

V70

## Vakuumversuche

Sonia Chander  
sonia.chander@tu-dortmund.de

Jana Schlücking  
jana.schluecking@tu-dortmund.de

Durchführung: 13.06.2022

Abgabe: 05.07.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Vakuum . . . . .	3
2.2 Ideales Gas und Druck . . . . .	3
2.3 Sorption und Lecks . . . . .	4
2.3.1 Leckratenmessung . . . . .	5
2.4 Leitwert . . . . .	5
2.5 Vakuumerzeugung . . . . .	6
2.5.1 Drehschieberpumpe . . . . .	6
2.5.2 Turbomolekularpumpe . . . . .	7
2.6 Vakuummessung . . . . .	8
2.6.1 Piezo-Vakuummeter . . . . .	8
2.6.2 Pirani-Vakuummeter . . . . .	8
2.6.3 Penning- und Bayard-Alpert-Vakuummeter . . . . .	8
<b>3 Aufbau</b>	<b>8</b>
<b>4 Durchführung</b>	<b>9</b>
4.1 Turbomolekularpumpe . . . . .	9
4.1.1 Leckratenmessung . . . . .	9
4.1.2 Evakuierungskurve . . . . .	10
4.2 Drehschieberpumpe . . . . .	10
4.2.1 Leckratenmessung . . . . .	10
4.2.2 Evakuierungskurve . . . . .	10
<b>5 Fehlerrechnung</b>	<b>10</b>
<b>6 Auswertung</b>	<b>11</b>
6.1 Turbopumpe . . . . .	12
6.1.1 Leckratenmessung . . . . .	12
6.1.2 Evakuierungskurve . . . . .	13
6.2 Drehschieberpumpe . . . . .	15
6.2.1 Leckratenmessung . . . . .	15
6.2.2 Evakuierungskurve . . . . .	16
6.3 Tabellen der Messwerte . . . . .	19
<b>7 Diskussion</b>	<b>28</b>
<b>8 Anhang</b>	<b>32</b>
<b>Literatur</b>	<b>36</b>

# 1 Zielsetzung

In diesem Versuch geht es um das Arbeiten mit Vakuum. Dabei werden die Drehschieberpumpe und die Turbomolekularpumpe genauer betrachtet. Das jeweilige Saugvermögen der Pumpen wird über eine Evakuierungsmessung sowie Leckatenmessungen bestimmt.

## 2 Theorie

Um die Arbeitsweise der Pumpen, sowie mögliche Probleme der Vakuumphysik zu verstehen wird zunächst auf die Grundlagen eingegangen.

### 2.1 Vakuum

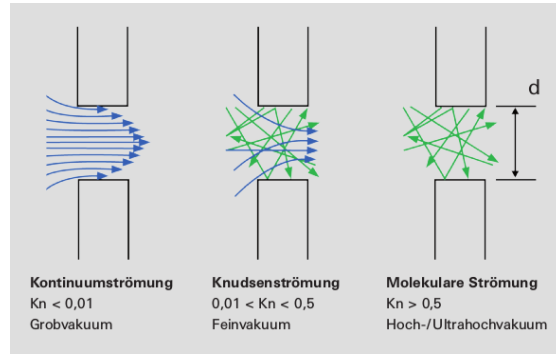
Von einem Vakuum wird gesprochen, wenn der Druck in einem Raum niedriger ist als 300 mbar, also niedriger als der geringste Atmosphärendruck auf der Erdoberfläche [7]. Ab diesem Wert beginnt das sogenannte Grobvakuum und weitere Bereiche können definiert werden. Je nach Druckbereich entstehen bestimmte Ströme, die auf die mittlere freie Weglänge der Gasteilchen zurückzuführen ist. Das liegt daran, dass mit abnehmender Teilchendichte die mittlere freie Weglänge steigt. Diese Länge beschreibt den durchschnittlichen Weg, den ein Teilchen zwischen zwei Stößen zurücklegt.

Im Grobvakuum (300 mbar - 1 mbar) herrschen vornehmend viskose Strömungen. Diese sind nochmals unterteilbar in laminare und turbulente Strömung. Bei laminarer Strömung sind die mittleren freien Weglängen der Teilchen klein im Vergleich zu den Größen im Strömungskanal, sodass mehr Stöße unter den Teilchen vorherrschen als Kollisionen mit den Wänden des Raumes. Dadurch bewegen sich die Teilchen in geradlinigen Bahnen. Das Feinvakuum beschreibt den Druckbereich von 300 mbar -  $10^{-4}$  mbar. Hier ist Knudsenströmung auffindbar [7]. Diese beschreiben den Übergang von viskoser zu molekularer Strömung. Die mittlere freie Weglänge ist hier in der Größenordnung des Strömungskanals. Der Bereich von  $10^{-3}$  mbar -  $10^{-7}$  mbar beschreibt das Hochvakuum, das Ultravakuum geht dann bis  $10^{-12}$  mbar. Molekulare Strömung ist hier vertreten. Die mittlere freie Weglänge der Teilchen ist hier größer als die Abmessung des Strömungskanals, die Gasteilchen kollidieren öfter gegen die Wände des Raumes als das sie untereinander stoßen. Drücke, die kleiner als  $10^{-12}$  mbar sind, liegen im Bereich des extrem hohen Vakuums. In Abbildung 1 ist eine Visualisierung der verschiedenen Strömungsarten und der mittleren freien Weglänge zu sehen.

### 2.2 Ideales Gas und Druck

Im vorliegenden Versuch ist es ausreichend vom Modell des idealen Gases auszugehen. Hierbei wird angenommen, dass die Gasteilchen keine Ausdehnung haben und untereinander nur über vollkommen elastische Stöße wechselwirken. Dadurch kann das Gas mit der idealen Gasgleichung beschrieben werden:

$$p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T.$$



**Abbildung 1:** Verschiedene Strömungsarten der Vakuumbereiche [7].

Hierbei beschreibt  $p$  den Gasdruck,  $V$  das Volumen des Raumes,  $N$  die Teilchenzahl,  $k_B$  die Boltzmann-Konstante und  $T$  die Temperatur. Wird nun die Temperatur konstant gehalten, ist der Druck proportional zum Inversen des Volumens ( $p \propto V^{-1}$ ). Dies ist auch unter dem Gesetz von Boyle-Mariotte bekannt.

Da der Druck die senkrechte Kraftkomponente auf eine Fläche beschreibt, gilt für die Einheit:

$$1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Pa} \qquad 1 \text{ hPa} = 1 \text{ mbar}$$

Zur Bestimmung des Saugvermögens  $S$  wird das Gesetz von Boyle-Mariotte verwendet

$$p \cdot V = \text{const}$$

und zeitlich abgeleitet. Dabei kann die zeitliche Ableitung des Volumens als Saugvermögen  $S$  identifiziert werden:

$$S = \frac{dV}{dt} = -\frac{V dp}{p dt}.$$

Durch Lösen der DGL

$$-\frac{S}{V} \cdot \dot{p} = p \tag{1}$$

mithilfe einer Exponentialfunktion entsteht ein Ausdruck für den Druck

$$p(t) = (p_0 - p_E) \cdot \exp\left(-\frac{S}{V_0}t\right) + p_E. \tag{2}$$

Hierbei beschreibt  $p_0$  den Anfangsdruck im Rezipienten und  $p_E$  den Enddruck, den die Vakuumpumpe schließlich erzeugen kann. Durch die Aufnahme einer Evakuierungskurve kann das Saugvermögen mithilfe von (2) ermittelt werden.

## 2.3 Sorption und Lecks

Um auf einige Herausforderungen der Vakuumphysik einzugehen, muss es ein Verständnis von Sorption und Lecks geben. Allgemein beschreibt Sorption die Anreicherung eines

Stoffes. Dabei wird noch unterschieden, ob dieser Prozess innerhalb oder zwischen zwei Phasen abläuft. Das erste wird Absorption genannt, das zweite Adsorption. Entsprechend beschreibt die Desorption den Rückprozess.

Lecks können das Vakuum verschlechtern. Auch hier gibt es eine Unterteilung zwischen realen und virtuellen Lecks. Die realen sind die Lecks, die aufgrund des Versuchsaufbaus entstanden sind. Ein nicht richtig angeschlossener Schlauch oder fehlende Dichtungen können reale Lecks sein und arbeiten somit gegen die Vakuumpumpe. Virtuelle Lecks entstehen z.B. bei der Produktion. Ein Beispiel wären Hohlräume, die bei der Produktion des Rezipienten oder Ähnlichem entstehen und sich beim Evakuieren öffnen. Kommt es zu Sorption im Evakuierungsprozess, kann das auch als virtuelles Leck beschrieben werden. Im Gegensatz zu realen Lecks können virtuelle schwer bis gar nicht gefunden oder im Nachhinein behoben werden. Als einzige Vorbeugungsmaßnahme von virtuellen Lecks muss in der Produktion der verschiedenen Teile so sauber wie möglich gearbeitet werden.

### 2.3.1 Leckratenmessung

Die Leckrate  $Q$  wird wie folgt definiert

$$S = \frac{Q}{p_G}$$

$$\Rightarrow Q = V_0 \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t}.$$

$p_G$  beschreibt dabei den Gleichgewichtsdruck,  $S$  das Saugvermögen. Somit entsteht auch ein Ausdruck für das Saugvermögen

$$S = \frac{V_0}{p_G} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (3)$$

Werden nun mehrere Messungen mit unterschiedlichen Gleichgewichtsdrücken durchgeführt, so kann aus  $\Delta p/\Delta t$  das Saugvermögen  $S$  bestimmt werden.

## 2.4 Leitwert

Da das effektive Saugvermögen  $S_{\text{eff}}$ , also das Saugvermögen, das letztendlich am Rezipienten ankommt, stark vom Aufbau der Vakuumanlage beeinflusst bzw. verringert wird, wird eine weitere Größe definiert. Der Leitwert  $L$  beschreibt den sogenannten Strömungswiderstand, der durch Verbindungen wie Schläuche usw. verursacht wird. Somit wird das effektive Saugvermögen wie folgt ausgedrückt:

$$S_{\text{eff}} = \frac{S_0 \cdot L}{S_0 + L}.$$

$S_0$  beschreibt dabei das theoretische Saugvermögen der Vakuumpumpe [7].

## 2.5 Vakuumerzeugung

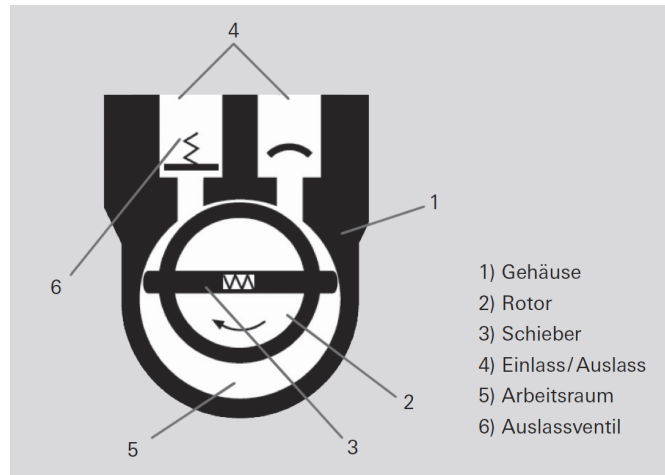
In diesem Versuch werden zwei Pumpen untersucht: die Drehschieberpumpe und die Turbomolekularpumpe. An sich werden verschiedenen Arten von Pumpen unterschieden. Unbeschränkt einsatzfähig sind gasfördernde Pumpe. Hier wird Gas in abgeschlossenen Volumina entweder komprimiert oder ausgedehnt. Ihre Funktionsweise beruht auf dem Gesetz von Boyle-Mariotte. Durch das Ausgleichen von Drücken gelangen die Teilchen aus dem Rezipienten in die Pumpkammer und aus der Pumpkammer in die Umgebung. Die Drehschieberpumpe ist eine gasfördernde Pumpe.

