

**Physikalisches Anfängerpraktikum - P2**

**Vakuum**

**P2-44**

Auswertung von  
**Tobias Renz** und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 19. April 2012



## Versuch P2-41,42,44

## Vakuum

## Raum F1-19

Dieser Versuch bietet einen Einblick in die für den Experimentalphysiker oft so wichtige Vakuumtechnik. Sie spielt eine wesentliche Rolle zum Beispiel in der Nanophysik, aber auch bei Großexperimenten wie KATRIN im Campus Nord oder dem LHC am CERN. Ein anderes Anwendungsbeispiel wäre die Dünnschichttechnik, mit welcher z.B. luftdichte Oberflächen in Chipstüten aufgedampft werden.

Sie lernen Prinzipien der Vakuumerzeugung und der Vakuummessung (Messung kleiner Drücke) kennen, gewinnen Erfahrung mit der Handhabung einer Vakuumapparatur und - meist unvermeidlich - auch mit den praktischen Schwierigkeiten. Bei der Beschäftigung mit Wärmeleitungsmanometer, Gasentladung, Aufdampfversuch und Leitwertbestimmung haben Sie gute Gelegenheit, die Bedeutung der '**mittleren freien Weglänge**' kennen zu lernen. Die Funktionsprinzipien von Drehschieberpumpe, Turbomolekularpumpe, Wärmeleitungsmanometer und Ionisationsmanometer sollten Ihnen schon zu Beginn des Versuchs klar sein.

### Hinweise:

**Obwohl in diesem Versuch eine splittergeschützte Glasglocke verwendet wird, kann die evakuierte Glasglocke implodieren. Zum Schutz der Augen muss deshalb beim Arbeiten an der evakuierten Apparatur eine Schutzbrille getragen werden!**

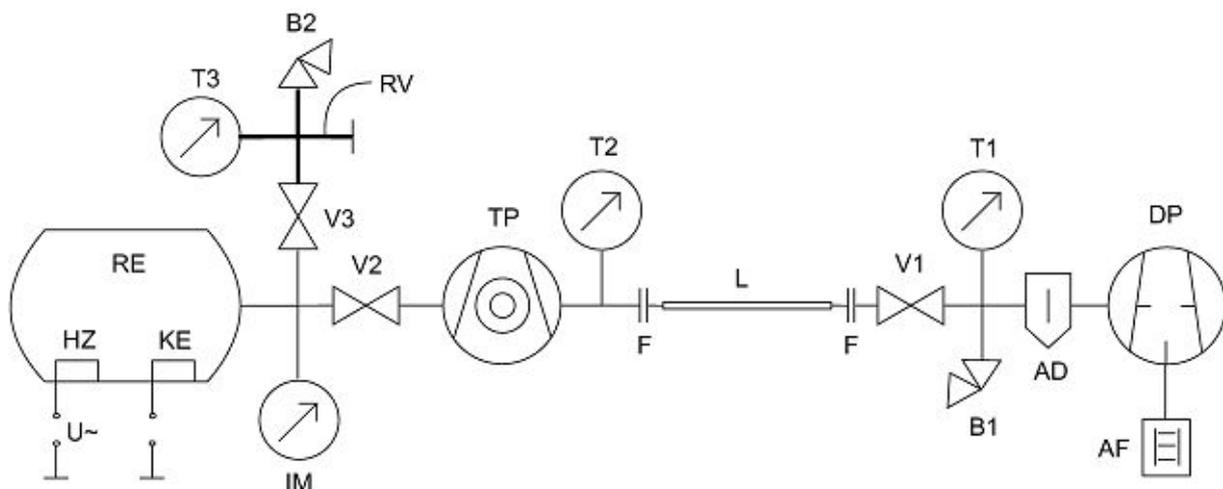
**Die hier aufgebaute Apparatur ist sehr empfindlich. Bei fehlerhafter Handhabung können teure Schäden entstehen, weshalb die einzelnen Versuchsteile nur nach Rücksprache mit dem Betreuer gestartet werden dürfen!**

Beim Arbeiten am Rezipienteninneren (Verdampferschiffchen laden, Glas putzen etc.) soll die Pumpenöffnung mit der bereitliegenden Plastikkappe abgedeckt werden. Vor dem Verbinden von Bauteilen mit Hilfe von Dichtungsringen müssen die Ringe und die Dichtflächen sorgfältig gereinigt werden.

Die Turbomolekularpumpe darf nur bei einem Vorvakuumdruck von besser als  $10^{-1}$  mbar eingeschaltet werden.

Die Apparatur darf erst dann belüftet werden, wenn nach Abschalten der Turbomolekularpumpe deren **Rotor völlig zum Stillstand gekommen ist!** Das dauert einige Minuten! Ein Lufteinbruch bei rotierender Pumpe zerstört diese. Extreme Vorsicht!

### Skizze der Apparatur:



DP Drehschieberpumpe; AF Auspuff-Filter; (AD Adsorptionsfalle); T1, T2, T3 Wärmeleitvakuummeter (Thermovac-Meßsonde); B1, B2 Belüftungsventil; V1, V2, V3 Vakuumventil; L austauschbare Verbindungsleitung; TP Turbomolekularpumpe (TURBOVAC); IM Ionisationsvakuummeter (Penning-Transmitter); RE Rezipient; RV Referenzvolumen; HZ wechselstrombeheiztes Verdampferschiffchen; KE mit Hochspannung versorgte Kugelelektroden.

## **Aufgaben:**

In der Regel finden Sie die Apparatur unter Vorvakuum vor, das Aufdampfschiffchen mit Indium bestückt und die Glasglocke gereinigt von alten Aufdampfbelägen. Dann sollten Sie sich zunächst einen **Überblick über die Apparaturen verschaffen**, indem Sie die Leitungen verfolgen und die verwendeten Bauteile lokalisieren. Beachten Sie die Hinweise auf diesem Aufgabenblatt und schalten Sie die Apparatur nicht ohne den Betreuer ein! Die drei Versuchsaufbauten sind fast gleich; Apparatur 44 ist als einzige mit der Gasentladungsröhre für den Demoversuch ausgestattet, dafür fehlt hier die Möglichkeit der Messung der Überschlagsfestigkeit (Aufg. 6).

### **1. Demoversuch (für alle an Apparatur 44 vorhanden)**

**Beobachten, skizzieren und beschreiben Sie die Gasentladung in Abhängigkeit vom Druck.** Evakuieren Sie den Rezipienten und die Gasentladungsröhre gemeinsam (Ventile V1 und V2 offen) **mit Hilfe der Drehschieberpumpe**, die Turbomolekularpumpe bleibt ausgeschaltet. Dabei ist das Hochspannungsgerät (U=) eingeschaltet. Erniedrigen Sie den Druck bis die Gasentladung erlischt. Schließen Sie nach dieser Aufgabe das Ventil V2 zur Gasentladungsröhre für alle folgenden Aufgaben. (Warum wohl?)

**2. Bestimmen Sie den Leitwert eines Metallrohres.** Wechseln Sie die Verbindungsleitung L (bisher Metall-Wellschlauch mit großem Querschnitt) gegen das etwa gleichlange Rohr mit ~2mm Innendurchmesser aus. Nehmen Sie "gleichzeitig" den zeitlichen Verlauf des Druckes an beiden Messstellen T1 und T2 auf. Diskutieren Sie Ihr Ergebnis.

Schalten Sie nach der Messreihe die Drehschieberpumpe wieder ab, belüften Sie den Rezipienten und tauschen Sie das 2mm-Rohr wieder gegen den Metall-Wellschlauch aus.

**3. Bestimmen Sie das Druckabhängige Saugvermögen S(p) der Drehschieberpumpe.** Evakuieren Sie dazu wieder die Apparatur mit Hilfe der Drehschieberpumpe. Nehmen Sie hierbei den zeitlichen Verlauf des Druckes p am Saugstutzen der Drehschieberpumpe auf (Messintervall zunächst so kurz wie möglich und später 15s). Verwenden Sie hierzu die Thermovac-Messsonde T1 und die Stoppuhr. Zeichnen Sie ein Diagramm S(p). Bestimmen Sie aus dem linearen Bereich des Kurvenverlaufs das mittlere Saugvermögen  $\bar{S}$ . Schalten Sie nach der Messung die Drehschieberpumpe ab.

