Vakuum (VAK)

Manuel Staebel – 2236632 / Michael Wack 2234088

1 Versuchsdurchführung

1.1 Aufnahme einer Referenzfunktion („Eichung“)

1.1.1 Versuchsziel

Mit Hilfe eines McLeod Manometers soll ein Wärmeleitmanometer (Pirani) geeicht werden. Dies geschieht durch Aufnahme einer Eichkurve. Diese entsteht durch Auftragen des gemessenen Stromfluss durch das Pirani über dem vom McLeod angezeigten Referenzdruck.

1.1.2 Versuchsanordnung

Durch eine Drehschieberpumpe wird ein Unterdruck erzeugt. Dieser lässt sich durch Einlassen von Luft über ein Dosierventil regeln. Die beiden Manometer werden über einen Schlauch mit dem Pumpensystem verbunden, dadurch steht an beiden immer der gleiche Druck zur Messung zur Verfügung. Vgl. Abb.4 in der Angabe.

1.1.3 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuches hatten wir Probleme einen ausreichend niedrigen Druck zu erzeugen um überhaupt in den Anzeigebereich des McLeod (<1,5 mbar) zu kommen. Es stellte sich heraus, dass es irgendwo eine undichte Stelle gab, die sich nur durch den völlig neuen Zusammenbau der Versuchsapparatur beseitigen ließ. Wir nahmen zuerst 15 Messwerte im Bereich von unter 1,5 mbar auf, da in diesem Bereich eine sehr hohe Genauigkeit durch das McLeod gegeben ist. Anschließend ermittelten wir weitere 5 Messwerte im Bereich von 10 bis 100 mbar, die sich am U−Rohr im McLeod ablesen ließen. Bei niedrigem Druck mussten wir zwischen den Messungen immer etwas warten, bis sich der Druck gleichmäßig im gesamten System eingestellt hatte. Bei der Messung mit Hilfe des McLeod musste man darauf achten, dass keine Luft innerhalb der Quecksilbersäule eingeschlossen wurde.

1.1.4 Auswertung

Die Messergebnisse wurden auf dem beiliegendem doppelt logarithmischem Papier in Form eines Druck−Leistungs− und eines Druck−Strom−Diagramms (Eichkurve) eingetragen. Dabei zeigte sich, dass die in Wärme umgewandelte elektrische Leistung im Bereich von 0,1 bis 1,5 mbar nahezu linear mit dem Druck steigt bzw. fällt. Oberhalb und unterhalb dieses Bereichs flacht die Kurve ab. Unterhalb des linearen Bereichs, ist der Druck so gering, dass der Wärmetransport durch die Moleküle des umgebenden Gases klein gegenüber dem Wärmetransport durch anderen Effekte, wie z.B. der Infrarotstrahlung oder der mangelnden thermischen Isolierung des Wolframdrahtes gegenüber der Umgebung an den Befestigungsstellen. Oberhalb des linearen Bereichs flacht die Kurve ab, da die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle kleiner wird, als die Dimension des Gehäuses. D.h. die Moleküle stoßen immer öfter untereinander. Da mehr Gasteilchen keinen den Wärmetransport nicht mehr verbessern können, wird dieser unabhängig vom Druck.

1.2 Saugvermögen

1.2.1 Versuchsziel

Durch Messung der Zeit, die zum Entleeren eines Kolbenprobers benötigt wird, soll das Saugvermögen S der Drehschieberpumpe bei ca. 0,5 mbar bestimmt werden.

1.2.2 Versuchsanordnung

Der Kolbenprober wird über einen Schlauch und ein Dosierventil mit der Pumpe verbunden. Zur Druckmessung dient das vorher geeichte Pirani, das über ein T−Stück ebenfalls an der Pumpe angeschlossen wird. Am Einlass des Kolbenprobers befindet sich ein 3−Wege−Glashahn über den man wahlweise den Kolben mit der Pumpe verbinden oder mit neuer Luft von außen befüllen kann. Vgl. Abb. 5 in der Angabe.

