Methode von Rüchard besser ist als diejenige von Clement-Desormes. Die Durchführung an sich ist auch weniger aufwendig. Der große Vorteil von der Methode von Rüchard liegt darin, dass man sofort merkt, wenn irgendwo etwas undicht ist, da die Kugel dann nicht schwingt, sondern einfach in das Glasgefäß hinein fällt.

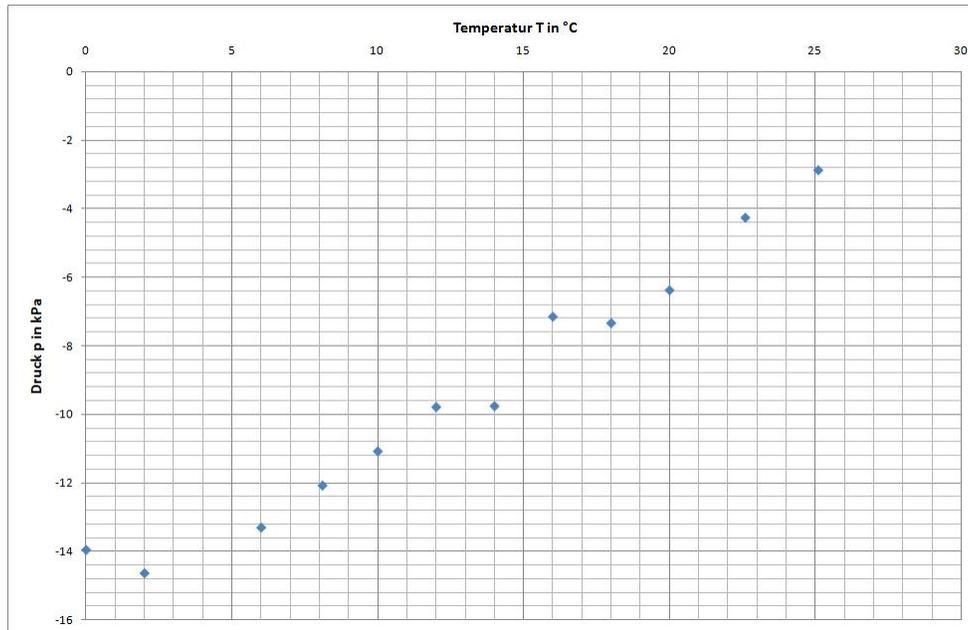
## 3 Dampfdruckkurve von n-Hexan

In diesem Versuch haben wir die Dampfdruckkurve von n-Hexan gemessen. Dazu wurde der Rezipient zunächst in Eiswasser getaucht und dann bei steigender Temperatur die jeweiligen Höhendifferenzen der Quecksilbersäule aufgenommen. Aus Zeitgründen haben wir die Messung nicht nochmal bei fallender Temperatur durchgeführt. Aus  $\Delta h$  lässt sich analog zu Aufgabe 1 der Druck berechnen, die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

$T [^{\circ}C]$	0,0	2,0	6,0	8,1	10,0	12,0
$p [kPa]$	-13,97	-14,65	-13,31	-12,09	-11,09	-9,79
$T [^{\circ}C]$	14,0	16,0	18,0	20,0	22,6	25,1
$p [kPa]$	-9,77	-7,15	-7,34	-6,38	-4,26	-2,87

Der Druck ist hier nicht der absolute Druck, sondern eigentlich nur die Differenz zum Druck im Bereich über dem linken Quecksilbermeniskus, daher das negative Vorzeichen.

Trägt man nun Druck über Temperatur auf, so erhält man die Dampfdruckkurve von n-Hexan:

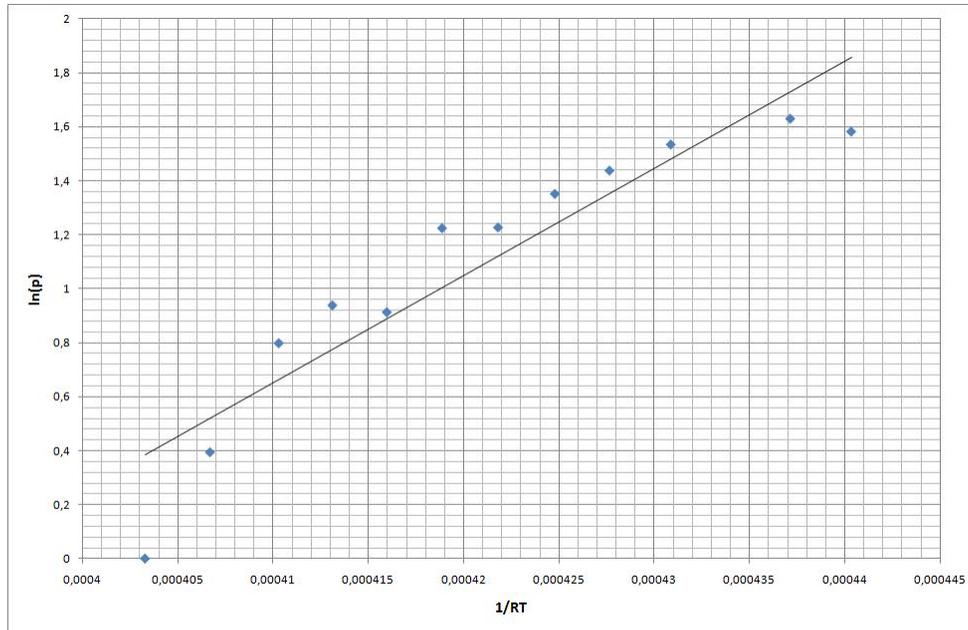


Die Kurve verläuft nicht ganz wie erwartet. Zum Einen haben wir einen Sprung zwischen  $14^{\circ}C$  und  $16^{\circ}C$ . Dieser lässt sich damit erklären, dass wir vermutlich an das Kathetometer gekommen sind und es verkippt haben. Dadurch wurde nicht mehr gerade, sondern unter einem Winkel abgelesen, was zu einer Verschiebung der Kurve ab dieser Stelle führte. Zum Anderen war die Messung im Allgemeinen sehr ungenau, da die Temperatur stetig zunahm und sich dadurch kein richtiges Gleichgewicht einstellen konnte und außerdem die Temperaturverteilung im Rezipient nicht gleichmäßig war. Dies wurde zwar durch Rühren etwas verhindert, aber vollständig vermeiden ließ es sich wohl nicht. Des Weiteren sind wie immer Ablesefehler möglich.

Es sollte nun noch die Verdampfungsenthalpie von n-Hexan berechnet werden. Dazu bietet es sich an,  $\ln(\frac{p}{p_0})$  über  $\frac{1}{RT}$  aufzutragen. Nach Formel (10) aus der Vorbereitung erhält man dann  $H_{v,mol}$  direkt aus der Steigung.

$$\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = const - H_{v,mol} \cdot \frac{1}{RT}$$

Für  $p_0$  kann irgendein Referenzwert genommen werden, da die Werte dadurch nur entlang der y-Achse um eine Konstante verschoben werden. Wir verwendeten hier den Wert bei  $25,1\text{ }^\circ\text{C}$ . Es ergibt sich folgendes Schaubild:



Mit Hilfe der RGP-Formel von Excel erhalten wir für die Steigung  $m = 39688$ . Daraus folgt für die Verdampfungsenthalpie:  $H_{v,mol} = -39,69 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ . Dies ergibt eine Abweichung deutliche von  $37,57\%$  vom Literaturwert, der bei  $H_{v,mol} = 28,85 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  liegt.