



SS/WS 20.10.1.....

Praktikum: (P1/P2) (Mo/Di/Mi/Do) Gruppe-Nr: 22...

Name: Löschner ..... Vorname: Maximilian.....

Name: Pransche ..... Vorname: Benedikt.....

Versuch: Vakuum ..... (mit/ohne) Fehlerrechnung

Betreuer: Julia Weira ..... Durchgeführt am: 8.6.10.....

Abgabe am: 15.6.10.....

Rückgabe am: ..... Begründung: .....

2. Abgabe am: .....

Ergebnis: (+ / 0 / -) Fehlerrechnung: ja / nein  
Datum: 15.6.10 ..... Handzeichen: J.W. ....  
Bemerkungen:  
sehr schön  
gute Ideen  
gute Diskussionen



## Versuch P2-41,42

## Vakuum

## Raum F1-19

Der Versuch bietet einen Einblick in die für den Experimentalphysiker so wichtige Vakuumtechnik. Sie spielt nicht nur in der Nanophysik sondern auch bei so wichtigen Experimenten wie z.B. dem Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment (**KATRIN**) eine wichtige Rolle. Desweiteren findet sie unter anderem auch Anwendung in der Dünnschichttechnik, mit welcher z.B. die luftdichten Oberflächen in Chipstüben 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, immer eine Schutzbrille getragen werden!**

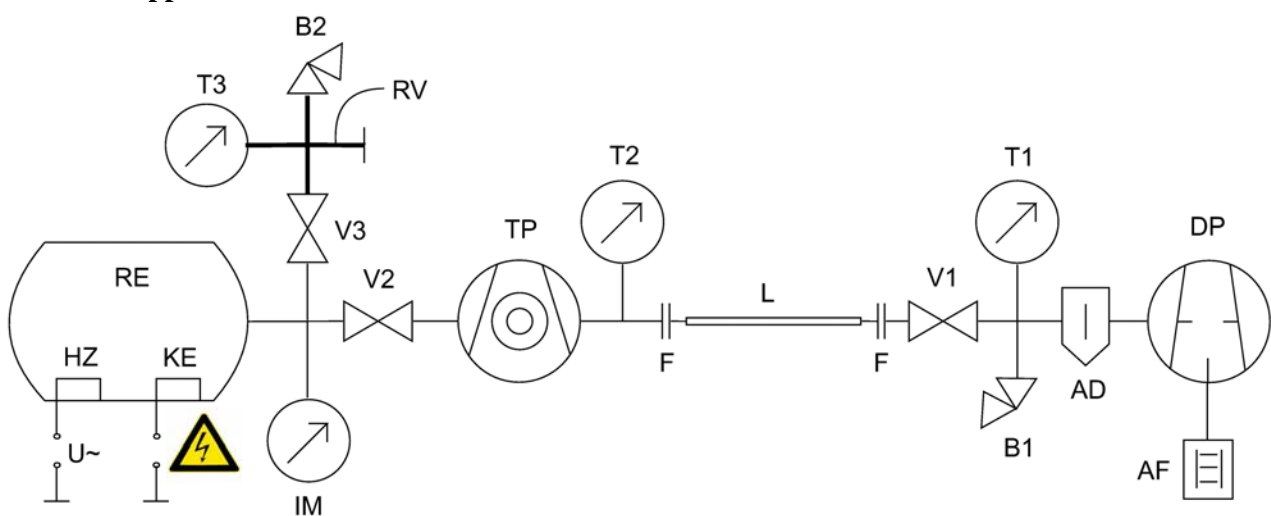
**Die hier aufgebaute Apparatur ist sehr empfindlich. Bei fehlerhafter Handhabung können große Schäden entstehen, weshalb die einzelnen Versuchsteile nur nach Rücksprache mit dem Betreuer gestartet werden dürfen!**

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 und eventuell hauchdünn mit Vakuumfett versehen werden.

Die Turbomolekularpumpe darf nur bei einem Vorvakuumdruck von  $\leq 8 \cdot 10^{-2}$  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 (TRIVAC); AF Auspuff-Filter; AD Adsorptionsfalle; T1, T2, T3 Wärmeleitungs-  
vakuummeter (Thermovac-Meßsonde); B1, B2 Belüftungsventil; V1, V2, V3 Vakuumventil, handbetätigt; L  
austauschbare Verbindungsleitung; TP Turbomolekularpumpe (TURBOVAC); IM Ionisationsvakuummeter  
(Penning-Transmitter); RE Rezipient; RV Referenzvolumen; HZ wechselstrombeheiztes Verdampfer-  
schiffchen; KE mit Hochspannung versorgte Kugelelektroden

## **Aufgaben:**

**1.** 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 vor der Ausführung von Aufgabe 2 einen **Überblick über die Apparatur 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!

**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 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 belüftet 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 an 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 können 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 V2 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.** Messen Sie die Überschlagnspannung 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 anschließen mit der Drehschieberpumpe bis zu einem Druck von ca. 500 mbar. Schließen Sie V2 um den erreichten Druck zu halten und erhöhen sie wieder die Spannung bis zur Entladung. Öffnen Sie anschließend V2, evakuieren Sie erneut 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

als 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. Was für folgen haben diese Ergebnisse für die Industrie?

**7. Dampfen Sie drei bei 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:** Der Heizstrom darf erst hochgedreht werden, wenn das Sollvakuum erreicht ist. Beobachten Sie beim Hochdrehen das Tantal-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.

**9. Demonstrationsversuch** an der Vakuumapparatur mit Öldiffusionspumpe: Hier ist in der Glasglocke ein **Kühlfinger** befestigt, der von außen mit flüssigem Stickstoff gefüllt werden kann. Beteiligen Sie sich an diesem Versuchsteil und diskutieren Sie das resultierende Druckverhalten.

#### **Umrechnungen:**

1 bar =  $10^5$  Pa =  $10^5$  N/m<sup>2</sup>;

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

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

#### **Volumenangaben:**

Volumen der gesamten Apparatur mit Metallwellschlauch: 10,384 l

Volumen des Rezipienten bis V2,V3 und IM: 10,243 l

Referenzvolumen: 0,043 l

#### **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-Mariottesche 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

Drei **Wärmeleitungsmanometer**-Sonden (T1,T2,T3) THERMOVAC Transmitter TTR91, Messbereich  $5 \cdot 10^{-4}$  mbar bis 1 bar

**Ionisationsmanometer**-Messsonde (IM) Penning-Transmitter PTR225, Messbereich  $1 \cdot 10^{-9}$  –  $1 \cdot 10^{-2}$  mbar

**Transmittercontroller** DISPLAY THREE, = Elektronisches Vakuum-Druckmessgerät, Anzeigebereich  $1 \cdot 10^{-9}$  – 2000 mbar, 3-Kanalgerät

**Turbomolekularpumpe** (TP) TURBOVAC 50, Saugvermögen  $\geq 30$  l/s, Flanschdurchmesser Vorvakuumseite 16 mm, Hochvakuumseite 65 mm, Drehfrequenz max. 7200 min<sup>-1</sup>, Hochlaufzeit ca. 2 min, nötiges Vorvakuum  $\leq 4 \cdot 10^{-2}$  mbar, Endvakuum im Rezipienten günstigstenfalls  $2 \cdot 10^{-6}$  mbar