In gasbindenden Pumpen werden Gasteilchen unter anderem durch Physisorption gebunden. Bei hohem Druck, also einer hohen Teilchendichte kann nur ein geringer Teil der vorhandenen Teilchen in die Gasphase aufgenommen werden, bei geringem Druck wird ein großer Teil der noch vorhandenen Teilchen aufgenommen.

Kinetische Pumpen beschleunigen die Gasteilchen in Pumprichtung, sie verringern somit den Druck. Sie benötigen ein Vorvakuum, da bei einer zu kleinen mittleren freien Weglänge die Gasteilchen durch Stöße untereinander die Bewegungsrichtung schnell verlieren. Die Turbomolekularpumpe ist eine kinetische Pumpe.

### 2.5.1 Drehschieberpumpe

In Abbildung 2 ist der schematische Aufbau einer Drehschieberpumpe zu sehen. Diese ist eine ölüberlagerte Rotationsverdrängerpumpe. Grob besteht die Pumpe aus zwei Ventilen, Ein- und Auslassventil. Das Einlassventil ist mit dem Rezipienten verbunden und schließt sich nicht. Das Auslassventil dient dazu das Gas dann beim Pumpen in die Umgebung zu befördern, dazu kann das Ventil geöffnet und geschlossen werden. Innerhalb des Gehäuses befindet sich der Arbeitsraum der Pumpe, in welchem ein Rotor und Schieber zu finden ist. Das Verhalten der Drehschieberpumpe kann auch mithilfe des Boyle-Mariotte-Gesetzes erklärt werden. Der Rotor läuft exzentrisch im Mittelpunkt des Arbeitsraumes, dabei wird ein größeres Volumen angeboten. Nach  $p \cdot V = \text{const}$  fällt nun der Druck, da es einen Anstieg an Volumen gibt, in das auch die Gasteilchen gehen. Der Rotor dreht sich weiter und der mit Gas gefüllte Raum wird nun komprimiert, da sich der Schieber vor das Einlassventil stellt. Das Volumen wird kleiner, der Druck somit größer. Sobald der Druck in diesem Raum den der Umgebung außerhalb der Pumpe übersteigt, wird das Auslassventil geöffnet und das Gas entweicht. So kann eine einstufige Pumpe einen Druck von  $6 \cdot 10^{-2}$  mbar bis  $6 \cdot 10^{-3}$  mbar im Rezipienten erzeugen [2]. Zweistufige Drehschieberpumpen können einen Druck von  $6 \cdot 10^{-4}$  mbar bis  $6 \cdot 10^{-5}$  mbar erzeugen [2]. In diesem Versuch wird eine einstufige Drehschieberpumpe verwendet.



**Abbildung 2:** Schematischer Aufbau einer Drehschieberpumpe [7].

### 2.5.2 Turbomolekularpumpe

Anders als die Drehschieberpumpe benötigt die Turbomolekularpumpe ein Vorvakuum um zu funktionieren. In Abbildung 3 ist eine Turbomolekularpumpe zu sehen. Im Inneren des Gehäuses sieht sie aus wie eine Turbine bzw. wie ein zusammengesetzte, mehrstufige Turbine. Dieser Rotor ist mit schaufelartigen Scheiben besetzt. Sie liegen schräg an. Ebenfalls sind weitere dieser Schaufeln spiegelverkehrt angebracht worden. Bei Drehung des Rotors werden die Gasteilechen durch Stöße mit den Rotorwänden in Pumprichtung beschleunigt. Damit das auch passiert, muss sich der Rotor mit einer Geschwindigkeit vergleichbar mit der der Gasteilchen bewegen. Dafür dreht sich der Rotor dann mit einigen kHz, bei der verwendeten Turbomolekularpumpe sind es 1350 Hz. So kann der Druck im Rezipienten schnell auf  $10^{-4}$  mbar gebracht werden. Weiter ist zu beachten, dass eine Turbomolekularpumpe selbst kein Vakuum erzeugen kann. Sie muss mit einer weiteren Pumpe, z.B. mit einer Drehschieberpumpe zusammen eingesetzt werden.



**Abbildung 3:** Das Modell einer Turbomolekularpumpe [9].

## **2.6 Vakuummessung**

### **2.6.1 Piezo-Vakuummeter**

Das Piezo-Vakuummeter ist für die Messung im Grobvakuum geeignet. Die Idee dabei ist die Kraft der Gasteilchen auf die Oberfläche zu messen. Das geschieht über ein Piezo-Kristall, der bei Kompression messbare elektrische Spannung erzeugt. Da die Kraft auf den Piezo-Kristall mit sinkendem Druck abnimmt, ist das Messgerät ab Feinvakuum nicht mehr so gut einsetzbar.

### **2.6.2 Pirani-Vakuummeter**

Im Feinvakuum kann das Pirani-Vakuummeter verwendet werden, da hier die Wärmeleitfähigkeit proportional zum Druck ist. Ein stromdurchlossener Draht befindet sich im Rezipienten. Durch die Messung des Widerstandes des Leiters kann die Temperatur des Drahtes ermittelt werden. Der Draht kühlt sich dann abhängig vom Rezipienten-Druck unterschiedlich schnell ab, wodurch der Druck selbst bestimmbar ist.

### **2.6.3 Penning- und Bayard-Alpert-Vakuummeter**

Beide Vakuummeter arbeiten im Hoch- und Ultrahochvakuum. Das Bayard-Alpert-Vakuummeter, ein Heiß-Ionisations-Vakuummeter arbeitet wie folgt:

Elektronen werden durch thermische Emission freigesetzt. Diese werden zu einer Anode hin beschleunigt und können auf dem Weg Gasatome ionisieren. Diese ionisierten Gasatome werden zu einer Kathode beschleunigt, es entsteht ein Strom, der als Maß für die Vakuumqualität dient.

Das Penning-Vakuummeter ist ein sogenanntes Kalt-Ionisations-Vakuummeter. Bis auf die Elektronenerzeugung funktioniert dieses Vakuummeter genau wie das Bayard-Alpert-Vakuummeter. Hier werden die Elektronen durch elektrische Feldemission gewonnen.

In diesem Versuch wird für die Vakuummessung einmal eine Kombination aus Piezo- und Pirani-Vakuummeter verwendet und eine Kombination aus Piranivakuummeter und Kaltkathoden-Sensor.

## **3 Aufbau**

In Abbildung 4 ist der Versuchsaufbau zu sehen. P1 beschreibt die Drehschieberpumpe, P2 die Turbomolekularpumpe. V1 und V2 zeigen auf die Ventile der entsprechenden Pumpen, mit diesen Ventilen können die Pumpen abgeschoben werden. Zum Einstellen des Gleichgewichtsdruck dienen die Ventile V3 und das Dosierventil D, welche unter dem Rezipienten zu finden sind. Das Piezo-Pirani-Vakuummeter Typ TPG202 der Firma Pfeiffer Vacuum steht bei M1. Weiterhin gibt es zwei Kaltkathoden-Vakuummeter M2 und M3, es handelt sich um den Typ PKR 360 von Pfeiffer Vacuum, welche jeweils mit einem Anzeigegerät TPG 361 von Pfeiffer Vacuum verbunden sind. Eins ist dabei an der Turbomolekularpumpe angeschlossen, das andere hinter dem Dosierventil.



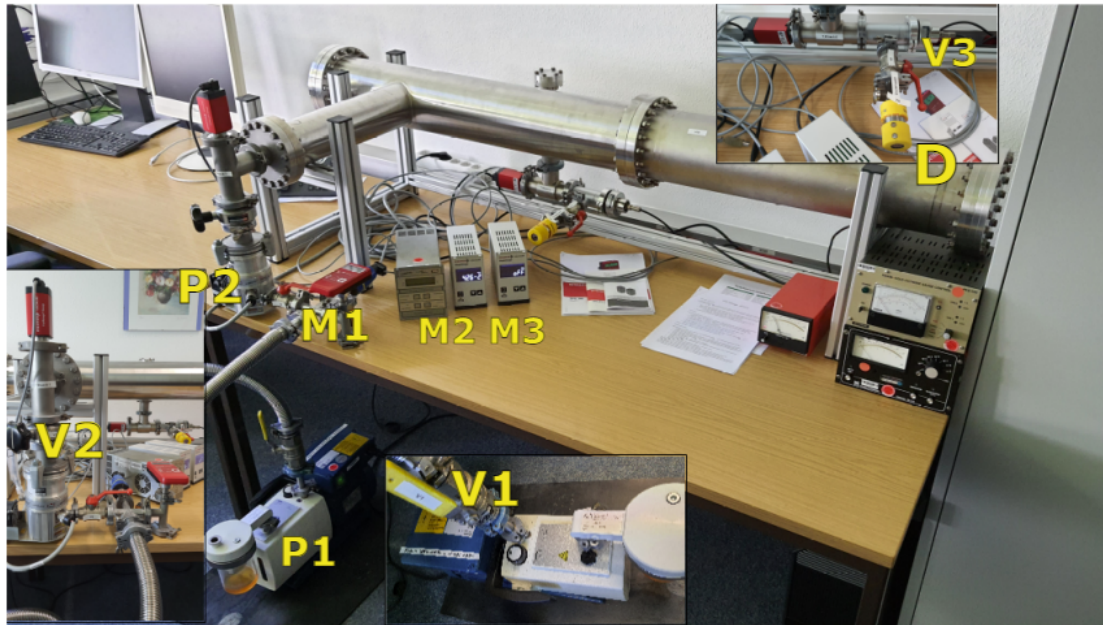


Abbildung 4: Der Versuchsaufbau [1].

## 4 Durchführung

Während des Kolloquiums wird die Drehschieberpumpe gestartet. Dabei wird darauf geachtet, welcher Druck erreicht werden kann und somit wird auch überprüft ob die Anlage dicht und funktionsfähig ist. Daraufhin kann die Turbomolekularpumpe angeschaltet werden. Ebenfalls wird geprüft, wie klein der Druck wird um den Aufbau zu prüfen.

### 4.1 Turbomolekularpumpe

Bei der Turbomolekularpumpe handelt es sich um das Modell Turbo SST81 von der Firma ILMVAC und wird mit 1350 Hz betrieben. Laut Hersteller beträgt das Saugvermögen 771/s [1].

#### 4.1.1 Leckratenmessung

Zunächst wird eine Leckratenmessung durchgeführt. Mithilfe des gelben Dosierventils wird ein konstanter Gleichgewichtsdruck im Rezipienten eingestellt. Dabei ist das Ventil zur Turbomolekularpumpe geöffnet. Nun wird das Ventil verschlossen und die Messung wird gestartet, indem der Druck alle 10 s aufgenommen wird. Dieser Messvorgang wird insgesamt drei Mal wiederholt für vier verschiedenen Leckraten. Ein Messvorgang beträgt dabei 120 s. Die Gleichgewichtsdrücke betragen  $2 \cdot 10^{-4}$  mbar,  $1 \cdot 10^{-4}$  mbar,  $7 \cdot 10^{-5}$  mbar und  $5 \cdot 10^{-5}$  mbar. Zur Aufnahme der Messung wurde das Messgerät M2 verwendet.

