

Vorbereitung: Vakuum

Christine Dörflinger (*christinedoerflinger@gmail.com*)

Frederik Mayer (*fmayer163@gmail.com*)

Gruppe Do-9

12. Juli 2012

Inhaltsverzeichnis

0	Allgemeines	3
0.1	Vakuum	3
0.2	Vakuumpumpen	3
0.2.1	Drehschieberpumpe	3
0.2.2	Turbomolekularpumpe	3
0.3	Saugvermögen	4
0.4	Saugleistung	4
0.5	Mittlere freie Weglänge	4
0.6	Strömung von Gasen	4
0.7	Leitwert	4
0.8	Strömungswiderstand	5
0.9	Manometer	5
0.9.1	Membranmanometer	5
0.9.2	U-Rohr-Manometer	5
0.9.3	Wärmeleitungsmanometer	5
0.9.4	Ionisationsmanometer	5
0.9.5	Penning-Manometer	5
1	Demoversuch	6
2	Leitwert eines Metallrohrs	6
3	Saugvermögen der Drehschieberpumpe	6
4	Saugvermögen der Turbomolekularpumpe	7
5	Statisches Kalibrierungsverfahren	7
6	Elektrische Durchschlagfestigkeit im Vakuum	7
7	Aufdampfen einer Indium-Schicht auf eine Plexiglasscheibe durch eine Kreisblende	8
8	Vorbereiten der Apparatur für die Nachfolger	8
9	Quellenangabe	8

0 Allgemeines

In diesem Praktikumsversuch wird auf die Vakuumtechnik eingegangen: Dabei sollen die Prinzipien der Vakuumerzeugung und -messung gezeigt werden.

0.1 Vakuum

Vakua sind Bereiche, in denen der Druck deutlich geringer als der atmosphärische Druck ist. Es wird unterschieden:

- Grobvakuum von 300 mbar bis 1 mbar
- Feinvakuum (FV) von 1 mbar bis 10^{-3} mbar
- Hochvakuum (HV) von 10^{-3} mbar bis 10^{-7} mbar
- Ultrahochvakuum (UHV) 10^{-7} mbar bis 10^{-14} mbar

0.2 Vakuumpumpen

Im folgenden wird nur auf die Funktionsweise der Drehschieber- und der Turbomolekularpumpe eingegangen, da diese in den Versuchen verwendet werden.

0.2.1 Drehschieberpumpe

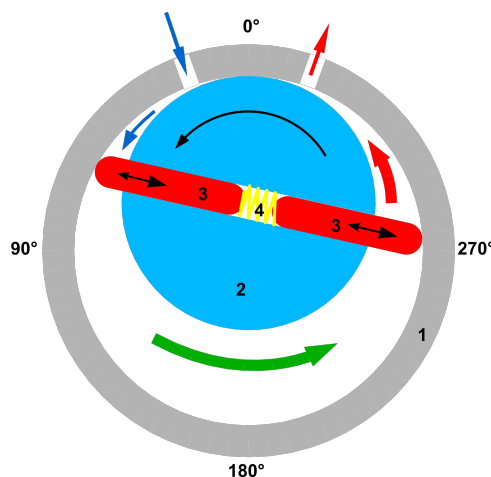


Abbildung 1: Prinzip einer Drehschieberpumpe

Die Schieber (3) unterteilen den Raum zwischen Rotor (2) und Stator (1) in Kammern, sie sind beweglich angebracht (z.B. an Feder (4)) um Abstandsänderungen während des Umlaufs auszugleichen. Die Evakuierung ist in Abb. 1 gut zu erkennen.

0.2.2 Turbomolekularpumpe

Die Turbomolekularpumpe besteht aus abwechselnder Anordnung von Statoren mit variierenden Anstellwinkeln und Rotoren dazwischen (Geschwindigkeit ungefähr mittlere Geschwindigkeit der Gasmoleküle). Die Pumpwirkung kommt dadurch zustande, dass den Teilchen Impulse in axialer Richtung zugefügt werden (durch Stöße mit Rotoren). Bei leichten Molekülen wird nur ein kleiner zusätzlicher Impuls übertragen; bei schweren ein größerer Impuls. Das Kompressionsvermögen ist somit besser für 'schwere' Gase.

