

Versuche P2-41,42

Vakuum

Versuchsvorbereitung

Marco A. Harrendorf und Thomas Keck, Gruppe: Mo-3
Karlsruhe Institut für Technologie, Bachelor Physik

Versuchstag: 13.06.2011

Theoretische Hintergründe

0.1 Drehschieberpumpe

In dem Praktikumversuch wird eine zweistufige Drehschieberpumpe vom Typ TRIVAC D2,5E eingesetzt.

Drehschieberpumpen gehören zur Klasse der Rotationsverdrängerpumpen und basieren auf folgendem Funktionsprinzip: In einem zylindrischen Gehäuse dreht sich ein exzentrisch gelagerter, geschlitzter Rotor, wobei der Rotor zwei oder mehrere Schieber enthält. Diese Schieber können federbelastet sein oder auf Grund der Fliehkraft an die Gehäusewand gedrückt werden, wobei sie während des Umlaufs Luft von der Saugöffnung zur Auslassöffnung vor sich herschieben und somit eine Verringerung des Drucks auf der Saugseite bewirken.

Diese Pumpenart ist weiterhin in aller Regel ölgeschmiert, um zum einen die innere Gehäusewand ausreichend zu schmieren und abzudichten und um zum anderen schädliche Räume und Spalte ausreichend abzudichten sowie Kompressionswärme abzuführen.

Die Verwendung von Öl hat allerdings einen Nachteil: Das Öl kommt bei einstufigen Drehschieberpumpen zwangsläufig mit der äußeren Atmosphäre in Berührung und nimmt dabei Gas auf, welches dann vakuumseitig entweichen kann. Der erreichbare Enddruck auf der Vakuumseite ist deshalb durch die Leckrate der Ölschmierung begrenzt. Aus diesem Grund setzt man, sofern man niedrigere Arbeitsdrücke erreichen will, häufig zweistufige Drehschieberpumpen ein. Für die Ölschmierung der zweiten Pumpenstufe wird hierbei bereits vorentgastes Öl aus der ersten Pumpenstufe verwendet, wodurch die Leckrate deutlich sinkt.

In Abbildung 1 ist schematisch eine einstufige Drehschieberpumpe vom Typ TRIVAC A dargestellt.

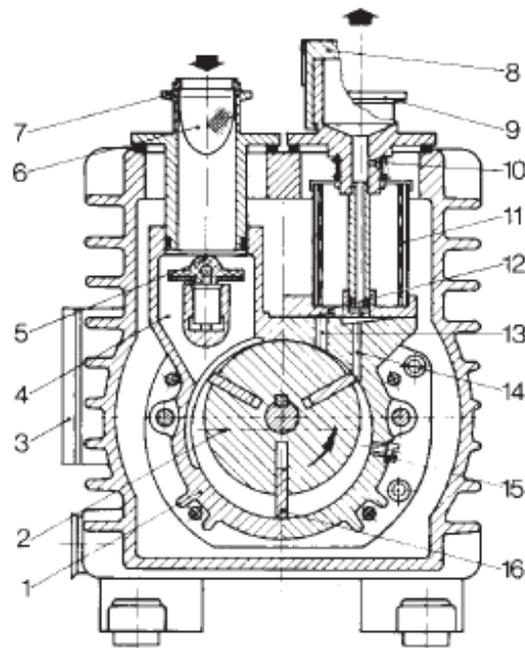
0.2 Turbomolekularpumpe

Molekularpumpen und Turbomolekularpumpen beruhen auf dem folgenden, seit 1913 bekannten Funktionsprinzip: In Folge von Zusammenstößen der einzelnen abzupumpenden Gasteilchen mit den Flächen eines schnell drehenden Rotors erhalten die Gasteilchen einen Impuls. In speziell geformten Zwischenräumen, die durch die meist scheibenförmig ausgebildeten Flächen des Rotors und die ruhenden Flächen des Stators gebildet werden, wird der Impuls der Gasteilchen in eine Vorwärtsbeugung der Gasteilchen umgesetzt. D.h. die Gasteilchen werden in eine vorgegebene Richtung transportiert und somit die Anzahl der Gasteilchen auf der Saugseite gezielt verringert.

In den ursprünglich konzipierten Molekularpumpen waren die Zwischenräume für die Impulsformung konstruktionsbedingt sehr eng, weswegen die technische Umsetzung sehr schwierig war. Allerdings gelang es Ende der 1950er Jahre mit dem Einsatz von turbinenartigen Bauformen die Molekularpumpen zu den Turbomolekularpumpen weiterzuentwickeln und diese Form der Vakuumherzeugung technisch nutzbar zu machen, weil die Abstände zwischen Stator und Rotor mit diesen Bauformen deutlich vergrößert werden konnten.

