

Vorbereitung: Vakuum

Axel Müller & Marcel Köpke
Gruppe: 30

24.06.2012

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Drehschieberpumpe	3
1.2	Turbomolekularpumpe	3
1.3	Diffusionspumpe	3
1.4	Kryopumpe	4
1.5	Saugvermögen	4
1.6	Saugleistung	4
1.7	Kontinuumstrom	4
1.8	Molekularströmung	4
1.9	Strömungswiderstand	5
1.10	Strömungsleitwert	5
1.11	mittlere freie Weglänge	5
1.12	Leckrate	5
1.13	Lecksuche	5
1.14	Membranmanometer	5
1.15	U-Rohr-Manometer	6
1.16	Wärmeleitungsmanometer	6
1.17	Ionisationsmanometer	6
1.18	Penning-Manometer	6
1.19	Gasgesetze	7
1.20	Partialdruck	7
1.21	Dampfdruck	7
1.22	Boyle-Mariottesches Gesetz	8
2	Aufgaben	9
2.1	Demoversuch	9
2.2	Leitwert eines Metallrohrs	9
2.3	Saugvermögen der Drehschieberpumpe	9
2.4	Saugvermögen der Turbomolekularpumpe	9
2.5	einstufiges, statisches Kalibrierungsverfahren	10
2.6	elektrische Durchschlagfestigkeit im Vakuum	10
2.7	Aufdampfen einer Indium-Schicht	11
2.8	Vorbereitung der Apparatur	11

1 Einleitung

In diesem Versuch werden wir Grundzüge der Vakuumtechnik kennenlernen und ihre praktischen Tücken erforschen.

1.1 Drehschieberpumpe

Bei Drehschieberpumpen handelt es sich um Verdrängerpumpen. Die Verdrängung wird durch eine Rotationsbewegung verursacht. Die Pumpe besteht meist aus einem zylindrischen Körper (Stator) und einem Rotor. An diesem sind Schieber angebracht, die durch die Fliehkraft bzw. durch Federkräfte an die Außenwand gedrückt werden. Dadurch erzeugt der Rotor eine Verdrängung, die an einem äußeren Ventil abgelassen werden kann.

1.2 Turbomolekularpumpe

Eine weiterentwickelte Molekularpumpe. Ihr Arbeitsprinzip basiert auf der gezielten Impulsänderung von Luftmolekülen. Diese wird durch mehrere Statoren (Luftleitbleche) und Rotoren, die entlang der Pumpenlänge verschiedene Anstellwinkel einnehmen, hervorgerufen. Die Moleküle stoßen mit den Rotoren und erhalten dadurch eine bevorzugte Bewegungsrichtung entlang ihrer Symmetrieachse.

Die typische Umdrehungszahl der Rotoren liegt bei $\approx 3000 \frac{U}{min}$. Die Abmessungen sind so gewählt, dass die Geschwindigkeiten am Rand in den Bereich der Molekularbewegungsgeschwindigkeit $\overline{c_{Gas}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$ kommen. Schwere Gasteilchen sind also geeigneter als leichte Gasteilchen, da bei gleicher Umdrehungszahl ein größerer Impuls auf die schweren Teilchen übertragen werden kann.

Wichtig bei der Verwendung der Turbomolekularpumpe ist die Erzeugung eines Vorvakuums. Bei Atmosphärendruck würde die Pumpe durch die hohe Luftreibung schlichtweg überhitzen und dadurch zerstört werden.

1.3 Diffusionspumpe

Die Diffusionspumpe ist eine Hochvakuumpumpe. Sie besteht aus einem abgeschlossenen Körper der auf der einen Seite gekühlt und auf der anderen Seite erhitzt wird. Das Treibmittel (z.B. Wasser oder Öl) siedet an der warmen Seite und reißt Luftmoleküle in einem Dampfstrahl mit. Auf der kühlen Seite kondensiert der Treibmittel und läuft an den kalten Wänden wieder Richtung Hitze (bzw. wird durch eine andere Pumpe dorthin abgepumpt). Der Dampfstrahl wird dabei durch ein Ventil geleitet sodass der Luftstrom nur in eine Richtung fließen kann.

