

Prak.: P2 Semester: SS 21 Wochentag: Mo Gruppennr.: 11

Name: Wolf Vorname: Michel

Name: Liehr Vorname: Miyako Anakin

Emailadresse(n): \_\_\_\_\_

Versuch: Ideales und reales Gas (P2-47,48,49) Fehlerrech.: Ja

Betreuer: David Fischer Durchgeführt am: 26.04.21

Wird vom Betreuer ausgefüllt.

1. Abgabe am: \_\_\_\_\_

Rückgabe am: \_\_\_\_\_ Begründung:

2. Abgabe am: \_\_\_\_\_

Ergebnis: + / 0 / - Fehlerrechnung: Ja / Nein

Datum: \_\_\_\_\_ Handzeichen: \_\_\_\_\_

Bemerkungen:

# Inhaltsverzeichnis

<b>2. Einleitung: Ideales und reales Gas</b>	<b>3</b>
<b>3. Aufgabe 1: Spannungskoeffizient und absoluter Nullpunkt</b>	<b>4</b>
3.0.1. Statistische Unsicherheit . . . . .	5
3.0.2. Systematische Unsicherheit . . . . .	6
3.0.3. Fehlerbehaftetes Ergebnis . . . . .	6
3.0.4. Bestimmung des Absoluten Nullpunktes . . . . .	6
<b>4. Aufgabe 2: Bestimmung des Adiabatenkoeffizient nach Clement-Desormes</b>	<b>9</b>
4.0.1. Statistische Unsicherheit . . . . .	9
4.0.2. Systematische Unsicherheit . . . . .	10
4.0.3. Ergebnis und fehlerbehafteter Wert . . . . .	10
<b>5. Aufgabe 3: Bestimmung des Adiabatenexponent zweier unterschiedlicher Gase</b>	<b>13</b>
<b>6. Aufgabe 4: Dampfdruckkurve und Verdampfungswärme von n-Hexan</b>	<b>18</b>
<b>Anhang</b>	<b>21</b>
A. Aufgabe 1: Messwerte . . . . .	21
B. Aufgabe 2: Messwerte . . . . .	22
C. Aufgabe 2: Messwerte . . . . .	23
D. Aufgabe 3: Messwerte . . . . .	24
E. Aufgabe 4: Messwerte . . . . .	25
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>26</b>

# Abbildungsverzeichnis

3.1. A1 - Jollysches Gasthermometer . . . . .	5
4.1. A2 - Aufbau nach Clement-Desormes . . . . .	10
4.2. A2 - P-T-Diagramm . . . . .	11
5.1. A3 Foto . . . . .	13
5.2. A3 Fit . . . . .	15
6.1. A4 Foto . . . . .	18
6.2. A4 Dampfdruckkurve . . . . .	20

6.3.	A4 Fit . . . . .	20
A.1.	A1 - Messwerte zur Bestimmung des Spannungskoeffizienten von Luft . . . . .	21
B.2.	A2 - Messwerte zur Bestimmung des Adiabatenexponenten von Luft . . . . .	22
C.3.	A2 - Messwerte zur Bestimmung des Adiabatenexponenten von Luft . . . . .	23
D.4.	A3 - Messwerte zur Bestimmung des Adiabatenexponenten von Luft und von Argon . . . . .	24
E.5.	A4 - Messwerte zur Bestimmung der Dampfdruckkurve und Verdampfungswärme von n-Hexan . . . . .	25

## Tabellenverzeichnis

3.1.	Aufgabe 1: Messwerte und Ergebnisse . . . . .	8
3.2.	Aufgabe 1: statistische Unsicherheiten auf Messwerte . . . . .	8
4.1.	Aufgabe 2: Messwerte . . . . .	11
4.2.	Aufgabe 2: statistische Unsicherheiten auf Messwerte . . . . .	12
5.1.	Aufgabe 3 Größen . . . . .	15
5.2.	Aufgabe 3 Fehler . . . . .	16

1.



FAKULTÄT FÜR PHYSIK  
Physikalisches Praktikum P2 für Physiker

Versuch P2-47,48,49

Ideales und Reales Gas

Raum F1-08

Es ist Sinn dieses Experimentes, 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 Celsiusstemperatur 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. Verwenden Sie destilliertes Wasser. Ein Diagramm 'Siedetemperatur des Wassers bei reduziertem Barometerstand' befindet sich am Arbeitsplatz. Vergessen Sie nicht, das Barometer abzulesen.

Anm: Zur Wartezeitüberbrückung können schon parallel Messungen zu den Aufgaben 2.1 und 2.2 ausgeführt werden.

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

**Achtung:** Nicht zu viel Überdruck erzeugen, da sonst bei der Expansion Flüssigkeit aus dem Manometer spritzt!

Skizzieren Sie den Prozeß im p-V-Diagramm. Ablesungen dürfen nur vorgenommen werden, wenn sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Bis zu ~10 Sekunden Wartezeit müssen eingehalten werden. Zum Erzeugen von Überdruck (Welcher Überdruck ist sinnvoll?) den Dreiwegehahn am Blasebalg in Stellung 'Vorn' bringen. Zur Messung den Hahn entsprechend drehen.

- 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.

- 3 Bestimmen Sie dasselbe Verhältnis  $\kappa = c_p/c_v$ , mit einer Schwingungsmethode (Sie können sich eine der beiden Möglichkeiten 3.1 oder 3.2 aussuchen)

- 3.1 Wenden Sie die Methode von Rüchardt an, indem Sie  $\kappa$  aus der Schwingungsdauer einer Stahlkugel, die im Glasrohr auf einem Luftpolster schwingt bestimmen.

**Achtung:** Das Glasrohr ist ein Präzisionschwingungsrohr und sehr teuer! Gehen Sie sehr vorsichtig damit um. Die Qualität der Messung hängt sehr stark von folgenden Bedingungen ab:

- a) Das Glasrohr muß innen extrem sauber sein. (Kugel und Rohrrinnenfläche nicht mit den Fingern berühren!)
- b) Alle Stopfen müssen dicht schließen.
- c) Das Glasrohr muß recht gut senkrecht stehen. Das kann durch vorsichtiges 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 schon erreicht worden!)

Die Schwingungsdauer muß sorgfältig bestimmt werden. Sie geht quadratisch in das Ergebnis ein. Das Luftvolumen unter der Kugel beträgt 10,58 Liter  $\pm 0,3\%$ .

**3.2 Bestimmen Sie  $\kappa$  für zwei unterschiedliche Gase aus der Schwingungsdauer T eines Kolbens, der auf einem (kleinen) Gasvolumen V schwingt.**

Messen Sie T für Volumina im Bereich von 30ml bis 80ml. Beginnen Sie mit Luft im Kolbenprober (zweiatomiges Gas). Der Kolben besteht aus Glas, also schlagen Sie ihn vorsichtig an. Achten Sie bei Volumenänderung darauf, dass die Pick-Up Spule mitverschoben wird. Zur Schwingungsmessung steht Ihnen ein Frequenzzähler Hameg-HM8021-4 zur Verfügung.

Wiederholen Sie die Messung mit dem Edelgas Argon.

Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit der Erwartung aus den Schwingungsfreiheitsgraden für die jeweilige Gasart.