#### 4.1.2 Evakuierungskurve

Der Rezipient wird über das gelbe Dosierventil bis zu einem Anfangsdruck von  $5 \cdot 10^{-3}$  mbar belüftet. Dann wird das Ventil schnell geschlossen und die Messung gestartet. Hier wird der Druck zu Beginn (bis  $t \approx 40$  s) alle 5 s aufgenommen, danach nur noch alle 10 s, sodass eine Messung 120 s dauert. Dieser Messvorgang wird insgesamt drei Mal durchlaufen. Dabei werden die Messwerte mit dem Messgerät M2 aufgenommen.

### 4.2 Drehschieberpumpe

Die Messungen zur Drehschieberpumpe laufen analog zu der Messung mit der Turbomolekularpumpe ab. Die verwendete Drehschieberpumpe ist ebenfalls von der Firma ILMVAC mit dem Typ 300883/AKD16. Laut Hersteller beträgt das Saugvermögen 4,6 bis 5,5 m<sup>3</sup>/h und der angegebene Enddruck beträgt  $2 \cdot 10^{-3}$  mbar [1].

#### 4.2.1 Leckratenmessung

Analog wird ein Gleichgewichtsdruck mithilfe des gelben Dosierventils eingestellt und danach die Drehschieberpumpe mit dem Ventil direkt über der Pumpe abgeschiebert. Der Druck sollte alle 10 s mit dem Messgerät M1 aufgenommen werden, wird in diesem Versuch versehentlich mit M2 aufgenommen, die Messzeit insgesamt beträgt 200 s. Die Messung wird für vier verschiedene Gleichgewichtsdrücke jeweils drei Mal durchgeführt. Die verwendeten Gleichgewichtsdrücke sind 100 mbar, 50 mbar, 10 mbar und 0,5 mbar.

#### 4.2.2 Evakuierungskurve

Der Rezipient wird bei laufender Drehschieberpumpe über das gelbe Dosierventil belüftet, sodass ein Anfangsdruck von 1000 mbar entsteht. Das Ventil wird geschlossen und die Messung gestartet. Es wird mit dem Messgerät M2 gemessen. Der Druck wird dann alle 10 s aufgenommen, insgesamt für 600 s. Dieser Messvorgang wird insgesamt drei Mal durchgeführt. Dabei werden die Messwerte versehentlich mit dem Messgerät M2 statt mit M1 aufgenommen.

## 5 Fehlerrechnung

Bei der Mittelung von  $n$  unabhängig gemessenen Werten  $x_i$  nach der Gleichung

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

berechnet sich der Fehler des arithmetischen Mittelwertes nach

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}. \quad (4)$$

Bei Rechnungen mit mehreren fehlerbehafteten Größen ist die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung zu betrachten. Hierbei ist der Fehler der Funktion  $f(x_i)$  für unkorrelierte  $x_i$  durch

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2} \quad (5)$$

gegeben. Bei der Mittelung werden statistische Fehler ausgerechnet, welche mit steigender Anzahl  $n$  an Messungen kleiner werden, welches mathematisch durch den Bruch  $\frac{1}{n(n-1)}$  begründet wird. Wird eine Messgröße nur mit einem Messgerät gemessen, welches seine natürliche Messunsicherheit hat, dann handelt es sich um einen systematischen Fehler. Der relative Fehler der Systematik verändert sich nicht bei der Mittelung, die Unsicherheit lässt sich nicht über eine größere Anzahl an Messungen verkleinern.

Die Genauigkeit der abgelesenen Druckwerte ist druckabhängig, das Messgerät M2, ein kombinierte Pirani/Kaltkathoden-Sensor der Firma Pfeiffer Vacuum, hat im Druckbereich  $1 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \leq p \leq 100 \text{ mbar}$  eine Messunsicherheit von 30 % des Messwertes und im Bereich  $100 \text{ mbar} \leq p \leq 1000 \text{ mbar}$  eine Messunsicherheit von 50 % des Messwertes.

Wird die Gaußsche Fehlerfortpflanzung auf den Logarithmus Ausdruck  $\ln \left( \frac{p(t)-p_E}{p_0-p_E} \right)$  angewendet, ergibt sich der Fehler

$$\sigma_{\ln} = \sqrt{\frac{\sigma_{p(t)}^2}{(p(t)-p_E)^2} + \frac{\sigma_{p_0}^2}{(p_0-p_E)^2} + \sigma_{p_E}^2 \left( \frac{1}{p_0-p_E} - \frac{1}{p(t)-p_E} \right)^2}, \quad (6)$$

wobei  $\sigma_x$  die Messunsicherheit der Größe  $x$  bezeichnet.

Die in dem Versuch zu ermittelnden Saugvermögen werden jeweils unter anderen aus der Steigung  $m_i$  des  $i$ -ten linearen Fits berechnet. Der lineare Fit wird mithilfe von Scientific python [6] angewendet, die Fehler der Parameter werden automatisch analog zur linearen Regression berechnet. Damit ergeben sich für die folgenden Ausdrücke die folgenden Messunsicherheiten:

$$S = -m \cdot V \quad \rightarrow \sigma_S = \sqrt{V^2 \cdot \sigma_m^2 + m^2 \cdot \sigma_V^2} \quad (7)$$

$$S = \frac{m \cdot V}{p_G} \quad \rightarrow \sigma_S = \sqrt{\frac{V^2}{p_G^2} \sigma_m^2 + \frac{m^2}{p_G^2} \sigma_V^2 + \frac{m^2 V^2}{p_G^4} \sigma_{p_G}^2} \quad (8)$$

## 6 Auswertung

Bei der Versuchsvorbereitung wird der Rezipient zuerst mit der Drehschieberpumpe evakuiert. Dabei wird der Druck  $p_E$  ermittelt, welcher der kleinst erreichbare Druck der Vakuumpumpe ist. Der Wert beträgt  $p_E = (3,9 \pm 1,2) \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ . Anschließend wird die Turbopumpe eingeschalten und auch von ihr der Enddruck bestimmt, welcher hier  $p_E = (1,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$  beträgt.

## 6.1 Turbopumpe

Zuerst wurden die Messungen mit der Turbomolekularpumpe durchgeführt, mit der Leckratenmessung wurde begonnen. Das Volumen des benutzten Rezipienten beträgt  $V = (33,0 \pm 3,3) \text{ L}$ .

### 6.1.1 Leckratenmessung

Es wurde, wie in der Abschnitt 4 beschrieben ein Gleichgewichtsdruck von  $p_G = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$ ,  $(7,0 \pm 2,1) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$ ,  $(1,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$ ,  $(2,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$  eingestellt und bei  $t = 0 \text{ s}$  die Pumpe abgeschiebert und in Schritten von  $\Delta t = 10 \text{ s}$  der Druck an dem Messgerät M2 abgelesen. Dies wurde 3 mal für jeden Gleichgewichtsdruck gemacht. Anschließend wurden die Drücke der Messung pro Zeit gemittelt. Die Messwerte der einzelnen Messungen und der gemittelte Druck sind für  $p_G = (1,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$  in der Tabelle 3, für  $(2,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$  in der Tabelle 4, für  $p_G = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$  in der Tabelle 5 und schließlich für  $(7,0 \pm 2,1) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$  in der Tabelle 6 zu finden. Die angegebenen Fehler des gemittelten Drucks entstehen aus der Systematik, also der Unsicherheit des Messgerätes. Die statistischen Fehler berechnet sich nach der Gleichung (4), diese werden hier nicht betrachtet, da sie im Vergleich zu den systematischen Fehlern sehr klein sind.

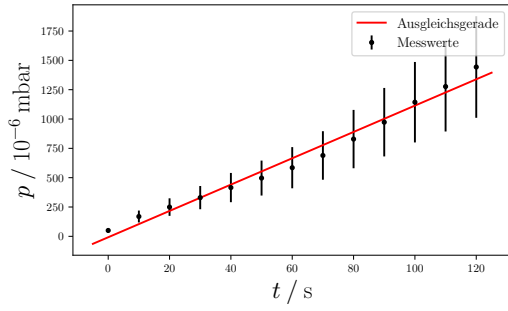
Die gemittelten Drücke werden gegen die Zeit in einem  $t - p$  Diagramm dargestellt. Diese sind für die verschiedenen Gleichgewichtsdrücke in der Abbildung 5 dargestellt. Es werden keine Messdaten exkludiert. Zusätzlich ist jeweils ein Fit der Form  $p(t) = m \cdot t + n$  eingezeichnet. Dieser wird mithilfe von python [4] gemacht. Die Fitparameter ergeben sich zu den folgenden Werten.

Für $p_G = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$	Für $p_G = (7,0 \pm 2,1) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$
$m = (1,12 \pm 0,05) \cdot 10^{-5} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$	$m = (1,93 \pm 0,09) \cdot 10^{-5} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$
$n = (-7,86 \pm 33,73) \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$	$n = (-9,19 \pm 6,11) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$
Für $p_G = (1,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$	Für $p_G = (2,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$
$m = (5,39 \pm 0,21) \cdot 10^{-5} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$	$m = (1,92 \pm 0,03) \cdot 10^{-4} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$
$n = (-4,24 \pm 1,46) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$	$n = (-3,43 \pm 1,64) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$

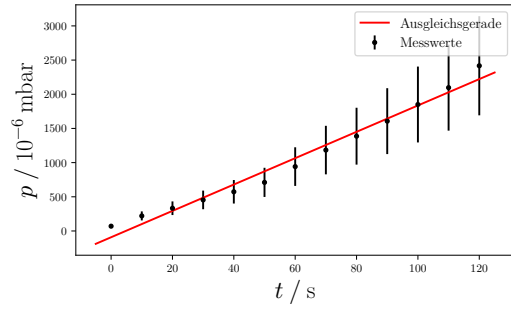
Durch Vergleich mit der Gleichung (3) folgt, dass das Saugvermögen  $S$  sich hier durch

$$S = \frac{m \cdot V}{p_G}$$

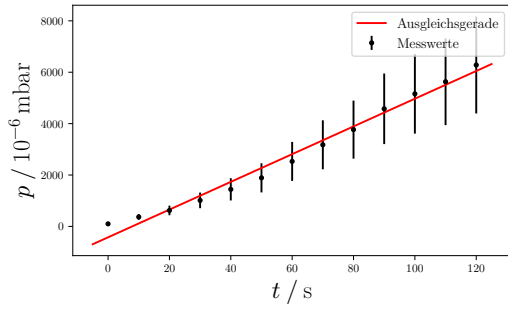
aus der Steigung der linearen Ausgleichsrechnung berechnet. Es werden folgenden Werte



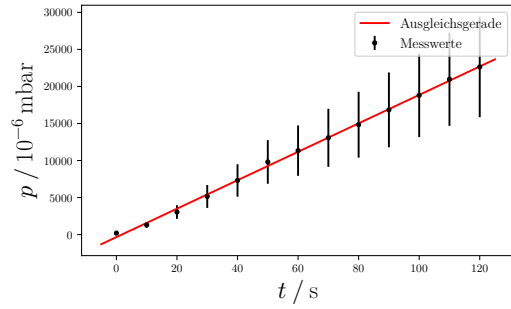
(a)  $p_G = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-5}$  mbar.



