

# VAKUUM (VAK)

DANIEL DOLINSKY UND JOHANNES VRANA

## INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung .....	1
2. Meßapparaturen .....	2
2.1. U-Rohr-Manometer (Quecksilbermanometer) .....	2
2.2. MCLEOD-Manometer .....	2
2.3. Wärmeleitungsmanometer (PIRANI) .....	2
3. Aufgaben .....	3
3.1. Eichung des Wärmeleitungsmanometer (PIRANI) .....	3
3.2. Saugvermögen .....	5
3.3. Effektives Saugvermögen .....	6
4. Beantwortung der Fragen .....	9

## 1 EINLEITUNG

Vakuum bezeichnet (historisch betrachtet) einen vollkommen leeren Raum. Dieser Zustand ist jedoch nicht zu erreichen. Es kann lediglich die Dichte der Gasteilchen in einem Volumen reduziert werden.

In diesem Praktikumsversuch haben wir einige Vakuumtechniken kennengelernt und dabei einige Eigenschaften idealer Gase untersucht.

## 2 MESSAPPERATUREN

### 2.1 U-Rohr-Manometer (Quecksilbermanometer)

Diese Meßmethode ist sehr direkt. Es wird die Kraft gemessen, die ein Gas auf eine Fläche ausübt. Mit dieser Meßmethode kann man zum einen nur bis zu einigen mbar herunter messen, zum anderen eignet sie sich nicht zum genauen Ablesen. Dies liegt zum einen an der recht groben Skalierung, zum anderen an der verschobenen Nullstellung. (Wir gehen von einem Fehler von 5 mbar aus)

### 2.2 MCLEOD-Manometer

Dieses Manometer besteht im Prinzip aus zwei Kapillaren in einem geschlossenen Gehäuse, wobei die linke nach oben offen, die rechte geschlossen ist. Zu Beginn der Messung befindet sich kein Quecksilber in der Anordnung, dadurch kann sich der Druck im Manometer dem Druck im System anpassen. Dann wird Quecksilber in die Anordnung gedrückt, dadurch wird die Luft in der Anordnung komprimiert. In der rechten Kapillare stellt sich ein Gleichgewicht ein, bei dem die Luft nicht weiter komprimiert werden kann. Es wird solange weiter Quecksilber in die Anordnung gedrückt, bis das Quecksilber in der linken Kapillare das obere Ende der rechten Kapillare erreicht hat. In der rechten Kapillare wird nun der Druck abgelesen, der im System herrscht.

### 2.3 Wärmeleitungsmanometer (PIRANI)

Das Wärmeleitungsmanometer nützt die lineare Abhängigkeit von Wärmeleitfähigkeit und Druck eines Gases aus. Als weiteren Effekt benutzt man die Änderung des Widerstandes bei verschiedenen Temperaturen. In der PIRANI-Meßröhre ist ein dünner Wolframdraht. Durch Nachregeln des Meßstroms kann die Temperatur und damit auch der Widerstand konstant gehalten werden. Um zu messen, bei welchem Strom der Widerstand konstant bleibt, verwendet man eine WHEATSTONE'sche Brückenschaltung mit drei Vergleichswiderständen  $R = 120 \Omega$ .

Die am Wolframdraht abfallende Leistung entspricht der abgeführten Wärme, welche über den Wärmeleitungskoeffizienten mit dem Druck zusammenhängt.