**4. 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 mit Dreivegehahn,  
Präzisionsglasrohr (60cm lang) mit gut passender Stahlkugel (16mm $\varnothing$   $\pm 0,5\%$ ; 16,68g  $\pm 0,1\%$ ),  
Kolbenprober 100ml / Kolben- $\varnothing$  = 31,1(1) mm / m = 109,80(5) g (incl. Magnet)  
Frequenzzähler Hameg-HM8021-4,  
2 Liter-Wassergefäß,  
Dampfdruckgefäß mit n-Hexan-Füllung und Hg-Manometer,  
Thermometer 0-50 Grad Celsius,  
Barometer 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

## 2. Einleitung: Ideales und reales Gas

Bei der Betrachtung und Auswertung von thermodynamischen Prozessen mit Gasen, wie es in diesem Versuch der Fall ist, muss zwischen der Annahme von idealem und realem Gas unterschieden werden. Bei idealem Gas werden die Gasteilchen als punktförmig, also ohne Eigenvolumen, angenommen. Des weiteren herrschen keine zwischenmolekularen Kräfte, wie beispielsweise Van-der-Waals-Kräfte. Die Zustände eines idealen Gases werden mit der allgemeinen Gasgleichung beschrieben

$$pV = nRT \quad , \quad (2.1)$$

wobei  $p$  für den Druck,  $V$  für das Volumen,  $n$  für die Molzahl,  $R$  für die universelle Gaskonstante und  $T$  für die Temperatur steht.

In bestimmten Fällen kann man jedoch nicht mehr von einem idealen Gas ausgehen. Bei niedrigen Temperaturen überwiegt die kinetische Energie nicht mehr den zwischenmolekularen Kräften, womit diese nicht mehr vernachlässigt werden können. Bei hohen Drücken hingegen ist das Eigenvolumen in Relation zum Gesamtvolumen nicht mehr vernachlässigbar. Somit gibt es für reale Gase eine eigene Zustandsgleichung, die die obigen Kriterien berücksichtigt

$$\left( p + a \frac{n^2}{V^2} \right) (V - nb) = nRT \quad , \quad (2.2)$$

wobei  $a$  den Kohäsionsdruck und  $b$  das Kovolumen der Gasteilchen repräsentieren.

In den folgenden Aufgaben wird bis auf die letzte von idealem Gas ausgegangen. Aufgabe 4 thematisiert Phasenübergänge, weshalb nicht mit der allgemeinen Gasgleichung gearbeitet werden kann.

### 3. Aufgabe 1: Spannungskoeffizient und absoluter Nullpunkt

Im ersten Versuch wird mit Hilfe eines Jollyschen Gasthermometers (Abbildung 3.1) der Spannungskoeffizient  $\alpha$  von Luft bestimmt. Anschließend wird daraus die Temperatur des absoluten Nullpunktes in Celsius berechnet. Das Jollysche Gasthermometer besteht im wesentlichen aus einem Gefäß G, das mit einer Kapillare K an einem Quecksilbermanometer verbunden ist. Das Quecksilbermanometer besteht aus einem festen linken Schenkel FS und einem vertikal verstellbaren rechten Schenkel BS. In FS ist eine Glasspitze S nach unten gerichtet. Zur Durchführung des Versuches wird G zuerst in ein Eisbad mit Temperatur  $T_1$  gestellt, die Quecksilbersäule in FS auf S eingestellt und die Höhendifferenz zur rechten Säule abgelesen. Zur Zwecken der Fehlerrechnung wird die Quecksilbersäule fünf mal neu auf S eingestellt und die Höhendifferenz abgelesen. Danach wird das Wasserbad bis nahe des Siedepunktes auf Temperatur  $T_2$  erwärmt, um die Höhendifferenz wie oben geschildert fünf mal abzulesen. Aus den Höhendifferenzen werden die Drücke berechnet, dabei muss beachtet werden, dass auf die rechte Säule in BS zusätzlich der Luftdruck  $p_a$  wirkt. Dieser wird zu Beginn des Versuches mit einem Digitalbarometer gemessen und kann während des gesamten Versuches als konstant angenommen werden. Die Messwerte sowie die daraus ermittelten Drücke sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Sie werden nach der Formel

$$p_i = \Delta p + p_a = a \Delta h + p_a \quad (3.1)$$

berechnet. Die natürliche Einheit des Quecksilbermanometers mmHg wird mit einem Faktor von  $a = 133,32$  in Pascal umgerechnet.

Nun kann aus den gemittelten Werten der Drücke bei den gemittelten Werten von  $T_1 = 1,66^\circ\text{C}$  und  $T_2 = 98,5^\circ\text{C}$  der Spannungskoeffizient  $\alpha$  berechnet werden. Für diesen isochoren Prozess kann die Formel 3.2 aus der Vorbereitungsmappe genutzt werden:

$$p = p_0(1 + \alpha \Delta T). \quad (3.2)$$

Dabei ist  $p_0$  der Druck beim Gefrierpunkt, in unserem Fall der Druck  $p_1$  des Gefäßes im Eiswasser.  $p_2$  ist der Druck bei der Siedetemperatur, in unserem Fall bei  $T_2$ . Umstellen nach  $\alpha$  ergibt:

$$\alpha = \frac{p_2 - p_1}{p_1 \cdot \Delta T} = \frac{p_2 - p_1}{p_1 \cdot (T_2 - T_1)} = 3,63 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}. \quad (3.3)$$

Dieser Wert für den Spannungskoeffizient ist noch nicht vollständig, da hier einige Effekte nicht berücksichtigt werden. Erstens wurde die thermische Ausdehnung des Glasgefäßes nicht berücksichtigt, zweitens wurde vernachlässigt, dass Luft kein ideales Gas ist, drittens ändert sich das Volumen elastisch bei verschiedenen Drücken und viertens besitzt der Teil des Gases, das nicht in dem Volumen G ist Raumtemperatur. Die letzten drei Effekte sind jedoch so gering, dass sie im weiteren vernachlässigt werden. Der erste Punkt ist jedoch von Interesse, weshalb nachfolgend der Korrekturterm berücksichtigt wird. Der korrigierte



Abbildung 3.1.: A1 - Foto des Jollyschen Gasthermometer

Wert  $\alpha_{\text{korr}}$  ergibt sich mit dem Volumenausdehnungskoeffizient  $\gamma = 2,5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$  von Glas nach der Vorbereitungsmappe zu:

$$\alpha_{\text{korr}} = \alpha + \frac{p_2}{p_1} \cdot \gamma = 3,65 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}} + 3,38 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}} = 3,66 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad (3.4)$$

Nachfolgend sollen die Unsicherheiten auf  $\alpha$  und  $\alpha_{\text{korr}}$  betrachtet werden.