(b)  $p_G = (7,0 \pm 2,1) \cdot 10^{-5}$  mbar.



(c)  $p_G = (1,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$  mbar.



(d)  $p_G = (2,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$  mbar.

**Abbildung 5:** Die gemittelten Drücke der Messungen der Drehschieberpumpe zu den verschiedenen Gleichgewichtsdrücken mit der jeweiligen linearen Ausgleichsrechnung.

berechnet:

$$\text{für } p_G = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \\ S = (7,4 \pm 2,4) \frac{1}{\text{s}}$$

$$\text{für } p_G = (7,0 \pm 2,1) \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \\ S = (9,1 \pm 3,0) \frac{1}{\text{s}}$$

$$\text{für } p_G = (1,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \\ S = (17,8 \pm 9,2) \frac{1}{\text{s}}$$

$$\text{für } p_G = (2,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \\ S = (31,7 \pm 10,1) \frac{1}{\text{s}}$$

Die Messunsicherheit des Saugvermögens berechnet sich nach der Gleichung (8).

### 6.1.2 Evakuierungskurve

Bei der Messung der Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe wird der Rezipient mit Luft befüllt bis zu einem Druck von  $p_0 = 5 \cdot 10^{-3}$  mbar. Dann wird der Rezipient abgedichtet und in Abständen von erst  $\Delta t = 5$  s und dann  $\Delta t = 10$  s wird der Druck abgelesen, bis  $t = 120$  s erreicht ist. Die Messung wurde drei mal ausgeführt. In der

weiteren Auswertung wird eine lineare Ausgleichsrechnung gemacht, wobei ein linearer Zusammenhang zwischen dem Logarithmusausdruck

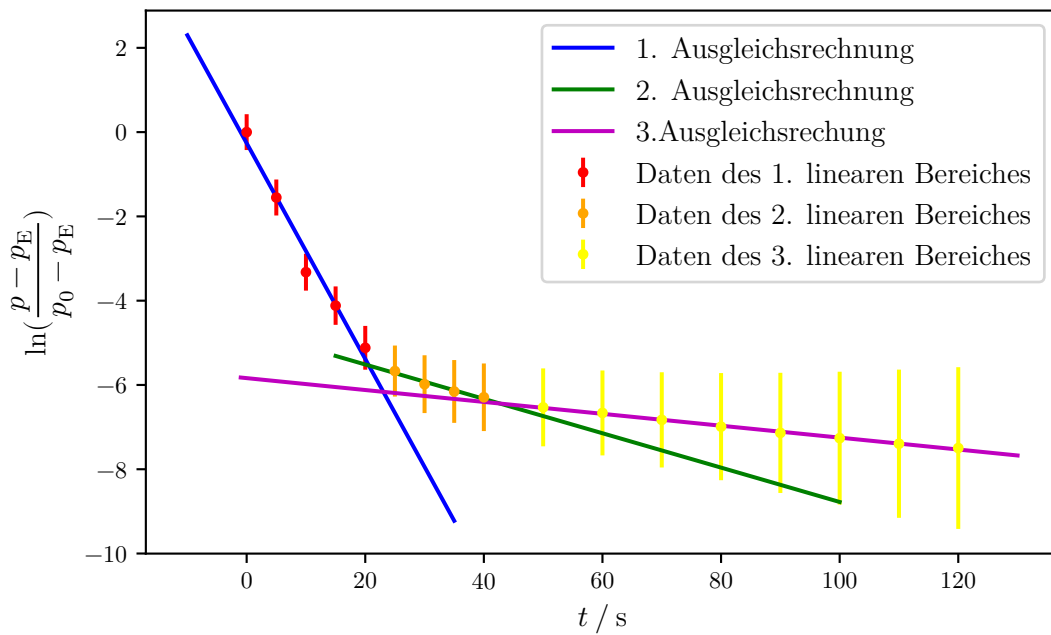
$$\ln(F) = \ln\left(\frac{p(t) - p_E}{p_0 - p_E}\right) = m \cdot t + n$$

und der Zeit besteht, wie es durch Logarithmieren aus der Gleichung (2) hergeleitet wird. Die Messdaten der einzelnen Messungen sind neben dem gemittelten Druck und dem daraus gerechneten Logarithmusausdruck in der Tabelle 7 aufgelistet. Der Enddruck der Pumpe wurde zu  $p_E = (1,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-5}$  mbar bestimmt. Der Fehler des gemittelten Drucks ergibt sich aus der Systematik, die statistischen Fehler werden nicht betrachtet, da sie deutlich kleiner sind. Der Fehler des Logarithmusausdruck berechnet sich nach (6). Es wird der Logarithmusausdruck  $\ln(F)$  gegen die Zeit aufgetragen. In den Daten werden lineare Abhängigkeiten gesucht und dann in diesen Bereichen eine lineare Ausgleichsrechnung der Form

$$y = m \cdot t + n$$

mit Hilfe von [4] durchgeführt. Es werden drei Bereiche gesucht.

Dieses Vorgehen ist in der Abbildung 6 zu sehen. Es wird kein Datenpunkt exkludiert. Die Parameterdaten für die lineare Ausgleichsrechnung sind in der Tabelle 1 aufgelistet.



**Abbildung 6:** Die Messdaten der Evakuierungsmessung der Turbopumpe aufgetragen in einem Logarithmusausdruck gegen die Zeit. Zusätzlich werden lineare Ausgleichsrechnungen in linear wirkende Bereiche gelegt.

**Tabelle 1:** Die Fitparameter und die daraus errechneten Saugvermögen für die einzelnen linearen Bereiche.

Bereiche	$m / (1/s)$	$n$	$S / (1/s)$
$3 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \leq p \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$	$-0,26 \pm 0,03$	$-0,26 \pm 0,28$	$8,4 \pm 1,2$
$2,9 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \leq p \leq 1,75 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$	$-0,041 \pm 0,006$	$-4,70 \pm 0,19$	$1,3 \pm 0,3$
$1,74 \text{ mbar} \leq p \leq 1,35 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$	$-0,014 \pm 0,001$	$-5,84 \pm 0,04$	$0,5 \pm 0,1$

Aus der Steigung der Ausgleichsgeraden kann das Saugvermögen berechnet werden, es gilt der Zusammenhang

$$S = -m \cdot V.$$

Dies folgt aus der Gleichung (1). Die entsprechenden Saugvermögen sind auch in der Tabelle 1 aufgelistet. Die Fehler der Werte werden mit der Gleichung (7) berechnet.

## 6.2 Drehschieberpumpe

Nun werden die gleichen Auswertungsschritte bei den Messwerten der Drehschieberpumpe angewendet. Das Volumen des Rezipienten beträgt nun  $V = (34,0 \pm 3,4) \text{ L}$ , da die Drehschieberpumpe hinter die dann ausgeschaltete Turbomolekularpumpe geschaltet, die Schläuche und die Pumpe, welche nun zusätzlich evakuiert werden müssen, haben also ein Volumen von  $V_{\text{Zusatz}} = (1,0 \pm 0,1) \text{ L}$ .

### 6.2.1 Leckratenmessung

Analog zum Vorgehen bei der Turbomolekularpumpe wird ein Gleichgewichtsdruck eingestellt. Hier werden die Gleichgewichtsdrücke  $p_G = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-1} \text{ mbar}$ ,  $(10 \pm 3) \text{ mbar}$ ,  $(50 \pm 15) \text{ mbar}$ ,  $(100 \pm 50) \text{ mbar}$  benutzt. Für jeden Gleichgewichtsdruck werden drei Messungen durchgeführt. Der Messzeitraum beträgt 200 s, es werden in Schritten von  $\Delta t = 10 \text{ s}$  Daten aufgenommen. Über die drei aufgenommenen Messungen des Drucks wird das arithmetische Mittel genommen. Der in den Tabellen angegebene Fehler des gemittelten Drucks ergibt sich aus der Systematik, die statistischen Fehler aus der Mittelung berechnen sich nach der Gleichung (4), da diese Fehler deutlich kleiner als die systematischen Fehler sind, werden sie nicht weiter betrachtet. Die großen Fehler der Messwerte lassen sich dadurch erklären, dass bei der Durchführung mit dem falschen Messgerät gemessen wurde, welches eigentlich nicht für diesen Druckbereich ausgelegt ist. Die Daten befinden sich für den Gleichgewichtsdruck  $p_G = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-1} \text{ mbar}$  in der Tabelle 8, und für  $p_G = (10 \pm 3) \text{ mbar}$  in der Tabelle 9. Für den Gleichgewichtsdruck  $p_G = (50 \pm 15) \text{ mbar}$  sind die Messdaten in der Tabelle 10 und für  $p_G = (100 \pm 50) \text{ mbar}$  in der Tabelle 11.

Die gemittelten Drücke werden gegen die Zeit aufgetragen. Dies ist in den Abbildungen in der Abbildung 7 zu sehen. Dazu sind in lineare Ausgleichsrechnungen mit python [4]

durchgeführt worden. Die Fitparameter ergeben sich zu:

Für $p_G = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-1} \text{ mbar}$	Für $p_G = (10 \pm 3) \text{ mbar}$
$m = (1,90 \pm 0,06) \cdot 10^{-3} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$	$m = (0,23 \pm 0,01) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$
$n = (0,490 \pm 0,007) \text{ mbar}$	$n = (10,12 \pm 0,21) \text{ mbar}$
Für $p_G = (50 \pm 15) \text{ mbar}$	Für $p_G = (100 \pm 50) \text{ mbar}$
$m = (2,19 \pm 0,11) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$	$m = (5,74 \pm 0,43) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$
$n = (46,12 \pm 3,14) \text{ mbar}$	$n = (95,27 \pm 8,04) \text{ mbar}$

Es werden bei den Gleichgewichtsdrücken  $p_G = (50 \pm 15) \text{ mbar}$ ,  $(100 \pm 50) \text{ mbar}$  einige Datenpunkte exkludiert, da der erweiterte Messbereich des Messgerätes dann überschritten wird und keine Linearität mehr vorliegt, wie es auch in den Abbildungen zu sehen ist. Aus den Steigungen der linearen Ausgleichsrechnung werden die Saugvermögen berechnet durch Vergleich mit Gleichung (3), wobei sich die Messunsicherheit nach Gleichung (8) berechnet:

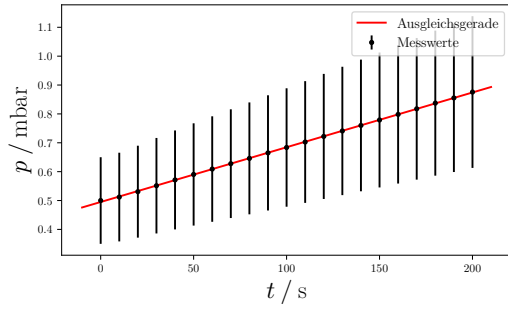
für $p_G = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-1} \text{ mbar}$	für $p_G = (10 \pm 3) \text{ mbar}$
$S = (0,12 \pm 0,05) \frac{1}{\text{s}}$	$S = (0,79 \pm 0,25) \frac{1}{\text{s}}$
für $p_G = (50 \pm 15) \text{ mbar}$	für $p_G = (100 \pm 50) \text{ mbar}$
$S = (1,49 \pm 0,48) \frac{1}{\text{s}}$	$S = (1,95 \pm 1,01) \frac{1}{\text{s}}$