Die abgegliche Brückenschaltung ist dementsprechend eine Parallelschaltung von je zwei gleichen Widerständen  $R$ . Der Gesamtwiderstand ist dementsprechend:

$$\frac{1}{R_G} = \frac{1}{2 \cdot R} + \frac{1}{2 \cdot R}$$

$$R_G = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot R} + \frac{1}{2 \cdot R}} = R$$

Da sich der Strom bei einer Parallelschaltung so berechnen läßt:

$$I_G = I_1 + I_2$$

ist der am PIRANI anliegende Strom:

$$I_2 = \frac{1}{2} \cdot I$$

und die im PIRANI in Wärme umgewandelte Leistung:

$$P = R \cdot I_2^2 = \frac{1}{4} \cdot R \cdot I^2 = 30 \Omega \cdot I^2$$

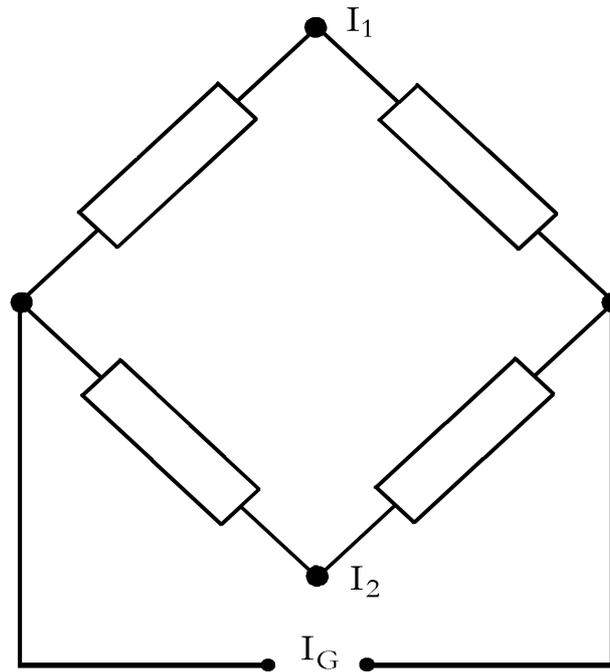


ABBILDUNG 1. Brückenschaltung

## 3 AUFGABEN

## 3.1 Eichung des Wärmeleitungsmanometer (PIRANI)

## 3.1.1 Durchführung.

An der Vakuumpumpe wird zugleich das Wärmeleitungsmanometer und das MCLEOD-Manometer angeschlossen. Zuerst wird versucht, das mit dieser Anordnung größtmögliche Vakuum zu erzeugen. Dabei wird der Druck am MCLEOD, bzw. ab 1,5 mbar am U-Rohr, sowie am PIRANI der benötigte Strom abgelesen. Nun erzeugt man über ein Drosselventil ein künstliches (regulierbares) Leck und erhält somit eine Eichkurve.

## 3.1.2 Meßwerte.

Der Fehler der Leistung P ergibt sich aus dem Fehler vom Strom I:

$$\frac{dP}{dI} = 60 \cdot I$$

$$u_P = \sqrt{u_I^2 \cdot \left(\frac{dP}{dI}\right)^2} = u_I \cdot 60 \cdot I$$

$p/\text{mbar}$	$I/\text{mA}$	$P/\text{mW}$
0,001 ± 0,001	5,5 ± 0,1	0,91 ± 0,04
0,01 ± 0,001	6,1 ± 0,1	1,12 ± 0,04
0,02 ± 0,001	6,5 ± 0,1	1,27 ± 0,04
0,032 ± 0,002	7,0 ± 0,1	1,47 ± 0,05
0,042 ± 0,002	7,5 ± 0,1	1,69 ± 0,05
0,053 ± 0,002	8,0 ± 0,1	1,92 ± 0,05
0,062 ± 0,002	8,5 ± 0,1	2,17 ± 0,06
0,073 ± 0,003	9,0 ± 0,1	2,43 ± 0,06
0,080 ± 0,003	9,5 ± 0,1	2,71 ± 0,06
0,095 ± 0,003	10,0 ± 0,1	3,00 ± 0,06
0,11 ± 0,01	10,4 ± 0,1	3,24 ± 0,07
0,13 ± 0,01	11,2 ± 0,1	3,76 ± 0,07
0,15 ± 0,01	12,0 ± 0,1	4,32 ± 0,08
0,19 ± 0,01	13,1 ± 0,1	5,15 ± 0,08
0,24 ± 0,01	14,1 ± 0,1	5,96 ± 0,09
0,27 ± 0,01	15,2 ± 0,1	6,93 ± 0,10
0,32 ± 0,01	16,2 ± 0,1	7,87 ± 0,10
0,37 ± 0,01	17,5 ± 0,1	9,19 ± 0,11
0,45 ± 0,01	18,7 ± 0,1	10,49 ± 0,12
0,52 ± 0,01	20,0 ± 0,1	12,00 ± 0,12
0,62 ± 0,01	21,5 ± 0,1	13,87 ± 0,13
0,78 ± 0,02	24,0 ± 0,1	17,28 ± 0,15
1,00 ± 0,02	27,0 ± 0,5	21,9 ± 0,9
1,18 ± 0,02	29,0 ± 0,5	25,2 ± 0,9
1,42 ± 0,02	31,5 ± 0,5	29,8 ± 1,0
2 ± 0,5	35,0 ± 0,5	36,8 ± 1,1
4 ± 0,5	39,5 ± 0,5	46,8 ± 1,2
6 ± 0,5	45,0 ± 0,5	60,8 ± 1,4
8 ± 0,5	53,0 ± 0,5	84,2 ± 1,6
10 ± 0,5	63,5 ± 0,5	121,0 ± 2,0
30 ± 0,5	79,0 ± 0,5	187,2 ± 2,4

3.1.3 *Auswertung.* Unterhalb von 0,05 mbar ist die Abweichung von der linearen Beziehung zwischen Druck und Wärmetransport gut zu erkennen. Die obere Grenze war leider nicht gut zu erkennen, da die Ablesung sehr ungenau war. Wir haben sie aber auf etwa 5 mbar abgeschätzt. Im Bereich mit sehr niedrigem Druck (<ca. 0,7 mbar) gilt die Proportionalität zwischen  $P$  und  $p$  nicht mehr, da hier nicht mehr genug Wärme durch die wenigen noch vorhandenen Gasteilchen abgeführt werden kann (Siehe auch allgemeine Bemerkung zur Wärmeleitfähigkeit in Beantwortung der Frage 5.2f).

Bei zu hohem Druck ist die Teilchendichte zu groß bzw. die freie Weglänge zu klein, um eine optimale Wärmeabfuhr vom Wolframdraht zu erreichen.

Da zwischen dem logarithmisch aufgetragenen Strom und dem logarithmisch aufgetragenen Druck eine lineare Beziehung besteht, muß gelten:

$$\ln I = a_1 \cdot \ln p + a_0$$

$$p = \exp\left(\frac{\ln I - a_0}{a_1}\right)$$

Für den Achsenabschnitt  $a_0$  und die Steigung  $a_1$  haben wir mit einem Fehlerberechnungsprogramm (von JOHANNES VRANA; Quelltext am Ende des Protokollheftes; Formeln aus Skript S.12ff) bei 21 Werten zwischen 0,053 mbar und 2 mbar die Werte

$$a_0 = 3,2756 \pm 0,0061966 \approx 3,276 \pm 0,007$$

$$a_1 = 0,41496 \pm 0,0037101 \approx 0,415 \pm 0,004$$

erhalten, wobei die Standardabweichung  $s = 0,018255$  ist.

## 3.2 Saugvermögen

3.2.1 *Durchführung.* Zur Bestimmung des Saugvermögens der Pumpe wurde ein konstanter Druck  $p$  mit Hilfe des Drosselventils in den Zuleitungen eingestellt. Dann wurde aus einem – vorher mit einem Dreiwegehahn abgeklemmten – Glaskolbenprober die Luft herausgepumpt. Dadurch zog es den Kolben in den Zylinder und es konnten die Zeitintervalle bei konstanten Volumendifferenzen gemessen werden. Im Volumenintervall von 10 ml bis 0 ml haben wir aufgrund der Halterung keine Werte mehr ablesen können. Außerdem hat sich in diesem Intervall auch der Druck zu stark geändert. (Werte siehe Protokollheft)

### 3.2.2 *Messung und Auswertung.*

Die Formel zur Berechnung von  $S$  lautet ( $p_0 = 1000$  mbar):

$$S = \frac{V}{t} \cdot \frac{p_0}{p}$$

Wir haben bei der Versuchsdurchführung den Druck jeweils mitgemessen und ich habe diesen auch jeweils zur Berechnung des Saugvermögens verwendet.