### 3.0.1. Statistische Unsicherheit

Die beiden mit Unsicherheiten behafteten Größen sind die Drücke  $p_1$  und  $p_2$  sowie die Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$ . Ihre statistischen Unsicherheiten sind die Standardabweichungen der fünf Messwerte um den Mittelwert und berechnen sich nach:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3.5)$$

Die so ermittelten statistischen Unsicherheiten sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Da diese korreliert sind, wird die Größtfehlerabschätzung verwendet, um die endgültige Unsicherheit auf den Spannungskoeffizient zu erhalten:

$$\sigma_{\alpha_{\text{korr}}} = \sum_x \left| \frac{\partial \alpha_{\text{korr}}}{\partial x} \right| \cdot s_x \quad (3.6)$$

$$= \left| \frac{\partial \alpha_{\text{korr}}}{\partial p_1} \right| s_{p,1} + \left| \frac{\partial \alpha_{\text{korr}}}{\partial p_2} \right| s_{p,2} + \left| \frac{\partial \alpha_{\text{korr}}}{\partial T_1} \right| s_{T,1} + \left| \frac{\partial \alpha_{\text{korr}}}{\partial T_2} \right| s_{T,2} \quad (3.7)$$

$$= \left| \frac{2p_1 - p_2}{p_1^2(T_2 - T_1)} - \frac{p_2}{p_1^2} \gamma \right| s_{p,1} + \left| \frac{1}{p_1(T_2 - T_1)} + \frac{\gamma}{p_1} \right| s_{p,2} \quad (3.8)$$

$$+ \left| \frac{(p_2 - p_1)p_1}{p_1^2(T_2 - T_1)^2} \right| s_{T,1} + \left| \frac{(p_2 - p_1)p_1}{p_1^2(T_2 - T_1)^2} \right| s_{T,2} \quad (3.9)$$

$$= \pm 5,93 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad (3.10)$$

### 3.0.2. Systematische Unsicherheit

Die systematischen Unsicherheiten ergeben sich aus den Messmethoden der Größen. Für den Druck ist das die Messskala des Manometers, welche in 1 mm eingeteilt war. Die Unsicherheit auf die Höhenmessung wird zu  $\Delta_h = \pm 0,5$  mm geschätzt. Nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung ergibt sich der systematische Fehler auf den Druck aus dem ersten Term von Formel 3.1 zu:

$$\Delta p = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial h} \Delta_h\right)^2} = g\rho\Delta_h = \pm 66,46 \text{ Pa} \quad (3.11)$$

Wird nun noch die systematische Unsicherheit  $\Delta_{p_a} = 0,5$  Pa des Luftdrucks mittels digitalem Barometer mit der Formel 3.1 berücksichtigt, ergibt sich für den Druck folgende systematische Unsicherheit:

$$\Delta p_i = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial h} \Delta_h\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial p_a} \Delta_{p_a}\right)^2} = \sqrt{\Delta_p^2 + \Delta_{p_a}^2} = 66,46 \text{ Pa} \quad (3.12)$$

Zu Letzt muss noch die systematische Unsicherheit auf die Temperaturmessung betrachtet werden. Da dessen letzte digitale Stelle die erste Nachkommastelle ist, wird als Unsicherheit  $\Delta_T = \pm 0,1$  °C angenommen. Mit der gleichen Formel 3.6 wie oben für die statistische Unsicherheit ergibt sich die systematische Unsicherheit auf den Spannungskoeffizient zu:

$$\sigma_{\alpha_{\text{korr}}} = \sum_x \left| \frac{\partial \alpha_{\text{korr}}}{\partial x} \right| \cdot s_x \quad (3.13)$$

$$= \left| \frac{2p_1 - p_2}{p_1^2(T_2 - T_1)} - \frac{p_2}{p_1^2} \gamma \right| \Delta_{p,1} + \left| \frac{1}{p_1(T_2 - T_1)} + \frac{\gamma}{p_1} \right| \Delta_{p,2} \quad (3.14)$$

$$+ \left| \frac{(p_2 - p_1)p_1}{p_1^2(T_2 - T_1)^2} \right| \Delta_{T,1} + \left| \frac{(p_2 - p_1)p_1}{p_1^2(T_2 - T_1)^2} \right| \Delta_{T,2} \quad (3.15)$$

$$= \pm 1,58 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad (3.16)$$

### 3.0.3. Fehlerbehaftetes Ergebnis

Durch die obige Betrachtung der Unsicherheiten ergibt sich das endgültige Ergebnis zu

$$\alpha_{\text{korr}} = 3,66 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}} \pm 5,93 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}} \pm 1,58 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}, \quad (3.17)$$

was sehr gut mit den Literaturwert von  $3,67 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$  [zen] übereinstimmt. Der Literaturwert liegt im Intervall der Unsicherheiten und die Abweichung von diesem beträgt nur überraschend kleine 0,27 %.

### 3.0.4. Bestimmung des Absoluten Nullpunktes

Mit unserem Modell von Gasen aus kleinen elastisch stoßenden Kugeln, der Vorstellung von Druck als Kraft bzw Impulsübertrag in einer gewissen Zeit und der Vorstellung von Temperatur als Bewegungsenergie der Teilchen, kann zurecht gefragt werden, ob die Temperatur einen absoluten Nullpunkt besitzt. Nach den vorangestellten Definitionen ist am absoluten Nullpunkt die kinetische Energie der Teilchen gleich Null, womit keine Stöße mit der Wand stattfinden, weshalb der Druck in Gleichung 3.2 gleich Null ist. Damit ergibt sich für den absoluten Nullpunkt eine Temperatur von:

$$T_0 = -\frac{1}{\alpha_{\text{korr}}} = -273,22 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.18)$$

Mit einer statistischen und systematischen Unsicherheit, welche sich nach der gleichen Formel ergeben, von:

$$\sigma_{T,0} = \frac{1}{\alpha_{kor}^2} \sigma_{\alpha_{kor}} = \pm 4,43 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.19)$$

$$\Delta_{T,0} = \frac{1}{\alpha_{kor}^2} \Delta_{\alpha_{kor}} = \pm 1,18 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.20)$$

Der komplette Wert mit Unsicherheiten ist demnach gegeben durch:

$$T_0 = -273,22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 4,43 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1,18 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.21)$$

Auch hier stimmt der errechnete Wert wieder überraschend genau mit dem Literaturwert von  $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$  [che] überein. Die Abweichung von diesem beträgt wieder gerade einmal  $0,27\%$  und er liegt im Intervall der Unsicherheiten.