Folgende zwei Punkte sind beim Einsatz einer Turbomolekularpumpe zu beachten:

1. Vor der Verwendung einer Turbomolekularpumpe muss bereits ein Vorvakuum vorliegen. Andernfalls könnte es in Folge der großen Luftreibung von Gasteilchen an den Rotor-



- | | |
|--|--|
| 1 Pumpengehäuse, | 9 Auspuffstutzen, |
| 2 Rotor, | 10 Nebelufteintritt für Ge-
räuschkämpfung, |
| 3 Ölstandsglas, | 11 Ölfilter, |
| 4 Ansaugkanal, | 12 Auspuffventil, |
| 5 Saugstutzenventil, | 13 Auspuffkanal, |
| 6 Schmutzfänger, | 14 Gasballastkanal, |
| 7 Ansaugstutzen, | 15 Öleinspritzung, |
| 8 Gasballastventilverschlus-
kappe, | 16 Schieber |

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer einstufigen Drehschieberpumpe vom Typ TRI-VAC A: Entnommen aus [Umrath]

und Statorflächen zu einer starken Erhitzung der Pumpe und damit zu deren Zerstörung kommen.

2. Nennenswerte Pumpwirkungen mit Turbomolekularpumpen werden erst erreicht, wenn die Umfangsgeschwindigkeit der Rotoren ungefähr der Größenordnung der mittleren kinetischen Geschwindigkeit der zu pumpenden Gasmoleküle entspricht. Je nach Gassorte und Größe der Rotoren sind deshalb Drehzahlen von 36.000 bis zu 72.000 Umdrehungen pro Minute erforderlich.

Ein wesentlicher Vorteil von Turbomolekularpumpen ist allerdings, dass das Saugvermögen über den gesamten Arbeitsbereich konstant ist und nur wenig von der Gasart abhängt.

Eine Turbomolekularpumpe vom Typ TURBOVAC 151 ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

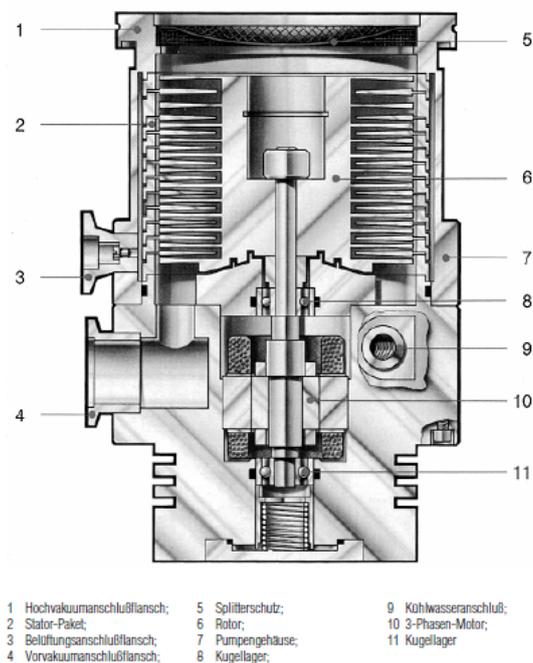


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Turbomolekularpumpe vom Typ TURBOVAC 151: Entnommen aus [Umrath]

0.3 Wärmeleitungsvakuummeter

Zur Messung von geringen (Vakuum-)Drücken sind gewöhnliche federbelastete Manometer oder Flüssigkeitssäulen-Manometer nicht mehr ausreichend.

Aus diesem Grund verwendet man für Drücke von $p_0 = 1013 \text{ mbar}$ bis zu $p \approx 10^{-4} \text{ mbar}$ unter anderem Wärmeleitungsvakuummeter.

In diesen Vakuummetern wird ausgenutzt, dass die Wärmeleitfähigkeit eines Gases für niedrige

Drücken $p < 1 \text{ mbar}$ vom Druck abhängig ist und druckproportional abnimmt, bis sie im Hochvakuum den Wert Null erreicht.

Die häufigste Bauform von Wärmeleitungsvakuummetern ist das sogenannte Pirani-Vakuummeter: In diesem gibt ein stromdurchflossener, etwa $100 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $150 \text{ }^\circ\text{C}$ heißer, dünner Draht Wärme über Wärmestrahlung und Wärmeleitung an das den Draht umgebende Gas ab. Sinkt der Druck des Gases nun soweit ab, dass die mittlere freie Weglänge der Gasatome ungefähr in der Größenordnung des Drahtdurchmessers liegt, so nimmt die Wärmeabfuhr immer mehr ab und die Temperatur des Drahtes steigt an. Durch die Verwendung einer elektronisch geregelten Wheatstone'schen Messbrücke wird der Widerstand des Drahtes und dessen Temperatur konstant gehalten, indem die Heizspannung nachgeregelt wird. Über die augenblicklich angelegte Heizspannung lässt sich dann der Druck des Gases ermitteln.