1.4 Kryopumpe

Durch starkes Abkühlen auf Temperaturen um $\sim 100K$ kondensieren die meisten Gase und verringern dadurch ihr Volumen. Durch Abtransport der gekühlten Flüssigkeit entsteht so eine Saugleistung.

1.5 Saugvermögen

$$S = \frac{dV}{dt}$$

Das Saugvermögen S bezeichnet den mittleren Volumenstrom durch die Pumpe

1.6 Saugleistung

$$Q = S \cdot p$$

Die Saugleistung gibt den Gasdurchsatz durch eine Pumpe in Abhängigkeit vom Ansaugdruck an.

1.7 Kontinuumstrom

Man spricht von einer Kontinuumströmung, wenn das strömende Material den Raum fast vollständig ausfüllt. Das strömende Material kann dann makroskopisch (als Mittel der mikroskopischen Größen) z.B. durch die Navier-Stokes-Gleichung beschrieben werden.

Dabei unterscheidet man noch zwei verschiedene Strömungsarten:

- laminar:
Der Strom ist «gleichmäßig», d.h. es gibt idealerweise keine Strömungsabrisse und Wirbel.
- turbulent:
wird ein Strom zu sehr abgelenkt können Strömungsabrisse und Wirbel entstehen. Man nennt den Strom an diesen Stellen turbulent.

1.8 Molekularströmung

Man spricht von einer Molekularströmung, wenn die mittlere freie Weglänge der strömenden Teilchen größer ist als der Strömungsdurchmesser. In einer Molekularströmung herrschen kaum noch Wechselwirkungen unter den strömenden Teilchen, Stöße mit der Wand sind wahrscheinlicher als Stöße untereinander.

1.9 Strömungswiderstand

Der Strömungswiderstand ist diejenige Kraft, die ein strömendes Material seiner Bewegung entgegensetzt bzw. diejenige Kraft, die auf ein umströmten Körper entgegen seiner gedachten Bewegungsrichtung durch die Strömung, wirkt.

1.10 Strömungsleitwert

Der reziproke Strömungswiderstand. Gibt die «Strömungsfähigkeit» an.

1.11 mittlere freie Weglänge

Die mittlere freie Weglänge ist diejenige Länge die eine Teilchen im Mittel zurücklegt bevor es mit einem anderen Teilchen wechselwirkt («stößt»). In Gasen ist sie stark druckabhängig, da bei niedrigen Drücken die Teilchendichte und damit die Stoßwahrscheinlichkeit stark abnimmt.

1.12 Leckrate

$$L = \frac{dp}{dt} V$$

Die Leckrate bezeichnet die Druckänderung (Druckverlustrate) eines bestimmten Volumens über die Zeit.

1.13 Lecksuche

Bezeichnet die Suche nach «Leaks»/Undichtigkeiten, falls $L \neq 0$.

Ein standardisiertes Verfahren ist die Verwendung von Massenspektrometern als Lecksucher. Dabei werden ionisierte Teilchen durch ein Magnetfeld so abgelenkt, dass ihr Auftreffpunkt auf einer Platte charakteristisch für eine bestimmte Teilchenmasse ist. Der Vorteil von diesen Massenspektrometern ist, dass sie auch bei sehr geringen Drücken noch gut funktionieren und so Leckstellen anzeigen können.

1.14 Membranmanometer

Eine dünne Membran befindet sich zwischen zwei Phasen unterschiedlichen Drucks und wird dadurch verbogen (Gasdruck -> Kraft auf die Membran). Das Verbiegen wird mit einem Zeiger angezeigt, sodass Druckunterschiede festgestellt werden können.