**Tabelle 3.1.:** Aufgabe 1: Messwerte von  $\Delta h$  des Jollyschen Gasthermometers bei  $T_1$  und  $T_2$  und die daraus ermittelten um den Luftdruck korrigierten Drücke

Messung	$T$ in $^{\circ}\text{C}$	$\Delta h$ in cm	$p$ in kPa
1	1,7	-4,7	93,43
2	1,8	-4,6	93,56
3	1,5	-4,5	93,70
4	1,6	-4,6	93,56
5	1,7	-4,5	93,70
$\bar{x}$	1,66	4,58	93,59
1	98,9	20,4	126,89
2	98,8	20,3	126,76
3	98,7	20,1	126,49
4	98,5	19,9	126,23
5	97,8	19,8	126,09
$\bar{x}$	98,5	20,1	126,49

**Tabelle 3.2.:** Aufgabe 1: statistische Unsicherheiten auf Messwerte

$s_{p,1}$	$s_{p,2}$	$s_{T,1}$	$s_{T,2}$
99,77 Pa	304,04 Pa	0,10 $^{\circ}\text{C}$	0,39 $^{\circ}\text{C}$

## 4. Aufgabe 2: Bestimmung des Adiabatenkoeffizient nach Clement-Desormes

Hier soll es um die Bestimmung des Verhältnisses von spezifischer Wärmekapazität bei konstanten Volumen und konstantem Druck  $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$  gehen. Dazu wird die Methode von Clement-Desormes angewandt. Sie soll im Folgenden kurz erläutert werden. Der Versuchsaufbau (Abbildung 4.1) besteht aus einem großen geschlossenen Gefäß, welches mit einem Drei-Wege-Hahn an einen Pumpball angeschlossen ist und eine verschließbare Öffnung zur Umgebungsluft hat. Außer dem Gefäß ist noch ein Manometer über den Drei-Wege-Hahn an dem Gefäß angeschlossen. Der Versuch besteht aus drei Schritten. Im ersten Schritt wird mit dem Pumpball ein Überdruck  $\Delta p_1$  in dem Gefäß erzeugt und der Temperatursgleichgewicht mit der Umgebung abgewartet. Im zweiten Schritt wird das Ventil, das das Gefäß mit der Umgebungsluft verbindet, kurzzeitig geöffnet und führt zu einem adiabatischen Druckausgleich. Dabei kühlt sich das Gas ab. Im dritten Schritt stellt sich aufgrund der isochoren Erwärmung zur Umgebungstemperatur  $T_0$  ein Überdruck  $\Delta p_2$  ein. Die Schritte sind in einem  $P$ - $T$ -Diagramm 4.2 dargestellt. Zur Durchführung des Versuchs werden obige Schritte befolgt und die Höhen der linken und rechten Säule jeweils im ersten und im dritten Schritt abgelesen. Diese Prozedur wird fünfmal durchgeführt. Dann noch jeweils drei Mal mit zu lange bzw. zu kurz geöffneten Ventil. Es ergibt sich Tabelle 4.1 mit den Messwerten. Wobei diesmal darauf zu achten ist, dass es kein Quecksilbermanometer ist, sondern ein Öl gefülltes.

Beginnend mit den Gleichungen einer adiabatischen Zustandsänderung wird in der Vorbereitungsmappe die Formel 4.1 zur Bestimmung der gesuchten Größe  $\kappa$  hergeleitet.

$$\kappa = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_1 - \Delta h_2} = 1,26 \quad (4.1)$$

Wobei  $\Delta h_1 = 11,07$  cm dem Überdruck durch das Pumpen im ersten Schritt entspricht und  $\Delta h_2 = 2,27$  cm dem durch die isochore Erwärmung in Schritt drei.

### 4.0.1. Statistische Unsicherheit

Wie in Aufgabe eins werden die statistischen Unsicherheiten erneut als Standardabweichungen der Messreihen nach Formel 3.5 berechnet und sind wieder in einer Tabelle 4.2 zusammengefasst. Da auch hier die Unsicherheiten auf  $\kappa$  korreliert sind, wird die Größtfehlerabschätzung verwendet:

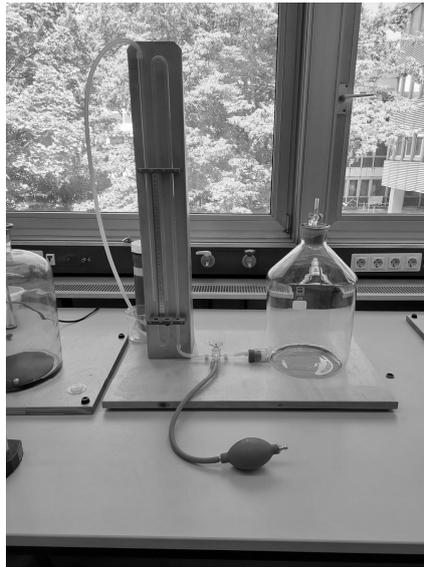


Abbildung 4.1.: A2 - Foto de Versuchsaufbaus nach Clement-Desormes

$$\sigma_{\kappa} = \left| \frac{\partial \kappa}{\partial h_1} \right| s_{h,1} + \left| \frac{\partial \kappa}{\partial h_2} \right| s_{h,2} \quad (4.2)$$

$$= \frac{-h_2}{(h_1 - h_2)^2} s_{h,1} + \frac{h_1}{(h_1 - h_2)^2} s_{h,2} \quad (4.3)$$

$$= \pm 1,29 \cdot 10^{-1} \quad (4.4)$$

#### 4.0.2. Systematische Unsicherheit

Da bei dieser Betrachtung wieder nur die Höhenmessung in die Formel für  $\kappa$  eingeht, ist die einzige systematische Unsicherheit der Ablesefehler von 0,5 mm an der 1 mm Skala der Schenkel.

$$\Delta_{\kappa} = \left| \frac{\partial \kappa}{\partial h_1} \right| \Delta_{h,1} + \left| \frac{\partial \kappa}{\partial h_2} \right| \Delta_{h,2} \quad (4.5)$$

$$= \frac{-h_2}{(h_1 - h_2)^2} \Delta_{h,1} + \frac{h_1}{(h_1 - h_2)^2} \Delta_{h,2} \quad (4.6)$$

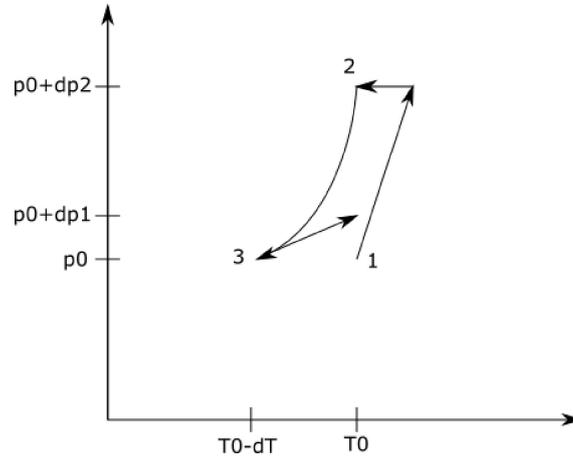
$$= \pm 2,86 \cdot 10^{-2} \quad (4.7)$$

#### 4.0.3. Ergebnis und fehlerbehafteter Wert

Das Ergebnis der Messung mit statistischem und systematischen Fehler ist

$$\kappa = 1,26 \pm 1,29 \cdot 10^{-1} \pm 0,28 \cdot 10^{-1} \quad (4.8)$$

womit der theoretische Wert von  $\kappa_{th} = \frac{f+2}{f} = 1,4$  eines Idealen zwei atomigen Gases mit  $f = 5$  Freiheitsgraden im Fehlerintervall liegt. Die Abweichung von diesem Wert beträgt 10%. Außerdem kann gesehen werden, dass die Adiabatenkoeffizienten bei den Messreihen mit zu lang geöffnetem Ventil von  $\kappa_{zl} = 1,19$  kleiner ist und bei zu kurz geöffneten Ventil  $\kappa_{zk} = 2,14$  größer ist. Dies liegt daran, dass der zweite Prozessschritt mit der Ausdehnung des Gases bei zu langer Belüftung nicht mehr adiabatisch ist, da es zu längerer Interaktion mit der Umwelt kommen kann. Wenn das Ventil zu kurz geöffnet wird, kann kein vollständiger Druckausgleich stattfinden.