1.2.3 Versuchsdurchführung

Zuerst regulierten wird den Druck mit dem Dosierventil so, dass der Strom durch das Pirani etwa 20 mA betrug. Dieser Strom entspricht laut unserer im letzten Versuch erstellten Eichtabelle dem gewünschten Druck von 0,5 mbar. Anschließend entleerten wir den Kolbenprober drei mal und notierten jeweils die Zeit nach 10 ml Volumenänderung.

1.2.4 Auswertung

T1 [s]	0	18	36	54	73	93	112	132	152	171	190
T2 [s]	0	19	37	56	75	93	113	133	153	172	191
T3 [s]	0	18	36,5	56	75	93	113	133	153	172	192
\ [s]	0	18,33	36,5	55,33	74,33	93	112,67	132,67	152,67	171,67	191
ΔT [s]	0	18,33	18,17	18,83	19	18,67	19,67	20	20	19	19,33

$\bar{x} = 19{,}1\ \mathrm{s}$ Durchschnittliche Zeit für 10ml Volumensveränderung

Berechnung des Saugvermögens:

$$\frac{p \cdot \Delta V}{\Delta t} = Q \quad Q = p_0 \cdot S \Rightarrow S = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$S = \frac{1000\ \mathrm{mbar}}{0{,}5\ \mathrm{mbar}} \cdot \frac{1 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{m}^3}{19{,}1/3600\ \mathrm{h}} = 3{,}77\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$$

Berechnung der Standardabweichung:

$$\bar{x} = 19{,}1\ \mathrm{s}\ ;\ n = 10$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} = 0{,}644\ \mathrm{s}$$

Berechnung der Messunsicherheit:

$$u = \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s = 0{,}34 \cdot 0{,}644 = 0{,}22\ s$$

D.h. mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,26% liegt die wahre Zeit für eine Volumenänderung von 10ml zwischen 18,88 und 19,32 Sekunden.

Vergleich des ermittelten Saugvermögens mit der Firmenangabe von 3,7 m³ / h

Unter Berücksichtigung der Messunsicherheit liegt die wahre Saugleistung der Pumpe mit 68,26% Wahrscheinlichkeit zwischen 3,81 und 3,73 m³/h und stimmt damit recht gut mit der Firmenangabe überein.

Einfluss von Rohr− und Schlauchdurchmessern

Aus der Steigung im P−t−Diagramm wird die starke Abhängigkeit des effektiven Saugvermögens von dem verwendeten Rohr− bzw. Schlauchdurchmesser deutlich. Es ist also wichtig bei einer Vakuumanlage angemessen dicke Verbindungen zu verwenden.

1.3 Effektives Saugvermögen (Auspumpzeit)

1.3.1 Versuchsziel

Durch Auspumpen eines Messingrezipienten soll die dafür benötigte Zeit bestimmt und der Einfluss von verschiedenen Verbindungsstücken zwischen Pumpe und Rezipient untersucht werden.

1.3.2 Versuchsanordnung

Die Drehschieberpumpe wird direkt über einen Schlauch mit dem Messingrezipienten verbunden. An diesem wird der Druck mit Hilfe des im ersten Versuch geeichten Pirani gemessen. Für die Messungen in b) und c) lassen sich die Kapillare zwischen dem Schlauch und dem Rezipienten einbauen.

1.3.3 Versuchsdurchführung

In regelmäßigen Zeitabständen (mit dem Schlauch alleine im 10−Sekunden−Takt insgesamt zwei Minuten lang, mit der dünnen Kapillare im 15−Sekunden−Takt insgesamt 8 Minuten lang und mit der dickeren Kapillare im 15−Sekunden−Takt insgesamt 6 Minuten lang) ermittelten wir den Strom durch das Pirani. Aus diesen Werten lässt sich später anhand der im ersten Versuch erstellten Eichtabelle der Druck im Rezipienten ermitteln. Unsere ersten drei Messreihen wiesen eine zeitliche Verschiebung auf, da wir den Normaldruck im Rezipienten anscheinend zwischen den einzelnen Versuchsreihen nicht wieder völlig hergestellt hatten. Deshalb wiederholten wir die drei Messreihen und korrigierten das Problem. Dadurch ergaben sich natürlich wesentlich genauere und reproduzierbare Werte und wir beschlossen, die ersten drei Reihen nicht in die Auswertung miteinzubeziehen.