Die Meßunsicherheit der Zeit und des Volumens heben sich auf. Es bleibt also nur noch der Fehler des Druckes  $p$ . Bei 24 Ergebnissen für  $S$  braucht man diesen Fehler auch nicht mehr zu berücksichtigen, da der Fehler aus der berechneten Meßunsicherheit  $u$  hervorgeht. Zur Berechnung des Mittelwertes von  $S$  und dem dazugehörigen Fehler haben wir das Fehlerberechnungsprogramm von JOHANNES VRANA (Formeln aus [?] S.3ff) verwendet.

$$\bar{S} = (3,8290 \pm 0,039157) \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \approx (3,83 \pm 0,04) \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Das Ergebnis stimmt recht gut mit der Firmenangabe von  $3,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  überein.

### 3.3 Effektives Saugvermögen

#### 3.3.1 Versuchsdurchführung.

Es wurden drei Meßreihen aufgenommen, zuerst mit einem Schlauch von 25 mm Durchmesser, dann mit einer Kapillare von 2 mm Durchmesser und 95 mm Länge, und als drittes mit einer Kapillare mit einem Durchmesser von 3 mm, aber gleicher Länge. Diese wurden zwischen Pumpe und Rezipient geschlossen. Dabei wurde zu festen Zeiten der Druck mit Hilfe des Wärmeleitungsmanometers gemessen. (Werte siehe Protokollheft)

#### 3.3.2 Theoretische Leitwerte und Saugvermögen.

Das effektive Saugvermögen läßt sich so berechnen:

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$$

Bei viskoser Strömung ( $\bar{p} = 5$  mbar) gilt:

$$L = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \eta l} \cdot \bar{p}$$

$$L_{Schlauch} = 1458 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = L_1$$

$$\Rightarrow S_{eff} = 3,69 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$L_{2\text{mm}} = 0,041 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Rightarrow S_{eff} = 0,040 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$L_{3\text{mm}} = 2,07 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Rightarrow S_{eff} = 1,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Bei molekularer Strömung ( $\bar{p} = 0,3$  mbar) gilt:

$$L = 121 \frac{m}{s} \cdot \frac{d^3}{l}$$

$$L_{Schlauch} = 10,47 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = L_1$$

$$\Rightarrow S_{eff} = 2,73 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$L_{2\text{mm}} = 0,037 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Rightarrow S_{eff} = 0,036 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$L_{3\text{mm}} = 0,123 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Rightarrow S_{eff} = 0,118 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

### 3.3.3 Messung und Auswertung.

Bei den ersten Messzeiten konnten wir keine Werte ermitteln, da die Brücke noch nicht ausgeglichen war.

$$p(t) = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{S}{V} \cdot t\right)$$

$$\ln p(t) = \ln p_0 - \frac{S}{V} \cdot t$$

Mit dem Fehlerberechnungsprogramm von JOHANNES VRANA haben wir jeweils den Achsenabschnitt  $a_0$  und die Steigung  $a_1$  berechnet, wobei die Größen

$$\ln p_0 = a_0$$

$$-\frac{S}{V} = a_1$$

sind. Da das Saugvermögen  $S$  interessiert, ist  $a_0$  unwichtig, und  $S$  lässt sich wie folgt berechnen:

$$S = -V \cdot a_1$$

#### 1. Schlauch

$$a_1 = -0,247$$

$$\Rightarrow S = 2,67 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

#### 2. 2mm-Kapillare

5 mbar:

$$a_1 = -0,0407 \frac{1}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow S = 0,439 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