**4. Bestimmen Sie mit Hilfe der Ionivac-Messröhre das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe.** Da die Turbomolekularpumpe bis zur vollen Saugleistung eine Anlaufzeit von ca. 60s benötigt, sollte sie nicht erst bei sehr niedrigen Drücken eingeschaltet werden. Die Apparatur muss also vor diesem Versuchsteil bis zu einem Druck von ca.  $2 \cdot 10^{-1}$  mbar teilbelüftet werden. Evakuieren Sie die Apparatur anschließend erneut mit der Drehschieberpumpe. Schalten Sie dann bei einem Druck von ca.  $8 \cdot 10^{-2}$  mbar die Turbomolekularpumpe ein und lesen Sie den Druck der Ionivac-Messröhre ab. Bestimmen Sie das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe analog zu Aufgabe 4 (Messintervall 10s). Beachten Sie die Hinweise des Betreuers bzgl. der Turbomolekularpumpe und diskutieren Sie den physikalischen Hintergrund. Schätzen Sie ab, mit welcher Kraft die Glasglocke auf die Gummidichtung gedrückt wird. Überlegen Sie sich was an dieser Glasglocke besonders sein muss.

**5. Führen Sie ein einstufiges, statisches Kalibrierungsverfahren durch.** Bei einer statischen Expansion wird das Boyle-Mariottesche Gesetz eingesetzt. Mit Hilfe dieses Verfahrens könnten z.B. Druckmessgeräte kalibriert werden.

Zunächst soll das Ventil V3 geschlossen werden und der Rezipient mit Hilfe der Drehschieberpumpe und anschließend mit der Turbomolekularpumpe evakuiert werden. Bei einem Druck von  $p < 10^{-4}$  mbar wird dann das Ventil V2 geschlossen und somit der Rezipient vom Rest der Apparatur getrennt. Die beiden Pumpen können ausgeschaltet werden. Öffnen Sie nun das Ventil V3 und lesen an der Messstelle T3 den sich einstellenden Gesamtdruck ab. Schließen sie anschließend wieder V3 und öffnen B2 damit sich in dem kleineren Referenzvolumen erneut Atmosphärendruck einstellt. Schließen Sie B2 und öffnen dann wieder V3 um eine erneute Expansion durchzuführen. Wiederholen Sie diesen Vorgang solange bis sich im Rezipienten ein Gesamtdruck von ca. 80mbar einstellt.

Skizzieren Sie den Druckverlauf und den Iterationszuwachs und bestimmen Sie das Expansionsverhältnis dieses Expansionssystems.

**6. Bestimmen Sie die elektrische Durchschlagfestigkeit im Vakuum.** (Kann nur an den Apparaturen 41 und 42 durchgeführt werden.) Die Turbomolekularpumpe ist ausgeschaltet und die Drehschieberpumpe läuft. Das Vakuum wird zunächst lediglich mit V1 geregelt.

Messen Sie die Überschlagsspannung zwischen zwei Metallkugeln in Abhängigkeit vom Druck. Beginnen Sie bei Atmosphärendruck (1000 mbar), erhöhen Sie die Spannung bis zur Entladung und evakuieren Sie die Apparatur anschließend mit der Drehschieberpumpe bis zu einem Druck von ca. 500 mbar. Schließen Sie V1 um den erreichten Druck zu halten und erhöhen sie wieder die Spannung bis zur Entladung. Evakuieren Sie weiter bis zur Hälfte des vorherigen Drucks und wiederholen Sie diese Vorgehensweise bis Sie einen Druck von ca. 0,05 mbar erreicht haben. In diesem Druckbereich wird es immer schwieriger den Druck konstant zu halten.

Um leichter und schneller an weitere Messwerte zu kommen, evakuieren Sie nun zusätzlich und ohne Unterbrechung mit der Turbomolekularpumpe bis zu einem Druck von ungefähr  $2 \cdot 10^{-4}$  mbar. Schalten Sie die Turbomolekularpumpe aus und schließen Sie V2. Der Druck steigt nun von alleine. Nehmen Sie sobald wie möglich ( $U \leq 9$  kV) weitere Messwerte auf. Die Messreihe endet, wenn ein Druck von 0,05mbar erreicht ist.

Diskutieren Sie warum sich der Druck ab einem bestimmten Druckbereich nicht mehr genau einstellen lässt und warum er bei sehr kleinen Drücken kontinuierlich sinkt.

Beschreiben, skizzieren und diskutieren Sie das Ergebnis der Messung und die Art des Funkenüberschlags in den unterschiedlichen Druckbereichen. Sehen Sie Parallelen zum Demoversuch? Welche Folgen haben diese Ergebnisse für die Industrie?

**7. Dampfen Sie bei drei verschiedenen Drücken jeweils eine Indium-Schicht durch eine Kreisblende auf eine schwenkbare Plexiglasscheibe auf.** Es soll jeweils ein Fleck bei einem Druck von  $p \leq 10^{-5}$  mbar,  $p \approx 10^{-3}$  mbar und  $p \approx 10^{-2}$  mbar aufgedampft werden. Beobachten Sie hierbei auch den benötigten Heizstrom und diskutieren Sie die Randschärfe der aufgedampften Flecken.

**Achtung: Auch hier ist es wichtig zu wissen, was man tut: lokalisieren Sie zunächst das Tantal-Verdampferschiffchen im Rezipienten. Die Heizleitung reicht aus es vollständig zu zerstören!** Der Heizstrom darf erst hochgedreht werden, wenn das Sollvakuum erreicht ist. Beobachten Sie beim Hochdrehen das Verdampferschiffchen. Es soll glühen, aber nicht schmelzen!

**8. Bereiten Sie die Apparatur für die Nachfolger vor.** Belüften Sie die Apparatur, reinigen Sie die Plexiglasscheibe und die Glasglocke von den Aufdampfbelägen, bestücken Sie das Aufdampfschiffchen mit etwas Indium (Menge von Betreuer überprüfen lassen) und setzen Sie die Glocke wieder auf den Dichtungsring. Anschließend evakuieren Sie die Apparatur mit der Drehschieberpumpe.

#### **Umrechnungen:**

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2;$$

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kp/cm} \approx 0,981 \text{ bar};$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr} = 760 \text{ mm Hg} \approx 1013 \text{ mbar}$$

#### **Volumenangaben:**

Referenzvolumen (bei allen Apparaturen gleich): **0,034 liter**

Volumina der drei Rezipienten (bis V2, V3 und IM): (App41- **10.1**; App42- **10.0**; App44- **9.2**) **liter**

die Volumina der Gesamtapparaturen sind jeweils um 0.5 liter größer

(Hinweis: Die Glasglocken dürfen nicht vertauscht werden)

#### **Stichworte:**

Rotierende Pumpen (Drehschieberpumpe), Turbomolekularpumpe, Diffusionspumpe, Kryopumpe, Saugvermögen, Saugleistung, Kontinuumsströmung (laminar, turbulent), Molekularströmung, Strömungswiderstand bzw. Leitwert, mittlere freie Weglänge in Abhängigkeit vom Druck, Leckrate, Lecksuche, Membranmanometer, U-Rohr-Manometer, Wärmeleitungsmanometer, Ionisationsmanometer, Penning-Manometer, Gasgesetze, Partialdruck, Dampfdruck, Boyle-Mariottesches Gesetz.

**Zubehör:**

Zweistufige **Drehschieberpumpe** (DP) TRIVAC D2,5E mit vakuumseitiger Adsorptionsfalle (AD) und ausgangsseitigem Auspuff-Filter (AF), Nennsaugvermögen 2,5 m<sup>3</sup>/h [App44: 1,6 m<sup>3</sup>/h];

Drei **Wärmeleitungsmanometer**-Sonden (T1,T2,T3) THERMOVAC Transmitter TTR91, Messbereich 5·10<sup>-4</sup> mbar bis 1 bar;

**Ionisationsmanometer**-Messsonde (IM) Penning-Transmitter PTR225, Messbereich 1·10<sup>-9</sup> – 1·10<sup>-2</sup>mbar;

**Transmittercontroller** DISPLAY THREE, = Elektronisches Vakuum-Druckmessgerät, Anzeigebereich 1·10<sup>-9</sup> – 2000 mbar, 3-Kanalgerät;

**Turbomolekularpumpe** (TP) TURBOVAC 50, Saugvermögen ≥ 30 l/s, Flanschdurchmesser Vorvakuumseite 16 mm, Hochvakuumseite 65 mm, Drehfrequenz max. 7200 min<sup>-1</sup>, Hochlaufzeit ca. 2 min;

**Steuergerät** TURBOTRONIK NT10 [NT50] für das kontrollierte Hochlaufen der Turbomolekularpumpe mit Start-/Stop-Tasten und Frequenzwandler für den Pumpenantriebsmotor (200 bis 1250 Hz), Anzeigelämpchen für ACCELERation / NORMALzustand / FAIL (fehlerhafter Zustand);