**Steuergerät** TURBOTRONIK NT10 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; Volumen bis V2 ,V3 und IM  $\approx 10,243$  l

**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  $R_i=10M\Omega$ , Anzeige also U/10)

**Metallwellschlauch**: Länge = 447mm; Durchmesser = 17mm

**Dünnes Metallrohr**: Länge = 443mm; Durchmesser = 2mm

**Stopuhr**

**Schutzbrillen**

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

#### **Literatur:**

Wutz: Handbuch Vakuumtechnik

Edelmann: Vakuumphysik und -Technik

W. Pupp/H.K. Hartmann: Vakuumtechnik

Diels, Jaeckel : Leybold-Vakuumtaschenbuch

Allgemeine Lehrbücher der Physik

---

Version: April 2010

# Vakuum - Versuchsvorbereitung

Maximilian Löschner, Benedikt Prunsche

25. Juni 2010

## Theoretische Vorüberlegungen

### 0.1 Drehschieberpumpe

Bei Drehschieberpumpen handelt es sich um Rotations-Verdrängerpumpen. Sie bestehen aus einem festen zylindrischen Gefäß (Stator) und einem exzentrisch gelagerten Rotor mit Schiebern, die durch Federn und die Fliehkraft auseinandergedrückt werden und dadurch an der Gehäusewand entlang gleiten und dadurch Luft vor sich herschieben (siehe Abb. 1). Diese wird schließlich am Auslassventil wieder ausgestoßen. In der Regel werden Schmieröle zur Reibungsverminderung und Abdichtung der verschiedenen Arbeitsbereiche innerhalb der Pumpe verwendet.

### 0.2 Turbo-Molekularpumpe

Die Turbomolekularpumpe ist eine Weiterentwicklung der von Gaede entwickelten Molekularpumpe. Sie besteht aus einer abwechselnden Anordnung von Statoren (Leitblechen) und Rotoren, deren Anstellwinkel über die Länge der Pumpe hinweg variiert. Die Gasteilchen erhalten durch Stöße mit den Rotoren eine Impulsänderung und damit eine bevorzugte Bewegungsrichtung entlang ihrer Symmetrieachse. Die Rotoren drehen sich mit Geschwindigkeiten von  $\approx 30000 \frac{U}{min}$  und mehr, so dass sie am Rand der Pumpe in den Bereich der Geschwindigkeit der Gasmoleküle gelangen:  $c_{Gas} = \sqrt{8RT/\pi M}$ . Hier erkennt man bereits, dass die Pumpen für schwere Gasteilchen besser funktionieren, da leichte Teilchen eine größere mittlere Geschwindigkeit haben und durch die Rotoren somit nur einen geringen Impulszuwachs erfahren. Zur Verwendung einer Turbomolekularpumpe muss stets ein Vorvakuum erzeugt werden, bevor man mit ihr bis in den Hochvakuumbereich gelangen kann. Ohne Vorvakuum käme es durch die hohe Luftreibung zu einer starken Erhitzung und schließlich zur Zerstörung der Pumpe.

### 0.3 Wärmeleitungsmanometer

Um sehr geringe Drücke zu messen reichen gewöhnliche (z. B. Flüssigkeitssäulen-) Manometer nicht mehr aus. Daher empfiehlt es sich auch Gedanken über entsprechende Messertemperaturen zu machen. Bis zu einem Druck von  $10^{-4}$  mbar sehr gut einsetzbar ist z.B.

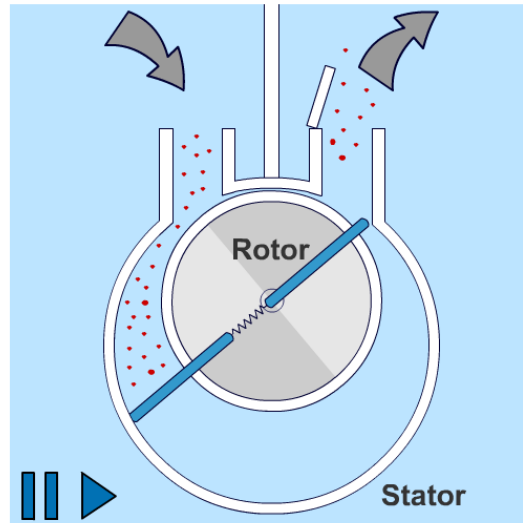


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Drehschieberpumpe

ein Wärmeleitungsmanometer oder auch Pirani-Vakuummeter. Bei diesem Druckmessgerät macht man sich zu nutze, dass die Wärmeleitung vom Umgebungsdruck abhängt. Dies funktioniert leider nur in einem eingeschränkten Druckbereich von ca.  $1000\text{mbar}$  bis  $5 \cdot 10^{-4}\text{mbar}$ , da außerhalb dieses Druckbereiches die Wärmeleitung nicht mehr wesentlich vom Umgebungsdruck abhängt. Das Wärmeleitungsmanometer besteht im wesentlichen aus einem Heizdraht der mit Hilfe einer Wheatstone-Brücke und eines Operationsverstärkers auf einem gleichbleibenden Widerstand (also auch einer gleichbleibenden) Temperatur gehalten wird. Die dafür nötige Spannung ist dann ein Maß für die Wärmeableitung am Draht und kann direkt in Druck umgerechnet werden. Ein Problem bei diesem Manometer ist die Gas-Abhängigkeit der Wärmeleitung, daher sind diese Manometer zumeist auf ein spezielles Gas geeicht (v.a. Luft oder  $N_2$ ).

#### 0.4 Ionisationsmanometer

Eine weitere Möglichkeit das Vakuum zu vermessen ist ein sog. Ionisationsmanometer. Dieses kann entweder als Kaltkathoden- oder Glühkathodenmanometer vorliegen. Da wir im Praktikum ein Penning-Vakuummeter zur Verfügung haben und dies ein Kaltkathodenmanometer ist werden wir nur auf diese Bauweise eingehen. An einer Anordnung aus Kathode und Anode liegt eine Gleichspannung von etwa  $2\text{kV}$  an. Diese beschleunigt vorhandene Elektronen welche dann zur Ionisierung restlicher Gasteilchen beitragen. Abhängig vom auftretenden Ionisationsstrom kann dann auf das Vakuum geschlossen werden. Da oberhalb von  $10^{-2}\text{mbar}$  eine Glimmentladung entstehen würde, die jedoch vom Umgebungsdruck abhängt kann mit einem Ionisationsmanometer nur ein Druck kleiner als  $10^{-2}\text{mbar}$  gemessen werden. Die untere Grenze liegt jedoch bei  $\approx 10^{-12}\text{mbar}$ , das Ionisationsmanometer ermöglicht also eine Messung im Hochvakuum Bereich.

# 1 Überblick über die Apparatur verschaffen

Zunächst wird die verwendete Apparatur inspiziert, indem man sich die Lage der einzelnen Bauteile und Leitungen klar macht. Im Glaskolben sollte bereits ein Vorvakuum herrschen, das Aufdampfschiffchen mit Indium versehen und die Glasglocke gereinigt sein.

