

Physik-Praktikum:VAK

1. Versuch: Eichung des Pirani-Druckmessers

Ziel

Ein Pirani-Manometer soll mit Hilfe eines McLeod-Manometers geeicht werden.

Aufbau

An die Drehschieberpumpe werden über einen Schlauch ein Pirani-Manometer und ein McLeod-Manometer angeschlossen; ein dosierbares Lufteinlassventil an der Pumpe sorgt dafür, dass man den Druck regeln kann.

Durchführung

Anfangen vom höchsten Vakuum, das die Pumpe liefern kann, wird in 20 Messungen mit jeweils erhöhtem Druck über den gesamten Messbereich des McLeod-Manometers (ohne U-Rohr) der dabei durch den Pirani-Heizdraht fließende Strom gemessen. Dabei regelt eine Automatik den Strom so, dass die Spannung zwischen den beiden parallelen Leitungen zwischen den 120-Ohm-Widerständen bzw. zwischen Widerstand und Heizdraht gleich 0 bleibt, also der Heizdraht einen konstanten Widerstand von 120 Ohm behält. Wichtig ist, das Dosierventil sehr vorsichtig und genau zu bedienen, und beim McLeod-Manometer das Quecksilber so hochzupumpen, dass keine Luft in der Quecksilbersäule ist und mit der Messung zu warten, bis sich das Druckgleichgewicht eingestellt hat.

Die Messergebnisse werden in einem Druck-Leistungs-Diagramm und einem Druck-Strom-Diagramm (= Eichkurve) auf doppelt logarithmischem Papier gezeichnet.

In welchem Bereich fällt die elektrische Leistung nahezu linear mit dem Druck ab?

Im Bereich ca. 0,1 - 1,48 mbar.

Wo durch wird dieser Bereich nach oben und unten begrenzt?

Nach oben:

Druck wird so groß, dass die freie Weglänge kleiner als die Gefäßdimensionen wird, d.h. die Wärmeleitung wird unabhängig vom Druck.

Nach unten:

Wärme wird auch durch Strahlung abgegeben, für eine effektive Wärmeleitung sind dann so wenige Gasteilchen vorhanden, dass die Wärmeleitung durch das Gas eine ähnliche Größenordnung wie die Wärmestrahlung oder andere Wärmelecks erreicht.

Fehlerquellen

- Ablesegenauigkeit auf dem analogen Ampèremeter und auf McLeod-Skala
- langsames Einschwingen des McLeod-Manometers
- Undichtigkeit des Systems (Ohne Dosierventil erreichten wir einen viel niedrigeren Druck, nämlich 0,001 mbar, gegenüber 0,04 mbar mit Ventil. Dadurch stimmt die Eich-tabelle nur mit Dosierventil.)

2. Versuch: Bestimmung des Saugvermögens der Pumpe

Ziel

Bei einem Druck von ca. 0,5 mbar soll das Saugvermögen der Pumpe mit Hilfe eines Kolbenprobers bestimmt werden.

Aufbau

An der Drehschieberpumpe sind ein Dosierventil (s.o.) und ein Pirani-Manometer zur Regelung und Messung des Drucks befestigt. Über einen Schlauch ist ein Kolbenprober angeschlossen, der per Dreiwegenventil an die Pumpe geschaltet werden kann.

Durchführung

Mit Hilfe des im vorigen Versuch geeichten Pirani-Manometers wird ein Druck von 0,5 mbar an der Pumpe mit dem Dosierventil eingestellt. Das Dreiwegenventil ist anfangs so eingestellt, dass die Luft von außen angesaugt wird. Dann wird das Ventil auf den Kolbenprober umgestellt und die Zeit gestoppt (mit der Stoppuhrfunktion einer Digital-Armbanduhr), die es dauert, bis sich der Kolben von 100 ml bis 20 ml bewegt hat. Der Versuch wird dreimal durchgeführt, und anschließend das Saugvermögen S , die Standardabweichung der Messung und die Messunsicherheit berechnet und das Saugvermögen mit der Firmenangabe von $3,7 \text{ m}^3/\text{h}$ verglichen.