1.15 U-Rohr-Manometer

In einem U-Rohr befindet sich eine Flüssigkeit, deren Füllhöhe, bei gleichem Druck auf beiden Enden des Rohrs, vermerkt wird. Stellt sich nun ein Druckunterschied zwischen den Enden des U-Rohrs ein, so verändert sich der Füllstand auf den beiden Seiten des Rohrs. Die Kraft auf die Oberfläche der Flüssigkeit muss dabei gleich der Gewichtskraft der «verdrängten» Flüssigkeitssäule sein. Dadurch ist ein Rückschluss auf den Druckunterschied an den Rohrenden möglich.

1.16 Wärmeleitungsmanometer

Das Wärmeleitungsmanometer ist ein Druckmessgerät, welches auch noch bei niedrigen Drücken von bis zu 10^{-4} mbar gut funktioniert. Es basiert auf der Tatsache, dass die Wärmeleitungsfähigkeit von Materialien im Bereich von 1000 mbar bis $5 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$ stark vom Umgebungsdruck abhängt.

Es besteht prinzipiell aus einem Heizdraht, einem Operationsverstärker und einer Wheatstone'schen Brücke. Dabei wird versucht einen (temperaturabhängigen) Widerstand auf einem konstanten Widerstandswert und damit einer konstanten Temperatur zu halten. Die dafür benötigte Spannung ist dann natürlich aufgrund der druckabhängigen Wärmeleitungsfähigkeit ebenfalls druckabhängig. Mit ihr können dann Rückschlüsse auf den Druck gemacht werden.

Da die Wärmeabgabe des Widerstands natürlich vom umgebenden Gas abhängt müssen diese Art von Manometer auf das jeweilige Gas geeicht werden.

1.17 Ionisationsmanometer

Analog zu den zuvor beschriebenen Massenspektrometern für die Lecksuche.

Zwischen einer Kathode und einer Anode werden Elektronen durch eine Spannung von einigen kV beschleunigt und ionisieren auf ihrer Bahn noch vorhandene Gasteilchen. Die entstandenen Ionen können nun durch Massenspektrometer oder ähnlichen Apparaturen nachgewiesen werden. Möglich ist auch eine direkte Messung des Ionisationsstrom.

Ionisationsmanometer eignen sich für Drücke unterhalb von 10^{-2} mbar , da es bei höheren Drücken zu einer Glimmentladung kommen kann (das Gas «zündet»). Die untere Grenze für Messungen liegt bei etwa 10^{-12} mbar . Ionisationsmanometer eignen sich also besonders für das Hochvakuum.

1.18 Penning-Manometer

Ein Ionisationsmanometer mit Kaltkathode, bei dem der Ionisationsstrom gemessen wird. Dieser ist proportional zur vorhandenen Gas-Teilchendichte und damit zum Druck. Die Genauigkeit wird durch an der Anode entstehende (weiche) Röntgenstrahlung begrenzt, da diese wiederum in der Lage ist Gas-Teilchen zu ionisieren.

1.19 Gasgesetze

Nimmt man ein Gas als vollkommen wechselwirkungsfreies Medium mit punktförmigen Teilchen an, so spricht man von einem idealen Gas. Die meisten Gase verhalten sich bei genügend kleinem Druck (kleine Teilchendichte $\rightarrow$ geringe Stoßwahrscheinlichkeit, Teilchenvolumen sehr klein gegenüber der mittleren freien Weglänge) wie ein ideales Gas. Die ideale Gasgleichung lautet:

$$pV = nRT$$

bzw.:

$$pV = N \cdot k_B T$$

mit p dem Druck, V dem Volumen, n der Stoffmenge, R der molaren/universalen Gas-konstante, N der Teilchenanzahl, k_B der Boltzmann-Konstante und T der Temperatur, wobei $R = N_A \cdot k_B$ gilt und N_A die Avogadrozahl ist.