**Rezipient** (RE), Glasglocke auf Metallteller mit Gummidichtung, Nennmaße ~250 mm Höhe, ~220 mm Durchmesser;

**Verdampferschiffchen** (HZ) im Rezipienten, elektrisch direkt heizbar, mit Abschirmung und Lochblende und einer von außen schwenkbaren Plexiglasplatte (vorgesehen zum Aufdampfen von Indiumflecken)

Netzgerät für 6V~ und 50 A für den Strom durch das Verdampferschiffchen;

**Kugelelektroden** (KG) im Rezipienten, elektrisch aufladbar

HV-Netzgerät für 0...10kV mit Digital-Multimeter WAVETEX-Meterman 85XT um die Spannung beim Funkenüberschlag abzulesen (mit zwischengeschaltetem Widerstand R<sub>i</sub>=10MΩ, Anzeige also U/10);

**Stoppuhr, Schutzbrillen,**

**Schutzkappe** zum Abdecken der Turbomolekularpumpe, wenn die Glasglocke abgenommen ist;

**Metallwellschläuche:** Länge x Durchmesser: (App41- **510x28**; App42- **440x21**; App44- **530x23**) mm<sup>2</sup>

**Dünnes Metallrohr:** Durchmesser = 2mm bzw. 8mm

**Literatur:**

Wutz: Handbuch Vakuumtechnik

Edelmann: Vakuumphysik und -Technik

W. Pupp/H.K. Hartmann: Vakuumtechnik

Diels, Jaeckel : Leybold-Vakuumtaschenbuch

Allgemeine Lehrbücher der Physik

**Physikalisches Anfängerpraktikum - P2**

**Vakuum**

**P2-44**

Versuchsvorbereitung von  
**Tobias Renz** und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 19. April 2012

# 1 Grundlagen

## 1.1 Definitionen

### 1.1.1 Druck:

Das Verhältnis zwischen der Kraft  $F$ , die senkrecht auf eine Fläche  $A$  ausgeübt wird und der Fläche selbst wird als Druck  $p$  definiert:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

### 1.1.2 ideales Gasgesetz:

Um den Zustand eines Gases zu beschreiben benötigt man die Zustandsgrößen Druck  $p$ , Volumen  $V$  und Temperatur  $T$ . Das ideale Gasgesetz ist die Zustandsgleichung für ein ideales Gas und lautet:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2)$$

mit Stoffmenge  $n$  in mol und molare Gaskonstante  $R = 8,314 \frac{\text{mol}}{\text{K}}$

Die Stoffmenge  $n$  hängt mit der Teilchenzahl  $N$  und der Avogadro-Konstante  $N_A$  folgendermaßen zusammen:

$$n = \frac{N}{N_A} \quad (3)$$

### 1.1.3 reale Gase:

Für reale Gase wird das ideale Gasgesetz um zwei Korrekturterme erweitert, man erhält die Van-der-Waals-Gleichung:

$$\left(p + \frac{a \cdot n^2}{V^2}\right)(V - n \cdot b) = n \cdot R \cdot T \quad (4)$$

Dabei bezeichnet  $a$  den Kohäsionsdruck und  $b$  das Kovolumen (Eigenvolumen der Gasteilchen). Der Faktor  $\frac{an^2}{V^2}$  beschreibt die gegenseitige Wechselwirkung der Gasteilchen (Binnendruck).

### 1.1.4 mittlere freie Weglänge:

Die mittlere freie Weglänge  $\lambda$  ist der Weg, den ein Gasteilchen im Schnitt zwischen zwei Kollisionen zurücklegt.

$$\lambda = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \sigma \cdot p} \quad (5)$$

wobei  $\sigma = d \pi^2$  der Stoßquerschnitt ist.

Die mittlere freie Weglänge ist also umgekehrt proportional zum Druck. Nimmt der Druck ab steigt  $\lambda$ . Die lässt sich anschaulich so klar machen: Gibt es weniger Teilchen pro Raumgebiet, so ist die Wahrscheinlichkeit für einen Zusammenstoß geringer; die Teilchen können im Mittel mehr Weg zurücklegen, bevor sie sich treffen.

### 1.1.5 Gasentladung:

Fließt ein elektrischer Stoß durch ein Gas, kommt es zur Gasentladung. Damit eine Gasentladung entstehen kann, müssen genügend Elektronen bzw. Ionen im Gas vorhanden sein. Durch die angelegten Elektroden werden die Ladungsträger beschleunigt und stoßen mit anderen Gaspartikeln zusammen. Ist die mittlere freie Weglänge der geladenen Teilchen groß genug, so haben diese genügend Energie um bei einem Stoß ein Gasteilchen zu ionisieren. Es kommt zur Gasentladung.

Man unterscheidet drei Arten der Gasentladung:

- Glimmentladung: Entsteht bei niedrigem Druck, wobei Ionen auf die Kathode auftreffen und Elektronen erzeugen. Die Elektroden werden dann zur Anode hin beschleunigt und können Gasmoleküle ionisieren. Es entsteht ein negatives (positives) Glimmen an der Kathode (Anode).
- Bogenentladung: Die Bogenentladung kommt bei sehr hohen Temperaturen an der Elektrode zustande. Dort werden dann direkt Elektronen emittiert.
- Funkenentladung: Ist eine Bogenentladung mit dem Unterschied, dass die Spannung sofort nach dem Ladungsausgleich zusammenbricht.

### 1.1.6 Saugvermögen $S$ und Saugleistung $\dot{Q}$ :

Das Saugvermögen einer Pumpe ist als das durch die Fläche des Saugstutzen fließende Gasvolumen pro Zeit definiert:

$$S = \frac{dV}{dt} \quad (6)$$

Die Saugleistung hingegen ist definiert als " pV-Stromstärke " am Saugstutzen:

$$\dot{Q} = \frac{d(p \cdot V)}{dt} \quad (7)$$

Da bei den meisten die Saugleistung annähernd unabhängig vom Druck ist lässt sie sich durch  $S$  ausdrücken:

$$\dot{Q} = p \cdot S \quad (8)$$

Betrachtet man nun noch das effektive Saugvermögen  $S_{eff}$  am Rezipienten unter der Annahme, dass die Temperaturänderung des Gases gering ist ergibt sich folgende Gleichung:

$$p_R \cdot S_{eff} = p_P \cdot S \quad (9)$$

wobei  $p_R$  bzw.  $p_P$  der Druck am Rezipienten bzw. der Pumpe ist. Da  $p_R$  immer größer als  $p_P$  ist, ist das Saugvermögen am Rezipienten immer kleiner als das Saugvermögen der Pumpe:

$$S_{eff} = \frac{p_P}{p_R} \cdot S < S \quad (10)$$

## 1.2 Leitwert $L$ :

Ein Gasstrom  $q$  verhält sich analog zum elektrischen Strom. Nun kann man einen Strömungswiderstand  $R$  und einen Strömungsleitwert  $L$  definiert werden.

$$R = \frac{\Delta p}{q} \quad (11)$$

$$L = \frac{1}{R} = \frac{q}{\Delta p} \quad (12)$$

Normalerweise verwendet man als Gasstrom  $q$  die pV-Stromstärke  $\dot{Q}$

## 1.3 Drehschieberpumpe

Bei der Drehschieberpumpe handelt es sich um eine Rotationsverdrängungspumpe. Sie besteht aus einem Hohlzylinder (Stator), indem ein weiterer Zylinder bzw. Rotor mit mindestens zwei Schiebern rotiert. Der Rotor ist exzentrisch gelagert und berührt die Innenwand des Stators zwischen Einlass und Auslassöffnung. Die Drehschieber werden durch Federn und durch die Fliehkraft an die Innenwand des Stators gedrückt und unterteilen somit den Bereich zwischen Rotor und Stator in verschiedene sogenannte Schöpfräume auf. Dreht sich der Rotor gelangt Luft durch den Einlass in einen Schöpfraum, der sich zuerst vergrößert und anschließend wenn sich der Schieber weiter dreht wieder verdichtet und durch den Auslass ausgestoßen. Bei diesen Pumpen ist darauf zu achten, dass die Schieber Luftdicht mit der Innenwand abschließen. Dies wird meist durch Schmiermittel erreicht.