Zu beachten ist allerdings, dass Wärmeleitungsvakuummeter von der verwendeten Gassorte abhängen und in der Regel nur für Luft und Stickstoff kalibriert sind.

0.4 Ionisationsvakuummeter

Zu den wichtigsten Vakuummeter zählen die Ionisationsvakuummeter, da sie auch sehr geringe Drücke messen können.

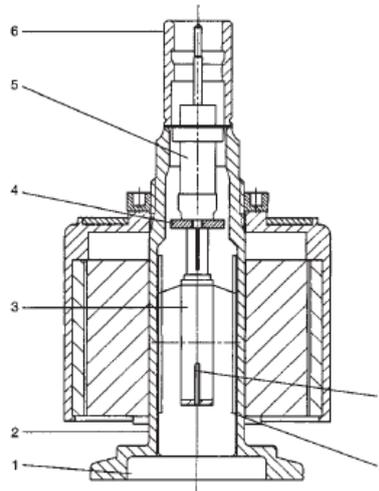
Zur Messung des Drucks mittels Ionisationsvakuummeter wird ausgenutzt, dass die Teilchenanzahldichte eines Gases proportional zum Druck ist und die Anzahl der vorliegenden Gasteilchen über die Stärke eines Ionenstroms gemessen werden kann: In Ionisationsvakuummetern mit kalter Kathode – sogenannte Penning-Vakuummeter – werden durch kalte Entladung zwischen zwei Elektroden unter hoher Feldstärke (Größenordnung 2 kV) positive Gasionen gebildet, die ihre Ladung an eine Messelektrode (sogenannter Ionenfänger) abgeben, wobei der zur Neutralisierung der Ionen notwendige Elektronenstrom gemessen wird. Die Ionisation der Gasatome erfolgt hierbei durch Elektronen, die im elektrischen Feld soweit beschleunigt werden, dass es bei Zusammenstößen mit den Gasatomen zur Ionenbildung kommt.

Wichtig für den Messbereich des Penning-Vakuummeters ist, dass die kalte Entladung über einen weiten Druckbereich aufrecht erhalten werden kann, sodass auch noch bei sehr geringen Drücken eine kontinuierliche Entladung stattfindet. Durch Verwendung von inhomogenen Magnetfelder wird deshalb der Weg der Elektronen so weit verlängert, dass die Stoßrate der Elektronen mit den Gasatomen auch bei zunehmender mittlerer freier Weglänge der Gasatome immer noch groß genug ist, sodass ein messbarer Ionenstrom aufrecht erhalten wird. Aus diesem Grund ist der Messbereich von Ionisationsvakuummetern nach unten hin auf einen Druck $p \approx 10^{-12} \text{ mbar}$ begrenzt.

Nach oben hin ist der Messbereich dadurch begrenzt, dass es bei Drücken $p > 10^{-2}$ zu Glimmentladungen zwischen den beiden Elektroden kommt, wobei die daraus resultierende Stromstärke nur in geringem Maße vom Druck abhängt und somit nicht messtechnisch genutzt werden kann.

Zu beachten ist bei Penning-Vakuummeter noch, dass auf Grund der Gasionisierung die Gasauflagerung zum Teil erheblich sein kann. Man kann also davon sprechen, dass ein Penning-Vakuummeter auch in geringem Ausmaß Gase bzw. besser Gasionen pumpt. Weiterhin kann es durch die Gasionen auch zu einer Zerstäubung des Kathodenmaterials kommen, weswegen sich mit fortschreitender Betriebszeit eine getternde Oberfläche auf den Wänden des Penning-Vakuummeters

bilden kann, wodurch es lokal zu Feldstärken-Erhöhungen und Feldstärken-Erniedrigungen kommen kann, die die Ungenauigkeit der Druckmessung bis auf $\pm 50\%$ erhöhen können. In der Abbildung 3 ist schematisch ein Penning-Vakuummeter vom Typ PENNINGVAC PR 35 dargestellt.



- | | |
|--------------------------------------|----------------------|
| 1 Kleinflansch DN 25 KF;
DN 40 KF | 5 Stromdurchführung, |
| 2 Gehäuse | 6 Anschlußbuchse |
| 3 Anodenring mit Zündstift, | 7 Anodenstift, |
| 4 Keramikscheibe | 8 Kathodenblech |

Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Penning-Vakuummeters vom Typ PENNINGVAC PR 35: Entnommen aus [Umrath]

0.5 Mittlere freie Weglänge

Die durchschnittliche Wegstrecke, die ein Gasteilchen ohne Wechselwirkung mit anderen Teilchen zurücklegt, nennt man mittlere freie Weglänge λ , wobei jede Art von Energie- bzw. Impulsänderung des Teilchens als Wechselwirkung aufgefasst wird.