## 2 Leitwert eines Metallrohres

Der Leitwert einer Pumpanordnung ist über den "pV- Durchfluss"  $Q_{pV}$  definiert:

$$Q_{pV} = \frac{d(p \cdot V)}{dt}$$

Dieser gibt die Geschwindigkeit der durch einen Leitung fließenden Gasmenge an. Der Leitwert  $L$  ist dann gegeben durch:

$$Q_{pV} = L \cdot \Delta p = L \cdot (p_2 - p_1)$$

Obige Gleichung zeigt, dass der pV- Durchfluss proportional zum Druckunterschied zwischen Ein- und Ausgang des Leitungselements ist, wobei  $L$  ein Proportionalitätsfaktor ist. Obige Gleichung wird auch als "Ohm'sches Gesetz der Vakuumtechnik" bezeichnet, was veranschaulicht, dass  $L$  dem Volumendurchfluss durch ein Leitungselement, also in der Analogie dem elektrischen Leitwert, entspricht. Der Leitwert ergibt sich aus der Geometrie des Leitungselements, kann jedoch nur bei sehr einfachen Geometrien direkt rechnerisch bestimmt werden. In der Literatur<sup>1</sup> findet sich folgende Gleichung für eine zylindrische Leitung ( $r = \text{Rohrradius}$ ,  $l = \text{Rohrlänge}$ ).

$$L = \frac{8}{3} \cdot \frac{r^3}{l} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}}$$

Im Versuch wird nun der bereits eingebaute Metall-Wellschlauch durch ein gleichlanges Rohr ausgetauscht und an den Messstellen  $T_1$  und  $T_2$  gleichzeitig der zeitliche Verlauf des Drucks bestimmt. Anschließend wird das Rohr wieder durch den Schlauch ausgetauscht. Der Leitwert sollte hier kleiner sein als der Vorhergesagte, da in obiger Gleichung die Reibung an der Rohrwand vernachlässigt wird.

## 3 Messung des druckabh. Saugvermögens $S(p)$ einer Drehschieberpumpe

In dieser Aufgabe soll das System mit Hilfe der Drehschieberpumpe evakuiert werden und der zeitliche Verlauf aufgezeichnet werden. Hierzu werden alle 15s Messwerte am Saugstutzen der Pumpe mit Hilfe der Messsonde T1 aufgezeichnet und anschließend in ein  $S(p)$  Diagramm eingezeichnet. Im Anschluss soll aus dem linearen Bereich der Kurve das mittlere Saugvermögen  $\bar{S}$  ermittelt werden.

<sup>1</sup><http://www.jkrieger.de/download/gasvakuum.pdf>



## 4 Messung des Saugvermögens der Turbo-Molekularpumpe

Nun soll mit Hilfe der Iovanic-Sonde das Saugvermögen der Turbo-Molekularpumpe (TMP) gemessen werden. Dazu wird das System wieder belüftet bis sich ein Druck von  $p = 0,2\text{mbar}$  eingestellt hat. Anschließend wird das System wieder mit der Drehschieberpumpe evakuiert (bis  $p \approx 0,08\text{mbar}$ ) und nun die TMP zugeschaltet. Nun soll der Druck alle 10s an der Iovanic-Messröhre aufgezeichnet werden um anschließend wieder ein Diagramm zu erstellen. Für die Kraft mit der die Glocke auf die Dichtung gedrückt wird, gilt genähert:

$$F = \Delta p \cdot A = 10^5 \text{Pa} \cdot 0,11^2 \text{m}^2 \cdot \pi \approx 3,8 \text{kN}$$

## 5 Einstufiges, statisches Kalibrierungsverfahren

Das Boyle- Mariotte'sche Gesetz besagt, dass der Druck einer Stoffmenge bei konstanter Temperatur umgekehrt proportional zum Volumen ist:

$$p \propto \frac{1}{V} \rightarrow \frac{p_1}{V_1} = \frac{p_2}{V_2}$$

Im Versuch wird zunächst im Rezipienten mithilfe der Drehschieber- und anschließend der Turbomolekularpumpe ein Druck von  $p < 10^{-4}\text{mbar}$  erzeugt. Anschließend wird der Rezipient über das Ventil  $V_2$  vom Rest des Systems getrennt und die Pumpen können abgestellt werden. Durch Öffnen des Ventils  $V_3$  stellt sich im Rezipienten und Referenzvolumen ein neuer Gesamtdruck  $p_{ges}$  ein, der nun an  $T_3$  gemessen wird. Durch Schließen von  $V_3$  und Öffnen des Belüftungsventils  $B_2$  stellt sich im Referenzvolumen erneut der Atmosphärendruck ein. Die letzten beiden Schritte werden nun solange wiederholt, bis sich im Rezipienten ein Druck von ca.  $80\text{mbar}$  eingestellt hat. Anschließend sollen Druckverlauf und Iterationszuachs skizziert und das Expansionsverhältnis bestimmt werden.

Der erste Schritt in diesem Verfahren sieht rechnerisch wie folgt aus:

1. Druck in den beiden Volumina zu Beginn:  $p_1 = \frac{n_1 RT}{V_{RP}}$ ,  $p_0 = \frac{n_2 RT}{V_{Ref}}$
2. nach Öffnen von  $V_3$ :  $p_2 = p_1 \cdot \frac{n_1 + n_2}{n_1} \cdot \frac{V_{RP} + V_{Ref}}{V_{RP}} \implies$  Druck in RP vergrößert sich

Mit jedem Schritt wird nun der Druck in RP weiter vergrößert, jedoch wird der Druckunterschied von Schritt zu Schritt geringer.

## 6 Druckabhängigkeit der elektrischen Durchschlagsfestigkeit

In diesem Versuch soll die elektrische Durchschlagsfestigkeit in abh. vom vorherrschenden Druck bestimmt werden. Dazu wird die Spannung zwischen zwei Metallkugeln so lange erhöht bis es zu einer elektrischen Entladung kommt. Dies soll nun bei verschiedenen Drücken vorgenommen werden um so eine aufschlussreiche Messreihe zu erhalten. Zunächst soll bei ca.  $1000\text{mbar}$  begonnen werden und nach jeder Entladung der Druck

halbiert werden, bis ein Druck von 0,05 mbar vorliegt. Ist dieser Druck erreicht soll nun mit Hilfe der TMP weiter evakuiert werden bis  $p = 2 \cdot 10^{-4} \text{mbar}$ . Nun wird die Pumpe abgeschaltet und das Ventil geschlossen. Der Druck steigt nun wieder von selbst und die Messreihe wird jetzt sozusagen rückwärts durchgeführt, wobei die Spannung nicht über 9kV erhöht werden sollte. Je nach Druck treten hierbei unterschiedliche Entladungen auf. Bei höheren Drücken bis ca.  $p \geq 0,1 \text{bar}$  treten Funkenentladungen (bzw. je nach Stromquelle auf Lichtbögen) auf. Hierbei gilt als Faustregel: pro mm zu Überwindender Strecke bei Atmosphärendruck werden ca. 3kV benötigt. Die benötigte Spannung sinkt jedoch bei niedrigeren Drücken. Bei niedrigeren Drücken (einige mbar) tritt dann die sog. Glimmentladung auf, die im Gegensatz zur Funkenentladung relativ kalt ist. Durch das Vakuum sind weniger Gasteilchen im System und die Elektronen stoßen wesentlich seltener mit den Gasteilchen, wodurch hitze-erzeugende Stöße mit den Wänden des Systems vermieden werden. Für die Industrie bleibt zu beachten, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Gasentladung bei niedrigeren Drücken zunimmt, d.h. ist besonders bei Flugzeugen oder auf hohen Bergen darauf zu achten, dass keine Funkenentladungen in elektrischen Bauelementen und Schaltkreisen auftreten.

