

# Mechanik und Vakuum<sup>1</sup>

P. Nisblé und D. Bubeck

## Abstract:

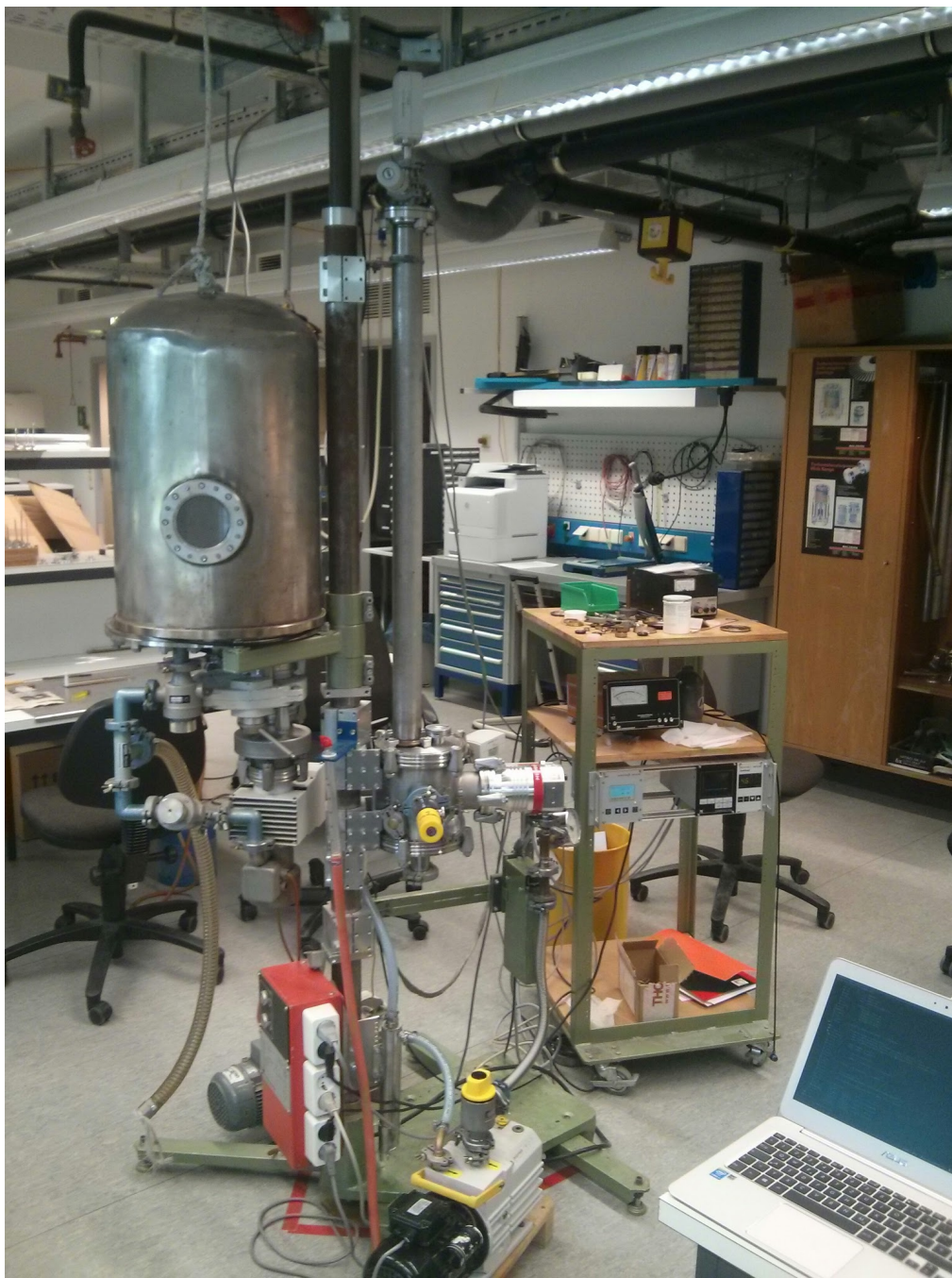
We observe the use of Vacuum pumps for different applications, as well as the mechanics behind pulling vacuums with those pumps, we mainly focus on rotary vane pumps and turbo molecular pumps (TMP).

