

Die Nutzung von Vakuumpumpen für unterschiedliche Anwendungen aufgrund ihrer Funktionsweise, sowie die Mechanik der Evakuierung ¹

P. Nisblé und D. Bubeck

Abstract: The abstract should preferentially be in English. Here we explain in a few lines
(i) what was done, and (ii) what the results were.

Als besondere Auswertung testiert: Datum, Unterschrift:

¹ Versuch F71, ausgeführt am 24.4.17, Betreuer: Frederik Arand, kurze besondere Auswertung

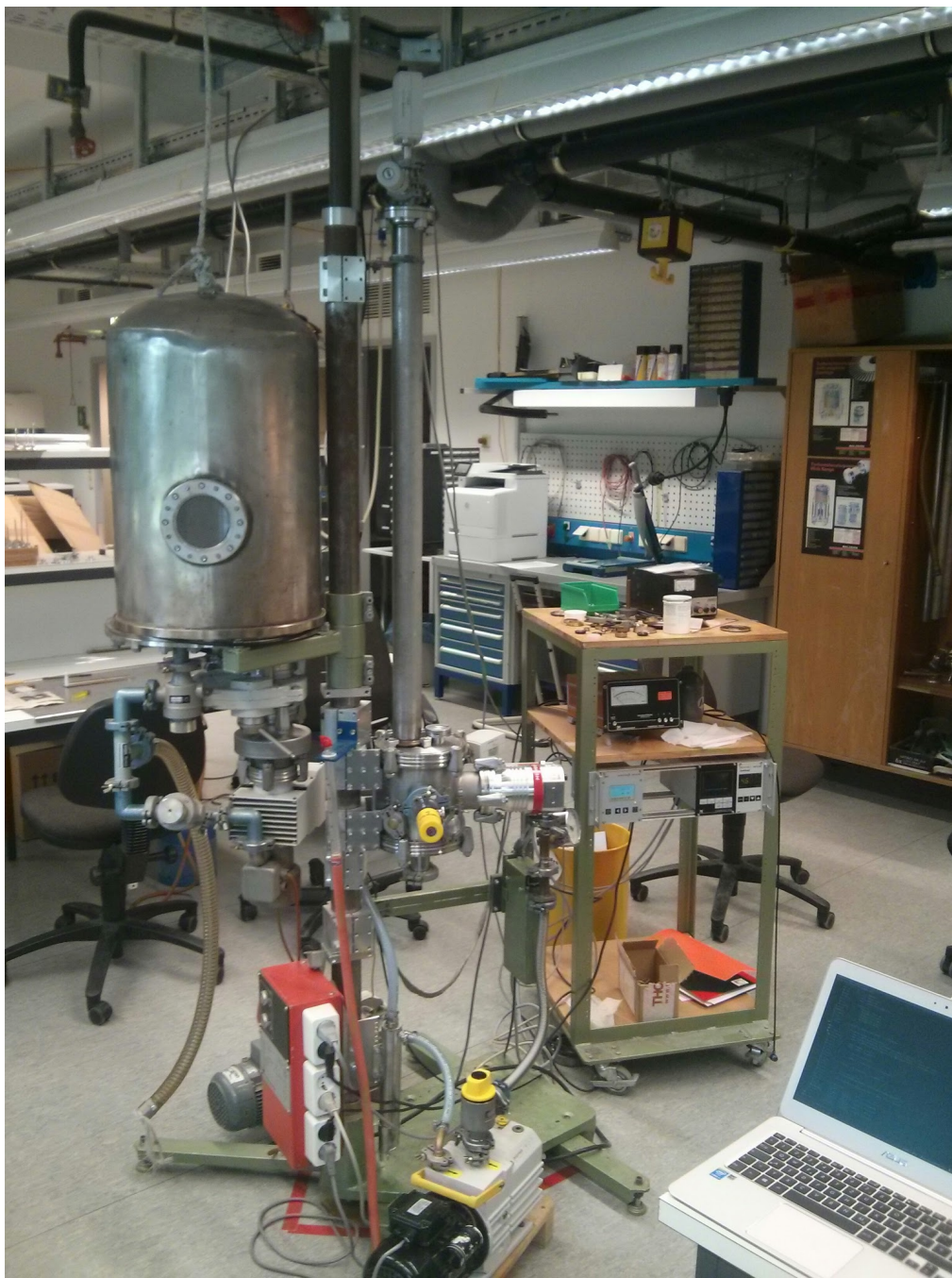


Abbildung 1: Apparatur die für den Versuch genutzt wird

1 Einleitung

Diese Reihe von Versuchen dienen zur Orientierung und Nutzung von Apparaturen die Evakuierung benötigen, sowie zur Verständnis der Vakuumtechnik und auch deren Grenzen. In geringem Maße auch der Sensibilisierung für zuvor unbekannte Fehlerquellen die in der Vakuumtechnik zu Fehlern führen können.