0.3 Saugvermögen

Der Volumendurchfluss durch die Ansaugöffnung wird als Saugvermögen S bezeichnet. Es gilt:

$$S = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

bzw. für konstanten Wert S :

$$S_c = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2)$$

0.4 Saugleistung

Die Saugleistung ist der zeitabhängige Transport einer Gasmenge:

$$q_{pV} = \frac{p \cdot V}{t} \quad (3)$$

Für konstante p und V auf der Ansaugseite gilt:

$$q_{pV} = S \cdot p \quad (4)$$

0.5 Mittlere freie Weglänge

Die mittlere freie Weglänge bezeichnet die durchschnittliche Strecke, die ein Teilchen zurücklegt, ohne mit anderen Teilchen wechselzuwirken. Sie ist gegeben durch

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma} \quad (5)$$

wobei n die Teilchenzahldichte und σ den Wirkungsquerschnitt bezeichnet. Mit abnehmenden Druck nimmt auch die Teilchenzahldichte n ab, womit die mittlere freie Weglänge größer wird: Je höher das Vakuum, desto länger ist die mittlere freie Weglänge.

0.6 Strömung von Gasen

Beim Evakuieren eines Volumens kommt es in den Gasleitungen zu einem Gasstrom. Hier unterscheidet man zwischen Kontinuums- und Molekularströmung.

Molekularströmung tritt bei sehr geringen Drücken auf. Im Vergleich zum Durchmesser der Leitung ist die mittlere freie Weglänge der Teilchen dann groß; deshalb finden kaum Stöße mit anderen Teilchen sondern hauptsächlich Stöße mit der Leitungswand statt. Die Strömungsgeschwindigkeit hängt dann nur von der Geometrie der Leitung ab. Man nennt dies auch Einzelteilchen-Strömung.

Bei höheren Drücken hingegen stoßen vor allem Teilchen untereinander: Dann spricht man von Kontinuumsströmung oder viskoser Strömung. Hier unterscheidet man zwischen laminarer K.-Strömung und turbulenter K.-Strömung. Bei der laminaren Kontinuumsströmung werden Teilchen am Rand der Leitung durch Reibung gebremst. Deshalb haben Gasschichten am Rand eine niedrigere Strömungsgeschwindigkeit als solche in der Mitte der Leitung. Wächst die Strömungsgeschwindigkeit, so nimmt auch die Reibung am Rand der Leitung zu und es bilden sich Wirbel. Man spricht dann von turbulenten Strömungen.

0.7 Leitwert

Der pV-Durchfluss durch ein Leitungselement wird über den Leitwert L beschrieben:

Es gilt:

$$q_{pV} = L(p_1 - p_2) = \Delta p \cdot L \quad (6)$$

Dabei ist $\Delta p = (p_1 - p_2)$ der Druckunterschied zwischen Ein- und Ausgang. Somit ist der Leitwert L der Volumendurchfluss durch ein Leitungselement.

0.8 Strömungswiderstand

Analog zur Elektrizitätslehre ($q_{pV} \rightarrow$ Strom, $\Delta p \rightarrow$ Spannung, $L \rightarrow$ el. Leitwert) kommt man über die Leitfähigkeit zum Widerstand:

$$W = \frac{1}{L} \quad (7)$$

Serienschaltung und Parallelschaltung sind ebenfalls analog.

0.9 Manometer

Manometer dienen dazu, Drücke zu messen.

0.9.1 Membranmanometer

Das Membranmanometer ist sehr einfach aufgebaut: Durch den Gasdruck wird ein dünnes Blech verbogen, womit ein Zeiger gedreht wird. Die Genauigkeit dieser Manometer ist eher gering, ihr Messbereich liegt zwischen 16 mbar und 40 bar.

0.9.2 U-Rohr-Manometer

U-Rohr-Manometer bestehen aus einem U-Rohr, das zu einem Teil mit Quecksilber gefüllt ist. Auf einer Seite ist das U-Rohr offen, auf der anderen Seite ist es luftleer und abgeschlossen (Torricellisches Vakuum). Der Druck berechnet sich aus der Höhendifferenz der Quecksilberspiegel mit

$$p = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (8)$$

0.9.3 Wärmeleitungsmanometer

Beim Wärmeleitungsmanometer wird die Tatsache, dass Wärmeleitfähigkeit druckabhängig ist, ausgenutzt. Ein Messdraht wird in einer Wheatstoneschen Brückenschaltung als Sensor genutzt: Der Widerstand des Messdrahtes (und damit die Temperatur) soll immer gleich bleiben. Dies wird über Nachregeln der Spannung am Messdraht gewährleistet. Aus der angelegten Spannung lässt sich der momentane Druck am Draht berechnen.