**Abbildung 4.2.:** A2 - P-T-Diagramm des Clement-Desormes-Versuch gezeichnet mit Inkscape von mir

**Tabelle 4.1.:** Aufgabe 2: Messwerte von  $\Delta h$  Manometers und die um den Luftdruck korrigierten Drücke

Messung		$h$ in cm links	$h$ in cm rechts	$\Delta h$ in cm
1	1. Schritt	23,1	11,7	
	3. Schritt	18,6	16,1	
2	1. Schritt	23,15	11,7	
	3. Schritt	18,6	16,2	
3	1. Schritt	23,4	11,5	
	3. Schritt	18,65	16,2	
4	1. Schritt	22,8	12,1	
	3. Schritt	18,5	16,3	
5	1. Schritt	22,4	12,5	
	3. Schritt	18,4	16,5	
$\bar{x}$	1. Schritt	22,97	11,9	11,07
$\bar{x}$	3. Schritt	18,55	16,26	2,27
Ventil zu lange geöffnet				
1	1. Schritt	22,9	12,2	
	3. Schritt	18,3	16,5	
2	1. Schritt	22,6	12,3	
	3. Schritt	18,2	16,6	
3	1. Schritt	22,2	12,6	
	3. Schritt	18,0	16,6	
$\bar{x}$	1. Schritt	22,56	12,36	10,2
$\bar{x}$	3. Schritt	18,16	16,56	1,6
Ventil zu kurz geöffnet				
1	1. Schritt	22,5	12,3	
	3. Schritt	20,4	14,4	
2	1. Schritt	21,15	13,6	
	3. Schritt	18,9	15,9	
3	1. Schritt	20,9	14,1	
	3. Schritt	19,5	15,4	
$\bar{x}$	1. Schritt	21,52	13,3	8,22
$\bar{x}$	3. Schritt	19,6	15,23	4,37

**Tabelle 4.2.:** Aufgabe 2: statistische Unsicherheiten auf Messwerte

$s_{h,1}$	$s_{h,2}$
$6,99 \cdot 10^{-1} \text{ cm}$	$2,03 \cdot 10^{-1} \text{ cm}$

## 5. Aufgabe 3: Bestimmung des Adiabatenexponent zweier unterschiedlicher Gase

Auch in diesem Teil des Versuchs soll der Adiabatenexponent eines bzw. zweier Gase bestimmt werden, nämlich der von Luft und von Argon. Aus den zwei Methoden, die laut Aufgabe 3 des Aufgabenblatts zur Verfügung stehen, wird hier auf die zweite (Aufgabe 3.2, siehe Aufgabenblatt am Anfang) zurückgegriffen. Dabei wird ein bestimmtes Volumen  $V$ , welches mit dem jeweiligen Gas befüllt ist, mit einem Glaskolben in einem Kolbenprober eingeschlossen. Anschließend wird mit der Hand einmal kurz und kräftig auf den Glaskolben geklopft, um ihn in Schwingung zu versetzen. Da es sich hier um recht hochfrequente Schwingungen handelt, erfolgt die Frequenzauffassung über einen elektronischen Frequenzzähler, einen Magneten am Glaskolben und eine Spule am Kolbenprober. Das eingeschlossene Volumen  $V$  wird, um eine Messreihe zu erhalten, beginnend bei 100 ml immer um 5 ml verkleinert, bis der Wert bei 50 ml angelangt ist. Der Aufbau ist als Foto in Abb. 5.1 zu sehen. Alle Messwerte befinden sich im Anhang (siehe D.4).

Da es sich hier um einen adiabatischen Prozess handelt, erfolgen Zustandsänderungen gemäß der Poissongleichungen. Eine davon lautet

$$p \cdot V^\kappa = \text{const} \quad , \quad (5.1)$$



Abbildung 5.1.: A3 - Foto der Apparatur

wobei  $p$  dem Druck,  $V$  dem Volumen und  $\kappa$  dem Adiabatenexponenten des Gases entspricht. Dies kann umgeformt werden zu

$$p = \text{const} \cdot V^{-\kappa} \quad . \quad (5.2)$$

Ableitung nach  $V$  liefert

$$\frac{dp}{dV} = -\text{const} \cdot \kappa \cdot V^{-\kappa-1} = -\kappa \frac{p}{V} \quad , \quad (5.3)$$

sodass sich am Ende folgende differentielle Gleichung ergibt

$$\Delta p = -\kappa \cdot p \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad . \quad (5.4)$$

Multiplikation mit der Fläche  $A$  und die Definition des Drucks  $p = \frac{F}{A}$  liefert schließlich einen Ausdruck für eine Kraftänderung  $dF$ , welche mit dem Hook'schen Gesetz gleichgesetzt werden kann. Es gilt  $dV = A \cdot dx$ , da der Kolben sich nur in eine Richtung bewegen kann.

$$dF = -\kappa \frac{p}{V} A^2 \cdot dx = -D \cdot dx \quad (5.5)$$

Mit  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}}$  folgt dann die Funktion

$$\kappa = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{m \cdot V}{A^2 \cdot p} \quad (5.6)$$

bzw.

$$V = \kappa \cdot \frac{A^2 \cdot p}{4\pi^2 m} \cdot T^2 = \kappa \cdot \frac{A^2 \cdot p}{4\pi^2 m} \cdot \left(\frac{1}{f}\right)^2 = a \cdot x + b \quad . \quad (5.7)$$

Letztere Gleichung (2.6) stellt einen linearen Zusammenhang zwischen dem Volumen  $V$  und der reziproken Frequenz im Quadrat  $\left(\frac{1}{f}\right)^2$  dar. Da die Querschnittsfläche des Glaskolbens inkl. Magnet  $A$ , der Druck innerhalb des eingeschlossenen Volumens  $p$  und die Masse des Glaskolbens inkl. Magnet  $m$  bekannt sind (siehe Tab. 5.1), kann mithilfe einer linearen Regression die Steigung  $a$  herausgefunden und anschließend mit der Formel

$$\kappa = a \cdot \frac{4\pi^2 m}{A^2 \cdot p} = V \cdot f^2 \cdot \frac{4\pi^2 m}{A^2 \cdot p} \quad (5.8)$$

der gesuchte Adiabatenkoeffizient  $\kappa$  berechnet werden.