Der komplette Versuch ist getrennt in 6 Teilversuche: [1]

1. Funktionsweise einer Drehschieberpumpe

Beobachtung einer Drehschieberpumpe in Betrieb und Bestimmung des maximal erreichbaren Vakuums (nach Abb. 2)

2. Abpumpen kondensierbarer Dämpfe

Beobachtung der selben Drehschieberpumpe unter Abpumpen kondensierbarer Dämpfe und dem daraus resultierenden maximalen Vakuum (nach Abb. 3)

3. Funktionsweise von Molekular- und Turbomolekularpumpe (TMP)

Beobachtung einer Hybridpumpe mit Turbo- und Gaedestufe in Betrieb (nach Abb. 4)

4. Saugvermögen der TMP

Messung des Saugvermögens der TMP mithilfe einer Kapillaren (nach Abb. 5)

5. Bestimmung des Leitwerts von Rohr und Blende

(nach Abb. 9)

6. Lecksuche

mit Teslatransformator und Heliumlecksucher (nach Abb. 14)

2 Versuchsdurchführung

2.1 Inbetriebnahme der Drehschieberpumpe

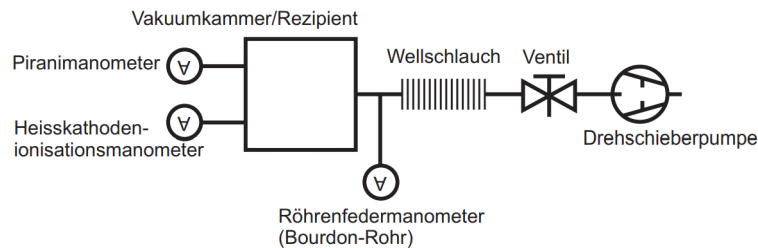


Abbildung 2: generalisierter Aufbau zur Beobachtung der Funktionsweise einer Drehschieberpumpe

Es hat sich ein Enddruck der Drehschieberpumpe bei

$$(1.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-1} \text{ mbar}$$

Aufgrund des zu großen Enddrucks und der darauffolgenden Lecksuche, welche negativ war, wird angenommen, dass sich noch Wasser im System befunden hat. (Versuchsteil 2 wurde vorgezogen)

2.2 Abpumpen kondensierbarer Dämpfe

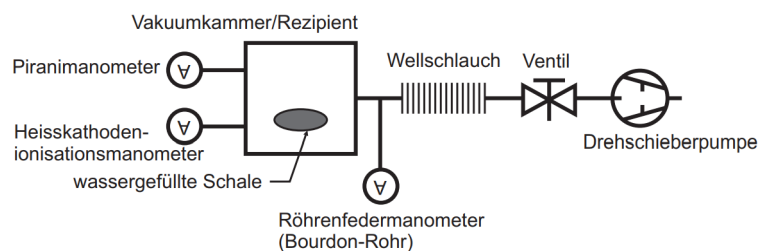


Abbildung 3: Vakuum-Blockschaltbild zum Versuch des Abpumpens kondensierbarer Dämpfe

Beobachtung:

- Wasser beginnt bei niedrigem Druck an zu siedens
→ Schalte Gasballast zu um Kondensation des Wasserdampfes zu verhindern
- Wasser gefriert bei $\sim 5.8 \text{ mbar}$

2.3 Inbetriebnahme einer Turbomolekularpumpe

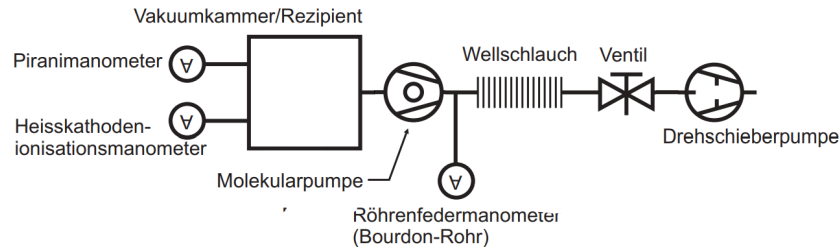


Abbildung 4: Aufbau zur Beobachtung der Funktionsweise von Molekular- und Turbomolekularpumpe

Die Turbomolekularpumpe wird nun nach [1], wie in Aufbau 4 hinzugeschaltet. Die Apparatur wurde eingeschaltet und über Nacht laufen gelassen.