Wärmeleitungsmanometer werden aufgrund geringer Einstellzeiten oft genutzt und funktionieren gut im Feinvakuumbereich (1 bis 10^{-3} bar).

0.9.4 Ionisationsmanometer

Beim Ionisationsmanometer wird die oben bereits erwähnte druckabhängige Änderung der mittleren freien Weglänge zur Druckmessung genutzt: Es besteht aus einer Anode, einer Kathode und einem Ionenkollektor. An der Kathode werden Elektronen emittiert und zur Anode hin beschleunigt. Dabei können Elektronen auf Gasteilchen treffen und diese ionisieren. Deshalb kann vom Druck und von der verwendeten Gasart abhängiger Ionenstrom gemessen werden.

0.9.5 Penning-Manometer

Das Penning-Manometer ähnelt dem Ionisationsmanometer und dient dazu, sehr niedrige Drücke messen zu können. Bei sehr niedrigen Drücken kann kein Ionenstrom mehr gemessen werden, da Ionisationswahrscheinlichkeit dann sehr klein ist. Abhilfe verschafft hier ein Magnetfeld, dass die Elektronen auf dem Weg von der Kathode zur Anode auf eine spiralförmige Bahn zwingt. Die Weglänge der Elektronen und damit auch die Ionisationswahrscheinlichkeit wird so drastisch erhöht. Damit können auch Drücke im Bereich des Hochvakuums (10^{-3} bis 10^{-7} bar) gemessen werden.

1 Demoversuch

Mit den anderen Gruppen wird hier gemeinsam die Gasentladung an Apparatur 44 in Abhängigkeit vom Druck beobachtet.

Zunächst werden Rezipient und Gasentladungsröhre bei eingeschaltetem Hochspannungsgerät mit der Drehschieberpumpe evakuiert. Bei Erniedrigen des Drucks sollte die Gasentladung erlöschen.

2 Leitwert eines Metallrohrs

Zunächst wird als Verbindungsleitung L ein Rohr mit etwa 2 mm Innendurchmesser eingebaut. Zwischen den Messstellen T1 und T2 soll der zeitliche Druckverlauf gleichzeitig aufgenommen werden. Nach der Messung wird die verwendete Drehschieberpumpe abgeschaltet und der Rezipient belüftet.

Betrachtet man das Saugvermögen:

$$S = \frac{dV}{dt} = \frac{q_{pv}}{p} \quad (9)$$

Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Saugvermögen auf beiden Seiten des Rohrs nicht das selbe ist. Verwendet wird hierbei das Saugvermögen 'vor' dem Rohr S_{eff} kommt man auf:

$$S_{\text{eff}} = \frac{q_{pv}}{p_2} \quad (10)$$

Da der pV-Durchfluss überall gleich bleibt lässt sich über den Druck auf der Pumpenseite p_1 berechnen:

$$q_{pV} = L(p_1 - p_2) = p_1 \cdot S \implies L = \frac{p_1 \cdot S}{p_1 - p_2} = \frac{S_{\text{eff}} \cdot S}{S - S_{\text{eff}}} \quad (11)$$

Die Werte S und S_{eff} erhält man aus der Definition des Saugvermögens:

$$S = \frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{nRT}{p} \right) = -\frac{nRT}{p^2} \cdot \dot{p} = -\frac{V}{p} \cdot \dot{p} \leftrightarrow \frac{S}{V} = -\frac{\dot{p}}{p} \quad (12)$$

Durch Integrieren erhält man:

$$\int_{t=0}^t \frac{S}{V} dt = - \int_{t=0}^t \frac{\dot{p}}{p} dt \longrightarrow \frac{S}{V}(t - t_0) = \ln(p_0) - \ln(p) \longrightarrow \ln(p) = -\frac{S}{V}t + \frac{S}{V}(t_0) + \ln(p_0) \quad (13)$$

Das kann als Geradengleichung angesehen werden, durch den gefittet wird.

Die Steigung sei hierbei:

$$m = -\frac{S}{V} \longrightarrow S = -m \cdot V \quad (14)$$

Aus dem Plot und der Regression von dem Druck an der Messstelle T1 ($\longrightarrow p_1$) erhält man S ; S_{eff} bekommt man analog dazu aus den Werten von T2 ($\longrightarrow p_2$).