Für reale Gase können natürlich das Eigenvolumen der Teilchen und die Wechselwirkungen untereinander nicht mehr vernachlässigt werden. Man führt dann Korrekturterme ein, die versuchen diese zwei Einflüsse zu berücksichtigen. Die Van-der-Vaals-Gleichung ist ein solcher Versuch:

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

dabei berücksichtigt der Parameter b das Eigenvolumen der Teilchen und a die Wechselwirkungen untereinander. Beides sind also materialabhängige (und im allgemeinen von den Zustandsgrößen abhängige) Parameter.

1.20 Partialdruck

Partialdrücke definiert man für Gasgemische. Dabei wird einer Teilchenart ein eigener (Partial-)Druck zugeordnet, welcher demjenigen Druck entspricht, den die Teilchenart bei Abwesenheit andersartiger Teilchen im Volumen ausüben würde.

Seien p_i mit $i \in M \subset \mathbb{N}$ Partialdrücke eines Gasgemisches. Dann gilt für ideale Gase nach dem Dalton'schen Gesetz:

$$p_{ges} = \sum_{i \in M} p_i$$

1.21 Dampfdruck

Als Dampfdruck bezeichnet man in einem abgeschlossenen System denjenigen Druck, welcher sich einstellt wenn sich ein Gas mit seiner kondensierten (flüssigen) oder resublimierten (festen) Phase im thermodynamischen Gleichgewicht (gleich Temperatur) befindet.

Steigt der Dampfdruck einer Flüssigkeit / eines Festkörpers in einem offenen System über den Umgebungsdruck, so fängt sie/er an zu kochen/sublimieren!

1.22 Boyle-Mariottesches Gesetz

Bei konstanter Temperatur (isotherme Zustandsänderung) ist in einem abgeschlossenen System der Druck eines idealen Gases umgekehrt proportional zum Volumen:

$$p \sim \frac{1}{V}$$

Dies folgt direkt aus dem idealen Gasgesetz:

$$p = \frac{nRT}{V} = \text{const.} \cdot \frac{1}{V}$$

bzw.:

$$pV = \text{const.} \Rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

2 Aufgaben

2.1 Demoversuch

In diesem Versuchsteil soll eine Gasentladung in Abhängigkeit des Umgebungsdrucks beobachtet werden. Legt man eine genügend große Feldstärke an ein Gas an, kann es zu Gasentladungen kommen. Dabei bewegen sich ionisierte Gasteilchen entlang des Feldes und ionisieren durch Stöße weitere Teilchen. Durch das Rückfallen der Teilchen in den Grundzustand kann sichtbares Licht emittiert werden. Um das Gas zu «zünden» können beschleunigte Elektronen verwendet werden.

Ist der Druck und damit die Teilchendichte und Stoßwahrscheinlichkeit (große mittlere freie Weglänge) zu gering kann die Gasentladung erlöschen bzw. nicht starten.

2.2 Leitwert eines Metallrohrs

In diesem Versuchsteil bestimmen wir den Leitwert eines Metallrohres, indem wir den Druckunterschied an den Rohrenden und die Saugleistung messen. Herrscht an den Enden eines Rohrs ein Druckunterschied Δp so versucht das Medium im Rohr durch Strömung diesen Druckunterschied auszugleichen. Bezeichnet R den Strömungswiderstand und C den Strömungsleitwert so gilt:

$$R = \frac{\Delta p}{Q} \quad C = \frac{1}{R} = \frac{Q}{\Delta p}$$

mit $Q = p \frac{dV}{dt}$ der Saugleistung.

2.3 Saugvermögen der Drehschieberpumpe

Mit Hilfe der Drehschieberpumpe soll eine Kammer evakuiert werden. Dabei wird der zeitliche Verlauf des Drucks aufgezeichnet um so das Saugvermögen $S = \frac{dV}{dt}$ der Pumpe in Abhängigkeit des Drucks angeben zu können.

2.4 Saugvermögen der Turbomolekularpumpe

Analog zu 2.3, nur das hier beachtet werden muss, dass die Turbomolekularpumpe eine Anlaufzeit von $\sim 60s$ hat bis die volle Saugleistung erreicht ist, d.h. die Kammer muss für diesen Versuch mit einem Druck von $\sim 2 \cdot 10^{-1} mbar$ teilbelüftet werden bevor sie mit der Pumpe evakuiert wird.