0,3 mbar:

$$a_1 = -0,00466 \frac{1}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow S = 0,0503 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

#### 3. 3mm-Kapillare

5 mbar:

$$a_1 = -0,0285 \frac{1}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow S = 0,308 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

0,3 mbar:

$$a_1 = -0,0127 \frac{1}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow S = 0,137 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Den sehr großen Fehler bei 5 mbar (2 mm und 5 mm Kapillaren) konnten wir uns nicht erklären. Die restlichen Fehler sind auf die ungenaue Methode der Druckablesung über die Eichkurve zurückzuführen.

Bei der Konstruktion einer Vakuumpumpe ist auf große Leitungsdurchmesser zu achten, da diese einen großen Leitwert besitzen (siehe Ergebnisse für Kapillaren mit 3mm und 2mm Durchmesser).

Die Messung der Serien- und Reihenschaltung zweier Kapillaren konnte aus zeitlichen Gründen nicht mehr durchgeführt werden.

#### 4 BEANTWORTUNG DER FRAGEN

1. Als „ideal“ bezeichnet man ein Gas, wenn seine Teilchen als Kugeln betrachtet werden können, die außer elastischen Stößen nicht miteinander wechselwirken. Diese Bedingung wird von Luft im Bereich unserer Versuchsbedingungen annähernd erfüllt (kaum elektrostatische Wechselwirkungen).
2. Wärmetransport in Gasen läßt sich als Energieübertrag bei Stoßprozessen zwischen den Gasteilchen beschreiben. Die Wärmeleitfähigkeit ist primär druckunabhängig;
3. den wenigen Teilchen in der Wand der evakuierten Thermoskanne ist es jedoch nicht möglich, trotz z.B. hoher mittlerer kinetischer Energie der Gasteilchen (aufgrund großer freier Weglänge), genug Energie und damit Wärme zwischen Außen- und Innenraum zu übertragen.
4. Kupfer: 390; Wasser: 0,6; Luft: 0,025; Stein: 2,5; Fett: 0,18. Kupfer wird, wie viele andere Metalle auch, in der Technik als Wärmeleiter eingesetzt. Wasser läßt sich gut als Kühlmittel einsetzen (z.B. Kraftwerkskühlung), es überhitzt nicht zu schnell und ist in großen Mengen verfügbar; Luft dient z.B. in Doppelglasscheiben als thermischer Isolator, ebenso wie Fett in der Haut vieler Lebewesen. Steine leiten und speichern Wärme gut (z.B. in Wärmespeicher- oder Pizzaöfen).
5. Gerthsen, S. 1055 hierzu: Clermont-Ferrand, wo PASCALS Schwager wohnte, liegt selbst 400 m hoch. Der Anstieg um 1060 m Höhe läßt Hg um ziemlich genau 100 mm fallen. PASCAL mag die Höhendifferenz auf 1000 m geschätzt haben und folgerte (unabhängig von den benutzten Längeneinheiten), daß Hg 10000mal schwerer ist als Luft. Die Dichte von Hg ergibt sich ganz einfach z.B. durch Vergleich mit Wasser im U-Rohr. Man erhält so für Luft den recht guten Dichte-Wert von 1,3 g/l.
6. Im Molekularströmungsbereich liegt die freie Weglänge der Gasteilchen im Bereich der Behälterdimension, es gibt also kaum Stöße der Gasteilchen untereinander.
- 7.

$$p(t) = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{S_{eff}}{V} \cdot t\right)$$

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{L_{Schlauch}} + \frac{1}{L_{1\text{mm}}}$$

$$L = 121 \frac{m}{s} \cdot \frac{d^3}{l}$$

$$L_{1\text{mm}} \approx S_{eff} \approx 0,00046$$

$$\Rightarrow p(10\text{min}) \approx 988 \text{ mbar}$$

Der Druck nimmt nur sehr langsam ab.