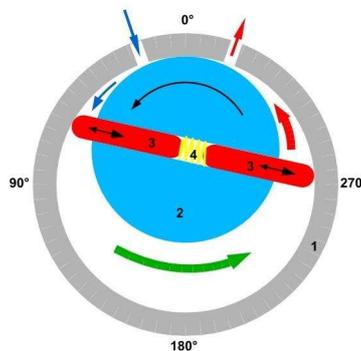


Abbildung 1: Drehschieberpumpe

## 1.4 Turbomolekularpumpe

Die Turbomolekularpumpe besteht aus einer Anordnung von Statoren zwischen denen Rotoren laufen. Als Statoren werden die Leitbleche zwischen den einzelnen Rotorblättern bezeichnet. Diese sind unbeweglich und fest mit dem Pumpengehäuse verbunden. Sie werden benötigt um den Luftstrom geschickt auf die nächste Rotorschicht abzulenken. An den Rotoren sind Schauflräder angebracht, die sich schnell bewegen und so den Gasteilchen einen Impuls in axialer

Richtung übertragen. Durch diesen Impulsübertrag bekommen die Teilchen eine bevorzugte Bewegungsrichtung und werden somit aus dem Gefäß gesaugt. Damit die Pumpe funktioniert müssen sich die Schaufelräder im Bereich der Geschwindigkeit der mittleren thermischen Geschwindigkeit ( $\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$ ) bewegen. Somit ist die Wirkungsweise dieser Pumpe vom Gas abhängig.

Damit man mit dieser Pumpe niedrige Drücke erreichen kann, muss ein Vorvakuum herrschen.

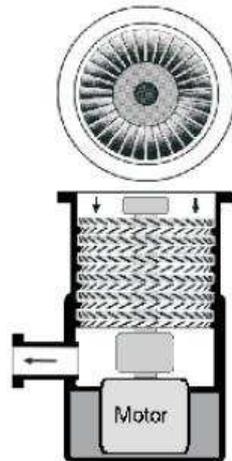


Abbildung 2: Turbomolekularpumpe

## 1.5 Wärmeleitungsmanometer

Ein Wärmeleitungsmanometer wird benutzt um sehr kleine Drücke zu messen. Bei kleinen Drücken reichen die Flüssigkeitsmanometer nicht mehr aus.

Die Tatsache, dass die Wärmeleitfähigkeit druckabhängig ist, wird bei diesem Manometer genutzt. In der Messröhre des Manometers befindet sich ein Messdraht, der Teil einer Wheatstoneschen Brückenschaltung ist. Die angelegte Spannung wird nun so reguliert, dass bei Druckänderungen der Draht immer den gleichen Widerstand und somit auch eine konstante Temperatur hat. Über die jeweils angelegte Spannung kann dann auf den momentanen Druck geschlossen werden.

## 1.6 Ionisationsmanometer

Ein Ionisationsmanometer besteht aus einer Kathode, welche Elektronen emittiert, einer Anode und einem Ionenkollektor. Die emittierten Elektronen werden beschleunigt und stoßen mit den Gasteilchen, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ionisiert werden. Mit dem Ionenkollektor kann nun ein Ionenstrom gemessen werden und daraus der Druck berechnet werden.

## 2 Aufgaben

### 2.1 Demonstrationsversuch

In diesem Demonstrationsversuch wird die Gasentladung bei verschiedenen Drücken untersucht. Dazu wird der Rezipient und die Gasentladungsröhre gemeinsam mit Hilfe der Drehschieberpumpe evakuiert. Nach diesem Versuch wird das Ventil V2 zur Gasentladungsröhre geschlossen, weil für die folgenden Versuche nur der Rezipient benötigt wird.

### 2.2 Leitwert eines Metallrohres

Die Verbindungsleitung L wird durch ein Rohr mit 2mm Innendurchmesser ausgetauscht. Dann wird gleichzeitig der Druck an beiden Messstellen T1 und T2 gemessen.

Nun müssen wir aus dem Messwerten  $p_R$  und  $p_P$  die Saugvermögen S und  $S_{eff}$  berechnen und aus diesen Werten kann dann der Leitwert L berechnet werden.

Mit der Definition der Saugleistung (5) und der Annahme, dass es sich um ein ideales Gas handelt (2) erhält man für die Saugleistung folgenden Ausdruck:

$$S = \frac{dV}{dt} = nRT \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{p} \right) = -nRT \frac{\dot{p}}{p^2} = -V \frac{\dot{p}}{p} \quad (13)$$

Man erhält also eine Differentialgleichung erster Ordnung für p:

$$\dot{p} + \frac{S}{V} \cdot p = 0 \quad (14)$$

Mit folgender Lösung für p:

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{S}{V} \cdot t} \quad \text{mit} \quad p_0 = p(t = 0s) \quad (15)$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = -\frac{S}{V} \cdot t \quad (16)$$

Trägt man nun  $\ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$  über t auf kann den Messwerten von  $p_R$  bzw.  $p_P$  aus  $S_{eff}$  bzw. S bestimmt werden.

Nun muss noch aus  $S_{eff}$  und S der Leitwert berechnet werden.

Aus der Definition des Leitwertes L (11) und der Definition für  $\dot{Q}$  (7) folgt:

$$L = \frac{p_P \cdot S}{p_R - p_P} = \frac{p_R \cdot S_{eff}}{p_R - p_P} \quad (17)$$

Durch Umformen und (9) folgt:

$$L = \left( \frac{1}{S_{eff}} - \frac{1}{S} \right)^{-1} \quad (18)$$

### 2.3 Druckabhängiges Saugvermögen $S(p)$ der Drehschieberpumpe

Die Apparatur wird mit Hilfe der Drehschieberpumpe evakuiert und der zeitliche Verlauf des Druckes p am Saugstutzen gemessen.

Anschließend soll ein  $S(p)$  Diagramm gezeichnet werden. Das Saugvermögen wird analog zu 2.2 durch Auftragung von  $\ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$  über t bestimmt.

## 2.4 Saugvermögen der Turbomolekularpumpe

Mit Hilfe der Ionivac-Messröhre soll das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe bestimmt werden. Dazu wird die Apparatur zuerst mit der Drehschieberpumpe teil evakuiert bevor die Turbomolekularpumpe eingeschaltet wird.

Das Saugvermögen wird analog zu den vorherigen Aufgaben bestimmt.

Nun soll noch abgeschätzt werden, mit welcher Kraft die Glasglocke auf die Gummidichtung gedrückt wird. Dies kann man mit Hilfe der Definition des Druckes (1) abschätzen:

$$F = \Delta p \cdot A \quad (19)$$

## 2.5 Einstufiges, statisches Kalibrierungsverfahren

Das Boyle-Mariotte Gesetz besagt, dass bei konstanter Temperatur  $T$  und Stoffmenge  $n$  der Druck bei idealen Gasen umgekehrt proportional zum Volumen ist:

$$p = \frac{const}{V} \quad bzw. \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (20)$$

Zunächst wird das Ventil V3 geschlossen und der Rezipient evakuiert. Durch schließen von V2 wird der Rezipient vom Rest der Apparatur getrennt.

Nun wird V3 geöffnet und somit die Verbindung zum Referenzvolumen geöffnet. Der Gesamtdruck soll nun gemessen werden. V3 wird wieder geschlossen und durch Öffnen von B2 stellt sich im Referenzvolumen wieder Atmosphärendruck ein. Dieser Vorgang wird nun solange wiederholt bis sich im Rezipienten ein Gesamtdruck von ca. 80mbar einstellt.

Dadurch das das Referenzvolumen immer wieder auf Atmosphärendruck gebracht wird, kommt befindet sich immer eine bestimmte Stoffmenge  $n$  im Referenzvolumen.

$$n = \frac{p_{at} \cdot V_{ref}}{R \cdot T} \quad (21)$$

Diese Stoffmenge kommt durch Öffnen von V3 ins Gesamtsystem bestehend aus Rezipientenvolumen  $V_{Rp}$  und Referenzvolumen  $V_{ref}$ . Im Gesamtsystem befindet sich also nach dem ersten Öffnen die Gesamtstoffmenge  $n_{ges}$ :

$$n_{ges} = n_0 + \frac{p_{at} \cdot V_{ref}}{R \cdot T} \quad (22)$$

Wird nun V3 wieder geschlossen teilt sich die Stoffmenge auf den Rezipienten und das Referenzvolumen auf. Im Rezipienten befindet sich dann noch die Stoffmenge  $n_{Rp}$ :

$$n_{Rp} = n_{ges} \cdot \frac{V_{Rp}}{V_{ges}} \approx n_{ges} \quad (23)$$

Durch diese Näherung bekommt man ein einfaches Iterationsverfahren:

$$n^{(i)}_{ges} = n_0 + i \cdot \frac{p_{at} \cdot V_{ref}}{R \cdot T} \quad (24)$$

## 2.6 Elektrische Durchschlagfestigkeit im Vakuum

Es soll die Überschlagsspannung zwischen zwei Metallkugeln in Abhängigkeit vom Druck gemessen werden. Angefangen wird bei Atmosphärendruck und dann nach jedem Schritt halbiert.