Die mittlere freie Weglänge kann in sehr guter Näherung durch die Teilchendichte n und den Teilchendurchmesser d beschrieben werden:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot d^2}$$

Hieraus folgt, dass die mittlere freie Weglänge umgekehrt proportional zu der Teilchendichte und wegen $pV = nRT$ auch umgekehrt proportional zum Druck ist.

0.6 Stoßzahl

Die sogenannte Stoßzahl z entspricht der durchschnittlichen Anzahl der Zusammenstöße eines Teilchens mit anderen Teilchen pro Zeiteinheit.

Die Stoßzahl z ist durch die mittlere Teilchengeschwindigkeit \bar{c} und die mittlere freie Weglänge λ definiert:

$$z = \frac{\bar{c}}{\lambda}$$

Versuche

1 Versuch 1: Überblick über die Apparatur verschaffen

In diesem Versuch soll man sich einen Überblick über die Apparatur verschaffen, indem man die einzelnen Bauteile identifiziert und die verschiedenen Verbindungsleitungen verfolgt.

Eine Skizze zum Versuchsaufbau ist in Abbildung 4 wiedergegeben.

Zusätzlich soll kontrolliert werden, ob die Apparatur bereits unter Vorvakuum steht, das Aufdampfschiffchen ausreichend mit Indium bestückt ist und sowohl die Plexiglasscheibe als auch die Glasglocke gereinigt wurde, sodass sie keine alten Aufdampfbeläge mehr aufweisen.

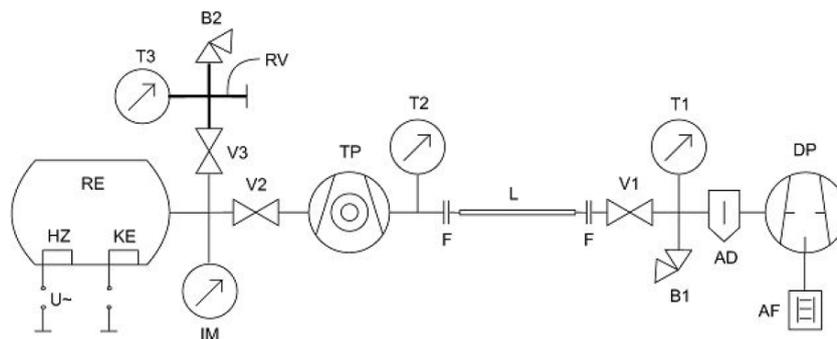


Abbildung 4: Skizze zum Versuchsaufbau: Entnommen aus [Aufgabenstellung]

Folgende Bauteile sind in der Versuchsskizze (Abb. 4) dargestellt:

AD	Adsorptionsfalle
AF	Auspuff-Filter
B1, B2	Belüftungsventil
DP	Drehschieberpumpe (TRIVAC)
HZ	Wechselstrombeheiztes Verdampferschiffchen
IM	Ionisationsvakuummeter
KE	Mit Hochspannung versorgte Kugelelektroden
L	Austauschbare Verbindungsleitung
RE	Rezipient
RV	Referenzvolumen
T1, T2, T3	Wärmeleitungs-Vakuummeter (Thermovac-Meßsonde)
TP	Turbomolekularpumpe (TURBOVAC)
V1, V2, V3	Handbetätigtes Vakuumventil

2 Versuch 2: Bestimmung des Leitwerts eines Metallrohres

2.1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch soll der Leitwert eines Metallrohres bestimmt werden

2.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der Metall-Wellschlauch mit Querschnitt $d_W = 17 \text{ mm}$ und Länge $l_W = 447 \text{ mm}$, der bislang als Verbindungsleitung L diente, wird gegen ein dünnes Metallrohr mit Durchmesser $d_R = 2 \text{ mm}$ und Länge $l_R = 443 \text{ mm}$ ausgetauscht.

Anschließend wird die Drehschieberpumpe (DP) eingeschaltet und der zeitliche Verlauf des Druckes an den beiden Messstellen T1 und T2 gleichzeitig aufgenommen.

Nach dieser Messreihe wird die Drehschieberpumpe abgeschaltet, der Rezipient belüftet und das Metallrohr wieder durch den Metall-Wellschlauch ersetzt.

2.3 Theoretischer Hintergrund: Bestimmung des Leitwertes

Das in der Produktbeschreibung einer Vakuumpumpe angegebene theoretische Saugvermögen S unterscheidet sich vom effektiven Saugvermögen S_{eff} , da sich in der Regel zwischen Pumpe und Behälter ein Rohrleitungssystem befindet, welches einen Strömungswiderstand darstellt.

Der Strömungswiderstand des Rohrleitungssystems bewirkt, dass das in der Praxis erreichte, effektive Saugvermögen S_{eff} stets kleiner als das Saugvermögen der Pumpe S ist.