1.3.4 Auswertung

Ermittlung des effektiven Saugvermögens aus dem Diagramm

$$S = \frac{\Delta\ p}{\Delta\ t}\ \frac{V}{p}$$

2mm Kapillare

$$S_{5\ \mathrm{mbar}} = \frac{|0{,}375 - 1{,}3|\ \mathrm{mbar}}{|330 - 150|\ \mathrm{s}}\ \frac{3\ \mathrm{l}}{5\ \mathrm{mbar}} = 3{,}1 \cdot 10^{-6}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}$$

$$S_{0{,}3\ \mathrm{mbar}} = \frac{|0{,}375 - 1{,}3|\ \mathrm{mbar}}{|330 - 150|\ \mathrm{s}}\ \frac{3\ \mathrm{l}}{0{,}3\ \mathrm{mbar}} = 5{,}1 \cdot 10^{-5}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}$$

Berechnung der theoretischen Leitwerte

$$L = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \eta \cdot l} \cdot \bar{p} \quad \mathrm{mit} \quad \bar{p} = \frac{p_1 + p_0}{2}\ ; \quad (18)$$

Kapillare: Durchmesser $2 \pm 0{,}1\ \mathrm{mm}$, Länge $95 \pm 2\ \mathrm{mm}$

Druck 5 mbar $\Rightarrow$ viskose Strömung $\Rightarrow$ $\eta_{Luft} = 1{,}82 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{kg\ m^{-1}\ s^{-1}}$

$$\bar{p} = \frac{1000\ \mathrm{mbar} + 5\ \mathrm{mbar}}{2} = 502{,}5\ \mathrm{mbar}$$

$$L = \frac{\pi \cdot \left((2 \pm 0{,}1)\ \mathrm{mm}\right)^4}{128 \cdot 1{,}82 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{kg\ m^{-1}\ s^{-1}} \cdot (95 \pm 2)\ \mathrm{mm}} \cdot 0{,}5025\ \mathrm{bar} =$$

$$= \left(1{,}164 \cdot 10^{-7} \pm 2{,}53 \cdot 10^{-8}\right) \frac{m^3}{s}$$

22% Fehlerbereich !

Druck 0,3 mbar $\Rightarrow$ Molekularströmung $\Rightarrow$ $\eta = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m_a\ d\ \bar{c}$

$$L = 121 \cdot \frac{d^3}{l} = \left(8{,}51 \cdot 10^{-8} \pm 1{,}44 \cdot 10^{-8}\right) \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}$$

17% Fehlerbereich !

Schlauch: Durchmesser 25mm, Länge 50 cm, Druck 0,08 mbar

$$L = \frac{\pi \cdot \left(0{,}025\ \mathrm{m}\right)^4}{128 \cdot 1{,}82 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{kg\ m^{-1}\ s^{-1}} \cdot 0{,}5\ \mathrm{m}} \cdot 0{,}500\ \mathrm{bar} = 5{,}27 \cdot 10^{-4}\ \frac{\mathrm{m}^3}{s}$$

Berechnung des Saugvermögens

$$p\ (t) = p_0 \cdot e^{-\frac{S}{V} \cdot t} \Rightarrow S = -\ln\left(\frac{p\ (t)}{p_0}\right) \cdot \frac{V}{t}\ ;$$

Schlauch: p(35s) = 0,08 mbar; $t = 35 \pm 2\ \mathrm{s}$; $V = 3{,}0 \pm 0{,}1 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m}^3$

$$S = 8{,}13 \cdot 10^{-4} \pm 7{,}34 \cdot 10^{-5}\ \frac{\mathrm{m}^3}{s}$$

9% Fehlerbereich !

Kapillare: Durchmesser 2mm

p(60s) = 5 mbar; $t = 60 \pm 2\ \mathrm{s}$

$$S = 2{,}66 \cdot 10^{-4} \pm 1{,}77 \cdot 10^{-5}\ \frac{\mathrm{m}^3}{s}$$

7% Fehlerbereich !

p(400s) = 0,3 mbar; $t = 400 \pm 2\ \mathrm{s}$

$$S = 6{,}08 \cdot 10^{-5} \pm 2{,}33 \cdot 10^{-6}\ \frac{\mathrm{m}^3}{s}$$

4% Fehlerbereich !