## **7 Aufdampfen eines Indium-Flecks auf eine Plexiglasscheibe bei verschiedenen Drücken**

In der letzten Aufgabe soll nun mit Hilfe einer Kreisblende ein Indiumfleck aufgedampft werden. Dabei wird das Indium an den Siedepunkt gebracht. Verdampfte Teile kondensieren nun an der kälteren Plexigalsscheibe und setzen sich dort ab. Diese Aufdampfung soll nun bei 3 verschiedenen Drücken ( $p \leq 10^{-5} \text{mbar}$  ,  $p \approx 10^{-3} \text{mbar}$  ,  $p \approx 10^{-2} \text{mbar}$  ) erfolgen. Dabei soll v.a. auf den Heizstrom (sollte bei niedrigeren Drücken geringer sein) sowie die Randschärfe der aufgedampften Flecken bei den unterschiedlichen Drücken geachtet werden. Im Allgemeinen sollte das Verdampfen im Hochvakuum stattfinden um v.a. Oxidation und Stöße mit anderen Teilchen zu vermeiden. Zu beachten ist bei diesem Versuch, dass der Heizstrom nicht zu stark wird um das Tantal-Verdampferschiffchen nicht zu schmelzen.

## **8 Vorbereitung der Versuchsanordnung für nachfolgende Gruppen**

Zum Schluss des Versuchs soll noch die gesamte Versuchsanordnung für nachfolgende Gruppen vorbereitet werden. Hierzu muss:

1. Die Aparatur belüftet werden
2. Die Aparatur gereinigt werden
3. Das Verdampferschiffchen bestückt werden
4. Die Aparatur wieder zusammengesetzt und anschließend evakuiert werden

## **9 Kühlung der Apparatur mit flüssigem Stickstoff**

Zuletzt wird ein Demonstrationsversuch zusammen mit dem Betreuer durchgeführt. Hierbei wird ein „Kühlfinger“, der sich in der Glasglocke befindet, mit flüssigem Stickstoff gefüllt und anschließend die Druckänderung beobachtet. Das dabei auftretende Verhalten soll dann gemeinsam diskutiert werden.

A2) Leitwert

Zeit in s	$T_1 - P_1$	$T_2 \rightarrow P_2$ in u. bar
10	410	1000
20	270	1000
30	130	1000
40	146	1000
50	115	900
60	100	670
70	68	470
80	57,5	315
90	42	244
100	33	193
.	27,5	165
.	23,0	139
.	18,9	119
.	16	106
.	12,6	94
.	12,0	82,4
.	10,8	72,7
.	9,55	62,0
.	8,55	62,1
.	7,7	57,1
.	7,13	52,1
.	6,6	47,8
.	6,15	45,3
.	5,75	47,2
.	5,4	40,6
.	5,12	38,2
.	4,88	36,2
.	4,68	34,3
.	4,50	32,5
5min	4,34	30,9

J. W

A3	Zeit in s	T in mbar
	15	1000
	30	743
	45	431
		140
		470
		1,63
		0,63
		0,29
		0,161
150		0,100
		0,0715

Zeit in s	T in mbar
175	0,0715
	0,0554
	0,0460
	0,0391
	0,0374
	0,0316
300	

Zeit in s	p in mbar
<del>30</del>	30
5	19,4
10	13,5
	9,4
	6,3
	4,4
	3,0
	2,15
	1,55
	1,12
	0,874

2 Messung im Bereich 20 mbar  
 (was im Bereich 20 mbar  
 (10 mbar))

A4	Zeit in s	p in $10^{-4}$ mbar
	0	1,5
	10	1,24
	20	1,14
		1,07
		1,01
		0,964
		0,923
		0,891
		0,860
		0,834
		0,812
		0,793
		0,774
		0,757
		<del>0,74</del>

Zeit in s	p $10^{-5}$ mbar
20-70	7,43
	7,33
	7,17
	7,05
	6,88
	6,77
	6,65
	6,53
	6,41
	6,29
	6,19
	6,10
	6,0
	5,91
	5,84
	5,73
5 min	5,67

A5 |  $p = 4,5 \cdot 10^{-2}$  mbar 0. Schritt

↑ w

1. 4,22 mbar
2. 8,75 mbar
3. 13,2
4. 17,8
5. 22,2
6. 27,3
7. 31,6
8. 37,1
9. 42,4
10. 46,5
11. 52,7
12. 58,3
13. 63,6
14. 69,0
15. 73,7
16. 79,8
- 17.

Demo versuchs:  $p_1 = 10^{-2}$  Torr

$p_2 = 4 \cdot 10^{-6}$  Torr

↙ ↘

A6   $U_{\text{Drehen}}$ in kV	$P$ in mbar ( $T_2$ )
3,65	1000
2	<del>500</del> 520
1,5	280
1,12	137
0,700	71,4
0,535	35,8
0,45	17,0
0,420	2,0
0,437	4,08
0,38	2,01
0,388	0,987
0,511	0,502
0,64	0,26
0,661	0,20
0,73	0,07
0,99	0,033

$U$ in kV	$P$ in
1,31	$2 \cdot 10^{-2}$
1,46	$2,14 \cdot 10^{-2}$
<del>1,5</del>	<del>2,2</del>
<del>1,6</del>	<del>2,3</del>
2,0	$2 \cdot 10^{-2}$
2,2	2
1,75	2,05
1,5	2,15
1,40	2,06
1,20	2,1
1,10	3,9
1,01	5

} 10<sup>-2</sup>

A7)

$6 \cdot 10^{-6}$  mbar weniger  
 $2,8 \cdot 10^{-2}$  mbar Skala  $\frac{1}{3}$  I  
 $3,3 \cdot 10^{-2}$  mbar mehr

# Vakuum - Auswertung

Benedikt Prunsche, Maximilian Löschner

25. Juni 2010

## 1 Überblick über die Aparatur verschaffen

Zunächst wurde die Aparatur betrachtet, die Lage der einzelnen Druckmessgeräte bestimmt und die Funktion der Ventile etc. kontrolliert. Die Bereuerin riet nochmals zum umsichtigen Umgang mit den teuern Geäten und erklärte die Verwendung der Messgeräte.

## 2 Leitwert eines Metallrohres

Um den Leitwert eines dünnen Metallrohres zu bestimmen tauschten wir zunächst den bereits eingebauten Metall- Welschlauch mit einem solchen Röhrchen aus. Die im Versuch gefundenen Messpunkte sind in Abbildung 1 gezeigt.