The content of this experiment aims at determining the capacity of suction of a TMP, and to find conductance and holes of an apparatus.

Als besondere (kurze) Auswertung testiert: Datum, Unterschrift:

---

<sup>1</sup> 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

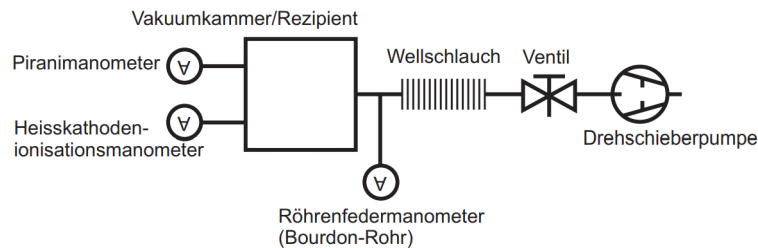
(nach Abb. 7)

6. Lecksuche

mit Teslatransformator und Heliumlecksucher (nach Abb. 10)

## 2 Versuchsdurchführung

### 2.1 Inbetriebnahme der Drehschieberpumpe



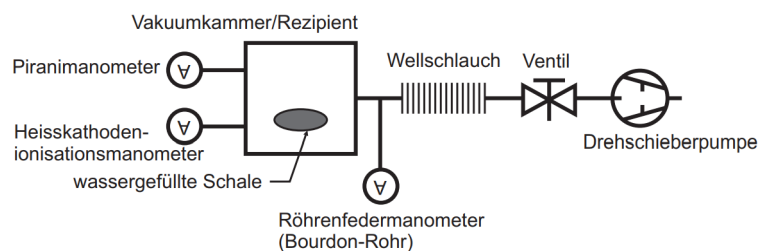
**Abbildung 2:** generalisierter Aufbau zur Beobachtung der Funktionsweise einer Drehschieberpumpe

Es hat sich ein Enddruck der Drehschieberpumpe bei

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

eingestellt. 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

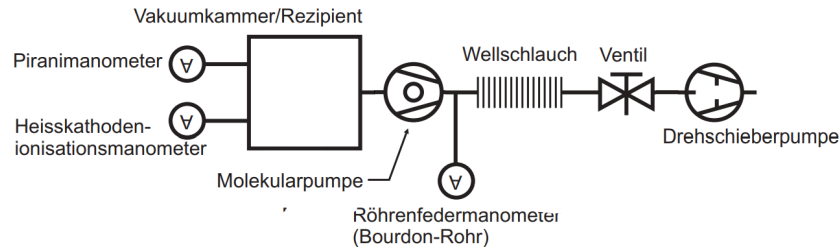


**Abbildung 3:** Vakuum-Blockschaltbild zum Versuch des Abpumpens kondensierbarer Dämpfe

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



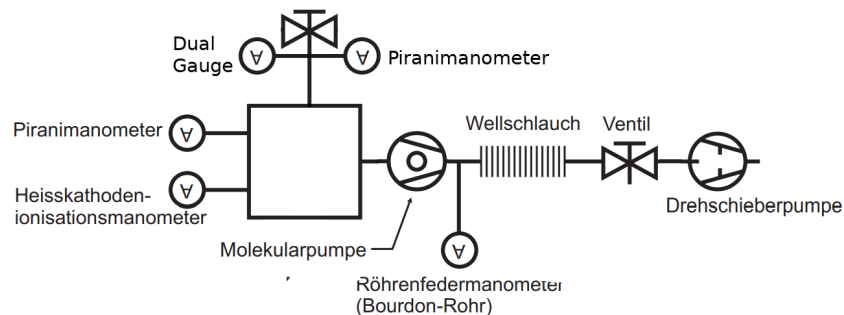
**Abbildung 4:** Aufbau zur Beobachtung der Funktionsweise von Molekular- und Turbomolekularpumpe

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

Zum Messen des Saugvermögens werden nun Glaskapillaren an die Vakuumkammer angeflanscht. Dann wird der gewünschte Druck eingestellt und ein Tropfen Seifenwasser in die Kapillare gegeben. Dieser wird beobachtet und das angesaugte Volumen pro Zeit notiert.