Es ist nachvollziehbar, dass eine Vergrößerung des Rohrleitungssystems zu einer Abnahme des effektiven Saugvermögens S_{eff} führt, wobei sich das effektive Saugvermögen S_{eff} aus dem theoretischen Saugvermögen S und dem gesamten Strömungsleitwert des Rohrsystems L über folgende Formel berechnen lässt:

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{L}$$
$$\Leftrightarrow L = \frac{S_{eff} \cdot S}{S - S_{eff}} \quad (1)$$

Diese Gleichung beinhaltet auch den zu erwartenden Grenzfall, dass für einen Leitwert $L = \infty$, d.h. keinem Strömungswiderstand, das effektive Saugvermögen S_{eff} gleich dem theoretischen Saugvermögen S ist.

Das Saugvermögen S ist definiert durch die zeitliche Änderung des Volumens V :

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

Durch die Verwendung einer Glasglocke ist im gesamten Versuch das Volumen V konstant und es kann für das Volumen V die ideale Gasgleichung $pV = nRT$ eingesetzt werden:

$$S = \frac{d}{dt} \frac{n \cdot R \cdot T}{p}$$

Da sich im Versuch einzig und allein der Druck p mit der Zeit t ändert, folgt:

$$\begin{aligned} S &= - \frac{n \cdot R \cdot T}{p^2} \cdot \dot{p} \\ &= - \underbrace{\frac{n \cdot R \cdot T}{p}}_V \cdot \frac{\dot{p}}{p} \\ &= - \frac{V}{p} \cdot \frac{dp}{dt} \end{aligned}$$

Diese Differentialgleichung kann durch Separation der Variablen gelöst werden:

$$\begin{aligned} \int \frac{S}{V} dt &= - \int \frac{dp}{p} \\ \Rightarrow \frac{S}{V} \cdot (t - t_0) &= - (\ln p - \ln p_0) \\ \Rightarrow \ln p &= - \underbrace{\frac{S}{V}}_{\text{Steigung } m} \cdot t + \underbrace{\frac{S}{V} \cdot t_0 + \ln p_0}_{y\text{-Achsenabschnitt } y_0} \end{aligned} \quad (2)$$

Unter Verwendung einer linearen Regression kann also aus dem an einer Messstelle gemessenen Druck p und der verstrichenen Messzeit t bei bekanntem Anfangsdruck p_0 das Saugvermögen S wie folgt

$$S = - m \cdot V \quad (3)$$

bestimmt werden.

Letztendlich ergibt sich dann der Leitwert für das eingesetzte dünne Metallrohr aus dem Saugvermögen S_1 an der ersten Druckmessstelle und dem Saugvermögen S_2 an der zweiten Druckmessstelle über die oben bereits angegebene Formel (Gl. 1):

$$L = \frac{S_1 \cdot S_2}{S_1 - S_2}$$

Alternativ kann der Leitwert des Rohres auch mit Hilfe der Knudsen-Gleichung (siehe [Umrath]) berechnet werden, wenn die Temperatur der Luft ungefähr 20 °C beträgt:

$$L = 135 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \frac{p_1 + p_2}{2} + 12.1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \frac{1 + 192 \cdot d \cdot \frac{p_1 + p_2}{2}}{1 + 237 \cdot d \cdot \frac{p_1 + p_2}{2}} \left[\frac{l}{s} \right]$$

3 Versuch 3: Bestimmung des druckabhängigen Saugvermögens der Drehschieberpumpe

3.1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch soll das druckabhängige Saugvermögen $S(p)$ der Drehschieberpumpe bestimmt werden, ein $S(p)$ -Diagramm gezeichnet werden und aus dem linearen Bereich des Kurvenverlaufs das mittlere Saugvermögen \bar{S} bestimmt werden.

3.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der zuvor belüftete Rezipient (RE) wird mit Hilfe der Drehschieberpumpe evakuiert. Während dieses Vorgangs wird alle 15 Sekunden der zeitliche Verlauf des Drucks mit Hilfe des Wärmeleitungsvakuummeters T1 gemessen.

Nach Durchführung der Messung wird die Drehschieberpumpe abgeschaltet.

3.3 Hinweis zur Versuchsauswertung

Das druckabhängige Saugvermögen $S(p)$ bzw. das mittlere Saugvermögen \bar{S} der Drehschieberpumpe lässt sich an Hand der Gleichungen 2 und 3 über eine lineare Regression bestimmen.

4 Versuch 4: Bestimmung des Saugvermögens der Turbomolekularpumpe

4.1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch soll das Saugvermögen S der Turbomolekularpumpe bestimmt werden.