In der Vorbereitung wurde bereits die Definition des Leitwerts angegeben:

$$Q_{pV} = L \cdot \Delta p$$

Da in unserem Versuch  $Q_{pV}$  nicht direkt gemessen werden konnte, muss der Leitwert anders bestimmt werden. Dazu betrachtet man das Saugvermögen der verwendeten Pumpe:

$$S = \frac{Q_{pV}}{p}$$

Durch die Verwendung einer Leitung mit bestimmten Leitwert unterscheidete sich das Saugvermögen vor und nach der Leitung. Das effektive Saugvermögen  $S_{eff}$  gibt das Saugvermögen vor der Leitung an, als die Volumenänderung, die tatsächlich auf das zu evakuierende Gefäß wirkt:

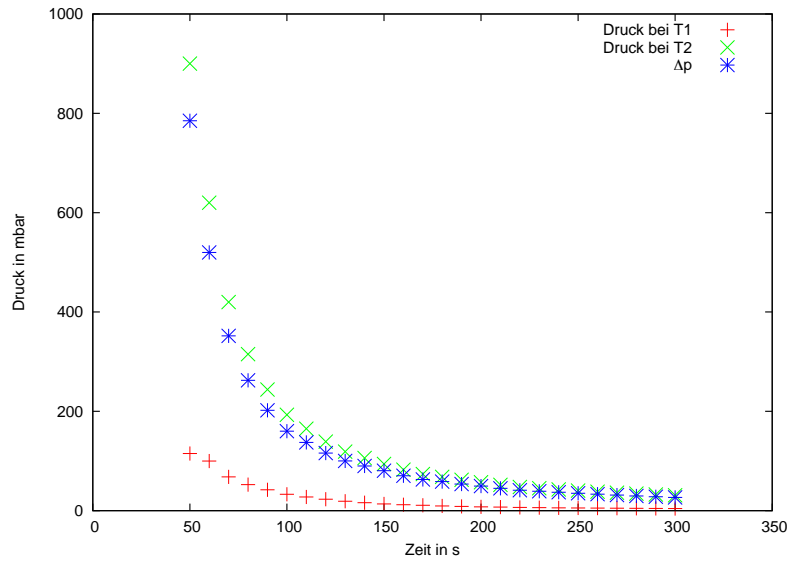
$$S_{eff} = \frac{Q_{pV}}{p_2} \quad (1)$$

Da der pV- Durchfluss an allen Stellen der Aparatur gleich ist, lässt er sich über den Druck hinter der Leitung, also bei der Pumpe bestimmen:

$$Q_{pV} = p_1 \cdot S = L \cdot (p_2 - p_1)$$
$$L = S \cdot \frac{p_1}{p_2 - p_1} \quad (2)$$



Abbildung 1: Druckverläufe bei der Bestimmung des Leitwerts



Aus Gleichung (1) und (2) ergibt sich schließlich:

$$L = \frac{S_{eff} \cdot S}{S - S_{eff}}$$

$S$  und  $S_{eff}$  müssen nun über unsere Messwerte bestimmt werden. Dazu muss man zunächst die Definition des Saugvermögens betrachten:

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

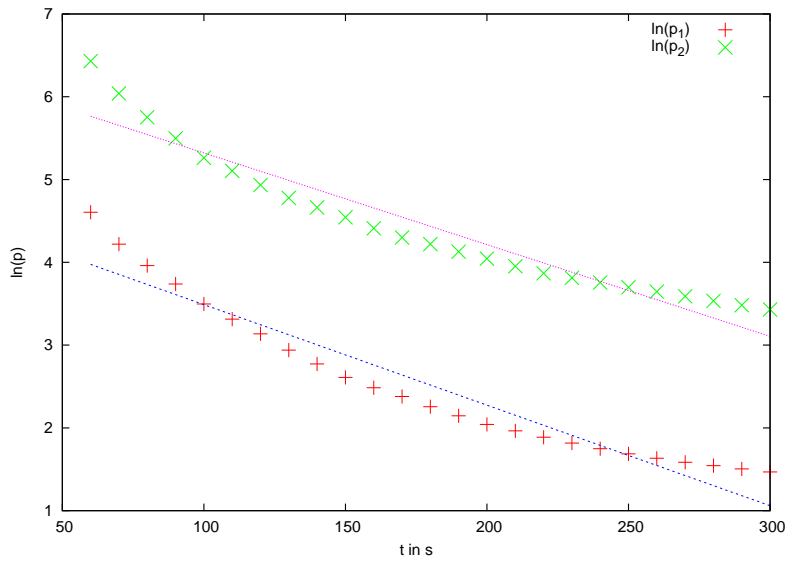
Diese DGL lässt sich durch Separation der Variablen lösen:

$$\frac{S}{V} = -\frac{\dot{p}}{p}$$

$$\int_{t_0}^t \frac{S}{V} dt' = - \int_{t_0}^t \frac{1}{p(t')} dt'$$

$$\frac{S}{V}(t - t_0) = -(\ln p - \ln p_0)$$

Abbildung 2: Bestimmung des Saugvermögens vor und hinter der Leitung



$$\Rightarrow \ln p = \underbrace{-\frac{S}{V}}_{\text{Steigung } m} \cdot t + \frac{S}{V} \cdot t_0 + \ln p_0$$

Es zeigt sich also, dass durch Auftragen von  $\ln p$  über  $t$  eine Gerade entstehen sollte, deren Steigung  $m$  gerade  $-S/V$  entspricht. Über das Verfahren der linearen Regression lässt sich nun diese Steigung aus den Messpunkten bestimmen und in  $S$  umrechnen:

$$S = -m \cdot V$$

Auf diese Weise erhalten wir:

- $m_1 = -0,012146$  ,  $S = 0,126 \frac{l}{s}$
- $m_2 = -0,0110792$  ,  $S_{eff} = 0,115 \frac{l}{s}$

Die Auftragung von  $\ln p$  über  $t$  einschließlich der Regressionsgeraden findet sich in Abbildung 2. Somit ergibt sich schließlich für den Leitwert:

$$L = 1,32 \frac{l}{s}$$

Dieser Wert liegt über dem Erwarteten. Das könnte daran liegen, dass der erwartete lineare Verlauf von  $\ln p$  über  $t$ , wie man im Diagramm zu sehen ist, nur eine Näherung

Tabelle 1: Punktweise Bestimmung des Leitwerts

$p_1$ in mbar	$p_2$ in mbar	Leitwert $L$ in $\frac{l}{s}$
115	900	0,132
100	620	0,137
68	420	0,137
52,5	315	0,138
42	244	0,139
33	193	0,139
27,5	165	0,138
23	139	0,138
18,9	119	0,137
16	106	0,135
13,6	94	0,134
12	82,4	0,134
10,8	73,7	0,135
9,55	68	0,134
8,55	62,1	0,133
7,7	57,1	0,133
7,13	52,1	0,133
6,6	47,8	0,133
6,15	45,3	0,133
5,75	42,8	0,133
5,4	40,4	0,133
5,12	38,3	0,133
4,88	36,2	0,133
4,68	34,3	0,133
4,5	32,5	0,133
4,34	30,9	0,133

darstellt. Man bestimmt  $S$  und  $S_{eff}$  über die Steigung der Ausgleichsgeraden. Diese variiert über verschiedene Druckbereiche jedoch sehr stark, weshalb die Ergebnisse bei Messungen in unterschiedlichen Druckbereichen voneinander abweichen. Da man in der Berechnung für  $L$  auf diese Weise zwei genäherte Wert für die Saugvermögen einsetzt, vervielfacht sich der Fehler offensichtlich. Auch  $S$  und  $S_{eff}$  nur über die ersten sechs Messpunkte bestimmt wird (hier ist der Verlauf etwas steiler), ergibt sich keine "besserer" Wert für  $L$ . Deshalb wurde der Leitwert nochmals mit  $L = S_{eff} \cdot \frac{p_2}{p_2 - p_1}$  und anschließender Mittelung über alle so erhaltenen Werte bestimmt (siehe Tabelle 1).