### 6.2.2 Evakuierungskurve

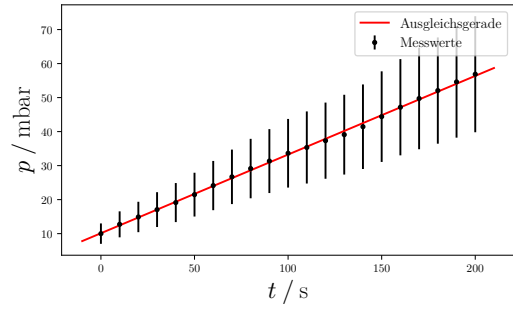
Die Drehschieberpumpe hat einen Enddruck von  $p_E = (3,9 \pm 1,2) \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ . Der Rezipient wird für die Aufnahme der Evakuierungskurve mit der Drehschieberpumpe bis zu einem Druck von  $p_0 = (1000 \pm 500) \text{ mbar}$  belüftet. Dann wird die Luftzufuhr abgeschiebert und der Druck in Abhängigkeit der Zeit in Schritten von  $\Delta t = 10 \text{ s}$  aufgenommen bis  $t = 600 \text{ s}$  erreicht. Die aufgenommenen Messdaten sind in den Tabelle 12 und 13 zu finden. Es wird über die Drücke gemittelt, wobei der in den Tabellen angegebene Fehler sich aus der Systematik ergibt, da die statistischen Fehler deutlich kleiner sind. Bei der dritten Messreihe werden die ersten beiden aufgenommenen Datenpunkte exkludiert, da diese so gut wie gleich dem dritten Punkt sind und sich daher vermuten lässt, dass die Zeitnahme begonnen hat, bevor der Rezipient komplett abgedichtet war. Daher hat diese Messreihe zwei Werte weniger, dann wird nur über die erste und zweite Messung gemittelt. Dort sind außerdem die Ergebnisse der Rechnung

$$\ln(F) = \ln \left( \frac{p(t) - p_E}{p_0 - p_E} \right)$$

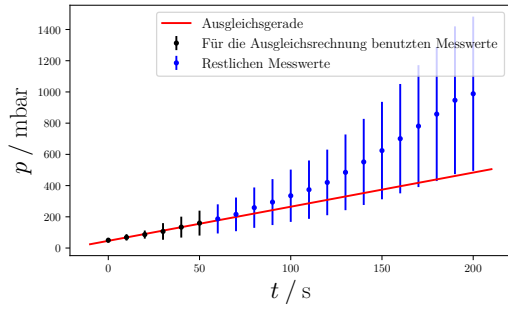




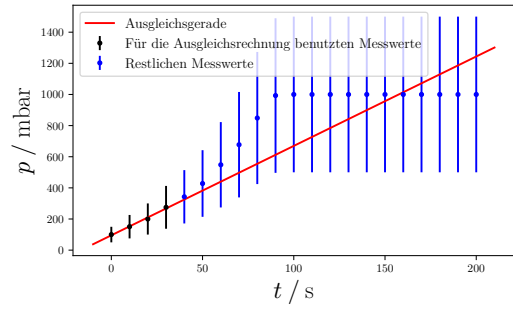
(a)  $p_G = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-1}$  mbar.



(b)  $p_G = (10 \pm 3)$  mbar.



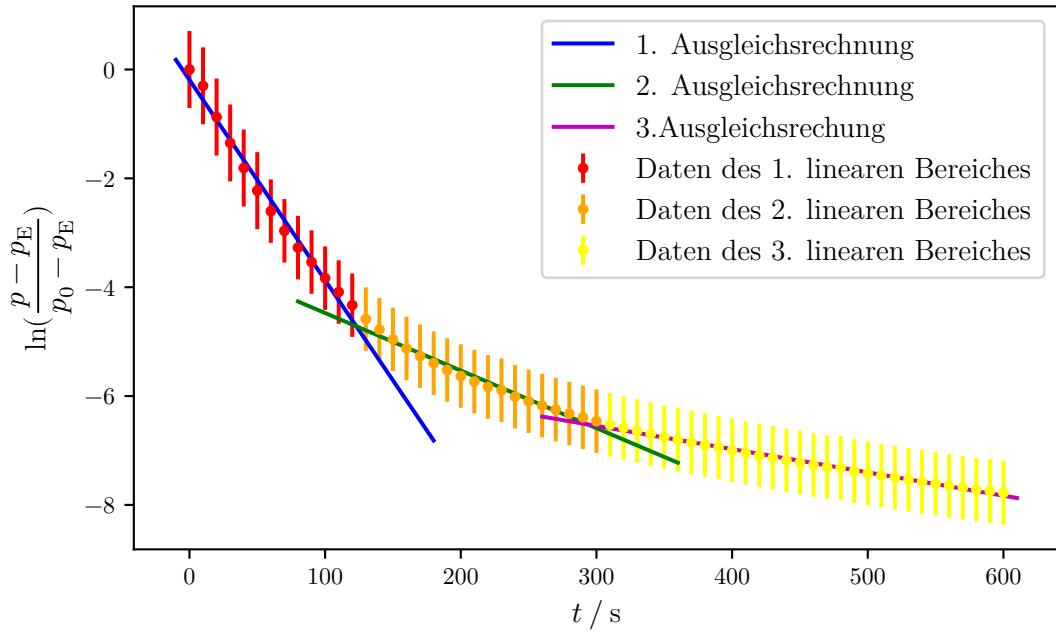
(c)  $p_G = (50 \pm 15)$  mbar.



(d)  $p_G = (100 \pm 50)$  mbar.

**Abbildung 7:** Die gemittelten Drücke der Messungen zu den verschiedenen Gleichgewichtsdrücken mit der jeweiligen linearen Ausgleichsrechnung.

eingetragen, da diese in ein  $t - \ln(F)$  Diagramm eingetragen werden. Die Fehler dieses Ausdruckes werden mit der Gleichung (6) berechnet.



**Abbildung 8:** Die gemittelten Messdaten der Evakuierungsmessung der Drehschieberpumpe aufgetragen in einem Logarithmusausdruck gegen die Zeit. Zusätzlich werden lineare Ausgleichsrechnungen in linear wirkende Bereiche gelegt.

Die Abbildungen werden auf lineares Verhalten untersucht, wobei drei verschiedene Bereiche mit linearem Verhalten identifiziert werden. Dies ist in der Abbildung 8 zu sehen.

Die Parameterdaten der linearen Ausgleichsrechnungen sind in der Tabelle 2 für die verschiedenen Druckbereiche aufgelistet. Das Saugvermögen berechnet sich aus der Steigung  $m$  durch

$$S = m \cdot V,$$

welches sich durch Vergleich mit Gleichung (1) ergibt. Die Werte für das Saugvermögen sind auch in der Tabelle 2 aufgelistet, der Fehler berechnet sich nach der Formel (8).

**Tabelle 2:** Die Fitparameter und die daraus errechneten Saugvermögen für die einzelnen linearen Bereiche von der Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe.

Bereiche:	$m / (1/s)$	$n$	$S / (l/s)$
$10 \text{ mbar} \leq p \leq 1000 \text{ mbar}$	$-0,037 \pm 0,002$	$-0,19 \pm 0,10$	$1,6 \pm 0,2$
$1,5 \text{ mbar} \leq p \leq 10 \text{ mbar}$	$-0,011 \pm 0,001$	$-3,42 \pm 0,10$	$0,4 \pm 0,1$
$0,4 \text{ mbar} \leq p \leq 1,5 \text{ mbar}$	$-0,004 \pm 0,001$	$-5,27 \pm 0,03$	$0,1 \pm 0,1$

### 6.3 Tabellen der Messwerte

**Tabelle 3:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Turbopumpe mit den Gleichgewichtsdruck  $P_G = (1,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$  mbar.

$t / s$	$p_{M1} / 10^{-4}$ mbar		$p_{M2} / 10^{-4}$ mbar		$p_{M3} / 10^{-4}$ mbar		$p_{Mittel} / 10^{-4}$ mbar	
0	1,0 $\pm$	0,3	1,0 $\pm$	0,3	1,0 $\pm$	0,3	1,0 $\pm$	0,3
10	3,6 $\pm$	1,1	3,6 $\pm$	1,1	3,9 $\pm$	1,2	3,7 $\pm$	1,2
20	5,9 $\pm$	1,8	6,5 $\pm$	2,0	6,2 $\pm$	1,9	6,2 $\pm$	1,9
30	10,1 $\pm$	3,1	10,2 $\pm$	3,1	10,1 $\pm$	3,1	10,1 $\pm$	3,1
40	14,2 $\pm$	4,3	14,3 $\pm$	4,3	14,8 $\pm$	4,5	14,4 $\pm$	4,4
50	18,8 $\pm$	5,7	18,9 $\pm$	5,7	19,0 $\pm$	5,7	18,9 $\pm$	5,7
60	25,3 $\pm$	7,6	25,0 $\pm$	7,5	25,6 $\pm$	7,7	25,3 $\pm$	7,6
70	31,9 $\pm$	9,6	31,7 $\pm$	9,6	31,7 $\pm$	9,5	31,8 $\pm$	9,6
80	38,0 $\pm$	11,4	37,4 $\pm$	11,3	37,6 $\pm$	11,3	37,7 $\pm$	11,3
90	46,2 $\pm$	13,9	44,9 $\pm$	13,5	46,2 $\pm$	13,9	45,8 $\pm$	13,8
100	51,8 $\pm$	15,6	51,4 $\pm$	15,5	51,6 $\pm$	15,5	51,6 $\pm$	15,5
110	57,1 $\pm$	17,2	56,0 $\pm$	16,8	55,8 $\pm$	16,8	56,3 $\pm$	16,9
120	64,0 $\pm$	19,2	62,4 $\pm$	18,8	62,0 $\pm$	18,6	62,8 $\pm$	18,9

**Tabelle 4:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Turbopumpe mit den Gleichgewichtsdruck  $p_G = (2,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$  mbar.

$t / s$	$p_{M1} / 10^{-4}$ mbar		$p_{M2} / 10^{-4}$ mbar		$p_{M3} / 10^{-4}$ mbar		$p_{Mittel} / 10^{-4}$ mbar	
0	2,0 $\pm$	0,6	2,0 $\pm$	0,6	2,0 $\pm$	0,6	2,0 $\pm$	0,6
10	11,3 $\pm$	3,4	12,7 $\pm$	3,9	14,8 $\pm$	4,5	12,9 $\pm$	3,9
20	27,8 $\pm$	8,4	31,8 $\pm$	9,6	31,8 $\pm$	9,6	30,5 $\pm$	9,2
30	48,3 $\pm$	14,5	54,3 $\pm$	16,3	51,8 $\pm$	15,6	51,5 $\pm$	15,5
40	64,4 $\pm$	19,4	79,8 $\pm$	24,0	75,0 $\pm$	22,5	73,0 $\pm$	22,0
50	89,2 $\pm$	26,8	104,0 $\pm$	31,2	101,0 $\pm$	30,3	98,0 $\pm$	29,5
60	107,0 $\pm$	32,1	119,0 $\pm$	35,7	114,0 $\pm$	34,2	113,3 $\pm$	34,0
70	122,0 $\pm$	36,6	137,0 $\pm$	41,1	133,0 $\pm$	39,9	130,7 $\pm$	39,2
80	137,0 $\pm$	41,1	156,0 $\pm$	46,8	152,0 $\pm$	45,6	148,3 $\pm$	44,5
90	155,0 $\pm$	46,5	180,0 $\pm$	54,0	170,0 $\pm$	51,0	168,3 $\pm$	50,5
100	175,0 $\pm$	52,5	200,0 $\pm$	60,0	189,0 $\pm$	56,7	188,0 $\pm$	56,4
110	197,0 $\pm$	59,1	218,0 $\pm$	65,4	214,0 $\pm$	64,2	209,7 $\pm$	62,9
120	215,0 $\pm$	64,5	236,0 $\pm$	70,8	228,0 $\pm$	68,4	226,3 $\pm$	67,9

**Tabelle 5:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Turbopumpe mit den Gleichgewichtsdruck  $P_G = (5,0 \pm 1,5)$  mbar.