Die Kapillaren haben die folgenden Größen:

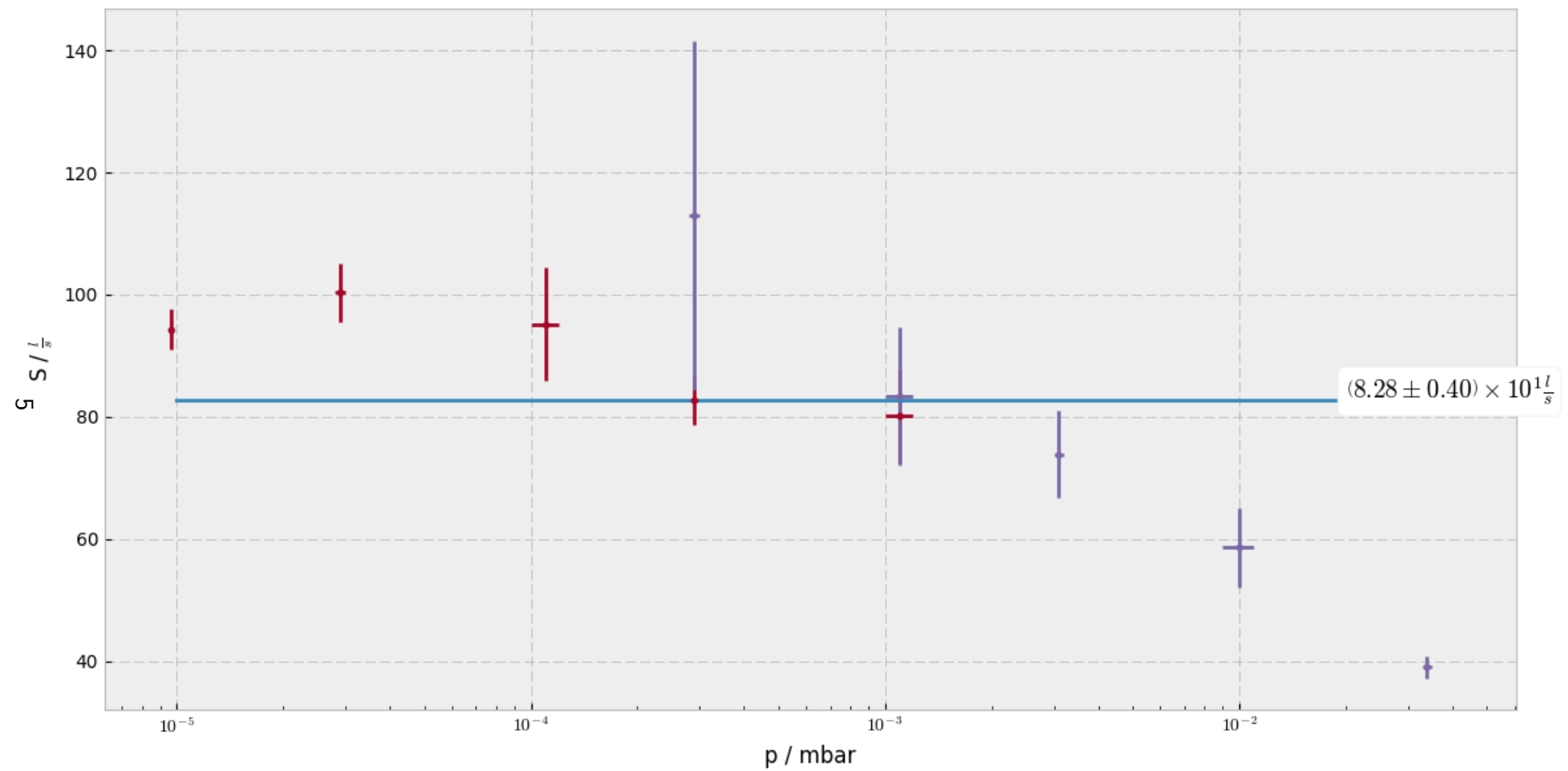
- $0.1 \text{ ml}$
- $0.2 \text{ ml}$
- $0.5 \text{ ml}$

- 1 *ml*

Zuletzt wird ein Kolben angebracht:

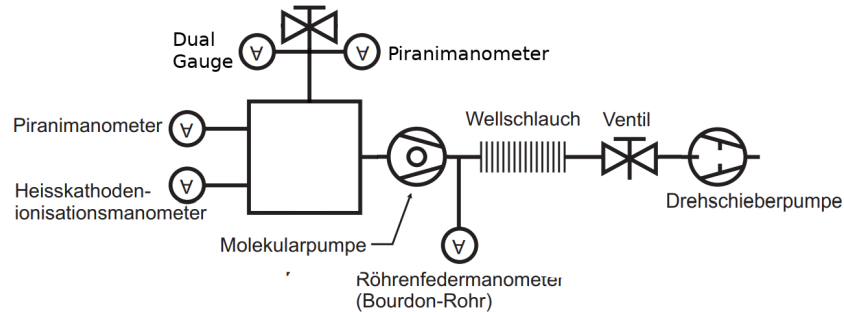
(Diese Messungen geschehen bei Äußerem Normaldruck) Anschließend wird langsam belüftet um die TMP nicht zu überhitzen

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



**Abbildung 6:** Saugvermögen der TMP inklusive linearem Fit

## 2.5 Leitwert von Rohr und Blende



**Abbildung 7:** 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 Halterohr:

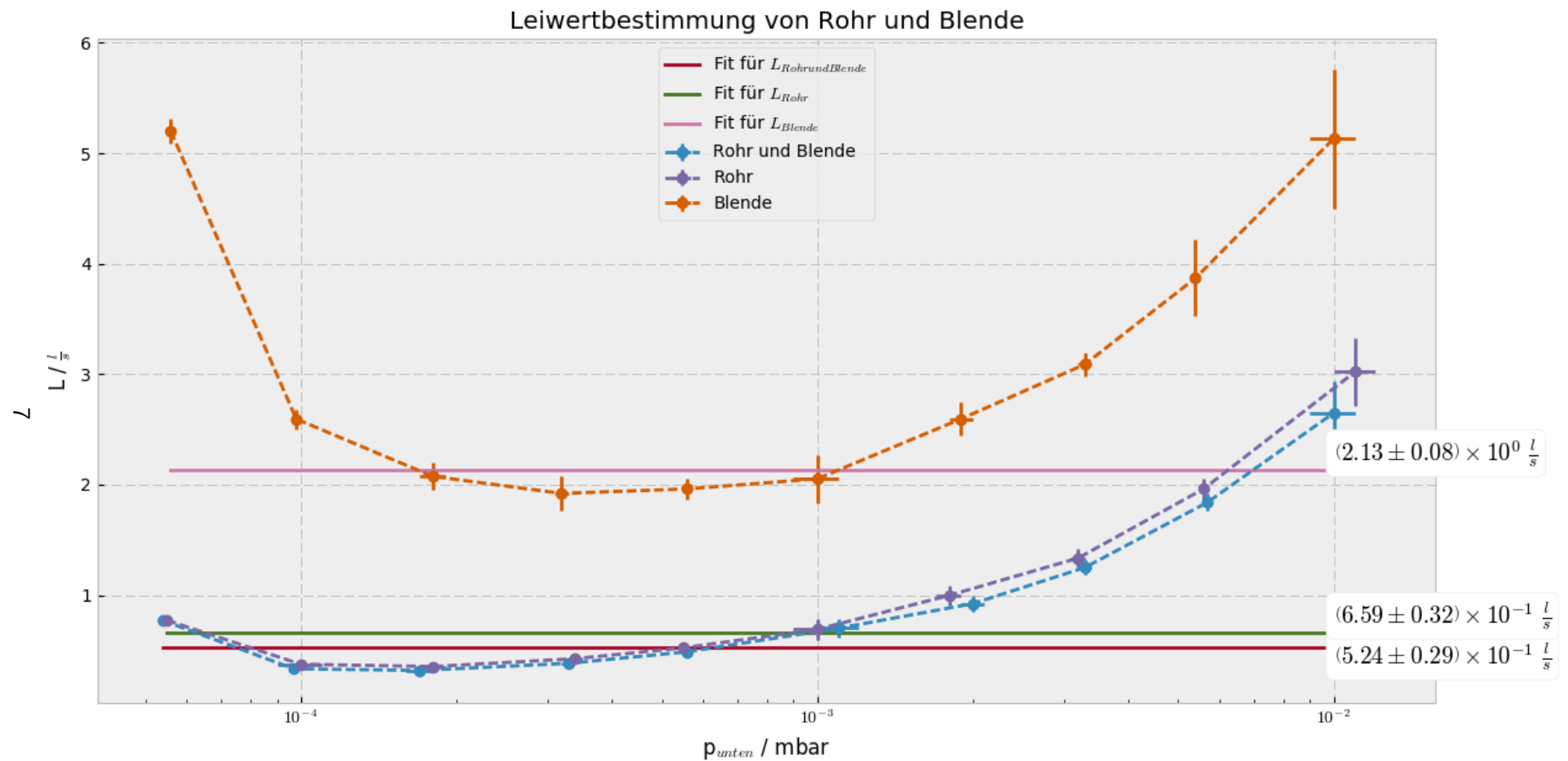
$$d = (52.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