Damit ergibt sich ein Mittelwert von:

$$\bar{L} = 0,135 \frac{l}{s}$$

In der Vorbereitungshilfe ("Vakuumb Grundlagen") war die sogenannte Knudensformel

gegeben, mit der sich Leitwerte von langen dünnen Röhren berechnen lassen:

$$L = 135 \frac{d^4}{l} \bar{p} + 12,1 \frac{d^3}{l} \cdot \frac{1 + 192d \cdot \bar{p}}{1 + 237d \cdot \bar{p}} \left[ \frac{l}{s} \right]$$

Dabei sind  $d$  der Rohrdurchmesser in cm,  $l$  die Rohrlänge in cm und  $\bar{p} = 0,5 \cdot (p_1 + p_2)$  in mbar. Diese liefert für unseren Messbereich wiederum einen Wert von  $L = 0,44 \frac{l}{s}$ , wobei die Werte für Anfangs- und Endpunkt der Messung stark voneinander abweichen. Dies könnte daran liegen, dass die Gleichung für tiefere Messbereiche ausgelegt ist. Der gefundenen Mittelwert für  $\bar{L}$  liegt zumindest in der gleichen Größenordnung. Eventuell fällt er hier kleiner aus, da das verwendete Metallrohr recht verbogen war.

### 3 Druckabhängiges Saugvermögen der Drehschieberpumpe

Ganz analog zur vorherigen Aufgabe wurde hier der Druck an T1 über einen längeren Zeitraum gemessen, um das Saugvermögen der Drehschieberpumpe zu bestimmen. Hier ergibt sich natürlich ein wesentlich größerer Wert als in der vorherigen Aufgabe, da statt des dünnen Röhrchens ein Metall- Wellschlauch mit großem Leitwert die Pumpe mit dem Rezipienten verbindet. Die Messwert wurden hier in der Form  $\ln p$  über  $t$  aufgetragen um über die Steigung einen Wert für  $S$  zu erhalten, wobei die ersten vier Messwerte aus dem Protokoll vernachlässigt wurden. Diese lagen offensichtlich außerhalb des Messbereichs von T2, da das Messgerät nicht für Drücke über  $1000\text{mbar}$  konzipiert ist.

Zu bemerken ist noch, dass eine zweite Messreihe durchgeführt wurde, um die Messpunktdichte im näherungsweise linearen Arbeitsbereich der Pumpe zu erhöhen und so einen "besseren" Wert für die Steigung zu erhalten. Der Fit wurde dementsprechend nur an die Messpunkte der zweiten Messreihe angepasst. Man kann in Abbildung 3 gut den erwarteten linearen Verlauf erkennen.

Es ergibt sich schließlich für die Steigung und damit  $S$ :

$$m = -0,0719408 \cdot \frac{1}{s}$$

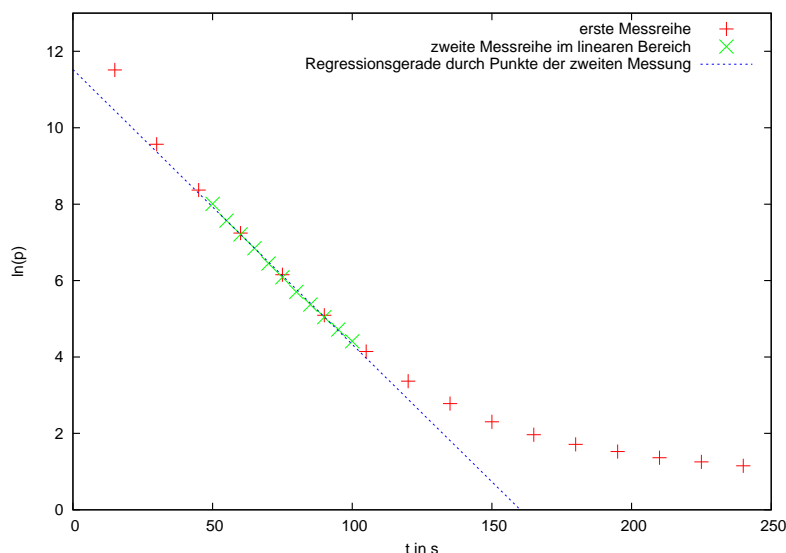
$$S = -m \cdot V = 0,747 \frac{l}{s} = 2,69 \frac{m^3}{h}$$

Dieser Wert weicht lediglich um 7% vom angegebenen Wert von  $2,5 \frac{m^3}{h}$  ab. Der Wert stellt also ein gutes Ergebnis dar. Er liegt wahrscheinlich etwas über dem angegebenen Wert, da die Pumpe in höheren Druckbereichen mehr Luft abpumpen kann und dementsprechend ein größeres Saugvermögen aufweist, als bei einer Mittelung über einen großen Druckbereich.

### 4 Saugvermögen der Turbomolekularpumpe

In diesem Versuch sollten wir nun das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe bestimmen. Hierzu wurde zunächst mit Hilfe der Drehschieberpumpe ein Vorvakuum von ca.

Abbildung 3: Messreihen mit Regressionsgerade zur Bestimmung von  $S$  der Drehschieberpumpe



$8 \cdot 10^{-2}$  mbar geschaffen, daraufhin wurde die Turbomolekularpumpe gestartet. Die Messung begann dann nach der Beschleunigungsphase deren Ende wir am Gerät ablesen konnten. Hierzu lasen wir 5min lang alle 10s den angezeigten Druck vom Display der Iovanic-Messröhre ab. Analog zu Aufgabe 3 lösten wir nun die DGL 3 und stellten diese anschließend so um, dass wir das Saugvermögen als Steigung einzeichnen konnten 4.

$$S = \dot{V} = \left( \frac{n\dot{RT}}{p} \right) = nRT \cdot \left( \frac{\dot{1}}{p} \right) = -\frac{nRT}{p} \cdot \frac{\dot{p}}{p} = -V \cdot \frac{\dot{p}}{p} \quad (3)$$

$$-\frac{t}{V} \cdot S + \ln p_0 = \ln p \quad (4)$$

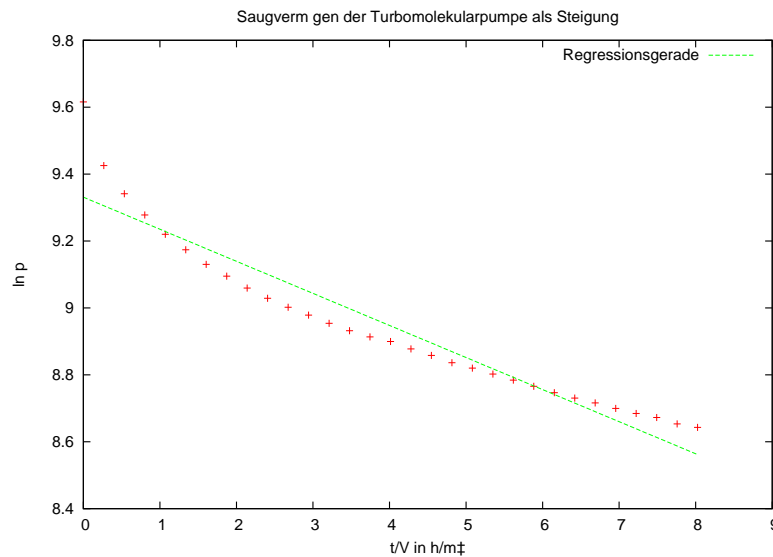
Nun plotteten wir die Messreihe mit Hilfe von Gnuplot und erhielten so die Steigung  $a$  der Ausgleichsgeraden die gleichzeitig das Saugvermögen der TMP darstellt.