4.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Apparatur wird bis auf einen Druck $p \approx 2 \cdot 10^{-1} \text{ mbar}$ belüftet. Anschließend wird die Apparatur unter Verwendung der Drehschieberpumpe wieder evakuiert. Ab einem Druck $p \approx 8 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$ wird die Turbomolekularpumpe zugeschaltet.

Nun wird in einem zeitlichen Abstand von 10 Sekunden der Druck am Ionisationsmanometer (IM) abgelesen und protokolliert.

4.3 Hinweis zur Versuchsauswertung

Das Saugvermögen S der Turbomolekularpumpe lässt sich an Hand der Gleichungen 2 und 3 über eine lineare Regression bestimmen.

Weiterhin ist bei der Versuchsauswertung zu beachten, dass die Turbomolekularpumpe erst nach ca. 60 Sekunden ihre volle Saugleistung S erreicht.

4.4 Theoretischer Hintergrund: Abschätzung der Kraft auf die Glasglocke

Die Kraft F , die auf die Glasglocke wirkt, wenn das Endvakuum mit einem Druck von ca. $p_{End} \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$ erreicht wurde, ist durch den Druckunterschied Δp und die Aussenfläche A der Glasglocke gegeben.

Die Aussenfläche A der Glasglocke, wobei die Glasglocke als Kugelkappe mit Höhe $h = 250 \text{ mm}$ und Öffnungsdurchmesser $d = 220 \text{ mm}$ angesehen werden kann, beträgt:

$$\begin{aligned} A &= \frac{\pi}{4} \cdot (d^2 + 4 \cdot h^2) \\ &= 0.23 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Der Druckunterschied Δp ergibt sich aus dem äußeren Luftdruck $p_0 \approx 1 \text{ bar}$ und dem Enddruck p_{End} zu:

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_0 - p_{End} \\ &\approx 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Die auf die Glasglocke wirkende Kraft F beträgt dann:

$$\begin{aligned} F &= \Delta p \cdot A \\ &= 23 \text{ kN} \end{aligned}$$

Die Glasglocke muss also sehr große Druckkräfte aushalten können. Hierzu ist auch die Verwendung besonderer Glassorten erforderlich, da handelsübliches Glas nur eine geringe Druckbeständigkeit senkrecht zu seiner Oberfläche aufweist.

5 Versuch 5: Durchführung eines einstufigen, statischen Kalibrierverfahrens

5.1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch soll ein einstufiges, statisches Kalibrierverfahren durchgeführt werden. Abweichend von [Aufgabenstellung] soll laut des Betreuers nicht das Expansionsverhältnis, sondern das Referenzvolumen V_{ref} bestimmt werden.

5.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Zunächst wird das Ventil V3 geschlossen und der Rezipient (RE) unter Verwendung der Drehschieberpumpe und der Turbomolekularpumpe evakuiert. Bei einem Druck $p < 10^{-4} \text{ mbar}$ wird dann das Ventil V2 geschlossen, sodass der Rezipient (RE) vom Rest der Apparatur getrennt ist. Es ist nun möglich, die beiden Vakuumpumpen auszuschalten.

Nachfolgend wird nun folgender Vorgang mehrmals hintereinander ausgeführt, bis ein Druck $p \approx 80 \text{ mbar}$ im Rezipienten (RE) vorliegt:

Das Ventil V3 wird geöffnet, sodass ein Druckausgleich zwischen Rezipient (RE) und Referenzvolumen (RV) stattfindet. Anschließend wird der Gesamtdruck p des Systems an der Messstelle T3 abgelesen und protokolliert. Darauffolgend wird das Ventil V3 wieder geschlossen und das Belüftungsventil B2 geöffnet, damit sich erneut Atmosphärendruck im Referenzvolumen (RV) einstellt. Zuletzt wird das Belüftungsventil B2 geschlossen und durch Öffnen des Ventils V2 eine erneute Expansion durchgeführt.

Weiterhin ist für die Auswertung zusätzlich noch einmalig der Atmosphärendruck p_0 zu protokollieren.

5.3 Theoretischer Hintergrund: Boyle-Mariottesches Gesetz

Das Gesetz von Boyle-Mariotte besagt, dass der Druck p idealer Gase bei gleichbleibender Temperatur und gleichbleibender Stoffmenge umgekehrt proportional zum Volumen V ist:

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

Erhöht man als beispielsweise den Druck auf ein Gaspaket von p_1 auf p_2 , so verringert sich das Volumen des Gaspakets von V_1 auf V_2 . Umgekehrt kommt es bei einer Verringerung des Drucks von p_1 auf p_2 zu einer Vergrößerung des Volumens von V_1 zu V_2 .

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

5.4 Theoretischer Hintergrund: Bestimmung des Referenzvolumens

Zur Bestimmung des Referenzvolumens V_{ref} werden die innerhalb der Apparatur ausgetauschten Stoffmengen n betrachtet.