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

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

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





**Abbildung 8:** Leitwertbestimmung anhand des Diagramms

## 2.6 Lecksuche

Zunächst wird der Aufbau aus Versuchsteilen 4 & 5 benutzt

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

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

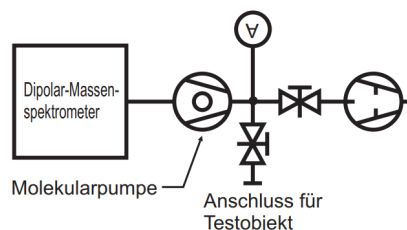
Der Teslatrafo wurde dann auf die Glaskapillare gehalten.

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



**Abbildung 9:** Lecksuche mit Teslatrafo

Für die Gegenstromlecksuche wurde folgender Aufbau verwendet:



**Abbildung 10:** 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 Dichtung und ein Materialfehler im Bauteil ausfindig gemacht werden, die offensichtlich für das Leck im Aufbau verantwortlich sind.

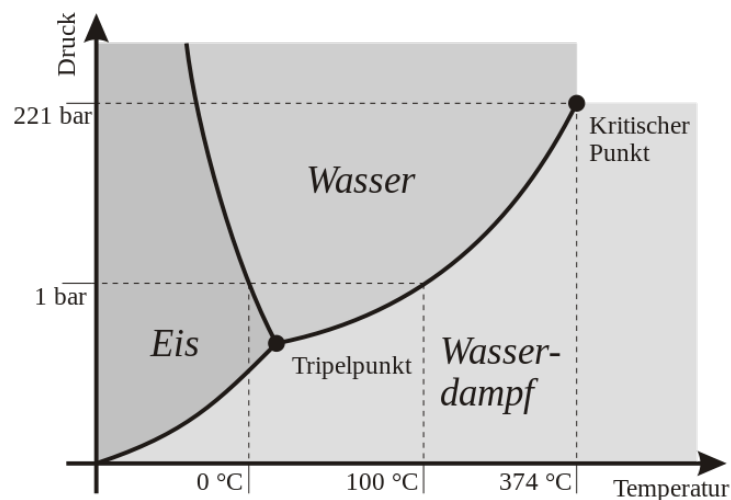
## 3 Ergebnisse

### 3.1 Inbetriebnahme der Drehschieberpumpe

Nach Inbetriebnahme der Drehschieberpumpe fiel der Druck innerhalb von 2 *min* auf  $(1.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-1}$  mbar und verweilt dort.

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.

### 3.2 Abpumpen kondensierbarer Dämpfe



**Abbildung 11:** 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  $(5.8 \pm 0.1)$  *mbar*, gefriert das Wasser, da nun der Tripelpunkt überschritten ist (Literaturwert: 6 *mbar* →  $2\sigma$ )

### 3.3 Inbetriebnahme einer TMP

Die TMP erreichte (nach einer Nacht) einen Druck von  $(1.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$ , was den durch die Drehschieberpumpe erreichten Druck um 5 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 Rezipienten abgesaugten Volumen  $V_R$  (pro Zeit):

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

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

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

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

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

$$(8.28 \pm 0.04) \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

- 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
- nach der zweiten Messung wurde dem Wasser etwas mehr Seife hinzugefügt, um die Reibung des Tropfens in der Kapillare zu minimieren