Saugvermögen

$$\frac{p \cdot V}{\Delta t} = Q = p_0 \cdot S \Rightarrow S = \frac{p \cdot V}{\Delta t \cdot p_0} = \frac{1000 \text{ mbar} \cdot 10 \text{ ml}}{0,5 \text{ mbar} \cdot 19,1983 \text{ s}} = 3,75 \frac{\text{m}^3}{\text{h}};$$

Die Pumpe ist also etwas besser als angegeben.

Standardabweichung der Messung

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2} = 0,913 \text{ s}; (\text{mit } \bar{x} = 19,1983)$$

Messunsicherheit

$u = \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s = 0,201 \text{ s}$, d.h. mit der Wahrscheinlichkeit von 68,3 % liegt die Zeit in dem Intervall von der Breite s um \bar{x} .

Fehlerquellen

- Wenn der Kolben des Kolbenprobers weit herausgezogen ist, neigt dieser dazu, sich zu verkanten und ruckweise zu bewegen, wodurch die Ablesung natürlich erschwert und verfälscht wird. Dies war vor allem beim ersten Messdurchgang der Fall.
- Fehler in der Eichtafel des Pirani-Manometers aus vorigem Versuch
- Starten und Anhalten der Stoppuhr nicht ganz exakt synchronisiert mit Start der Messung bzw. Durchgang des Kolbens durch Skalenstrich („menschliches Versagen“)

3. Versuch: Effektives Saugvermögen

Ziel

Messung der Auspumpzeiten des Rezipienten bei verschiedenen Verbindungsstücken zwischen Pumpe und Rezipient.

Durchführung

Die Pumpe wird über einen Schlauch (einmal direkt, einmal über eine Kapillare mit 2 mm Durchmesser und einmal über eine Kapillare mit 3 mm Durchmesser) mit dem Rezipienten (Volumen: 3 Liter) verbunden, an dem mit einem Pirani-Manometer der Druck gemessen werden kann. In regelmäßigen Zeitabständen (mit dem Schlauch alleine nach 5 Sekunden im 10-Sekunden-Abstand insgesamt zwei Minuten lang, mit der dünnen Kapillare im 15-Sekunden-Abstand insgesamt 8

Minuten lang und mit der dickeren Kapillare in 15-Sekunden-Abstand insgesamt 6 Minuten lang) wird der Druck gemessen und über die Zeit auf halblogarithmischem Papier aufgetragen. Daraus wird das effektive Saugvermögen bestimmt.

Effektives Saugvermögen aus Tabelle

[aus Grafik]

Effektives Saugvermögen berechnet

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

Schlauch bei 0,3 mbar: $t = (30 \pm 2) \text{ s}$, $V = (3,0 \pm 0,1) \text{ l}$, $p_0 = 1000 \text{ mbar}$;

$$\Rightarrow S = (2,92 \pm 0,3) \frac{\text{m}^3}{\text{h}};$$

Kapillare (3 mm):

bei 0,3 mbar: $t = (120 \pm 2) \text{ s}$; $\Rightarrow S = (0,73 \pm 0,04) \frac{\text{m}^3}{\text{h}};$

bei 1,5 mbar: $t = (62 \pm 2) \text{ s}$; $\Rightarrow S = (1,13 \pm 0,077) \frac{\text{m}^3}{\text{h}};$

Theoretische Berechnung der Leitwerte

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

Kapillare (3 ± 0,1) mm Durchmesser, (95 ± 2) mm Länge:

bei 0,3 mbar: es kann von Molekularströmung ausgegangen werden: $\eta = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m_a \cdot d \cdot \bar{c};$

$$\Rightarrow L = 121 \cdot \frac{d^3}{l} = (3,438 \cdot 10^{-5} \pm 4,38 \cdot 10^{-6}) \frac{\text{m}^3}{\text{s}};$$

bei 1,5 mbar: keine Molekularströmung: $\eta_{Luft} = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1};$

$$\Rightarrow L = (5,76 \cdot 10^{-2} \pm 9,4 \cdot 10^{-3}) \frac{\text{m}^3}{\text{s}};$$