Über Nacht hat sich der Druck im Rezipienten auf $(1.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$ eingestellt. (gemessen mit dem Dual-Gauge-Messgerät)

Die Frequenz der Turbomolekularpumpe beträgt $f = 1.5 \text{ kHz}$

2.4 Saugvermögen der TMP

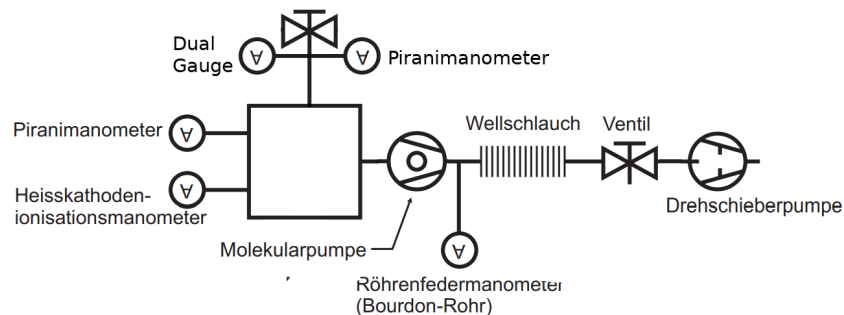


Abbildung 5: Bestimmung des Saugvermögens einer TMP

Es wird nun eine Kapillarröhre an den Rezipienten angeflanscht, diese hat ein Fassungsvermögen von

Mithilfe des Binärventils wird nun der gewünschte Druck eingestellt. Ein Seifentropfen wird in die Kapillare eingegeben und die Dauer gemessen, die der Tropfen benötigt um ein gewünschtes Volumen in der Kapillare zu überschreiten

V / ml	p / mbar	t / s	V / ml
$(1.00 \pm 0) \times 10^{-1}$	$(9.60 \pm 0.10) \times 10^{-6}$	$(3.31 \pm 0) \times 10^1$	$(3.00 \pm 0.10) \times 10^{-2}$
$(2.00 \pm 0) \times 10^{-1}$	$(2.90 \pm 0.10) \times 10^{-5}$	$(2.06 \pm 0) \times 10^1$	$(6.00 \pm 0.20) \times 10^{-2}$
$(2.00 \pm 0) \times 10^{-1}$	$(1.10 \pm 0.10) \times 10^{-4}$	$(5.73 \pm 0) \times 10^0$	$(6.00 \pm 0.20) \times 10^{-2}$
$(5.00 \pm 0) \times 10^{-1}$	$(2.90 \pm 0.10) \times 10^{-4}$	$(1.25 \pm 0) \times 10^1$	$(3.00 \pm 0.10) \times 10^{-1}$
$(1.00 \pm 0) \times 10^0$	$(1.10 \pm 0.10) \times 10^{-3}$	$(4.54 \pm 0) \times 10^0$	$(4.00 \pm 0.10) \times 10^{-1}$

Abbildung 6: Messreihe 1.1 - Saugvermögen bei Kapillaren

Die Kapillare wurde nun durch eine Andere ersetzt, diese besitzt ein Fassungsvermögen von und es wurden folgende Messungen gemacht:

Es erfolgt eine weitere Kapillare mit dem Fassungsvermögen von ml , mit den folgenden Messungen:

Zuletzt wird ein Kolben angebracht:

- Gesamtvolumen: $(35 \pm 3) ml$ (Schätzung)
- Masse: $m = 44.67 g$
- Skalenteilung: $0.5 ml$
- Durchmesser: $d = (15.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} m$

p / mbar	t / s	V / ml
$(1.10 \pm 0.10) \times 10^{-3}$	$(5.45 \pm 0) \times 10^1$	$(5.00 \pm 0.50) \times 10^0$
$(2.90 \pm 0.10) \times 10^{-4}$	$(6.10 \pm 0) \times 10^1$	$(2.00 \pm 0.50) \times 10^0$
$(3.10 \pm 0.10) \times 10^{-3}$	$(2.40 \pm 0) \times 10^1$	$(5.50 \pm 0.50) \times 10^0$
$(1.00 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(1.71 \pm 0) \times 10^1$	$(1.00 \pm 0.05) \times 10^1$
$(3.40 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(1.13 \pm 0) \times 10^1$	$(1.50 \pm 0.05) \times 10^1$

Abbildung 7: Messreihe 1.2 - Saugvermögen bei Kolben

(Diese Messungen geschehen bei Äußerem Normaldruck) Anschließend wird langsam belüftet um die TMP nicht zu überhitzen

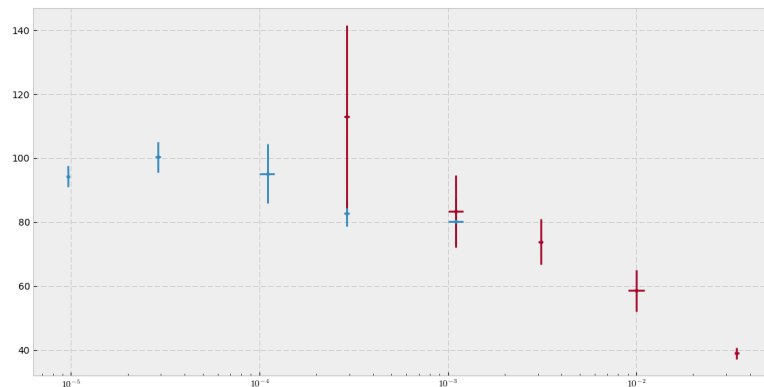


Abbildung 8: Saugvermögen der TMP inklusive linearem Fit

2.5 Leitwert von Rohr und Blende

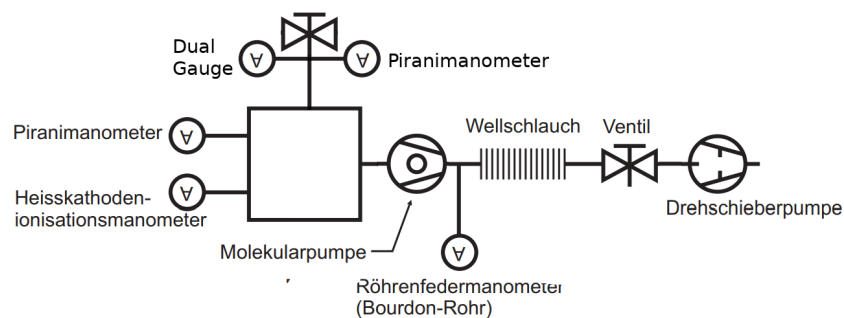


Abbildung 9: Aufbau zur Bestimmung des Leitwerts von Rohr und Blende

Der Rezipient wird nun leer gepumpt und anschließend mittels Binärventil der gewünschte Druck eingestellt. Bei verschiedenen Rohren und Blenden in der Führung wird der Druck jeweils oben am Führrohr und unten am Rezipienten gemessen (mithilfe der Dual-Gauge)

- Maße Blende:

$$d = (4.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$h = (5.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

- Maße Rohr:

$$d = (12.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$h = (1.00 \pm 0.05) \text{ m}$$

- Maße Halterrohr:

$$d = (52.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$h = (1.00 \pm 0.05) \text{ m}$$

p_o / mbar	p_u / mbar
$(5.80 \pm 0.10) \times 10^{-3}$	$(5.40 \pm 0.10) \times 10^{-5}$
$(2.40 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(9.70 \pm 0.10) \times 10^{-5}$
$(4.40 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(1.70 \pm 0.10) \times 10^{-4}$
$(7.10 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(3.30 \pm 0.10) \times 10^{-4}$
$(9.50 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(5.60 \pm 0.10) \times 10^{-4}$
$(1.30 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$(1.10 \pm 0.10) \times 10^{-3}$
$(1.80 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$(2.00 \pm 0.10) \times 10^{-3}$
$(2.20 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$(3.30 \pm 0.10) \times 10^{-3}$
$(2.60 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$(5.70 \pm 0.10) \times 10^{-3}$
$(3.20 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$(1.00 \pm 0.10) \times 10^{-2}$