Wir erhielten den folgenden Wert:

$$S = -a = (0.0958662 \pm 0.005656) \frac{m^3}{h}$$

In der Vorbereitungsmappe ist für das Saugvermögen der TMP ein Wert von  $\geq 30 \frac{l}{s}$  gegeben - dies entspräche einem Wert von  $S_{lit} \approx 108 \frac{m^3}{h}$  also ca. dem 1000 fachen unseres Wertes. Diese Abweichung können wir uns nur dadurch erklären, dass das Saugvermögen

Abbildung 4: Saugvermögen der TMP als Steigung



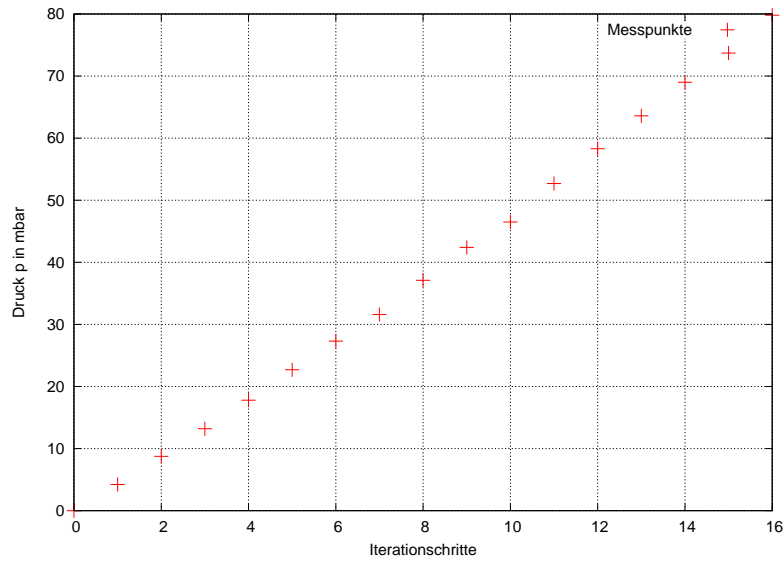
meistens für Atmosphärendruck angegeben wird und bei wesentlich höheren Drücken deshalb auch ein wesentlich geringeres Saugvermögen vorliegt. Eine weitere Fehlerquelle könnte die Turbomolekularpumpe selbst sein, die höchst empfindlich auf eine unpassende Benutzung reagiert und deshalb mittlerweile eventuell nicht mehr ihre volle Leistung erreicht. Die Messapparatur selbst kann als Fehlerquelle praktisch ausgeschlossen werden, da die Werte aus anderen Versuchen (z. B. aus dem Kalibrierungsverfahren) gut mit den Erwartungen übereinstimmen.

## 5 Einstufiges, statisches Kalibrierungsverfahren

In diesem Versuchsteil wurde der Rezipient bei geschlossenem Ventil V3 mithilfe der beiden Pumpen auf einen Druck von  $p < 10^{-4} \text{ mbar}$  eingestellt und V2 geschlossen. Anschließend wurde das Referenzvolumen belüftet, das Belüftungsventil geschlossen und V3 geöffnet, so dass ein Druckausgleich zwischen Rezipient und Referenzvolumen stattfinden konnte. Der Ausgleichsdruck wurde nun bei T3 gemessen. Dieses Belüftung wurde solange wiederholt, bis sich ein Druck von ca.  $80 \text{ mbar}$  eingestellt hatte. Der Druckverlauf ist in Abbildung 5 dargestellt.

Laut unserer Betreuerin sollten wir in diesem Versuch mithilfe der Messwerte eine Bestimmung des Referenzvolumens durchführen. Anders als in der Vorbereitung besprochen betrachten wir hierzu die ausgetauschten Stoffmengen innerhalb der Apparatur. Die Stoffmenge innerhalb der Volumina im Iterationsschritt  $i$  berechnet sich wie folgt (wobei

Abbildung 5: Druckverlauf beim Kalibrierungsverfahren



die Stoffmenge  $n_{Ref}$  im Referenzvolumen nach einer Belüftung immer die gleiche ist):

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

Im ersten Iterationsschritt findet durch den Druckausgleich ein Teilchenaustausch zwischen Rezipient und Referenzvolumen statt:

$$n_{ges} = n(0) + n_{Ref} = \frac{p(0) \cdot V_{RP}}{R \cdot T} + \frac{p_{Luft} \cdot V_{Ref}}{R \cdot T}$$

Beim anschließenden Verschluss von V3 teilt man die neue Stoffmenge  $n_{ges}$  wieder auf, jedoch kann  $V_{Ref}$  gegenüber  $V_{RP}$  vernachlässigt werden:

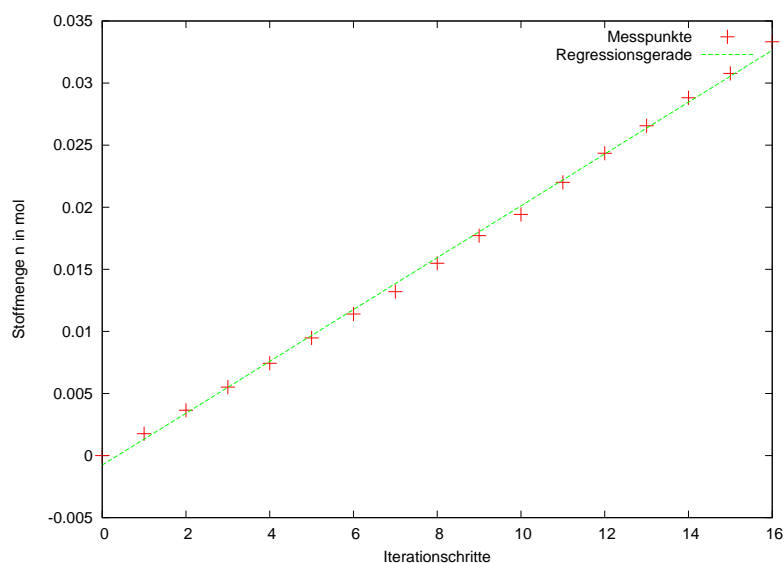
$$n_{RP} = \frac{V_{RP}}{V_{RP} + V_{Ref}} \cdot n_{ges} \approx n_{ges}$$

Im nächsten Schritt wird der Stoffmenge im Rezipienten wieder  $n_{Ref}$  zugefügt und so fort. Damit ergibt sich schließlich:

$$n_{ges}(i) = n(0) + i \cdot \frac{p_{Luft} V_{Ref}}{RT}$$

Es sollte sich durch Auftragen der Stoffmenge über der Schrittzahl  $i$  eine Gerade ergeben, wobei das Volumen  $V_{Ref}$  in die Steigung der Geraden eingeht. Mithilfe von Gnuplot