Berechnung des effektiven Saugvermögens

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \sum_n \frac{1}{L_n}$$

5 mbar: $S_{eff} = 1{,}16 \cdot 10^{-7}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}$

0,3 mbar: $S_{eff} = 8{,}50 \cdot 10^{-8} \ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}$

2 Fragen

2.1 Wann bezeichnet man ein Gas als ideal? Warum kann man für die "hier interessierenden Drücke (Abschnitt 3)" die Luft näherungsweise als ideal betrachten?

Ein Gas wird als ideal bezeichnet, wenn seine Teilchen als Kugeln betrachtet werden können und diese außer in der Form von vollkommen elastischen Stößen nicht miteinander wechselwirken. Die Teilchen bewegen sich mit statistisch verteilten Geschwindigkeiten. Bei Stößen untereinander und mit der Wand gelten Energie− und Impulssatz. Für ein ideales Gas muss der Teilchenradius r_0 klein gegen den mittleren Abstand r zwischen den Gasatomen sein, sodass man das Eigenvolumen der Atome gegenüber dem Volumen V, welches den Atomen zur Verfügung steht, vernachlässigen kann. Die Atome des idealen Gases werden wie Massenpunkte behandelt. Ein weiteres Maß für die „Idealität“ eines Gases ist die Gültigkeit der Zustandsgleichung für ideale Gase (ideales Gasgesetz). Man spricht von einem idealen Gas, wenn PV / nT für alle Drücke konstant ist.

Bei den verwendeten Drücken sind die Abstände der Gasatome weit größer, als dass Wechselwirkungen (außer Stöße) zwischen den Teilchen auftreten würden. Erst bei sehr hohen Drücken treten diese Wechselwirkungen auf. Die anziehenden / abstoßenden Kräfte zwischen den Molekülen nehmen mit dem Quadrat des Abstands ab.

2.2 Wie kann man jemand die Wärmeleitfähigkeit eines Gases erklären?

Die Wärmeleitung in Gasen basiert auf der Bewegung der Moleküle, welche bei thermischen Zusammenstößen einen Teil ihrer kinetischen Energie auf den Stoßpartner übertragen und dadurch Energie von einem Ort höherer Temperatur (d.h. größerer mittlerer Energie) zu Orten tieferer Temperatur transportieren. Die die Häufigkeit der Stöße zwischen den Molekülen von der Dichte des Gases abhängt, steht auch die Wärmeleitfähigkeit in direkter Beziehung zur Gasdichte.

2.3 Wenn die Wärmeleitfähigkeit eines Gases druckunabhängig ist, welchen Sinn hat es dann, den Mantel einer Thermosflasche zu evakuieren?

Die Wärmeleitfähigkeit ist nur in einem gewissen Bereich druckunabhängig. Evakuiert man die Isolationskammern einer Thermoskanne, sinkt die Teilchenanzahl und damit die Dichte. Ein Wärmeaustausch zwischen den Wänden erfolgt also langsamer, als im nicht evakuierten Zustand −> Isolationsgrad steigt, was Sinn einer Thermoskanne ist.

2.4 Welche Größenordnungen haben die Temperatur−Leitwerte von Kupfer, Wasser, Luft, Stein, Fett? Ziehen Sie praktische Konsequenzen !

Der Temperatur−Leitwert bestimmt, wie schnell sich eine räumliche Temperaturdifferenz ausgleicht. Er errechnet sich aus dem Quotienten der Wärmeleitfähigkeit eines Materials und dem Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und der Dichte des Materials:

$$\kappa = \frac{\lambda}{c\ \rho}$$

	Kupfer	Wasser	Luft	Stein	Fett
Wärmeleitfähigkeit λ $[\mathrm{W\ m^{-1}\ K^{-1}}]$	401	0,61	0,03	ca. 50	ca. 0,17
spezifische Wärmekapazität $[\mathrm{J\ K^{-1}\ kg^{-1}}]$	386	4180	1005	760	1880
Dichte $[\mathrm{kg\ m^{-3}}]$	8954	1003	1,29	2650	ca. 0,9
Temperatur−Leitwert $[\mathrm{m^2\ s^{-1}}]$	$116 \cdot 10^{-6}$	$0{,}145 \cdot 10^{-6}$	$23{,}1 \cdot 10^{-6}$	$24{,}8 \cdot 10^{-6}$	$100 \cdot 10^{-6}$