Für die Kraft auf die Dichtung gilt:

$$F = \Delta p \cdot A = 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot \left(\frac{0,220m}{2}\right)^2 \pi = 3801,33N$$

2.5 einstufiges, statisches Kalibrierungsverfahren

Unter einer Kalibrierung versteht man eine Vergleichsmessung eines zu kalibrierenden Messgeräts mit einem geeichten Vergleichsinstrument. Ein direkter Vergleich ist nur dann möglich, wenn beide Geräte einen überlappenden Messbereich besitzen. Wenn dies nicht gegeben ist, behilft man sich mit einem statistischen Kalibrierungsverfahren. In diesem Versuch machen wir uns das Boyle-Mariottesche Gesetz (bei veränderlicher Stoffmenge) zunutze, da während allen Messungen von einer isothermen Zustandsänderung ausgegangen werden kann.

Zu Beginn wird der Rezipient (V_1) so gut wie möglich evakuiert und dann vom Rest der Apparatur getrennt. Daraufhin wird er mit einem Referenzvolumen V_2 (mit bekanntem Druck $p_2 = 1bar$) verbunden bis sich ein Druckausgleich eingestellt hat. Dann gilt also:

$$\frac{p_{neu}(V_1 + V_2)}{n_{neu}} = \frac{p_{alt}V_1}{n_{alt}}$$

mit

$$n_{neu} = n_{alt} + n_2 = n_{alt} + \frac{p_2 V_2}{RT}$$

Damit folgt dann:

$$p_{neu} = p_{alt} \frac{V_1}{V_1 + V_2} \frac{n_{alt} + n_2}{n_{alt}}$$

Der Vorgang wird solange wiederholt bis sich ein Druck von $p_{neu} = 80mbar$ eingestellt hat. Mit den oben angegebenen Formel kann dann wiederum auf p_1 geschlossen werden.

2.6 elektrische Durchschlagfestigkeit im Vakuum

In diesem Versuchsteil wird die elektrische Durchschlagfestigkeit in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck gemessen. Dabei wird die Spannung zwischen zwei Metallkugeln solange erhöht bis es zu einer Gasentladung kommt. Die geringste Spannung, für welche dies geschieht, bestimmt die Durchschlagfestigkeit. Nun wird die Durchschlagfestigkeit bei verschiedenen Drücken gemessen, beginnend bei $1000mbar$. Nach jeder Messung soll der Druck halbiert werden bis ein Druck von $0,05mbar$ erreicht wurde. Daraufhin wird das Verfahren mit der Turbomolekularpumpe fortgesetzt bis ein Druck von $2 \cdot 10^{-4}mbar$ erreicht ist.

Je nach vorherrschendem Umgebungsdruck ergeben sich verschiedene Arten der Gasentladung. Bei höheren Drücken stellt sich Funkenentladung ein. Bei niedrigen Drücken kommt es zur Glimmentladung, die im Gegensatz zur Funkenentladung sehr «kalt» ist.

Die Wahrscheinlichkeit für eine Gasentladung nimmt mit fallendem Druck zu. D.h. für die Industrie ist es besonders wichtig bei elektrischen Bauteilen an Flugzeugen oder Geräten für Bergsteiger darauf zu achten, dass es zu keinen Gasentladungen kommt.

2.7 Aufdampfen einer Indium-Schicht

In diesem Versuchsteil wird eine Indium-Probe soweit erhitzt, bis sie siedet. Verdampfte Indium-Partikel kondensieren dann an der kälteren Plexiglas-Platte. Dabei wird der «Indium-Strahl» zusätzlich durch eine Lochblende «gerichtet». Die Randschärfe des aufgedampften Indiums soll diskutiert werden.

2.8 Vorbereitung der Apparatur

Hier soll die Apparatur gereinigt und sonstiges Vorbereitungsmaßnahmen getroffen werden.