## 2.7 Aufdampfen einer Indium-Schicht

Es soll bei drei verschiedenen Drücken eine Indium-Schicht durch eine Kreisblende auf eine Plexiglasscheibe aufgedampft werden. Es soll hierbei der benötigte Heizstrom und die Randschärfe beobachtet werden.

## 3 Quellen

- Vorbereitungsmappe
- Abbildung 1 (Drehschieberpumpe) - <http://de.wikipedia.org/wiki/Drehschieberpumpe> (Datum: 18.04.2012)
- Abbildung 2 (Turbomolekularpumpe) - Literatur zum Versuch

**Physikalisches Anfängerpraktikum - P2**

**Vakuum**

**P2-44**

Auswertung von  
**Tobias Renz** und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 19. April 2012

## Vorbemerkung

### 0.1 Vakuum

Man unterscheidet verschiedene Vakuen nach ihrer Qualität, also dem erreichten Druck.

	Druck in mbar	Moleküle pro $\text{cm}^3$	mittlere freie Weglänge
Großvakuum	300 bis 1	$10^{19} \dots 10^{16}$	$0,01 \dots 100 \mu\text{m}$
Feinvakuum	1 bis $10^{-3}$	$10^{16} \dots 10^{13}$	$0,1 \dots 100 \text{mm}$
Hochvakuum (HV)	$10^{-3}$ bis $10^{-5}$	$10^{13} \dots 10^9$	$100 \text{mm} \dots 1 \text{km}$
Ultrahochvakuum (UHV)	$10^{-7}$ bis $10^{-12}$	$10^9 \dots 10^4$	$1 \dots 10^5 \text{km}$
extrem hohes Vakuum (XHV)	$< 10^{-12}$	$< 10^4$	$> 10^5 \text{km}$

Tabelle 1: Charakterisierung der Druckbereiche

## 1 Demonstrationsversuch

In diesem Versuch wurde die Gasentladung in einer Gasentladungsröhre beobachtet. An die Röhre wurde Hochspannung angelegt und der Druck mittels einer Drehschieberpumpe variiert.

Bei hohem Druck (einige mbar) war keine Gasentladung zu sehen. Ist der Druck zu hoch, ist die mittlere freie Weglänge sehr klein und die Elektronen stoßen sehr häufig mit Gasatomen. Die Elektronen müssten aber eine gewisse Beschleunigungsstrecke zurücklegen, um genug Energie zu besitzen damit die Gasatome bei einem Stoß ionisiert werden können. Da sie aber zu oft stoßen, nehmen sie nicht genug Energie auf.

Sinkt nun der Druck sehen wir an der Anode ein Leuchten.

Sinkt der Druck weiter sieht man Leuchtringe mit gleichen Abständen. Diese Ringe kommen dadurch zustande, dass die Elektronen beschleunigt werden müssen um die nötige Energie zu bekommen. Treffen sie nun auf Gasatome werden diese ionisiert. Anschließend werden die Elektronen wieder beschleunigt und treffen nach einem bestimmten Abstand wieder auf Gasatome. Dieser Abstand entspricht der mittleren freien Weglänge, da diese ja genau als Weg zwischen zwei Stößen definiert ist. Man kann sich also über den Abstand der Leuchtringe einen Eindruck über die mittlere freie Weglänge verschaffen.

Ab einem bestimmten Druck sollte das Leuchten wieder verschwinden, da so wenige Gasteilchen vorhanden sind, dass die Stoßwahrscheinlichkeit der Elektronen mit einem Gasteilchen zu gering ist.



Abbildung 1: Gasentladung

## 2 Leitwert eines Metallrohres

Zunächst wurde der Metall-Wellenschlauch durch ein etwa gleichlanges Metallrohr ersetzt. Nun wurde der Rezipient mit der Drehschieberpumpe evakuiert. Dabei haben wir ein Video gedreht, auf welchem wir danach zu bestimmten Zeitpunkten (Anfangs jede Sekunde, später nur noch jede 10 Sekunden) beide Werte an T1 und T2 in eine Tabelle eintragen konnten (Tabelle im Anhang).

Gesucht ist nun der Leitwert des Metallrohres, diesen erhalten wir in dem wir zunächst die Saugleistung berechnen. Diese lässt sich aus der Steigung der Geraden bestimmen. Dazu wird  $\ln(p_i)$  über der Zeit  $t$  aufgetragen.

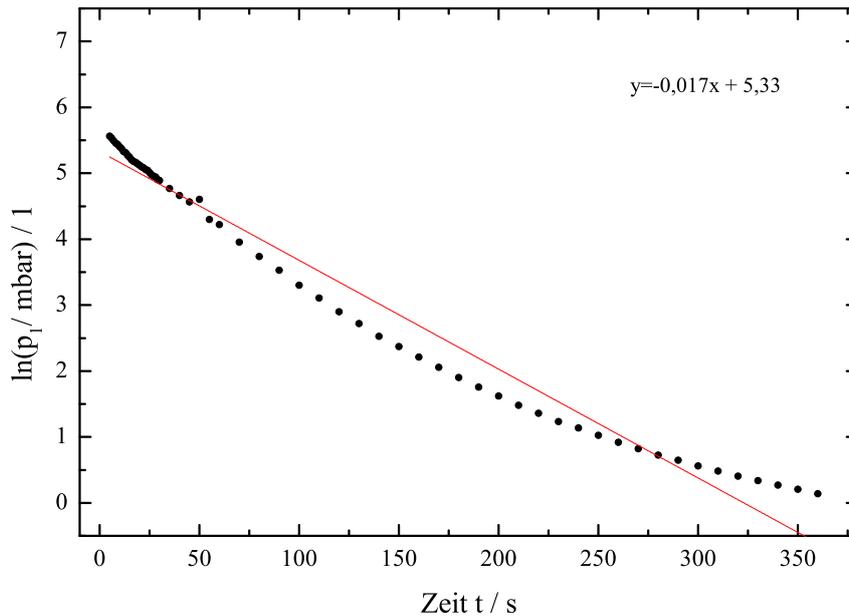


Abbildung 2: Leitwert eines Metallrohres Druck bei T1

Es ergibt sich für die Messung an T1 die Steigung zu  $m_1 = -0,017$ . Aus Gleichung (16) folgt:

$$\ln(p) = -\frac{S}{V}t + \ln(p_0) \quad (25)$$

Das heißt, wir benötigen das Volumen  $V$ . Dies ist angegeben für Apparatur 42 als  $V = 10\text{l}$ . Da hierzu noch Schlauch und ein Teil der Apparatur kommen, addieren wir hier noch  $0,2\text{l}$ . Das Metallrohr wird aufgrund seiner geringen Dicke vernachlässigt. Also:  $V = 10,2\text{l}$ . Daraus folgt:

$$S = -m_1V = 0,17\text{l s}^{-1} \quad (26)$$

Analoges erhalten wir für die Messung des Drucks bei T2.

Die Steigung beträgt nun:  $m_2 = -0,012$ . Wir erhalten das effektive Saugvermögen:

$$S_{eff} = -m_2V = 0,12\text{l s}^{-1} \quad (27)$$

Nach Gleichung (18) gilt dann:

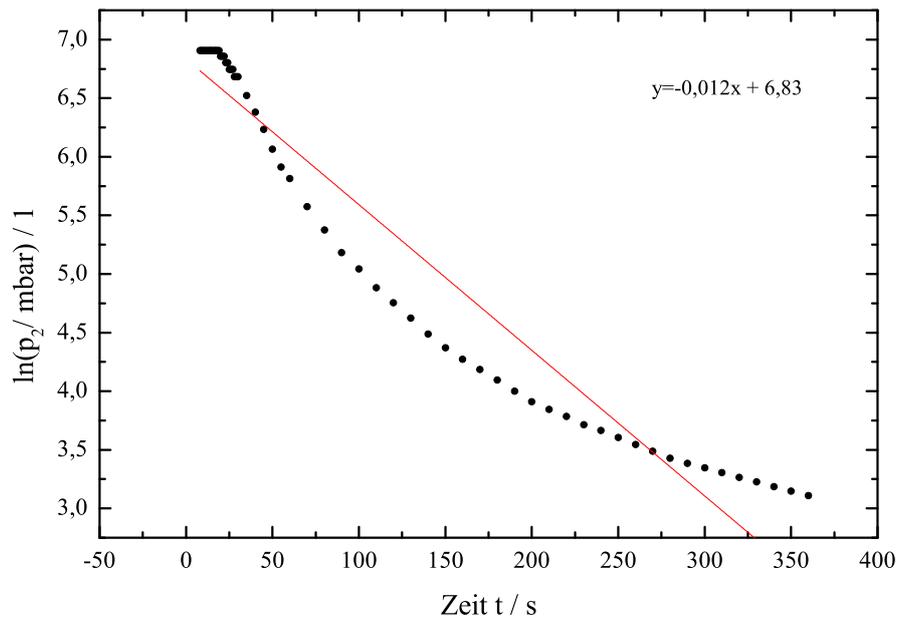


Abbildung 3: Leitwert eines Metallrohres Druck bei T2

$$L = \left( \frac{1}{S_{eff}} - \frac{1}{S} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{0,12 \text{ l s}^{-1}} - \frac{1}{0,17 \text{ l s}^{-1}} \right)^{-1} = 0,41 \text{ l s}^{-1} \quad (28)$$

### 3 Druckabhängiges Saugvermögen $S(p)$ der Drehschieberpumpe

Für diese Messung haben wir zuerst die Glasglocke wieder belüftet um sie dann mit der Drehschieberpumpe zu evakuieren. Den Druck haben wir in Abhängigkeit der Zeit an der Thermovac-Messsonde T1 also am Saugstutzen der Pumpe gemessen.

Aus den Messwerten von  $p$  soll nun das Saugvermögen  $S(p)$  berechnet werden. In der Vorbereitung (16) wurde der Zusammenhang hergeleitet. Dies stellt man nun nach  $S(p)$  um:

$$S(p) = -V \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \cdot \frac{1}{t} \quad (29)$$

Nun benötigt man noch das Volumen  $V$ . Dies ist das Volumen der Gesamtapparatur und dieses ist auf dem Versuchsblatt mit  $V = 10,5 \text{ l}$  angegeben. Damit kann man aus unseren Messwerten  $S(p)$  berechnen und graphisch darstellen.

Wir haben zuerst  $S$  über  $p$  aufgetragen und dann noch über  $\ln(p)$ :

Zu Beginn ist die Saugleistung noch gering, da die Pumpe noch anlaufen musste. Nach kurzer Zeit erreicht die Pumpe dann ihr maximales Saugvermögen. Sinkt nun der Druck, so sinkt auch das Saugvermögen. Dies ist auch verständlich, da die Pumpe auch nur ein bestimmtes Endvakuum erreicht.

Nun sollen wir noch die mittlere Saugleistung  $\bar{S}$  aus dem linearen Bereich des Kurvenverlaufs bestimmen. Dazu haben wir in den linearen Bereich eine Gerade angepasst.

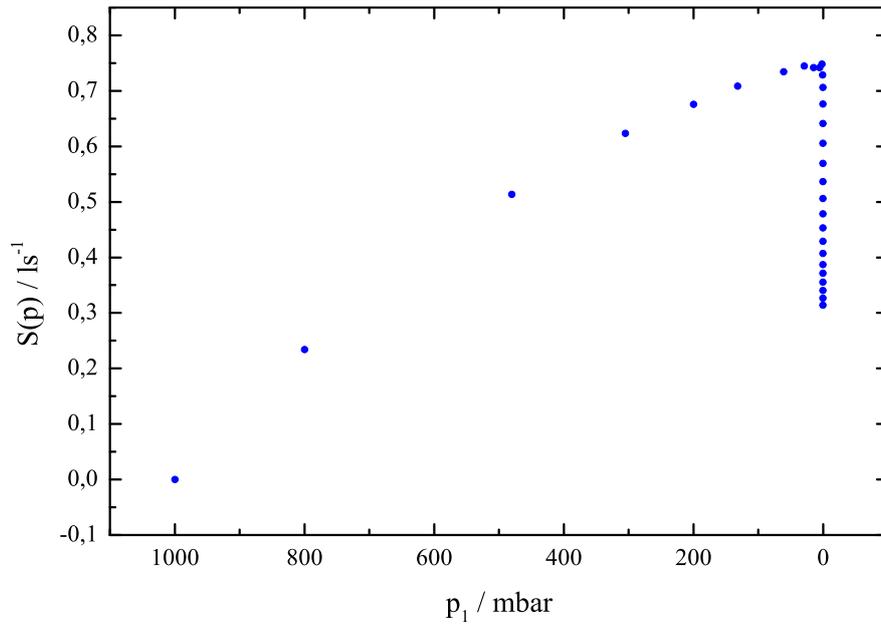


Abbildung 4: Saugvermögen über p

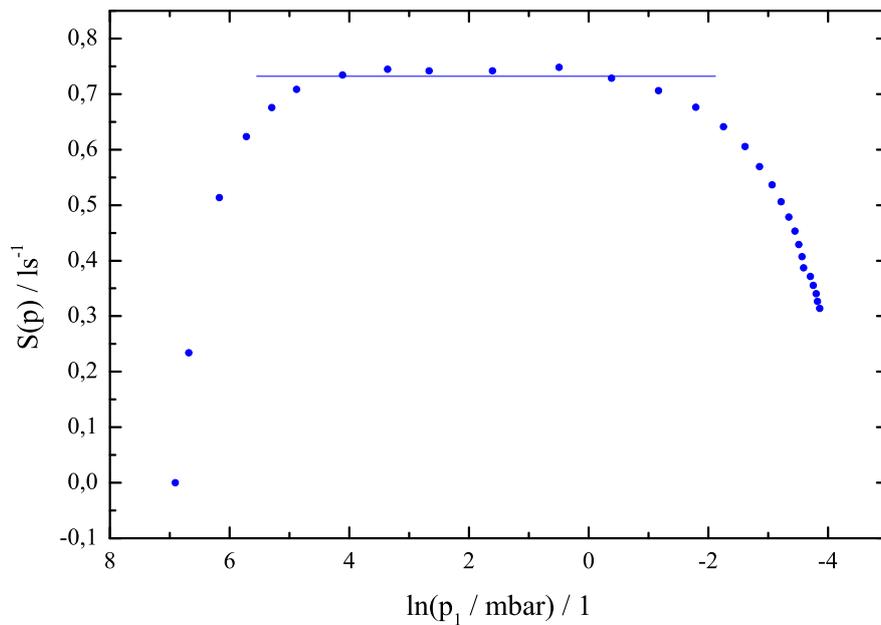


Abbildung 5: Saugvermögen über  $\ln(p)$

Die mittlere Saugleistung ergibt sich dann zu:

$$\bar{S} = 0,74 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 2,66 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \tag{30}$$

Auf dem Aufgabenblatt ist das Saugvermögen  $S = 2,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  angegeben. Unser Wert passt somit sehr gut mit dem Literaturwert überein. Das angegebene Saugvermögen erreicht die Pumpe aber nur in einem bestimmten Bereich.

## 4 Saugvermögen der Turbomolekularpumpe

Die Turbomolekularpumpe wurde nach einer Teilvakuation zur bereits laufenden Drehschieberpumpe zugeschaltet. Wir haben nun nach einer Anlaufzeit von 60 Sekunden in 10 Sekunden Schritten den Druck an der Ionivac-Messröhre abgelesen (die Messtabelle befindet sich im Anhang). Nun können wir wie auch schon in Aufgabe 2 oder 3 das Saugvermögen bestimmen. Wir haben uns für die erste Variante entschieden, da man bei diesem Graph noch am meisten erkennen kann.