Abbildung 10: Messreihe 2.1: Rohr und Blende

Nach der Messung wird die Pumpe belüftet. Das Halterrohr abgeschraubt und die Blende entfernt. Nach erneutem anbringen des Halterohrs wird erneut eine Druckmessung durchgeführt.

p_o / mbar	p_u / mbar
$(5.90 \pm 0.10) \times 10^{-3}$	$(5.50 \pm 0.10) \times 10^{-5}$
$(2.20 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(1.00 \pm 0.10) \times 10^{-4}$
$(4.20 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(1.80 \pm 0.10) \times 10^{-4}$
$(6.60 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(3.40 \pm 0.10) \times 10^{-4}$
$(8.70 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(5.50 \pm 0.10) \times 10^{-4}$
$(1.20 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$(1.00 \pm 0.10) \times 10^{-3}$
$(1.50 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$(1.80 \pm 0.10) \times 10^{-3}$
$(2.00 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$(3.20 \pm 0.10) \times 10^{-3}$
$(2.40 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$(5.60 \pm 0.10) \times 10^{-3}$
$(3.10 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$(1.10 \pm 0.10) \times 10^{-2}$

Abbildung 11: Messreihe 2.2: Rohr

Die Pumpe wird belüftet und als letzte Messreihe lediglich die Blende in das Halterrohr montiert. Der Rezipient wird erneut evakuiert und eine erneute Druckmessung durchgeführt.

p_o / mbar	p_u / mbar
$(9.40 \pm 0.10) \times 10^{-4}$	$(5.60 \pm 0.10) \times 10^{-5}$
$(3.20 \pm 0.10) \times 10^{-3}$	$(9.80 \pm 0.10) \times 10^{-5}$
$(7.30 \pm 0.10) \times 10^{-3}$	$(1.80 \pm 0.10) \times 10^{-4}$
$(1.40 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(3.20 \pm 0.10) \times 10^{-4}$
$(2.40 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(5.60 \pm 0.10) \times 10^{-4}$
$(4.10 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(1.00 \pm 0.10) \times 10^{-3}$
$(6.20 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(1.90 \pm 0.10) \times 10^{-3}$
$(9.10 \pm 0.10) \times 10^{-2}$	$(3.30 \pm 0.10) \times 10^{-3}$
$(1.20 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$(5.40 \pm 0.10) \times 10^{-3}$
$(1.70 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$(1.00 \pm 0.10) \times 10^{-2}$