Vergleich (absteigend): Kupfer $\Rightarrow$ Fett $\Rightarrow$ Stein $\Rightarrow$ Luft $\Rightarrow$ Wasser

2.5 *Blaise Pascal* schickte seinen Schwager mit einem U−Rohr−Manometer auf den Puy de Dôme, der 1463 m Höhe hat; wußte *Pascal* das auch? ⇒ Wie genau wird die Druckmessung gewesen sein und was konnte er daraus schließen ?

Absolute Höhenmessung war zu Lebzeiten von Pascal (1623−1662) nur über Luftdruckmessung (barometrische Höhenformel) möglich (heutzutage z.B. über GPS). Durch Luftdruckmessungen bestimmte Höhen können durch schnell variierende Wetterbedingungen Schwankungen von mehreren hundert Metern unterliegen. Da es dadurch nur mit großer Ungenauigkeit möglich war, die Höhe über dem Meeresspiegel „im Landesinneren“ zu bestimmen (aus Mangel an zuverlässigen Referenzpunkten), wird Pascal die absolute Höhe des Puy de Dôme von 1463 – zumindest nicht in der Genauigkeit − gekannt haben. Die relative Höhe z.B. zum Fuße des Berges konnte man damals z.B. mit Hilfe eines Theodoliten bestimmen.

Genauigkeit des U−Rohr−Manometers:

Die Messungenauigkeit des U−Rohr−Manometers wird mit 1mbar abgeschätzt, was einer − allein durch Meßgeräte bedingten − Ungenauigkeit von 10 Höhenmetern entspräche.

2.6 Was verstehen Sie unter *Molekularströmungsbereich* ?

Die Strömung eines Gases durch Öffnungen oder Rohre hängt stark vom Druckbereich ab. Man charakterisiert die verschiedenen Druckbereiche durch die *Knudsenzahl*

$$Kn = \frac{\Lambda}{d} \quad ,$$

welche das Verhältnis von mittlerer freier Weglänge Λ zum Durchmesser d der Öffnung bzw. des Rohres angibt. Den Fall, dass $\Lambda \gg D$, d.h. $Kn \gg 1$ ist, nennt man den Bereich der *Molekularströmung*.

2.7 Angenommen Sie versuchen den Behälter auch mit der 1 mm Kapillare zu evakuieren! Welchen Druck erwarten Sie nach 10 Minuten?

Nach der Entwicklung der Drücke bei der 2 mm bzw. 3 mm−Kapillare zu schliessen, wäre bei einer 1 mm−Kapillare nach 10 Minuten ein Druck von etwa 1 mbar zu erwarten.

2.8 Mit einer kommerziellen UHV−Anlage werden typischerweise Drücke von $4 \cdot 10^{-11}$ mbar erzeugt. Berechnen Sie die zugehörige freie Weglänge λ.

Nach Gerthsen ergibt sich für die mittlere freie Weglänge λ :

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{32} \cdot n \cdot F} \quad ,$$

wobei F der Querschnitt eines Moleküls ist. λ ist demnach der Teilchendichte und damit dem Druck umgekehrt proportional ⇒ Im Bereich von 10^3 hPa beträgt die mittlere freie Weglänge λ_0 ca. $6 \cdot 10^{-8}$ m. Bei einem Druck von $4 \cdot 10^{-11}$ hPa ergibt sich daher λ_1 zu

$$\frac{P_0}{P_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda_1 = \lambda_0 \frac{P_0}{P_1} = 6.0 \cdot 10^{-8} \frac{10^3 \text{ hPa}}{10^{-11} \text{ hPa}} = 1.5 \cdot 10^6 \text{ m} = 1500 \text{ km} \quad .$$