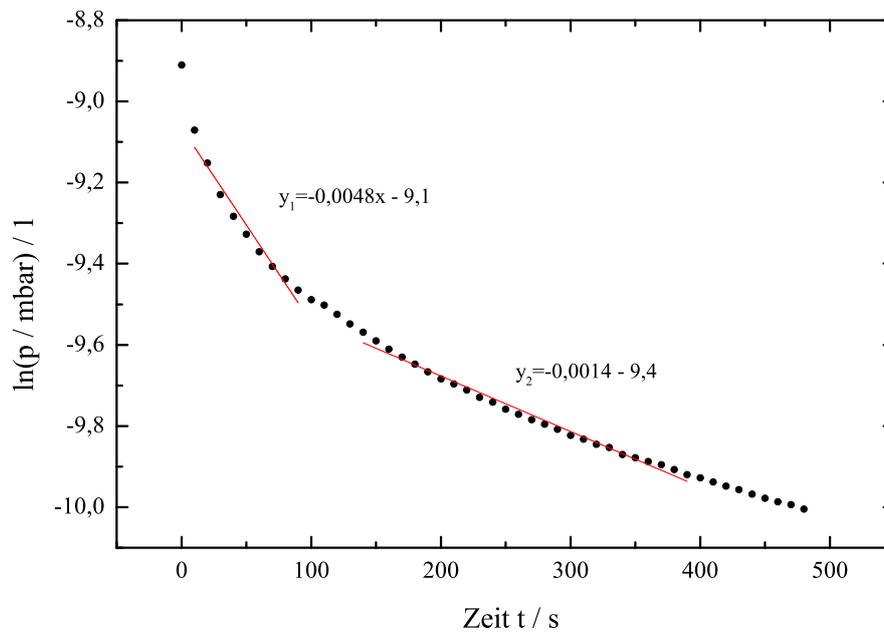


Abbildung 6: Saugvermögen der Turbomolekularpumpe

Man erkennt wieder schön, dass das Saugvermögen anfangs recht hoch ist und dann allmählich abklingt. Der Grund hierfür liegt darin, dass irgendwann eine Grenze erreicht wird, an welcher die Rotorblätter nicht mehr genügend Impuls auf die noch verbleibenden Teilchen ausüben können. Da die mittlere thermische Geschwindigkeit umso größer ist je leichter die Atome sind, bleiben jene vermehrt zurück. Für große Zeiten stellt sich dann ein Gleichgewicht ein, an dem die Rückdiffusionsrate gleich der des Saugvermögens wird.

Wir haben uns entschieden für den Anfangsbereich und für den Mittleren (bis End-) Bereich unserer Messung jeweils eine Ausgleichsgerade durch unsere Punkte zu legen, da leider kein Knick erkennbar war.

Aus den Steigungen lässt sich nun  $S$  berechnen. Dazu nehmen wir wieder  $V = 10,5 \text{ l}$  wie schon in Aufgabe 3.

$$\begin{aligned} S_1 &= -m_1 V = 0,0048 \cdot 10,5 \text{ l} = 0,05 \text{ l s}^{-1} \\ S_2 &= -m_2 V = 0,0014 \cdot 10,5 \text{ l} = 0,02 \text{ l s}^{-1} \end{aligned} \quad (31)$$

Unsere Werte sind jedoch vom Literaturwert  $S_{Lit} = 30 \text{ l s}^{-1}$  recht weit entfernt. Gründe hierfür

könnte das recht kleine Volumen sein, welches wir evakuieren.

Außerdem könnte der Wert anfangs schon erreicht werden, da aber die Messung dort recht schwierig war und die Messinstrumente sehr verzögert reagierten, können wir darüber keine Aussage treffen.

Nun soll noch die Kraft welche auf die Gummidichtung wirkt abgeschätzt werden. Nach Formel (19) folgt mit dem Durchmesser  $d = 220\text{mm}$ :

$$F = \Delta p \cdot A = (1000\text{mbar} - 4,52 \cdot 10^{-5}\text{mbar}) \cdot \pi \cdot \frac{220^2\text{mm}^2}{4} \approx 1 \cdot 10^{-5}\text{Pa} \cdot \pi \cdot 1\text{m}^2 \approx 3 \cdot 10^5\text{N} \quad (32)$$

## 5 Einstufiges, statisches Kalibrierungsverfahren

Um das Volumen des Referenzvolumens zu bestimmen haben wir ein einstufiges, statisches Kalibrierungsverfahren durchgeführt. Dazu haben wir das Ventil zwischen Rezipient und Referenzvolumen zunächst geschlossen und den Rezipienten bis zu einem Druck von 0,0045 mbar evakuiert. Anschließend wird das Ventil V3 zwischen Rezipient und Referenzvolumen geöffnet und der sich einstellende Druck gemessen. Das Ventil wird wieder geschlossen und durch öffnen von B2 wird das Referenzvolumen entlüftet. Nun schließt man wieder B2, öffnet V3 und misst den Druck. Dieses Iterationsverfahren wird nun solange durchgeführt bis sich ein Druck von ca. 80mbar eingestellt hat.

Nun haben wir zunächst einmal den Druck  $p$  über den Iterationsschritten  $i$  dargestellt.

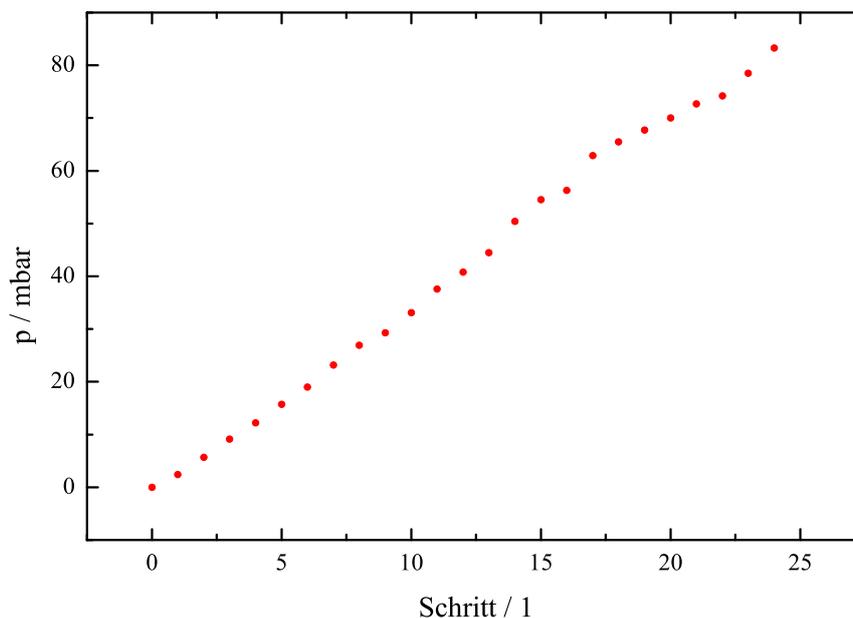


Abbildung 7: Einstufiges Kalibrierungsverfahren - Iteration

Es sollte auch noch der Iterationszuwachs dargestellt werden. Dies haben wir für die bessere Anschaulichkeit als Säulendiagramm dargestellt.

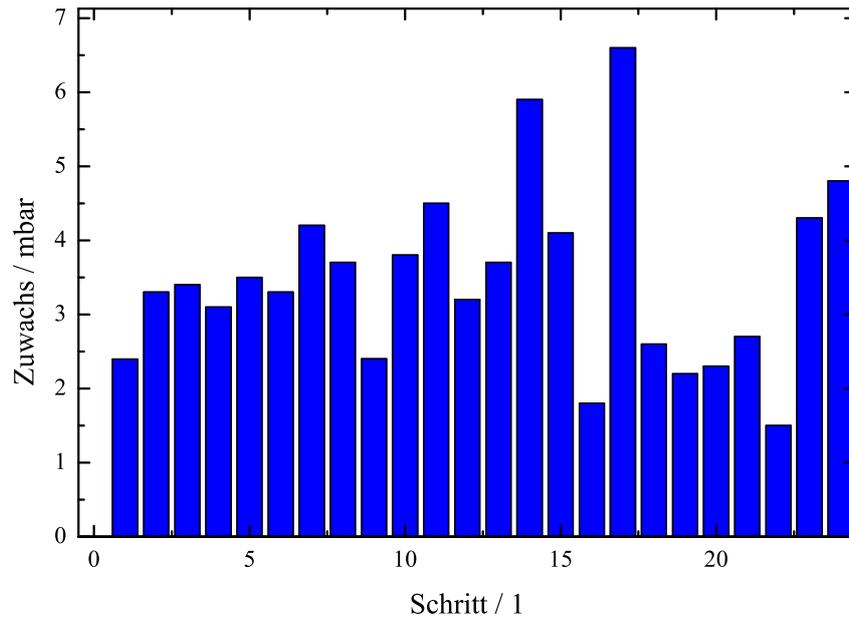


Abbildung 8: Einstufiges Kalibrierungsverfahren - Iteration

Man sieht, dass der Iterationszuwachs sehr unterschiedlich ist. Dies kann daran liegen, dass es darauf ankommt welche Zeit zwischen den einzelnen Schritten liegt und wie lange man dann gewartet hat bis man den Druck gemessen hat. Wenn man sich die " Ausreißer' "wegdenkt, sieht man, dass der Zuwachs mit wachsendem Druck abnimmt.