Abbildung 12: Messreihe 2.3: Blende

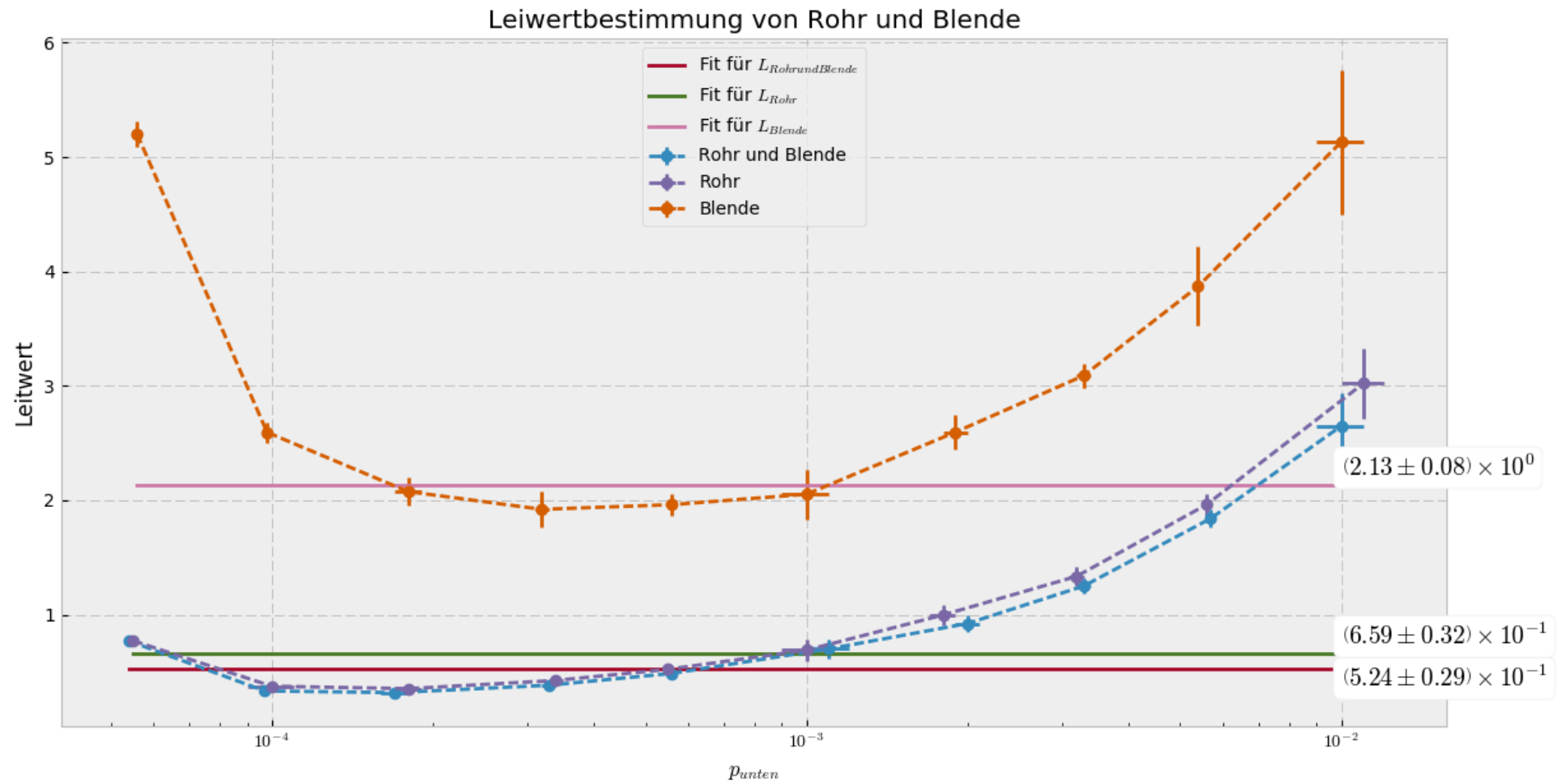


Abbildung 13: Leitwertbestimmung anhand des Diagramms

2.6 Lecksuche

Zunächst wird der Aufbau aus Versuchsteilen 4 & 5 benutzt

→ Über Nacht hat sich ein Druck von $(3.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-1} \text{ mbar}$ eingestellt.

Die Pumpen werden erneut eingeschaltet. Es wird ein aus Glas geschmolzenes Leck aus dem Auslass des Ventils am Rezipienten angebracht.

→ Mit dem Leck stellt sich ein Druck von ein.

Die Strahlenkanone wurde dann auf die Glaskapillare gehalten.

→ Der Luftstrom war durch die Gasentladung sehr deutlich zu sehen.

Für die Gegenstromlecksuche wurde folgender Aufbau verwendet:

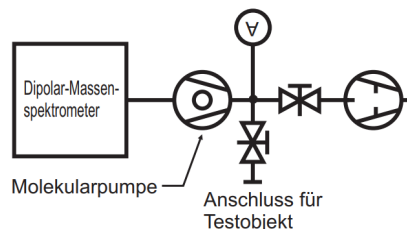


Abbildung 14: Prinzipschaltbild des im Versuchsteil 6 eingesetzten Gegenstromlecksuchers

Mittels einer Heliumgasflasche wurde an verschiedenen Stellen Helium auf die Apparatur gegeben und der Ausschlag am Spektrometer beobachtet.

→ Es konnte eine poröse Schweißnaht ausfindig gemacht werden, die offensichtlich für das Leck im Aufbau verantwortlich ist.

3 Ergebnisse

3.1 Inbetriebnahme der Drehschieberpumpe

Nach Inbetriebnahme der Drehschieberpumpe wurde der Druck im Rezipienten mittels des Dual-Gauge-Druckmessgerätes verfolgt.

Nach kurzer Laufzeit der Pumpe wird die Druckveränderung mitverfolgt, dabei fällt der Druck innerhalb von auf ab und verweilt dort für weitere Minuten deshalb schätzen wir, dass der Enddruck bis auf

$$p = (\pm) \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$$

(Fehler ist Schätzung) fallen wird, auch wenn wir die Pumpe über mehrere Stunden hinweg arbeiten lassen könnten.