Die Stoffmenge des i -ten Iterationsschritt $n(i)$ ergibt sich für den Druck p im jeweiligen Volumen V wie folgt aus dem idealen Gasgesetz:

$$n(i) = \frac{p(i) \cdot V}{R \cdot T}$$

Zu beachten ist noch, dass nach dem Öffnen des Ventils B2 die Stoffmenge im Referenzvolumen n_{ref} immer dieselbe ist, da sich ja immer der Atmosphärendruck p_0 einstellt.

Betrachtet man den ersten Iterationsschritt ($i = 1$), so kann man nach Öffnen des Ventils V3 den Druck $p(0)$ messen und erhält daraus die Stoffmenge im gesamten Volumen (Volumen des Rezipienten V_{RP} + Volumen des Referenzvolumen V_{ref}) n_{ges} über folgenden Zusammenhang:

$$\begin{aligned} n_{ges} &= n(0) + n_{ref} \\ &= \frac{p(0) \cdot V_{RP}}{R \cdot T} + \frac{p_0 \cdot V_{ref}}{R \cdot T} \end{aligned}$$

Durch den nachfolgenden Verschluss des Ventils V3 wird die Stoffmenge n_{ges} aufgeteilt, wobei die Stoffmenge im Referenzvolumen n_{ref} vernachlässigt werden kann, weil das Referenzvolumen V_{ref} viel kleiner als das Volumen des Rezipienten V_{RP} ist. Es ergibt sich daher folgende Näherung für die Stoffmenge im Rezipienten n_{RP} :

$$\begin{aligned} n_{RP} &= \frac{V_{RP}}{V_{RP} + V_{ref}} \cdot n_{ges} \\ &\approx n_{ges} \end{aligned}$$

Es wird also für die nachfolgenden Betrachtungen angenommen, dass die gesamte Stoffmenge n_{ges} im Rezipienten verbleibt.

Im Rahmen der weiteren Iterationsschritte wird also die Stoffmenge im Rezipienten n_{RP} und damit auch die Stoffmenge im gesamten Volumen n_{ges} gerade jeweils um die konstante Stoffmenge des Referenzvolumens n_{ref} erhöht:

$$n_{ges}(i) = n(0) + i \cdot \frac{p_0}{R \cdot T} \cdot V_{ref} \quad (4)$$

Die Gleichung 4 kann dann verwendet werden, um unter Zuhilfenahme einer linearen Regression aus der Zahl der Iterationsschritte i und der durch die Druckmessungen bestimmten Stoffmenge im gesamten Volumen n_{ges} das Referenzvolumen V_{ref} zu berechnen.

6 Versuch 6: Bestimmung der elektrischen Durchschlagfestigkeit im Vakuum

6.1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch soll die Überschlagsspannung zwischen zwei Metallkugeln in Abhängigkeit vom Druck bestimmt werden.

6.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der Rezipient ist zunächst vollständig belüftet, sodass Atmosphärendruck ($p \approx 1000 \text{ mbar}$) im Rezipienten herrscht. Die Spannung U zwischen den beiden Metallkugeln wird nun solange erhöht, bis es zu einer Entladung kommt. Die hierzu notwendige Spannung U und der augenblickliche Druck p werden nun protokolliert.

Anschließend wird der Rezipient unter Zuhilfenahme der Drehschieberpumpe bis zu einem Druck $p \approx 500 \text{ mbar}$ evakuiert und erneut die Überschlagsspannung U für den Druck p bestimmt. Hierzu wird sobald der gewünschte Druck p während des Evakuierens erreicht wurde, das Ventil V2 geschlossen, um den Druck p konstant zu halten.

Nachfolgend wird der oben beschriebene Vorgang solange unter Halbieren des jeweiligen Drucks p wiederholt, bis ein Druck $p \approx 0.05 \text{ mbar}$ erreicht wurde.

Nun wird unter Zuhilfenahme der Turbomolekularpumpe der Druck im Rezipienten auf $p \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$ reduziert. Anschließend wird die Turbomolekularpumpe ausgeschaltet und das Ventil V2 geschlossen.

Durch nicht zu vermeidene Lecks im Rohrleitungssystem kommt es zu einem Anstieg des Drucks im Rezipienten. Während dieses Anstieges soll so häufig wie möglich, die Überschlagsspannung U und der zugehörige Druck p bestimmt werden, wobei die eingestellte Überschlagsspannung $U = 9 \text{ kV}$ nicht überschreiten darf.

6.3 Erwartungen an den Versuch

Erwartet wird, dass es bei hohen Drücken ($p \geq 0.1 \text{ bar}$) zu Funkenentladungen kommt, die sich unter Umständen auch in Form von Lichtbögen zeigen werden, und dass bei hohen Drücken relativ hohe Überschlagsspannungen U notwendig sind, da die Elektronen auf dem Weg zwischen den Elektroden häufig mit Luftmolekülen stoßen können.