3 Saugvermögen der Drehschieberpumpe

Zunächst wird die Apparatur mit einer Drehschieberpumpe evakuiert. Mit einer Thermovaksonde und einer Stoppuhr wird der zeitliche Verlauf des Drucks am Saugstutzen gemessen. Aus den Messwerten wird ein Diagramm erstellt und daraus soll das mittlere Saugvermögen $\bar{S}$ bestimmt werden. Dazu trägt man das Saugvermögen $S(p)$ über den Druck (p wird logarithmisch aufgetragen) auf und legt eine Gerade ohne Steigung durch den linearen Teil.

Aus der Vorbereitungsmappe, bzw. die Geradengleichung aus Aufgabe 2 umgestellt:

$$S(p) = -V \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \cdot \frac{1}{t} \quad (15)$$

4 Saugvermögen der Turbomolekularpumpe

Mit Hilfe der Ionivac-Messröhre wird hier das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe bestimmt. Zunächst muss die Apparatur vor diesem Versuchsteil bis zu einem Druck von ca. $2 \cdot 10^{-1}$ mbar teilbelüftet werden. Anschließend wird die Apparatur erneut mit der Drehschieberpumpe evakuiert. Ab einem Druck von ca. $8 \cdot 10^{-2}$ mbar wird die Turbomolekularpumpe eingeschaltet und der Druck in der Messröhre abgelesen. In einem Messintervall von 10s wird der Druck abgelesen und daraus analog zu Aufgabe 4 das Saugvermögen bestimmt.

Wir nehmen die Kraft mit der die Glasglocke auf die Gummidichtung gedrückt wird folgendermaßen an:

$$F = \Delta p \cdot A = 10^5 \text{ Pa} \cdot \pi \left(\frac{0.22 \text{ m}}{2} \right)^2 \approx 3.8 \text{ kN} \quad (16)$$

5 Statisches Kalibrierungsverfahren

Aus dem idealen Gasgesetz

$$p \cdot V = nRT \quad (17)$$

bei dem p den Druck, V das Volumen, n die Stoffmenge, R die universelle Gaskonstante und T die Temperatur (in Kelvin) bezeichnet, lässt sich bei Betrachtung einer konstanten Temperatur das Boyle-Mariottesche Gesetz herleiten. Es gilt:

$$p_1 \cdot V_1 = \text{const.} = p_2 \cdot V_2 \Leftrightarrow \frac{p_1}{V_2} = \frac{p_2}{V_1} \quad (18)$$

Zur Versuchsdurchführung soll zunächst das Ventil V3 geschlossen werden. Anschließend wird der Rezipient zuerst mit der Drehschieber- und dann mit der Turbomolekularpumpe evakuiert. Wenn ein Druck von 10^{-4} mbar erreicht ist, wird das Ventil V2 geschlossen, und die Pumpen abgeschaltet. Anschließend soll das Ventil V3 geöffnet werden, sodass sich zwischen Rezipient und Referenzvolumen (bis dahin p_{atm}) der Druck ausgleicht. Der sich einstellende Gasdruck wird an T3 beobachtet. Dann wird V3 wieder geschlossen und B2 geöffnet, sodass sich im Referenzvolumen RV wieder Atmosphärendruck einstellt. Dieser Vorgang wird wiederholt (Iteration), bis an T3 ein Druck von 80mbar abgelesen wird. Mit dem Boyle-Mariottischen Gesetz gilt für den sich nach einem Öffnungsvorgang einstellenden Druck p_{ges} :

$$p_{\text{atm}} \cdot V_{\text{RV}} = p_{\text{ges}} \cdot (V_{\text{RV}} + V_{\text{RE}}) \quad (19)$$

wobei V_{RV} das Volumen des Referenzvolumens und V_{RE} das Volumen des Rezipienten bezeichnet.

Da ungefähr $V_{\text{RE}} \approx V_{\text{RV}} + V_{\text{RE}}$ gilt, da das Referenzvolumen klein gegenüber dem Rezipienten ist, ergibt sich für den Druckzuwachs pro Iterationsschritt ungefähr

$$\Delta p \approx p_{\text{ges}} \approx p_{\text{atm}} \cdot \frac{V_{\text{RV}}}{V_{\text{RE}}} \quad (20)$$

Der Gesamtdruck nach k Schritten beträgt

$$p_{\text{ges},k} = p_{\text{rez},0} + k \cdot p_{\text{atm}} \cdot \frac{V_{\text{RV}}}{V_{\text{RE}}} \quad (21)$$

Somit ist ein linearer Zusammenhang zwischen $p_{\text{ges},k}$ und k zu erwarten.