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  $\delta p$  auf den Leitwert  $L$  schließen, mittels:

$$L = \frac{Q}{\delta p} \quad (4)$$

(Saugleistung  $Q$ )

$$\text{mit } Q = S \cdot p_{\text{unten}} \quad (5)$$

$$\Rightarrow L = \frac{S \cdot p_{\text{unten}}}{\delta p}, \quad \delta p = p_{\text{oben}} - p_{\text{unten}} \quad (6)$$

Die Berechnung für die 3 Konfigurationen aus Rohr und Blende sind in den Tabellen 14,15 und 16 zu finden

Die Daten der Leitwerte sind in Diagramm 8 aufgetragen. zu sehen ist bei allen 3 Konfigurationen ein Anstieg des Leitwertes hin zu kleinen Drücken ( $p < 10^{-4} \text{ mbar}$ ) und hin zu sehr großen Drücken. ( $p > 2 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ ) Dies hat damit zu tun, dass in dieser Berechnung das Saugvermögen über den gesamten Druckbereich als konstant angenommen wurde. Wie in Diagramm 6 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  $2 \cdot 10^{-4}$  bis  $2 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$  gemacht:

$$\begin{aligned} L_{\text{Rohr}} &= (0.659 \pm 0.032) \frac{\text{l}}{\text{s}} \\ L_{\text{Rohr und Blende}} &= (0.524 \pm 0.029) \frac{\text{l}}{\text{s}} \\ L_{\text{Blende}} &= (2.13 \pm 0.08) \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{aligned}$$

### Überprüfung der Kirchhoffschen Regeln

Serienschaltung:

$$\frac{1}{L_{R+B}} = \frac{1}{L_R} + \frac{1}{L_B} \Leftrightarrow L_{R+B} = \frac{L_R L_B}{L_R + L_B} \quad (7)$$

Mit den experimentell bestimmten Werten für  $L_R$  und  $L_B$  folgt:

$$L_{R+B} = (0.503 \pm 0.019) \frac{\text{l}}{\text{s}} \quad (8)$$

(Abw:  $0.6 \sigma$ ) Was mit unserem experimentellen Wert sehr gut übereinstimmt und die kirchhoffschen Regeln als Analogie bestätigt.

### theoretische Leitwerte

$$L_{\text{theo,lam,Rohr}} = \frac{\pi}{8} r^4 \frac{\bar{p}}{\eta l} \quad \bar{p} = (p_o + p_u)/2, \eta = 17.1 \frac{\mu\text{Pa}}{\text{s}} \quad (9)$$

$$= (0.48 \pm 0.03) \frac{\text{l}}{\text{s}} \quad (\text{letzte Drücke aus Tab 15}) \quad (10)$$

$$\Rightarrow \text{Abw.: } 4 \sigma \quad (11)$$


---

$$L_{\text{theo,mol,Rohr}} = \frac{8}{3} \frac{r^3}{l} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}} \quad R = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}, M_{\text{Luft}} = 28.96 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \quad (12)$$

$$= (0.209 \pm 0.012) \frac{\text{l}}{\text{s}} \quad (13)$$

$$\Rightarrow \text{Abw.: } 13.2 \sigma \quad (14)$$


---

$$L_{\text{theo,mol,Blende}} = 362 \frac{\text{m}}{\text{s}} r^2 \quad (15)$$

$$= \frac{\text{l}}{\text{s}} \quad (16)$$

$$\Rightarrow \text{Abw.: } 4.8 \sigma \quad (17)$$


---

$$\Rightarrow L_{\text{theo,R+B}} = (0.368 \pm 0.020) \frac{\text{l}}{\text{s}} \quad (\text{nach 7}) \quad (18)$$

$$\Rightarrow \text{Abw.: } 4.5 \sigma \quad \text{zum experimentellen Wert} \quad (19)$$

## 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](https://de.wikibooks.org/wiki/Physik_in_unserem_Leben/_Aggregatzustands%C3%A4nderungen))

## 5 Anhang

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 12:** Messreihe 1.1 - Saugvermögen bei Kapillaren

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 13:** Messreihe 1.2 - Saugvermögen bei Kolben

$p_o$ / 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 14:** Messreihe 2.1: Rohr und Blende



$p_o$ / 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 15:** Messreihe 2.2: Rohr

$p_o$ / 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 16:** Messreihe 2.3: Blende