$t / s$	$p_{M1} / 10^{-5}$ mbar		$p_{M2} / 10^{-5}$ mbar		$p_{M3} / 10^{-5}$ mbar		$p_{Mittel} / 10^{-5}$ mbar	
0	5,0 $\pm$	1,5	5,0 $\pm$	1,5	5,0 $\pm$	1,5	5,0 $\pm$	1,5
10	17,8 $\pm$	5,4	16,5 $\pm$	5,0	16,4 $\pm$	5,0	16,9 $\pm$	5,1
20	25,0 $\pm$	7,5	24,6 $\pm$	7,4	25,2 $\pm$	7,6	24,9 $\pm$	7,5
30	33,2 $\pm$	10,0	32,6 $\pm$	9,8	33,2 $\pm$	10,0	33,0 $\pm$	9,9
40	41,9 $\pm$	12,6	41,2 $\pm$	12,4	41,6 $\pm$	12,5	41,5 $\pm$	12,5
50	49,7 $\pm$	15,0	49,7 $\pm$	15,0	49,6 $\pm$	14,9	49,6 $\pm$	14,9
60	59,0 $\pm$	17,7	58,2 $\pm$	17,5	58,3 $\pm$	17,5	58,5 $\pm$	17,6
70	68,9 $\pm$	20,7	68,6 $\pm$	20,6	69,3 $\pm$	20,8	68,9 $\pm$	20,7
80	83,5 $\pm$	25,1	82,3 $\pm$	24,7	82,9 $\pm$	24,9	82,9 $\pm$	24,9
90	98,3 $\pm$	29,5	97,3 $\pm$	29,2	96,3 $\pm$	28,9	97,3 $\pm$	29,2
100	115,0 $\pm$	34,5	114,0 $\pm$	34,2	114,0 $\pm$	34,2	114,3 $\pm$	34,3
110	128,0 $\pm$	38,4	127,0 $\pm$	38,1	128,0 $\pm$	38,4	127,6 $\pm$	38,3
120	145,0 $\pm$	43,5	144,0 $\pm$	43,2	144,0 $\pm$	43,2	144,3 $\pm$	43,3

**Tabelle 6:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Turbopumpe mit den Gleichgewichtsdruck  $p_G = (7,0 \pm 2,1) \cdot 10^{-5}$  mbar.

$t / s$	$p_{M1} / 10^{-5}$ mbar		$p_{M2} / 10^{-5}$ mbar		$p_{M3} / 10^{-5}$ mbar		$p_{Mittel} / 10^{-5}$ mbar	
0	7,0 ±	2,1	7,0 ±	2,1	7,0 ±	2,1	7,0 ±	2,1
10	20,9 ±	6,3	22,0 ±	6,6	23,2 ±	7,0	22,0 ±	6,7
20	32,3 ±	9,7	32,8 ±	9,9	34,7 ±	10,5	33,3 ±	10,0
30	44,2 ±	13,3	45,3 ±	13,6	46,8 ±	14,1	45,4 ±	13,7
40	55,1 ±	16,6	56,7 ±	17,1	60,2 ±	18,1	57,3 ±	17,2
50	59,1 ±	17,8	74,5 ±	22,4	79,7 ±	24,0	71,1 ±	21,4
60	88,1 ±	26,5	93,4 ±	28,1	101,0 ±	30,3	94,2 ±	28,3
70	112,0 ±	33,6	117,0 ±	35,1	126,0 ±	37,8	118,3 ±	35,5
80	131,0 ±	39,3	139,0 ±	41,7	146,0 ±	43,8	138,7 ±	41,6
90	150,0 ±	45,0	162,0 ±	48,6	170,0 ±	51,0	160,7 ±	48,2
100	176,0 ±	52,8	184,0 ±	55,2	195,0 ±	58,5	185,0 ±	55,5
110	197,0 ±	59,1	208,0 ±	62,4	224,0 ±	67,2	209,7 ±	62,9
120	226,0 ±	67,8	243,0 ±	72,9	256,0 ±	76,8	241,7 ±	72,5

**Tabelle 7:** Die einzelnen Messdaten der Evakuierungsmessung mit der Turbopumpe. Zusätzlich ist der Druck einmal gemittelt aufgeschrieben, der Fehler entspricht dem systematischen Fehler. Der Ausdruck  $\ln(F)$  ist aufgelistet, wobei  $F$  der Quotient  $F = \frac{p(t)-p_E}{p_0-p_E}$  ist.

$t / s$	$p_{M1} / 10^{-6}$ mbar		$p_{M2} / 10^{-6}$ mbar		$p_{M3} / 10^{-6}$ mbar		$p_{mittel} / 10^{-6}$ mbar		$\ln(F)$
0	5000,0 ±	1500,0	5000,0 ±	1500,0	5000,0 ±	1500,0	5000,0 ±	1500,0	0,00 ± 0,43
5	1220,0 ±	366,0	986,0 ±	295,8	999,0 ±	299,7	1068,3 ±	320,5	-1,55 ± 0,43
10	194,0 ±	58,2	176,0 ±	52,8	202,0 ±	60,6	190,7 ±	57,2	-3,32 ± 0,44
15	98,3 ±	29,5	79,3 ±	23,8	98,9 ±	29,7	92,2 ±	27,7	-4,12 ± 0,46
20	44,6 ±	13,4	35,3 ±	10,6	42,4 ±	12,8	40,8 ±	12,3	-5,12 ± 0,52
25	30,6 ±	9,2	25,8 ±	7,8	27,9 ±	8,4	28,1 ±	8,5	-5,67 ± 0,61
30	25,2 ±	7,6	22,0 ±	6,6	23,3 ±	7,0	23,5 ±	7,1	-5,98 ± 0,69
35	22,6 ±	6,8	20,4 ±	6,2	21,5 ±	6,5	21,5 ±	6,5	-6,15 ± 0,75
40	21,2 ±	6,4	19,2 ±	5,8	20,0 ±	6,0	20,1 ±	6,1	-6,29 ± 0,80
50	18,9 ±	5,7	17,4 ±	5,3	18,2 ±	5,5	18,2 ±	5,5	-6,53 ± 0,92
60	17,5 ±	5,3	16,8 ±	5,1	17,5 ±	5,3	17,3 ±	5,2	-6,66 ± 1,01
70	16,8 ±	5,1	15,8 ±	4,8	16,3 ±	4,9	16,3 ±	4,9	-6,83 ± 1,13
80	15,9 ±	4,8	15,1 ±	4,6	15,5 ±	4,7	15,5 ±	4,7	-6,99 ± 1,27
90	15,2 ±	4,6	14,5 ±	4,4	14,9 ±	4,5	14,9 ±	4,5	-7,14 ± 1,43
100	14,7 ±	4,5	14,1 ±	4,3	14,4 ±	4,4	14,4 ±	4,4	-7,26 ± 1,58
110	14,2 ±	4,3	13,7 ±	4,2	14,0 ±	4,3	14,0 ±	4,2	-7,39 ± 1,76
120	13,8 ±	4,2	13,5 ±	4,1	13,7 ±	4,2	13,7 ±	4,1	-7,50 ± 1,92

**Tabelle 8:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit dem Gleichgewichtsdruck  $p_G = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-1}$  mbar.

$t / s$	$p_{M1} / 10^{-1}$ mbar		$p_{M2} / 10^{-1}$ mbar		$p_{M3} / 10^{-1}$ mbar		$p_{Mittel} / 10^{-1}$ mbar	
0	5,0 ±	1,5	5,0 ±	1,5	5,0 ±	1,5	5,0 ±	1,5
10	5,1 ±	1,6	5,1 ±	1,6	5,2 ±	1,6	5,1 ±	1,6
20	5,3 ±	1,6	5,2 ±	1,6	5,4 ±	1,7	5,3 ±	1,6
30	5,5 ±	1,7	5,4 ±	1,7	5,6 ±	1,7	5,5 ±	1,7
40	5,7 ±	1,8	5,6 ±	1,7	5,9 ±	1,8	5,7 ±	1,8
50	5,9 ±	1,8	5,8 ±	1,8	6,1 ±	1,9	5,9 ±	1,8
60	6,1 ±	1,9	5,9 ±	1,8	6,3 ±	1,9	6,1 ±	1,9
70	6,3 ±	1,9	6,1 ±	1,9	6,5 ±	1,0	6,3 ±	1,9
80	6,5 ±	2,0	6,2 ±	1,9	6,7 ±	2,1	6,5 ±	1,0
90	6,6 ±	2,0	6,4 ±	2,0	6,9 ±	2,1	6,7 ±	2,0
100	6,8 ±	2,1	6,6 ±	2,0	7,1 ±	2,2	6,8 ±	2,1
110	7,0 ±	2,1	6,7 ±	2,1	7,3 ±	2,2	7,0 ±	2,2
120	7,2 ±	2,2	6,9 ±	2,1	7,6 ±	2,3	7,2 ±	2,2
130	7,4 ±	2,3	7,1 ±	2,2	7,8 ±	2,4	7,4 ±	2,3
140	7,6 ±	2,3	7,2 ±	2,2	8,1 ±	2,4	7,6 ±	2,3
150	7,8 ±	2,4	7,4 ±	2,3	8,3 ±	2,5	7,8 ±	2,4
160	8,0 ±	2,4	7,6 ±	2,3	8,4 ±	2,6	8,0 ±	2,4
170	8,1 ±	2,5	7,7 ±	2,4	8,7 ±	2,6	8,2 ±	2,6
180	8,3 ±	2,5	7,9 ±	2,4	8,9 ±	2,7	8,4 ±	2,5
190	8,5 ±	2,6	8,1 ±	2,5	9,1 ±	2,8	8,6 ±	2,6
200	8,7 ±	2,7	8,2 ±	2,5	9,3 ±	2,8	8,8 ±	2,7