Das Vakuum kann mit einer Drehschieberpumpe nicht beliebig gut werden, da die Drehschieberpumpe bei einem gewissen Druck das Gas nicht mehr genügend komprimieren kann, was zum Ausstoßen des Gases nötig wäre. Es stellt sich aber ein Gleichgewicht bei einem bestimmten Druck ein, sodass die Menge an Gas, die von der Pumpe nach außen gefördert wird, gerade der Menge Gas entspricht, die durch Lecks, oder Pseudolecks in den Rezipienten eintritt.

3.2 Abpumpen kondensierbarer Dämpfe

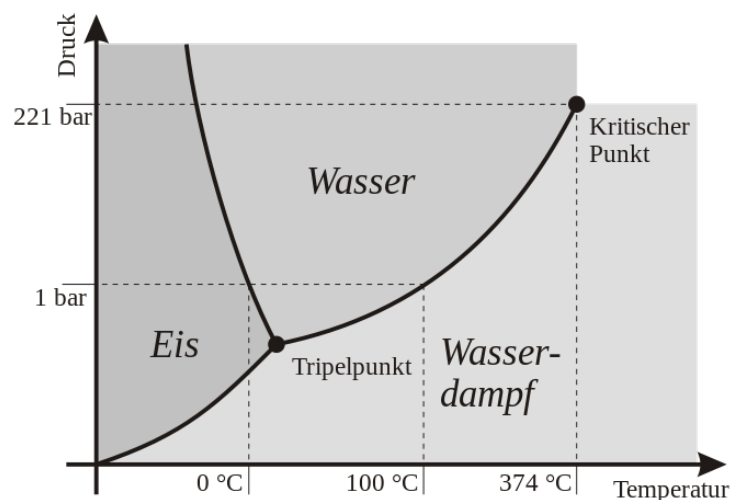


Abbildung 15: Phasendiagramm von Wasser (nach [2])

Im zweiten Teil des Versuchs konnten wir beobachten, wie Wasser verschiedene Zustände durchläuft:

- Das Wasser startet bei Normaldruck und Raumtemperatur
- Der Druck im Rezipienten fällt zu Beginn sehr stark, da die Pumpe eine große Gasmenge fördern kann. Die Temperatur des Wassers sollte dabei konstant bleiben. Ab einem Druck um 11 mbar sollte das Wasser zu kochen beginnen.
- Durch das siedende Wasser und den entstehenden Wasserdampf kann die Drehschieberpumpe nicht weiter arbeiten
→ Das Gasballastventil wird geöffnet
- Die Pumpe kann nun weiter arbeiten und der Zustand des Wassers wandert entlang der Dampfdruckkurve
- bei etwa (5.8 ± 0.1) mbar, gefriert das Wasser, da nun der Tripelpunkt überschritten ist (Literaturwert: 6 mbar $\rightarrow 2\sigma$)

3.3 Inbetriebnahme einer TMP

Die TMP erreichte (nach einer Nacht) einen Druck von was den durch die Drehschieberpumpe erreichten Druck um Größenordnungen absenkt, was solange dauert da Gase im Rezipienten desorbieren (Pseudoleck)

3.4 Saugvermögen der TMP

Nach dem Anbringen der Kapillare stellt sich ein Gleichgewicht ein, das durch die Kapillare eingesaugte Luftvolumen V_6 entspricht dann genau dem im Reipienten abgesaugten Volumen V_R (pro Zeit):

$$pV = nRT \quad (1)$$

(Druck p , Volumen V , Stoffmenge n , Gaskonstante R und Temperatur T)

$$\frac{p_{\text{außen}} V}{t} = \frac{p_{\text{innen}} V_R}{t} \quad (2)$$

$$\Leftrightarrow S = \frac{V_R}{t} = \frac{V_R}{t} \cdot \frac{p_{\text{außen}}}{p_{\text{innen}}} \quad (3)$$

$$\Delta S = \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 \left(\frac{\Delta p_{\text{innen}}}{p_{\text{innen}}}\right)^2 \cdot S} \quad (4)$$

Auf den Fehler von $p_{\text{außen}}$ wurde verzichtet und es wurde der Literaturwert von 1013 hPa verwendet. Die errechneten Wee für das Saugvermögen sind in Tabelle zu finden, die Daten wurden zudem in Abbildung aufgetragen und ein linearer Fit durchgeführt