Bei experimentellen Bestimmungen von physikalischen Größen ist es wichtig, ihre Unsicherheiten zu betrachten. So besitzt jeder experimentell bestimmte Wert einen systematischen

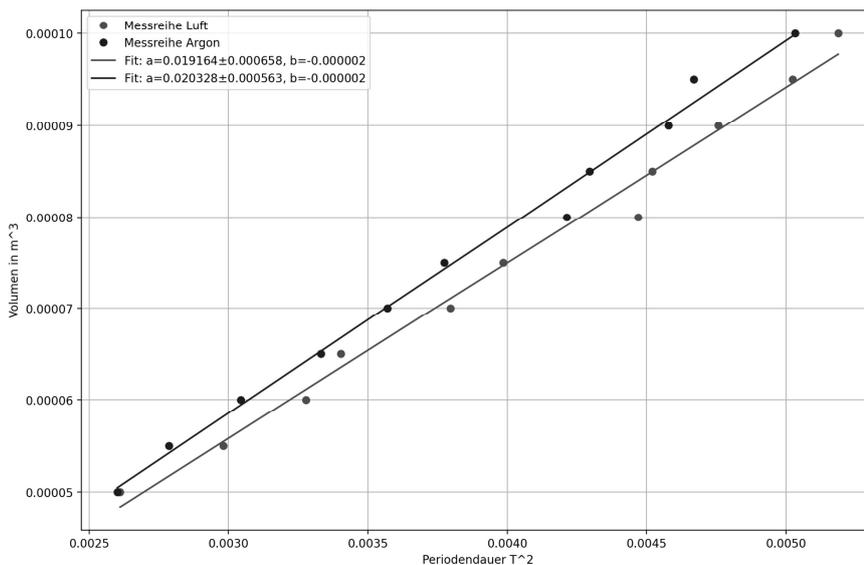


Abbildung 5.2.: A3 - Das eingeschlossene Volumen  $V$  in Abhängigkeit von der Periodendauer im Quadrat  $T^2$  und lineare Regression

und statistischen Fehler. Da außerdem die gesuchte Größe  $\kappa$  nicht direkt, sondern indirekt über Messungen anderer Größen bestimmt wird, müssen die einzelnen Unsicherheiten dieser Größen mithilfe von Fehlerrechnung mit einberechnet werden, um am Ende den gesamten Fehler auf  $\kappa$  zu erhalten. Das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz kann in diesem Fall nicht verwendet werden, da die Unsicherheiten der fehlerbehafteten Größen  $V$ ,  $f$ ,  $p$  und  $a$  korreliert sind. Verwendet werden soll also die Größtfehlerabschätzung. Diese erfolgt mit der Formel

$$\Delta f = \sum_{n=1}^N \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n \right| \quad . \quad (5.9)$$

Der systematische Fehler umfasst hierbei einmal den Ablesefehler beim Einstellen des eingeschlossenen Volumens  $V$ , die Ungenauigkeit des Frequenzzählers, den Fehler auf die angegebene Masse  $m$  und den Durchmesser  $d$  des Kolbens und die Ungenauigkeit des Barometers, womit vor dem Versuch der Atmosphärendruck wird gemessen wird. Der statistische Fehler besteht lediglich aus dem Fehler auf die Steigung  $a$  der Funktion (2.6),

**Tabelle 5.1.:** A3 - Größen, die zur Berechnung von  $\kappa$  benötigt werden. Dabei ist der Glaskolbendurchmesser  $d = 31,11$  mm und die Glaskolbenmasse  $m$  auf dem Aufgabenblatt gegeben. Der Atmosphärendruck  $p_0$  hingegen wird zu Beginn des Versuchs gemessen und der zusätzlich auf das Volumen  $V$  wirkende Druck mithilfe der Gewichtskraft des Glaskolbens berechnet, also ist  $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  der Ortsfaktor.

Größe	Berechnung	Wert
Querschnittsfläche $A$	$\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$	$7,601 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
Masse Glaskolben $m$		109,805 g
Druck $p$ in $V$	$p_0 + p_{\text{Kolben}} = 997 \text{ hPa} + \frac{mg}{A}$	101 117 Pa

welcher aus der Streuung der Messwerte von der linearen Regression (siehe Abb. 5.2) rührt. Alle Ungenauigkeiten sind in Tabelle 5.2 aufgelistet.

Der systematische Fehler lässt sich also berechnen durch

$$\Delta\kappa_{\text{sys}} = \left| \frac{\partial\kappa}{\partial V} \cdot \Delta V \right| + \left| \frac{\partial\kappa}{\partial f} \cdot \Delta f \right| + \left| \frac{\partial\kappa}{\partial p} \cdot \Delta p \right| + \left| \frac{\partial\kappa}{\partial m} \cdot \Delta m \right| + \left| \frac{\partial\kappa}{\partial d} \cdot \Delta d \right| \quad (5.10)$$

$$= \left| \frac{4\pi^2 m f^2}{A^2 p} \cdot \Delta V \right| + \left| \frac{8\pi^2 m V f}{A^2 p} \cdot \Delta f \right| + \left| -a \frac{4\pi^2 m}{A^2 p^2} \cdot \Delta p \right| \quad (5.11)$$

$$+ \left| a \frac{4\pi^2}{A^2 p} \cdot \Delta m \right| + \left| -a \frac{4 \cdot 64 m}{d^5 p} \cdot \Delta d \right| \quad . \quad (5.12)$$

Einsetzen der Werte liefert

$$\Delta\kappa_{\text{sys,Luft}} = 0,044 \quad (5.13)$$

$$\Delta\kappa_{\text{sys,Argon}} = 0,044 \quad . \quad (5.14)$$

Offensichtlich unterscheiden sich die systematischen Fehler beider Gase nur minimal, sodass sie gerundet den gleichen Wert besitzen. Der statistische Fehler berechnet sich wie folgt

$$\Delta\kappa_{\text{stat}} = \left| \frac{\partial\kappa}{\partial a} \cdot \Delta a \right| = \left| \frac{4\pi^2 m}{A^2 p} \cdot \Delta a \right| \quad . \quad (5.15)$$

Einsetzen der Werte liefert wiederum

$$\Delta\kappa_{\text{stat,Luft}} = 0,049 \quad (5.16)$$

$$\Delta\kappa_{\text{stat,Argon}} = 0,042 \quad . \quad (5.17)$$

Einsetzen der jeweiligen Werte in Formel (2.7) liefert dann folgendes Resultat

$$\kappa_{\text{Luft}} = 1,410 \pm 0,044 \pm 0,049 \quad (5.18)$$

$$\kappa_{\text{Luft}} = 1,484 \pm 0,044 \pm 0,042 \quad . \quad (5.19)$$

**Tabelle 5.2.:** A3 - Fehler der einzelnen Messgrößen, die anschließend mithilfe der Vorschrift der Größtfehlerabschätzung in den Gesamtfehler auf den Adiabatenexponenten  $\kappa$  einfließen werden. Der Fehler auf die Frequenz wurde aus dem Handbuch des Frequenzzählers, der auf die Steigung aus dem linearen Fit (siehe Abb. 5.2) entnommen.

Größe	Ungenauigkeit
$\Delta V$	$\pm 1,5$ ml
$\Delta f$	$\pm 5 \cdot 10^{-7}$ ml
$\Delta p$	$\pm 50$ Pa
$\Delta a_{\text{Luft}}$	$\pm 658 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}$
$\Delta a_{\text{Argon}}$	$\pm 563 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}$
$\Delta m$	$\pm 0,0005$ g
$\Delta d$	$\pm 0,005$ mm

Theoretisch können die Adiabatenexponenten mithilfe der Formel

$$\kappa = \frac{f + 2}{f} \tag{5.20}$$

berechnet werden, wobei dieses  $f$  für die Anzahl der Freiheitsgrade des Gases steht. Mit  $f_{\text{Luft}} = 5$  und  $f_{\text{Argon}} = 3$  ergeben sich  $\kappa_{\text{theo.Luft}} = 1,4$  und  $\kappa_{\text{theo.Argon}} = 1,67$  als theoretische Werte. Somit befindet sich der experimentell bestimmte Adiabatenexponent von Luft innerhalb seines Fehlerbereichs, der von Argon jedoch nicht. Es ist stark zu vermuten, dass sich aufgrund des Alters der Apparatur nicht mehr nur ausschließlich Argon im Volumen befindet, sondern sich dort auch ein recht großer Teil Luft darin befindet. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese Messmethode einen sehr guten Näherungswert für den Adiabatenexponent  $\kappa$  eines Gases liefert.