In der Vorbereitung wurde gezeigt, dass die Stoffmenge  $n$  folgendermaßen mit den Iterationsschritten  $i$  zusammenhängen:

$$n(i) = n_0 + i \cdot \frac{p_{at} \cdot V_{ref}}{R \cdot T} \quad (33)$$

Da wir den Druck gemessen haben, rechnen wir die Stoffmenge in Druck um:

$$p = n \cdot \frac{R \cdot T}{V} \quad (34)$$

$$\Rightarrow p(i) = p_0 + i \cdot p_{at} \cdot \frac{V_{ref}}{V} \quad (35)$$

Das heißt wir können das Referenzvolumen  $V_{ref}$  über die Steigung einer Ausgleichsgerade bestimmen. Die Ausgleichsgerade wird mit Origin bestimmt und hat eine Steigung  $m$  von:

$$m = 3,56 \text{ mbar} \quad (36)$$

Das Referenzvolumen ergibt sich nun zu:

$$V_{ref} = m \cdot \frac{V}{p_{at}} \quad (37)$$

mit  $p_{at} = 1013,25 \text{ mbar}$  und  $V = 10\text{l}$

Damit ergibt sich ein Wert für das Referenzvolumen von:

$$V_{ref} = 0,035l \quad (38)$$

Dieser Wert passt sehr gut mit dem angegebenen Wert von 0,034 l überein.

## 6 Durchschlagfestigkeit im Vakuum

Es wurde die Überschlagsspannung zweier Metallkugeln in Abhängigkeit vom Druck gemessen. Dabei wurde bei Atmosphärendruck von 1000mbar begonnen. Ab einem Druck von 0,05mbar wurde die Turbomolekularpumpe zugeschaltet. Dabei wurde der Rezipient zunächst auf  $2,00 \cdot 10^{-4}$  mbar evakuiert, da die Turbomolekularpumpe ein hohes Saugvermögen hat und wir sonst die Zwischenschritte nicht messen hätten können. Die Tabelle befindet sich wieder im Anhang.

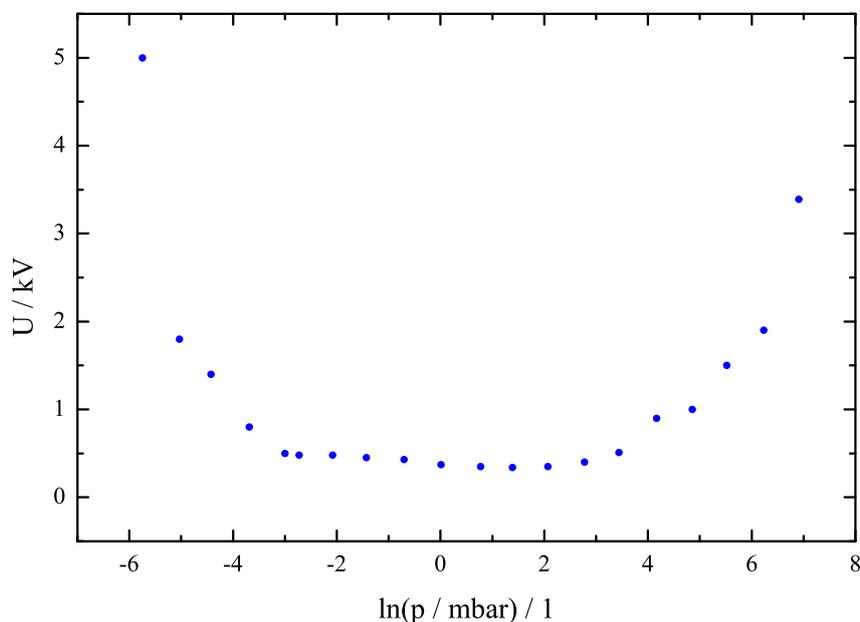


Abbildung 9: Durchschlagfestigkeit im Vakuum

Die Aufgenommene Spannungen entsprechen dabei immer dem Maximalwert vor der Entladung. Sobald an den Kugeln ein Ladungsausgleich durch Funkenüberschlag oder beispielsweise durch Glimmentladung bei niedrigen Drücken stattfindet, bricht die Spannung ein wenig zurück, da nun ein Strom fließt.

Es wurde in der Grafik eine logarithmische x-Achse gewählt um das Plateau minimaler Überschlagsspannung gut hervorzuheben. Es ist erkennbar, dass die Überschlagsspannung bei sehr niedrigen Drücken sehr groß ist. Anfangs lag sie sogar außerhalb der erlaubten 9kV. Daher konnten wir sie gar nicht messen. Kommt man nun in den Bereich, in der die mittlere freie Weglänge in etwa dem Abstand der Kugeln entspricht, so wird die Überschlagsspannung schnell sehr gering. Nimmt die mittlere freie Weglänge durch die Druckerhöhung weiter ab, so vergrößert sich auch wieder die Durchschlagfestigkeit.

Dieser Effekt wird also auch in der Industrie sehr wichtig, sobald es in einem Betriebsraum elektrischer Geräte zu niedrigen Drücken kommt. Diesen Sachverhalt untersucht schon Friedrich Paschen, welcher auch das nach ihm benannte Paschen-Gesetz aufgestellt hat. Auf dieses werden wir nicht weiter eingehen, sondern verweisen auf entsprechende Literatur. Der Effekt lässt sich durch die Oberflächenbeschaffenheit des Kathodenmaterials, Luftfeuchtigkeit im Teilvakuierten Raum, Temperatur und der Art des Gases stark beeinflussen. Als Beispiel könnte man hier die Bordelektronik in einem Flugzeug nennen.

## 7 Aufdampfen einer Indium-Schicht

Als letzten Versuch sollten wir noch durch eine Kreisblende eine Indium-Schicht auf eine Plexiglasscheibe aufdampfen. Dazu haben wir ein Verdampferschiffchen durch einen Heizstrom erhitzt. Auf diesem Schiffchen sollte eine geringe Menge Indium sein, das dann verdampft und durch die Kreisblende auf das Plexiglas aufgedampft wird.

Das Aufdampfen sollte bei drei verschiedenen Drücken ( $p_1 < 10^{-5}$  mbar,  $p_2 \approx 10^{-3}$  mbar und  $p_3 \approx 10^{-2}$  mbar) durchgeführt und beobachtet werden.

Beim niedrigsten Druck ( $p = 4 \cdot 10^{-5}$ ) benötigten wir einen Heizstrom von ca. 25A. Der auf das Plexiglas aufgedampfte Kreis war ungefähr so groß wie das Loch der Kreisblende. Der aufgedampfte Kreis hatte sehr scharfe Ränder. Dies liegt daran, dass bei diesem niedrigen Druck nur noch sehr wenige Gasatome vorhanden sind, die den aufsteigenden Indium Dampf streuen können. Der Indium Dampf gelangt also ohne Ablenkung auf die Scheibe und dampft dort einen kleinen und scharfen Kreis auf.

Bei höheren Drücken hat das Aufdampfen leider nicht mehr funktioniert, da wahrscheinlich zu wenig Indium auf dem Verdampferschiffchen platziert wurden. Wir hätten aber erwartet, dass bei höherem Druck der aufgedampfte Kreis größer und unschärfer wird. Dies liegt wie oben beschrieben daran, dass bei höherem Druck mehr Gasatome vorhanden sind, die den Indium Dampf streuen und ablenken.

Beim Heizstrom hätten wir erwartet, dass dieser mit steigendem Druck steigen wird. Da die Wärmeleitfähigkeit mit steigendem Druck besser wird, wird beim niedrigsten Druck am wenigsten Wärme abgeführt und man benötigt einen niedrigeren Strom und die benötigte Temperatur zu erreichen. Bei steigendem Druck steigt die Leitfähigkeit und es wird mehr Wärme abgeführt folglich braucht man auch einen höheren Heizstrom.

## 8 Aufräumen und Vorbereiten

Zum Schluss haben wir die Apparatur entlüftet und die Glasglocke sowie die Plexiglasscheibe gereinigt. Anschließend wurde noch, für die nächste Gruppe, auf dem Schiffchen platziert. Dies ist nötig, damit die nachfolgende Gruppe den Versuch 7 durchführen können.

Nachdem alles vorbereitet wurde, haben wir die Glasglocke wieder platziert und die Apparatur mit der Drehschieberpumpe evakuiert.

## 9 Quellen

- <http://de.wikipedia.org/wiki/Paschen-Gesetz>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Vakuum>
- Abbildung 1 - <https://www.uni-muenster.de/Physik.AP/Purwins/DE/1D-DC-Gasentladung-de.html> Stand: 19.04.2012, 21:20Uhr