Abbildung 6: Iterationszuwachs und Regressionsgerade zur Bestimmung von  $V_{Ref}$



haben wir nun die umgerechneten Messwerte geplottet und mithilfe des implementierten linearen Regressionsverfahren die Steigung  $m$  der Geraden bestimmt. Das so entstandene Diagramm ist in Abbildung 6 zu sehen. Für  $m$  und damit  $V_{Ref}$  ergab sich so:

$$m = 0,00208771 \cdot mol$$

$$V_{Ref} = \frac{m \cdot RT}{p_{Luft}} = \frac{m \cdot 8,314 \frac{J}{K \cdot mol} \cdot 295K}{101325Pa} = 0,050l$$

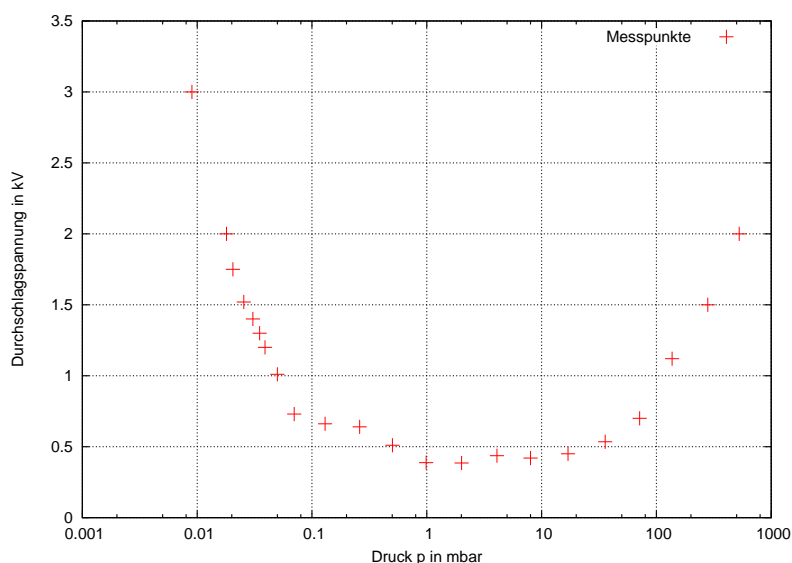
Dieser Wert weicht um 17% vom angegebenen Wert von  $V_{Ref} = 0,043l$  ab, liegt aber zumindest in der gleichen Größenordnung. Man muss bei dieser Abweichung jedoch beachten, in welcher Größenordnung hier gearbeitet wird. Die gesamte Apparatur hat schließlich ein Volumen von  $10,384l$  wodurch klar wird, dass die Bestimmung des vergleichsweise kleinen Referenzvolumens auf  $10^{-2}l$  genau auf sehr gut geeichte Messgeräte hindeutet.

## 6 Elektrische Durchschlagfestigkeit im Vakuum

In dieser Aufgabe sollte nun die Durchschlagfestigkeit bei verschiedenen Drücken bestimmt werden. Am Anfang stellten wir den geforderten Druck ein und veränderten die Spannung so lange, bis eine kontinuierliche Entladung zu erkennen war. Dann hielten wir



Abbildung 7: Messergebnisse Durchschlagspannung über Druck



die eingestellte Spannung und den eingestellten Druck fest. Bei sinkenden Drücken und dem Übergang zur Glimmentladung hatten wir jedoch große Probleme überhaupt noch Entladungen zu erkennen, da der Versuchsraum leider sehr gut beleuchtet war und wir auch keine Möglichkeit zur Abdunklung hatten. Deshalb versuchten wir nun nicht mehr den Zeitpunkt der Entladung optisch zu bestimmen sondern veränderten die Spannung so lange, bis wir auf ein Spannungsplateau erreicht hatten. Dies kam daher, dass falls die zum Durchschlag nötige Spannung überschritten wurde sie durch den Durchschlag abgebaut wurde und die Spannung daher nicht über diesen kritischen Wert gesteigert werden konnte. Nun trugen wir die gesamten Messergebnisse mit Hilfe von Gnuplot auf und erhielten genau die erwartete Kurve. Die benötigte Spannung fällt solange ab bis die freie Weglänge der Atome im Rezipienten genau dem Abstand von Kathode zu Anode entsprach - wurde die freie Weglänge größer so musste auch die Spannung wieder zunehmen. Des Weiteren war auch der Unterschied zwischen Funken- (klarer Lichtbogen) und Glimmentladung (eher diffuses Leuchten) sehr schön zu erkennen. Die Folgen für die Industrie wurden hierbei bereits in der Versuchsvorbereitung besprochen.

## 7 Aufdampfen einer Indium-Schicht

In dieser letzten Aufgabe sollte nun eine Indium-Schicht bei verschiedenen Drücken im Rezipienten aufgedampft werden. Hierbei sollte v.a. die Randschärfe und die benötigte Heizleistung beobachtet werden. Wie bereits in der Versuchsvorbereitung erwähnt, hängt

Tabelle 2: Druckänderung im Rezipienten nach Befüllung der Kühlfingers

$p_{anfang}$	$1 \cdot 10^{-3} Torr$
$p_{end}$	$4 \cdot 10^{-4} Torr$
$\Delta p$	$0,6 \cdot 10^{-3} Torr = 4,5 \cdot 10^{-4} mbar$

die Wärmeleitung in einem gewissen Druckbereich (in dem wir uns hier befanden) vom Druck im Rezipienten ab, daher war zu erwarten, dass die benötigte Heizleistung bei höherem Strom zunimmt. Da leider das Messgerät völlig falsch geeicht war können wir nur qualitative Aussagen über die benötigte Heizleistung treffen, diese stimmen aber vollkommen mit dem erwarteten überein: bei höheren Drücken war ein höherer Strom von Nöten. Auch die Randschärfe der Flecken nahm mit größerem Druck ab, da der Indiumdampf durch Stöße mit Teilchen im Rezipienten abgelenkt und auch ggf. Oxidiert wurde. Abschließend blieb festzustellen, dass bei geringeren Drücken ein wesentlich besseres Ergebnis zu erreichen war - ab Drücken größer als  $1 \cdot 10^{-2} mbar$  war es uns praktisch nicht mehr möglich noch einen sauberen Kreis aufzudampfen.

## 8 Abbau und Reinigung der Apparatur

Nach dem Fertigstellen der Messreihen wurde die Apparatur wie verlangt vom Indiumverschmutzungen gereinigt und für die nachfolgenden Gruppen vorbereitet.

## 9 Demonstrationsversuch: Kühlfinger

In diesem Versuch wurde an einer alten Vakuumanlage ein in den Rezipienten eingelassener Kühlfinger mit flüssigem Stickstoff befüllt. Sowohl Kondensation von Teilchen an der kalten Oberfläche als auch das Boyle-Mariott'sche-Gesetz sprechen für eine Druckabnahme im Rezipienten nach Verringerung der Temperatur. Dieses Ergebnis konnten wir gut beobachten. Der Druck hat sich um  $4,5 \cdot 10^{-4} mbar$  verändert - das entsprach einer Änderung um ca. 60%.