## 6. Aufgabe 4: Dampfdruckkurve und Verdampfungswärme von n-Hexan

In diesem Versuchsteil soll zum einen die Dampfdruckkurve, zum anderen die Verdampfungswärme von n-Hexan bestimmt werden. Um das zu erreichen, wird ein Dampfdruckgefäß mit n-Hexan-Füllung, welches direkten Anschluss zu einem Quecksilber-Manometer hat, beginnend bei etwa 0 °C kontinuierlich um etwa 2 °C erhöht bis 20 °C erreicht sind. Die Erwärmung des Gefäßes wird durch ein Wasserbad ermöglicht, in welches immer ein wenig warmes Wasser hinzugefügt wird. Dabei wird jedes Mal die Höhe des Quecksilberpegels von beiden Säulen des U-Rohrmanometers,  $h_l$  und  $h_r$ , mithilfe eines Kathetometers abgelesen. Der Aufbau ist als Foto in Abb. 6.1 zu sehen. Die Differenz dieser beiden Pegel  $\Delta h$  liefert dann Informationen über den vorherrschenden Druck im Dampfdruckgefäß. Die Messwerte befinden sich im Anhang (siehe E.5).

Der Sättigungsdampfdruck eines Gases ist derjenige Druck, bei dem sich der flüssige und gasförmige Zustand im Gleichgewicht befinden. Die Temperaturabhängigkeit von ihm wird durch die Clausius-Claperyon-Gleichung (3.1) beschrieben.

$$\frac{dp}{dT} = \frac{Q_{D,Fl}}{T(V_D - V_{Fl})} \quad , \quad (6.1)$$

wobei  $p$  der Druck,  $T$  die Temperatur,  $Q$  die Verdampfungswärme, also die Energie, um einen Stoff vom flüssigen in den gasförmigen Zustand zu bringen, und  $V$  das Volumen

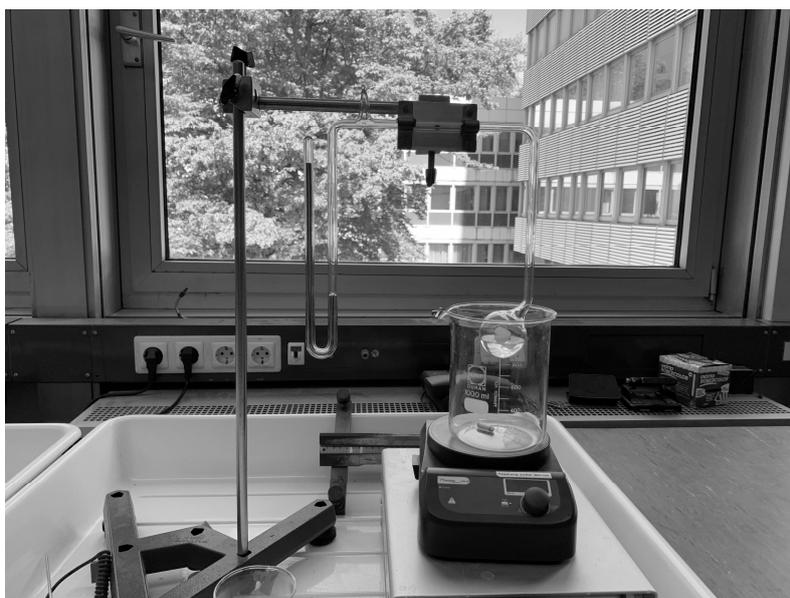


Abbildung 6.1.: A4 - Foto der Apparatur

eines Mols ist. Da das molare Volumen des flüssigen Zustands wesentlich geringer ist als das des gasförmigen Zustands  $V_D \gg V_{F1}$ , darf  $V_{F1}$  in der Rechnung vernachlässigt werden. Wird dann  $V_D$  noch durch das allgemeine Gasgesetz ausgedrückt, dann entsteht folgender Ausdruck

$$\frac{dp}{dT} = \frac{Q_{D,F1} \cdot p}{R \cdot T^2} \quad (6.2)$$

Lösen dieser Differentialgleichung liefert dann

$$\ln \frac{p}{p_0} = -\frac{Q_{D,F1}}{TR} + const = x \cdot a + b \quad , \quad (6.3)$$

welche einen linearen Zusammenhang zwischen  $\ln \frac{p}{p_0}$  und  $-\frac{1}{TR}$  darstellt. Werden also diese beiden Komponenten aufeinander aufgetragen und dann eine lineare Regression darauf angewendet, so lässt die Steigung  $a$  und somit  $Q_{D,F1}$ , also die gesuchte Verdampfungswärme von n-Hexan, ganz einfach bestimmen.

Zum Ablesen des Manometers wird einfach die Höhendifferenz beider Quecksilberpegel in cm mit einem Umrechnungsaktor multipliziert, um am Ende den Druck in hPa zu erhalten

$$p = |h_l - h_r| \cdot 1,3332 \cdot 10^3 = \Delta h \cdot 1,3332 \cdot 10^3 \quad . \quad (6.4)$$

Die Dampfdruckkurve ist in Abb. 6.2 zu sehen. Die Steigung  $a$  und somit die Verdampfungsenergie  $Q_{D,F1}$  in Abb. 6.3

$$Q_{D,F1} = 31,525 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad . \quad (6.5)$$

Ein Vergleich mit dem Literaturwert  $Q_{\text{lit}} = 31,73 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  ([Wik]) zeigt, dass der experimentell bestimmte Wert nur um 0,1% abweicht, welcher eine sehr gute Näherung ist. Dennoch gehören zu den möglichen Fehlerursachen der Ablesefehler der Höhe der Quecksilbersäulen und die Temperaturerfassung des Wassers. Zwar ist ein magnetisch betriebener Rührer im Wasserbad vorhanden, jedoch besteht die Wahrscheinlichkeit, dass keine komplett homogene Temperaturverteilung zum Zeitpunkt der Temperaturerfassung vorlag und somit die gemessene Temperatur verfälscht ist.