Bei niedrigen Drücken ($p \leq 10 \text{ mbar}$) sind dann jedoch Glimmentladungen zu erwarten, da sich dann deutlich weniger Luftmoleküle im Rezipienten befinden und es somit zu deutlich weniger Stößen zwischen Elektronen und Luftmolekülen kommt.

Weiterhin wird erwartet, dass die notwendige Überschlagsspannung U solange abnimmt, bis die mittlere freie Weglänge der Luftmoleküle im Rezipienten gerade dem Abstand zwischen den beiden Elektroden entspricht. Wird die mittlere freie Weglänge noch größer, sollte die notwendige Überschlagsspannung U wieder ansteigen, da dann immer weniger Luftmoleküle im Bereich der Elektronenbeschleunigungsstrecke zur Verfügung stehen, die angeregt werden können.

6.4 Folgen für die Industrie

Bei industriellen Anwendungen der Vakuumtechnik ist darauf zu achten, dass die Vakuumgefäße und andere elektrische Bauteile zum einen ausreichend geerdet sind und zum anderen durch die Wahl bestimmter Elektrodenformen in Bauteilen (z.B. Kugelelektroden anstatt Spitzenelektroden) hohe elektrische Feldstärken vermieden werden. Denn auf Grund der Druckabnahme nimmt auch die Überschlagsspannung U ab und somit steigt die Wahrscheinlichkeit für Funkenschlag und Gasentladungen deutlich an.

Auch bei der Auslegung von Flugzeugen, die sich in großen Höhen und bei geringen Luftdrücken bewegen, ist darauf zu achten, dass es zu keinen elektrostatischen Entladungen kommt.

7 Versuch 7: Aufdampfen einer Indium-Schicht auf eine Plexiglasscheibe

7.1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch soll bei drei verschiedenen Drücken jeweils eine Indium-Schicht unter Zuhilfenahme einer Kreisblende auf eine schwenkbare Plexiglasscheibe aufgedampft werden.

7.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Bei den Drücken $p \leq 10^{-5} \text{ mbar}$, $p \approx 10^{-3} \text{ mbar}$, $p \approx 10^{-2} \text{ mbar}$ wird mit Hilfe eines beheizbaren, mit Indium gefüllten Verdampferschiffchens und unter Verwendung einer Kreisblende jeweils eine Schicht Indium auf eine schwenkbare Plexiglasscheibe aufgedampft. Der hierfür notwendige Heizstrom I_H wird jeweils mitprotokolliert und anschließend die Form und Randschärfe der aufgedampften Flecken untersucht.

Zu beachten ist, dass der Heizstrom erst nach Erreichen des Solldrucks p eingeschaltet werden darf und dass das Verdampferschiffchen aus Tantal zwar glühen, aber nicht schmelzen darf.

7.3 Erwartungen an den Versuch

Folgende zwei Erwartungen an das Versuchsergebnis werden gestellt:

1. Der für das Aufdampfen der Indium-Schicht notwendige Heizstrom I_H sollte für kleinere Drücke p abnehmen, da mit der Abnahme des Drucks im Rezipienten auch der Dampfdruck über dem Verdampferschiffchen abnimmt und somit bereits bei einer geringen Temperatur das Indium verdampft.
2. Die Randschärfe der aufgedampften Flecken sollte bei einer Verringerung des Drucks p im Rezipienten zunehmen, da dann die mittlere freie Weglänge der verdampften Indium-Atome zunimmt und es zu weniger Streuungen von Indium-Atomen an im Rezipienten verbliebenen Luftmolekülen kommt.

8 Versuch 8: Vorbereitung der Apparatur für die Nachfolger

Im Rahmen dieses Versuches soll die Apparatur für die nachfolgende Praktikumsgruppe vorbereitet werden.

Hierzu ist die Apparatur zunächst zu belüften und anschließend sowohl die Plexiglasscheibe als auch die Glasglocke von Aufdampfbelägen zu reinigen, wobei die Schutzkappe auf die Turbomolekularpumpe gesetzt werden muss, solange die Glasglocke abgenommen ist. Weiterhin muss in Rücksprache mit dem Betreuer gegebenenfalls Indium im Verdampferschiffchen nachgefüllt werden. Zuletzt wird die Glasglocke wieder auf den Dichtungsring gesetzt und die Apparatur mit der Drehschieberpumpe evakuiert.

Literatur

[Aufgabenstellung] Aufgabenstellung zu den Versuchen P2-41,42

[Vorbereitungshilfe] Vorbereitungshilfe zu den Versuchen P2-41,42

[Umrath] W. Umrath: Grundlagen der Vakuumtechnik