**Tabelle 9:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit dem Gleichgewichtsdruck  $p_G = (10 \pm 3)$  mbar.

$t / \text{s}$	$p_{M1} / \text{mbar}$		$p_{M2} / \text{mbar}$		$p_{M3} / \text{mbar}$		$p_{\text{Mittel}} / \text{mbar}$	
0	10,0	$\pm 3,0$	10,0	$\pm 3,0$	10,0	$\pm 3,0$	10,0	$\pm 3,0$
10	12,7	$\pm 3,9$	12,6	$\pm 3,8$	12,9	$\pm 3,9$	12,7	$\pm 3,9$
20	14,9	$\pm 4,5$	14,8	$\pm 4,5$	15,0	$\pm 4,5$	14,9	$\pm 4,5$
30	17,0	$\pm 5,1$	17,0	$\pm 5,1$	17,2	$\pm 5,2$	17,1	$\pm 5,2$
40	19,1	$\pm 5,8$	19,1	$\pm 5,8$	19,2	$\pm 5,8$	19,1	$\pm 5,8$
50	21,3	$\pm 6,4$	21,5	$\pm 6,5$	21,6	$\pm 6,5$	21,5	$\pm 6,5$
60	24,0	$\pm 7,2$	24,1	$\pm 7,3$	24,3	$\pm 7,3$	24,1	$\pm 7,3$
70	26,6	$\pm 8,0$	26,7	$\pm 8,1$	26,8	$\pm 8,1$	26,7	$\pm 8,1$
80	29,1	$\pm 8,8$	29,1	$\pm 8,8$	29,2	$\pm 8,8$	29,1	$\pm 8,8$
90	31,3	$\pm 9,4$	31,3	$\pm 9,4$	31,4	$\pm 9,5$	31,3	$\pm 9,4$
100	33,5	$\pm 10,1$	33,9	$\pm 10,2$	33,5	$\pm 10,1$	33,6	$\pm 10,1$
110	35,3	$\pm 10,6$	35,3	$\pm 10,6$	35,4	$\pm 10,7$	35,3	$\pm 10,6$
120	37,2	$\pm 11,2$	37,4	$\pm 11,3$	37,4	$\pm 11,3$	37,3	$\pm 11,2$
130	39,1	$\pm 11,8$	39,0	$\pm 11,7$	39,2	$\pm 11,8$	39,1	$\pm 11,8$
140	41,4	$\pm 12,5$	41,4	$\pm 12,5$	41,5	$\pm 12,5$	41,4	$\pm 12,5$
150	44,4	$\pm 13,4$	44,4	$\pm 13,4$	44,4	$\pm 13,4$	44,4	$\pm 13,4$
160	47,0	$\pm 14,1$	47,3	$\pm 14,2$	47,2	$\pm 14,2$	47,2	$\pm 14,2$
170	49,6	$\pm 14,9$	49,8	$\pm 15,0$	49,8	$\pm 15,0$	49,8	$\pm 15,0$
180	52,1	$\pm 15,7$	51,9	$\pm 15,6$	52,2	$\pm 15,7$	52,1	$\pm 15,7$
190	54,6	$\pm 16,4$	54,5	$\pm 16,4$	54,7	$\pm 16,5$	54,6	$\pm 16,4$
200	56,9	$\pm 17,1$	56,8	$\pm 17,1$	56,9	$\pm 17,1$	56,9	$\pm 17,1$

**Tabelle 10:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit den Gleichgewichtsdruck  $p_G = (50 \pm 15)$  mbar.

$t / \text{s}$	$p_{M1} / \text{mbar}$		$p_{M2} / \text{mbar}$		$p_{M3} / \text{mbar}$		$p_{\text{Mittel}} / \text{mbar}$	
0	50	$\pm 15$	50	$\pm 15$	50	$\pm 15$	50	$\pm 15$
10	69	$\pm 21$	70	$\pm 21$	67	$\pm 21$	68	$\pm 21$
20	87	$\pm 27$	87	$\pm 27$	85	$\pm 26$	86	$\pm 26$
30	109	$\pm 55$	108	$\pm 54$	102	$\pm 51$	106	$\pm 54$
40	135	$\pm 68$	137	$\pm 69$	130	$\pm 65$	134	$\pm 67$
50	161	$\pm 81$	163	$\pm 82$	155	$\pm 78$	160	$\pm 80$
60	190	$\pm 95$	189	$\pm 95$	181	$\pm 91$	187	$\pm 94$
70	221	$\pm 111$	218	$\pm 109$	208	$\pm 104$	216	$\pm 108$
80	264	$\pm 132$	266	$\pm 133$	246	$\pm 123$	259	$\pm 130$
90	297	$\pm 149$	302	$\pm 151$	284	$\pm 142$	294	$\pm 148$
100	342	$\pm 171$	338	$\pm 169$	325	$\pm 163$	335	$\pm 168$
110	374	$\pm 187$	379	$\pm 190$	369	$\pm 185$	374	$\pm 187$
120	431	$\pm 216$	435	$\pm 218$	395	$\pm 198$	420	$\pm 211$
130	502	$\pm 251$	498	$\pm 249$	455	$\pm 228$	485	$\pm 243$
140	560	$\pm 280$	569	$\pm 285$	526	$\pm 263$	552	$\pm 276$
150	642	$\pm 321$	649	$\pm 325$	582	$\pm 291$	624	$\pm 313$
160	710	$\pm 355$	704	$\pm 352$	688	$\pm 344$	701	$\pm 351$
170	795	$\pm 398$	808	$\pm 404$	740	$\pm 370$	781	$\pm 391$
180	874	$\pm 437$	880	$\pm 440$	820	$\pm 410$	858	$\pm 429$
190	945	$\pm 473$	1000	$\pm 500$	895	$\pm 448$	947	$\pm 474$
200	1000	$\pm 500$	1000	$\pm 500$	965	$\pm 483$	988	$\pm 495$



**Tabelle 11:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit den Gleichgewichtsdruck  $p_G = (100 \pm 50)$  mbar.

$t / \text{s}$	$p_{M1} / \text{mbar}$		$p_{M2} / \text{mbar}$		$p_{M3} / \text{mbar}$		$p_{\text{Mittel}} / \text{mbar}$	
0	100 $\pm$	30	100 $\pm$	30	100 $\pm$	30	100 $\pm$	50
10	138 $\pm$	69	156 $\pm$	78	158 $\pm$	79	151 $\pm$	76
20	186 $\pm$	93	206 $\pm$	103	208 $\pm$	104	200 $\pm$	100
30	253 $\pm$	127	281 $\pm$	141	291 $\pm$	146	275 $\pm$	138
40	323 $\pm$	162	349 $\pm$	175	356 $\pm$	178	343 $\pm$	172
50	397 $\pm$	199	439 $\pm$	220	448 $\pm$	224	428 $\pm$	214
60	512 $\pm$	256	556 $\pm$	278	577 $\pm$	289	549 $\pm$	275
70	655 $\pm$	328	683 $\pm$	342	694 $\pm$	347	677 $\pm$	339
80	788 $\pm$	394	882 $\pm$	441	876 $\pm$	438	849 $\pm$	425
90	979 $\pm$	490	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	993 $\pm$	497
100	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500
110	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500
120	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500
130	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500
140	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500
150	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500
160	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500
170	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500
180	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500
190	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500
200	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500	1000 $\pm$	500

**Tabelle 12:** Die einzelnen Messdaten der Evakuierungsmessung mit der Drehschieberpumpe im Zeitbereich  $t \in [0 \text{ s}, 300 \text{ s}]$ . Zusätzlich ist der gemittelte Druck noch aufgetragen. Auch der Ausdruck  $\ln(F)$  ist aufgelistet, wobei  $F$  der Quotient  $F = \frac{p(t)-p_E}{p_0-p_E}$  ist.

$t / \text{s}$	$p_{M1} / \text{mbar}$	$p_{M2} / \text{mbar}$	$p_{M3} / \text{mbar}$	$p_{\text{mittel}} / \text{mbar}$	$\ln(F)$
0	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$0,0 \pm 0,8$
10	$798,0 \pm 399,0$	$800,0 \pm 400,0$	$624,0 \pm 312,0$	$740,7 \pm 370,4$	$-0,3 \pm 0,8$
20	$442,0 \pm 221,0$	$450,0 \pm 225,0$	$359,0 \pm 179,5$	$417,0 \pm 208,5$	$-0,9 \pm 0,8$
30	$278,0 \pm 139,0$	$282,0 \pm 141,0$	$218,0 \pm 109,0$	$259,3 \pm 129,7$	$-1,4 \pm 0,8$
40	$172,0 \pm 86,0$	$177,0 \pm 88,5$	$142,0 \pm 71,0$	$163,7 \pm 81,9$	$-1,8 \pm 0,8$
50	$111,0 \pm 55,5$	$119,0 \pm 59,5$	$93,8 \pm 28,2$	$107,9 \pm 54,0$	$-2,2 \pm 0,8$
60	$77,1 \pm 23,2$	$79,7 \pm 24,0$	$65,5 \pm 19,7$	$74,1 \pm 22,3$	$-2,6 \pm 0,6$
70	$53,2 \pm 16,0$	$55,8 \pm 16,8$	$45,9 \pm 13,8$	$51,6 \pm 15,5$	$-3,0 \pm 0,6$
80	$38,2 \pm 11,5$	$40,7 \pm 12,3$	$34,8 \pm 10,5$	$37,9 \pm 11,4$	$-3,3 \pm 0,6$
90	$29,8 \pm 9,0$	$31,4 \pm 9,5$	$26,0 \pm 7,8$	$29,1 \pm 8,8$	$-3,5 \pm 0,6$
100	$22,1 \pm 6,7$	$23,4 \pm 7,1$	$19,4 \pm 5,9$	$21,6 \pm 6,5$	$-3,8 \pm 0,6$
110	$17,0 \pm 5,1$	$17,7 \pm 5,4$	$15,6 \pm 4,7$	$16,8 \pm 5,1$	$-4,1 \pm 0,6$
120	$13,3 \pm 4,0$	$14,0 \pm 4,2$	$12,2 \pm 3,7$	$13,2 \pm 4,0$	$-4,3 \pm 0,6$
130	$10,3 \pm 3,1$	$10,8 \pm 3,3$	$9,5 \pm 2,9$	$10,1 \pm 3,1$	$-4,6 \pm 0,6$
140	$8,5 \pm 2,6$	$8,8 \pm 2,7$	$7,9 \pm 2,4$	$8,4 \pm 2,6$	$-4,8 \pm 0,6$
150	$7,0 \pm 2,2$	$7,4 \pm 2,3$	$6,7 \pm 2,0$	$7,0 \pm 2,2$	$-5,0 \pm 0,6$
160	$6,0 \pm 1,9$	$6,2 \pm 1,9$	$5,7 \pm 1,7$	$6,0 \pm 1,8$	$-5,1 \pm 0,6$
170	$5,2 \pm 1,6$	$5,4 \pm 1,7$	$4,9 \pm 1,5$	$5,2 \pm 1,6$	$-5,8 \pm 0,6$
180	$4,6 \pm 1,4$	$4,7 \pm 1,4$	$4,4 \pm 1,4$	$4,5 \pm 1,4$	$-5,4 \pm 0,6$
190	$4,0 \pm 1,3$	$4,1 \pm 1,3$	$3,9 \pm 1,2$	$4,0 \pm 1,2$	$-5,5 \pm 0,6$
200	$3,6 \pm 1,1$	$3,7 \pm 1,1$	$3,5 \pm 1,1$	$3,6 \pm 1,1$	$-5,6 \pm 0,6$
210	$3,3 \pm 1,0$	$3,3 \pm 1,0$	$3,1 \pm 1,0$	$3,2 \pm 1,0$	$-5,7 \pm 0,6$
220	$3,0 \pm 0,9$	$3,0 \pm 0,9$	$2,9 \pm 0,9$	$2,9 \pm 0,8$	$-5,8 \pm 0,6$
230	$3,0 \pm 0,9$	$2,7 \pm 0,9$	$2,6 \pm 0,8$	$2,8 \pm 0,9$	$-5,9 \pm 0,6$
240	$2,5 \pm 0,8$	$2,5 \pm 0,8$	$2,4 \pm 0,8$	$2,5 \pm 0,8$	$-6,0 \pm 0,6$
250	$2,3 \pm 0,7$	$2,3 \pm 0,7$	$2,2 \pm 0,7$	$2,3 \pm 0,7$	$-6,1 \pm 0,6$
260	$2,1 \pm 0,7$	$2,1 \pm 0,7$	$2,0 \pm 0,7$	$2,1 \pm 0,7$	$-6,2 \pm 0,6$
270	$1,9 \pm 0,6$	$2,0 \pm 0,6$	$1,9 \pm 0,6$	$1,9 \pm 0,6$	$-6,3 \pm 0,6$
280	$1,8 \pm 0,6$	$1,8 \pm 0,6$	$1,8 \pm 0,6$	$1,8 \pm 0,6$	$-6,3 \pm 0,6$
290	$1,7 \pm 0,5$	$1,7 \pm 0,6$	$1,6 \pm 0,5$	$1,7 \pm 0,5$	$-6,4 \pm 0,6$
300	$1,6 \pm 0,5$	$1,6 \pm 0,5$	$1,5 \pm 0,5$	$1,6 \pm 0,5$	$-6,5 \pm 0,6$