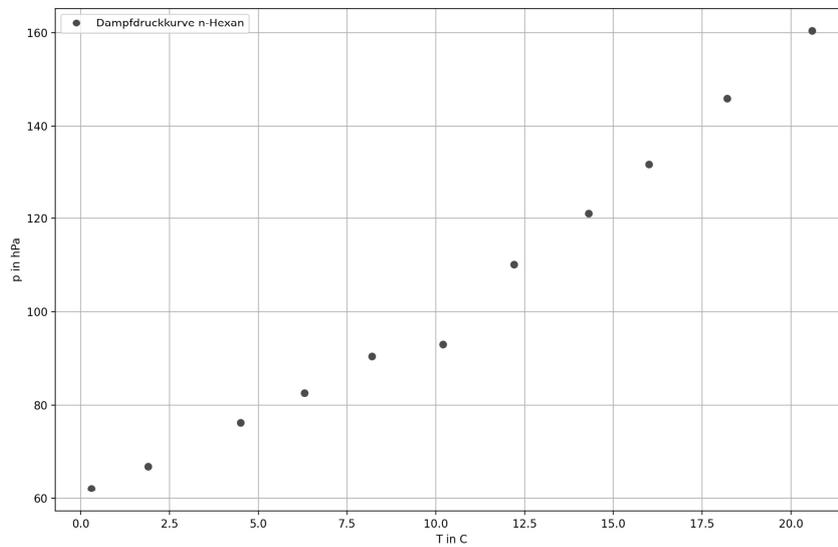


Abbildung 6.2.: A4 - Dampfdruckkurve von n-Hexan

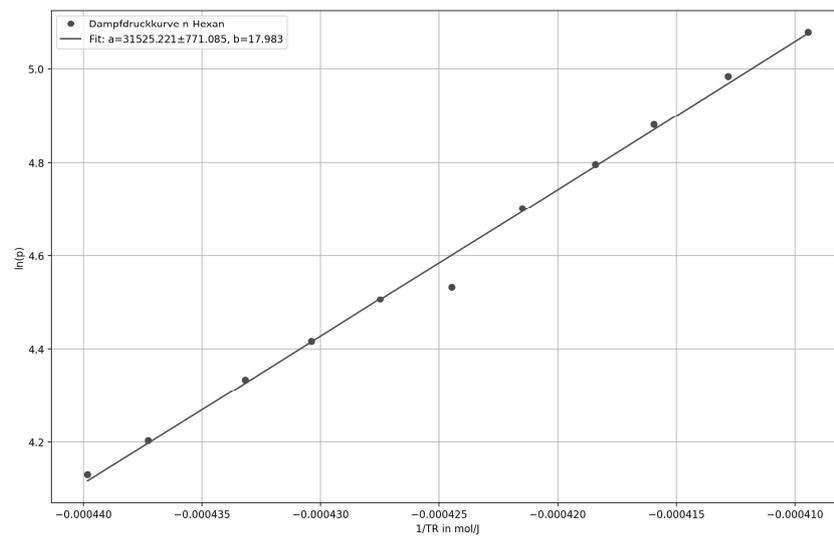


Abbildung 6.3.: A4 -  $\ln \frac{p}{p_0}$  in Abhängigkeit von  $-\frac{1}{TR}$  zur Bestimmung der Verdampfungswärme  $Q_{D,FI}$ , wobei  $p_0 = 1$  gesetzt wird, da es nur eine Verschiebung in y-Richtung verursacht

# Anhang

## A. Aufgabe 1: Messwerte

$p_0 = 997 \text{ mbar}$   $h_0 \text{ links} = 8 \text{ cm}$   $h_0 \text{ rechts} =$  wegen fehlerrechnung 5 mal ablesen  
fehler sind korreliert

	T in C	h_rechts in cm	
1	1.7	3.3	
2	1.8	3.4	
3	1.5	3.5	
4	1.6	3.4	
5	1.7	3.5	
1	98.9	28.4	
2	98.8	28.3	
3	98.7	28.1	
4	98.5	27.9	
5	97.8	27.8	

Abbildung A.1.: A1 - Messwerte zur Bestimmung des Spannungskoeffizienten von Luft

**B. Aufgabe 2: Messwerte**

Schritt 1	3 mal pumpen, Druck ablesen		
Schritt 2	Flasche kurz öffnen, Druck danach direkt ablesen		
Schritt 3	Temperatur einstellen lassen, Druck ablesen		
1. Durchgang	h_links in cm	h_rechts in cm	
	1	23.1	11.7
	2	18.4	16.3 dat war zu spät
	3	18.6	16.1
2. Durchgang	h_links in cm	h_rechts in cm	
	1	23.15	11.7
	3	18.6	16.2
3. Durchgang	h_links in cm	h_rechts in cm	
	1	23.4	11.5
	3	18.65	16.2
4. Durchgang	h_links in cm	h_rechts in cm	
	1	22.8	12.1
	3	18.5	16.3
5. Durchgang	h_links in cm	h_rechts in cm	
	1	22.4	12.5
	3	18.4	16.5

**Abbildung B.2.:** A2 - Messwerte zur Bestimmung des Adiabatenexponenten von Luft

## C. Aufgabe 2: Messwerte

Ventil zu lange offen gelassen			
1. Durchgang	h_links in cm	h_rechts in cm	
	1	22.9	12.2
	3	18.3	16.5

2. Durchgang			
h_links in cm	h_rechts in cm		
1	22.6	12.3	
3	18.2	16.6	

3. Durchgang			
h_links in cm	h_rechts in cm		
1	22.2	12.6	
3	18	16.6	

Ventil zu kurz offen gelassen			
1. Durchgang	h_links in cm	h_rechts in cm	
	1	22.5	12.3
	3	20.4	14.4

2. Durchgang			
h_links in cm	h_rechts in cm		
1	21.15	13.6	
3	18.9	15.9	

3. Durchgang			
h_links in cm	h_rechts in cm		
1	20.9	14.1	
3	19.5	15.4	

**Abbildung C.3.:** A2 - Messwerte zur Bestimmung des Adiabatenexponenten von Luft

**D. Aufgabe 3: Messwerte**

V in ml	f_luft	f_argon
100	13,884	14,095
95	14,108	14,634
90	14,498	14,778
85	14,874	15,257
80	14,958	15,406
75	15,839	16,277
70	16,229	16,735
65	17,142	17,326
60	17,466	18,125
55	18,314	18,945
50	19,569	19,606

**Abbildung D.4.:** A3 - Messwerte zur Bestimmung des Adiabatenexponenten von Luft und von Argon

## E. Aufgabe 4: Messwerte

T in C	h_rechts in c	h_links in cm	Delta h	p(h)
0,3	37,465	42,13	4,665	62,19378
1,9	37,355	42,375	5,02	66,92664
4,5	36,965	42,685	5,72	76,25904
6,3	36,7	42,91	6,21	82,79172
8,2	36,445	43,235	6,79	90,52428
10,2	36,075	43,055	6,98	93,05736
12,2	35,725	43,99	8,265	110,18898
14,3	35,27	44,35	9,08	121,05456
16	34,915	44,8	9,885	131,78682
18,2	34,325	45,28	10,955	146,05206
20,6	33,885	45,915	12,03	160,38396

**Abbildung E.5.:** A4 - Messwerte zur Bestimmung der Dampfdruckkurve und Verdampfungswärme von n-Hexan

# Literaturverzeichnis

[che] Internet. <https://www.chemie.de/lexikon/AbsoluterNullpunkt.html>.

[Wik] Internet. <https://de.wikipedia.org/wiki/Hexan>.

[zen] Internet. <http://www.zeno.org/Lueger-1904/A/Spannungskoeffizient>.