6 Elektrische Durchschlagfestigkeit im Vakuum

In diesem Versuch soll die elektrische Durchschlagfestigkeit in Abhängigkeit vom Druck untersucht werden. Dazu soll die Überschlagnspannung zwischen zwei Metallkugeln bestimmt werden. Es wird bei Atmosphärendruck begonnen, und der Druck anschließend mit der Drehschieberpumpe bis ungefähr 500mbar reduziert. Dann wird die Spannung wieder erhöht, bis ein Durchschlag stattfindet. Nun wird der Druck immer wieder halbiert und jeweils ein elektrischer Durchschlag erzeugt, bis ungefähr 0.05 mbar erreicht

sind.

Anschließend wird mit der Turbomolekularpumpe ohne Unterbrechung bis zu einem Druck von ungefähr $2 \cdot 10^{-4}$ mbar evakuiert, das Ventil V2 geöffnet und 'rückwärts' eine Messreihe aufgenommen.

Es ist zu erwarten, dass bei sinkendem Umgebungsdruck die Durchschlagsspannung zunächst auch abnimmt. Bei höheren Drücken werden Funkenentladungen bzw. Lichtbögen und bei niedrigeren Drücken Glimmentladungen zu sehen sein.

Zur Zündung einer Bogenentladung werden sehr hohe elektrische Spannungen benötigt. An der Elektrode, die eine sehr hohe Temperatur hat, kommt es dann zur Glühemission: Direkt aus der Elektrode werden Elektronen emittiert. An den Elektroden ist die Stromdichte sehr groß, und Elektroden und Gas heizen sich stark auf. Die zur Aufrechterhaltung der Entladung benötigte Spannung ist hingegen klein. Eine Funkenentladung ist eine sehr kurze Bogenentladung, bei der die Spannung zwischen den Elektroden nach der Zündung zusammenbricht.

In Bereichen niedrigen Drucks kann es zur Glimmentladung kommen: Sie tritt in niedrigen Druckbereichen auf und führt zu einem Glimmen in einer gasspezifischen charakteristischen Farbe. Zur Glimmentladung werden hohe Spannungen benötigt; da die Stromstärke hingegen relativ klein ist, bleiben Gas und Elektroden kalt.

Für die Überschlagsspannung ist bei dem Druck, bei dem die Mittlere Freie Weglänge ungefähr dem Abstand der Kugeln entspricht, ein Minimum zu erwarten. Hierzu führen zwei Effekte: Eine größere Mittlere Freie Weglänge führt dazu, dass Elektronen beim Überschlag weniger wechselwirken und so weniger Energie verlieren (Erniedrigung Überschlagsspannung). Andererseits führt eine geringere Dichte an Gasteilchen (höhere MFW) zu einer Erhöhung der Überschlagsspannung.

7 Aufdampfen einer Indium-Schicht auf eine Plexiglasscheibe durch eine Kreisblende

Zuletzt soll bei unterschiedlichen Drücken eine Indiumschicht auf eine Plexiglasscheibe aufgedampft werden.

Dazu wird Indium mit einem Heizstrom zum Verdampfen gebracht. An der kalten Plexiglasscheibe kondensiert nun das verdampfte Indium. Es soll bei drei unterschiedlichen Drücken aufgedampft werden. Der zu Verdampfung benötigte Heizstrom soll beobachtet werden. Bei höheren Drücken ist eine größere Randunschärfe zu beobachten, da die Mittlere Freie Weglänge dann kleiner und die Anzahl der Stöße der Indium-Atome zwischen Verdampfung und Plexiglasscheibe größer ist.

8 Vorbereiten der Apparatur für die Nachfolger

Die Apparatur soll belüftet, gereinigt, das Aufdampfschiffchen mit Indium bestückt, die Apparatur zusammengesetzt und evakuiert werden.

9 Quellenangabe

- Vorbereitungsmappe
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Drehschieberpumpe>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Vakuumpumpe>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Vakuum>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Membranmanometer>