Theoretische Berechnung des effektiven Saugvermögens

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \sum_i \frac{1}{L_i};$$

bei 0,3 mbar: $S_{eff} = 0,120 \frac{\text{m}^3}{\text{h}};$

bei 1,5 mbar: $S_{eff} = 3,64 \frac{\text{m}^3}{\text{h}};$

Fehlerquellen

- Fehler in der Eich-tabelle des Pirani-Manometers aus erstem Versuch; keine gemessenen Eichwerte für 0,3 mbar und 5 mbar
- Ables-ungenauigkeit am analogen Ampèremeter des Pirani-Manometers

- Verschiedene Skalen des Ampèremeters, kurze Zeitabstände zwischen Ablesevorgängen und während der Messung sich bewegender Zeiger führt zu Ablesefehlern

Fragen

Wann bezeichnet man ein Gas als ideal?

Wenn die Gasteilchen nur durch vollkommen elastische Stöße untereinander wechselwirken, es gibt keine anderen Kräfte zwischen den Teilchen, die Teilchen können als Kugeln betrachtet werden.

Warum kann man für die „hier interessierenden Drücke (Abschnitt 3)“ die Luft näherungsweise als ideal betrachten?

Bei diesen Drücken ist der Abstand zwischen den Teilchen und somit ihre freie Weglänge so groß, dass anziehende Kräfte zwischen den Atomen / Molekülen, die mit dem Quadrat der Entfernung abnehmen, vernachlässigt werden können.

Wie kann man jemand die Wärmeleitfähigkeit eines Gases erklären?

Wärme ist die kinetische Energie der Teilchen, durch vollkommen elastische Stöße wird diese kinetische Energie zwischen den Teilchen übertragen und somit weitergegeben, entsprechend wird die Wärme innerhalb des Gases weitergeleitet.

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

Wenn die mittlere freie Weglänge der Luftteilchen größer wird als die Gefäßgröße (hier: Mantel der Thermoskanne), ist $\kappa \propto n$.

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

Fett: gering => Körperfett dient als Wärmeisolierung bei Menschen und Tieren

Kupfer: hoch => Kühlkörper, Kühlrippen in der Technik

Wasser: hoch => als Wärmeübertragungsmedium in Kraftwerken, einfache Wärmeübertragung in Wärmetauschern

Luft: gering => Schaumstoffe, die viel Luft enthalten, werden als Isoliermittel verwendet

Stein: relativ hoch => Fußbodenheizung

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?

Die genaue Höhe des Berges wußte er nicht, weil zu dieser Zeit bestenfalls trigonometrische Höhenmessung (mit Theodolit) bekannt war, mit dem man nur die relative Höhe des Berges bestimmen kann. Die absolute Höhe (von Meeresniveau bzw. Normal-Null) kann man erst heute (mit Radarsatelliten, GPS) exakt bestimmen, zu Pascals Zeit ging das nur mit Luftdruckmessungen, die ziemlich ungenau sind (wegen Wetterabhängigkeit; Luftdruckschwankungen im Bereich von mehreren 10 hPa, das entspricht mehreren hundert Höhenmeter).

Was verstehen Sie unter Molekularströmungsbereich?

Die Knudsenzahl $Kn = \lambda / d$ gibt das Verhältnis zwischen mittlerer freier Weglänge und Gefäßdurchmesser an; man unterscheidet dabei zwischen Laminarströmung $Kn \ll 1$, Knudsenströmung (Übergangsbereich) $Kn \approx 1$ und Molekularströmung $Kn \gg 1$. Bei der Molekularströmung sind wegen der großen freien Weglänge Kollisionen zwischen den Teilchen sehr selten, es passieren v.a. Kollisionen zwischen Gasteilchen und Gefäßwand, deshalb spielt die Viskosität des Gases keine Rolle mehr, der Leitwert ist unabhängig vom Druck.

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

[...]

Mit einer kommerziellen UHV-Anlage wird typischerweise ein Druck von $4 \cdot 10^{-11}$ mbar erzeugt. Berechnen Sie die zugehörige freie Weglänge λ .

[...]