Abbildung 16: Tabelle der errechnete Werte des Saugvermögens

Abbildung 17: Messwerte des Saugvermögens einer TMP

$$S = (\pm) \frac{l}{s}$$

- Deutlich zu sehen ist, dass die mit dem Kolben gemessenen Werte systematisch zu hoch liegen. Dies liegt daran, dass der Kolben durch sein eigenes Gewicht noch zusätzlich Luft von außen hereindrückt.
- Es war zudem ein recht poröser Schlauch am Kolben angebracht, der für ein größeres Leck sorgt und somit die Messung verfälscht.

- Fehler bei den Kapillaren können dadurch zustande gekommen sein, dass die Kapillare in ihrer Halterung leicht schräg war und nicht senkrecht. Der Tropfer erfuhr daher eine Hangabtriebskraft weg vom Rezipienten

Wie könnte man die Genauigkeit der Messung erhöhen?

Zu Beginn bei sehr kleinem eingesaugten Volumen könnten noch dünnere Kapillare die zeitliche Genauigkeit erhöhen, da der Tropfen dann mit höherer Geschwindigkeit durch die Kapillare laufen würde.

3.5 Leitwert von Rohr und Blende

Bei verschiedenen eingebauten Teilen (Rohr, Blende) wurden die Druckdifferenzen oberhalb und unterhalb des Bauteils gemessen um den Leitwert des Aufbaus zu bestimmen. Mit dem in Teil 3 bestimmten Saugvermögen lässt sich über die Druckdifferenz δp auf den Leitwert L schließen, mittels:

$$L = \frac{Q}{\delta p} \quad (5)$$

(Saugleistung Q)

$$\text{mit } Q = S \cdot p_{\text{unten}} \quad (6)$$

$$\Rightarrow L = \frac{S \cdot p_{\text{unten}}}{\delta p} \quad (7)$$

$$\delta p = p_{\text{oben}} - p_{\text{unten}} \quad (8)$$

mit dem Fehler:

$$\Delta(\delta p) = \sqrt{\Delta p_{\text{oben}}^2 + \Delta p_{\text{unten}}^2} \quad (9)$$

$$\Delta L = \sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_{\text{unten}}}{p_{\text{unten}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\delta p)}{\delta p}\right)^2} \cdot L \quad (10)$$

Die Berechnung für die 3 Konfigurationen aus Rohr und Blende sind in den Tabellen zu finden

Abbildung 18

Abbildung 19

Abbildung 20

Die Daten der Leitwerte sind in den Diagrammen aufgetragen. zu sehen ist bei allen 3 Konfigurationen ein Anstieg des Leitwertes hin zu kleinen Drücken und hin zu sehr großen Drücken. Dies hat damit zu tun, dass in dieser Berechnung das Saugvermögen über den gesamten Druckbereich als konstant angenommen wurde. Wie in Diagramm zu sehen, ist dies keinesfalls so. Der Leitwert ist in diesen Bereichen wegen des zu groß angenommenen Saugvermögens selbst auch viel zu hoch. Bei den hohen Drücken gibt es außerdem den Effekt, dass hier schon der Übergang von der molekularen Strömung zur laminaren Strömung kommt und der Leitwert damit ansteigt. Zur Bestimmung des Leitwerts im molekularen Bereich wurde daher ein Fit (konstant) an die Messpunkte im Bereich gemacht:

$$\begin{aligned}\text{Rohr: } L_R &= (\pm) \frac{l}{s} \\ \text{Blende: } L_B &= (\pm) \frac{l}{s} \\ \text{Rohr + Blende: } L_{R+B} &= (\pm) \frac{l}{s}\end{aligned}$$

Überprüfung der kirchhoffschen Regeln

3.6 Lecksuche

4 Diskussion

(Teil 5: Rohrdurchmesser zu groß gewählt?)

Hier werden alle wesentlichen Ergebnisse nochmals ausgeführt und diskutiert.

Am Schluss kann man noch eine allgemeinere Bemerkung zum Versuch machen.

Literatur

- [1] Versuchsskript zu Versuch F70
- [2] de.wikibooks.org: Aggregatzustandsänderungen
(https://de.wikibooks.org/wiki/Physik_in_unserem_Leben/_Aggregatzustands%C3%A4nderungen)