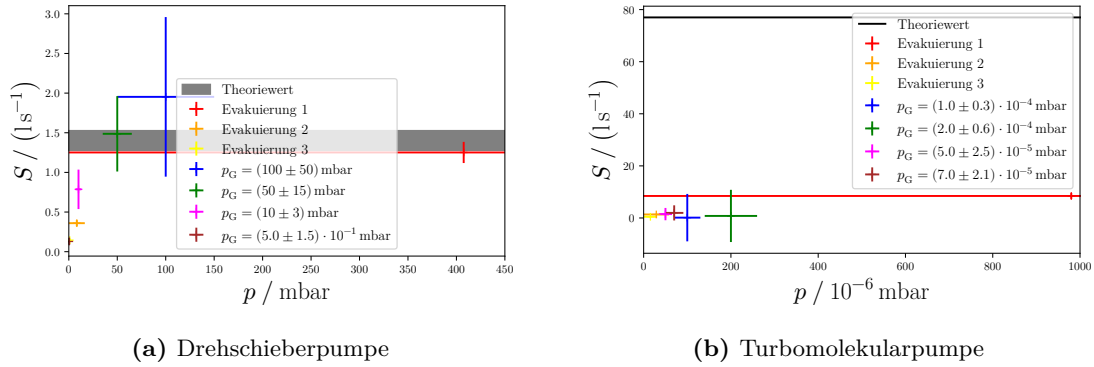
**Tabelle 13:** Die einzelnen Messdaten der Evakuierungsmessung mit der Drehschieberpumpe im Zeitbereich  $t \in [300 \text{ s}, 600 \text{ s}]$ . Zusätzlich ist neben dem gemittelten Druck noch der Ausdruck  $\ln(F)$  aufgelistet, wobei  $F$  der Quotient  $F = \frac{p(t)-p_E}{p_0-p_E}$  ist.

$t / \text{s}$	$p_{M1} / \text{mbar}$	$p_{M2} / \text{mbar}$	$p_{M3} / \text{mbar}$	$p_{\text{mittel}} / \text{mbar}$	$\ln(F)$
300	$1,57 \pm 0,47$	$1,59 \pm 0,48$	$1,54 \pm 0,46$	$1,57 \pm 0,47$	$-6,46 \pm 0,58$
310	$1,47 \pm 0,44$	$1,49 \pm 0,45$	$1,45 \pm 0,43$	$1,47 \pm 0,44$	$-6,53 \pm 0,58$
320	$1,39 \pm 0,42$	$1,41 \pm 0,42$	$1,36 \pm 0,41$	$1,39 \pm 0,42$	$-6,58 \pm 0,58$
330	$1,31 \pm 0,39$	$1,33 \pm 0,40$	$1,29 \pm 0,39$	$1,31 \pm 0,39$	$-6,64 \pm 0,58$
340	$1,24 \pm 0,37$	$1,25 \pm 0,38$	$1,22 \pm 0,37$	$1,24 \pm 0,37$	$-6,70 \pm 0,58$
350	$1,17 \pm 0,35$	$1,19 \pm 0,36$	$1,15 \pm 0,34$	$1,17 \pm 0,35$	$-6,75 \pm 0,58$
360	$1,12 \pm 0,34$	$1,12 \pm 0,34$	$1,10 \pm 0,33$	$1,11 \pm 0,33$	$-6,80 \pm 0,58$
370	$1,06 \pm 0,32$	$1,07 \pm 0,32$	$1,05 \pm 0,32$	$1,06 \pm 0,32$	$-6,85 \pm 0,58$
380	$1,01 \pm 0,30$	$1,02 \pm 0,31$	$1,00 \pm 0,30$	$1,01 \pm 0,30$	$-6,90 \pm 0,58$
390	$0,97 \pm 0,29$	$0,98 \pm 0,29$	$0,95 \pm 0,29$	$0,97 \pm 0,29$	$-6,95 \pm 0,58$
400	$0,92 \pm 0,28$	$0,93 \pm 0,28$	$0,91 \pm 0,27$	$0,92 \pm 0,27$	$-7,00 \pm 0,58$
410	$0,88 \pm 0,26$	$0,89 \pm 0,27$	$0,87 \pm 0,26$	$0,88 \pm 0,26$	$-7,04 \pm 0,58$
420	$0,84 \pm 0,25$	$0,84 \pm 0,25$	$0,82 \pm 0,25$	$0,84 \pm 0,25$	$-7,09 \pm 0,58$
430	$0,80 \pm 0,24$	$0,81 \pm 0,24$	$0,79 \pm 0,24$	$0,80 \pm 0,24$	$-7,14 \pm 0,58$
440	$0,77 \pm 0,23$	$0,77 \pm 0,23$	$0,76 \pm 0,23$	$0,77 \pm 0,23$	$-7,18 \pm 0,58$
450	$0,74 \pm 0,22$	$0,74 \pm 0,22$	$0,73 \pm 0,22$	$0,74 \pm 0,22$	$-7,22 \pm 0,58$
460	$0,70 \pm 0,21$	$0,71 \pm 0,21$	$0,70 \pm 0,21$	$0,70 \pm 0,21$	$-7,26 \pm 0,58$
470	$0,68 \pm 0,20$	$0,68 \pm 0,20$	$0,67 \pm 0,20$	$0,68 \pm 0,20$	$-7,30 \pm 0,58$
480	$0,70 \pm 0,21$	$0,66 \pm 0,20$	$0,65 \pm 0,19$	$0,67 \pm 0,20$	$-7,32 \pm 0,58$
490	$0,63 \pm 0,19$	$0,63 \pm 0,19$	$0,62 \pm 0,19$	$0,63 \pm 0,19$	$-7,38 \pm 0,58$
500	$0,60 \pm 0,18$	$0,61 \pm 0,18$	$0,60 \pm 0,18$	$0,60 \pm 0,18$	$-7,42 \pm 0,58$
510	$0,58 \pm 0,17$	$0,58 \pm 0,18$	$0,58 \pm 0,17$	$0,58 \pm 0,17$	$-7,46 \pm 0,58$
520	$0,56 \pm 0,17$	$0,56 \pm 0,17$	$0,55 \pm 0,17$	$0,56 \pm 0,17$	$-7,50 \pm 0,58$
530	$0,54 \pm 0,16$	$0,54 \pm 0,16$	$0,53 \pm 0,16$	$0,54 \pm 0,16$	$-7,54 \pm 0,58$
540	$0,52 \pm 0,16$	$0,52 \pm 0,16$	$0,51 \pm 0,15$	$0,52 \pm 0,16$	$-7,57 \pm 0,58$
550	$0,50 \pm 0,15$	$0,50 \pm 0,15$	$0,49 \pm 0,15$	$0,50 \pm 0,15$	$-7,61 \pm 0,58$
560	$0,48 \pm 0,14$	$0,48 \pm 0,15$	$0,48 \pm 0,14$	$0,48 \pm 0,14$	$-7,65 \pm 0,58$
570	$0,46 \pm 0,14$	$0,47 \pm 0,14$	$0,46 \pm 0,14$	$0,46 \pm 0,14$	$-7,68 \pm 0,58$
580	$0,45 \pm 0,13$	$0,45 \pm 0,14$	$0,45 \pm 0,13$	$0,45 \pm 0,13$	$-7,72 \pm 0,58$
590	$0,43 \pm 0,13$	$0,44 \pm 0,13$	$0,00 \pm 0,00$	$0,44 \pm 0,13$	$-7,75 \pm 0,58$
600	$0,42 \pm 0,13$	$0,42 \pm 0,13$	$0,00 \pm 0,00$	$0,42 \pm 0,13$	$-7,78 \pm 0,58$

## 7 Diskussion

Die Aufnahme der Messwerte lief ohne größere Probleme. Die ermittelten Werte für das Saugvermögen der verschiedenen Pumpen sind in der Abbildung 9 graphisch dargestellt und in den Tabellen 14 für die Drehschieberpumpe und 15 für die Turbomolekularpumpe aufgelistet mit den jeweiligen Abweichungen zu den Theoriewerten.

Der erste Bereich der Evakuierungsmessung wird auf der  $x$ -Achse nicht komplett angezeigt, damit die Ergebnisse des Saugvermögens bei kleineren Drücke besser zu erkennen sind.



**Abbildung 9:** Alle ermittelten Werte für das Saugvermögen der verschiedenen Pumpen dargestellt mit dem Theoriewert, oder dem Theoriebereich.

Die ermittelten Werte für das Saugvermögen der Drehschieberpumpe sind in der Tabelle 14 aufgelistet. Der Hersteller gibt für das Saugvermögen einen Bereich von  $S_{\text{theo}} \in [1,281/\text{s}, 1,531/\text{s}]$  [1] an. In der Tabelle 14 sind die relativen Abweichungen des experimentellen Wertes von dem theoretischen Wert berechnet nach der Formel

$$\Delta S = \frac{S_{\text{theo}} - S_{\text{exp}}}{S_{\text{theo}}} . \quad (9)$$

Die Abweichung wird in diesem Fall von dem kleinsten und dem höchsten Wert ausgerechnet.

Bei der Durchführung wurde hier der kombinierte Pirani/Kaltkathoden-Sensor (M2) benutzt. Die hohen Drücke liegen außerhalb des Messbereiches des Pirani Messgeräts, sodass einmal die Unsicherheiten sehr groß sind, aber auch die Linearität nicht mehr besteht, wie in der Abbildung 7c und auch in der Abbildung 7d zu sehen ist. Die gesamten Messungen zur Drehschieberpumpe sollten demnach am besten wiederholt werden, um das Saugvermögen genauer zu bestimmen. Dennoch ist zu sehen, dass die ermittelten Werte für das Saugvermögen im Rahmen des angenommenen Messfehlers bei dem ersten Bereich der Evakuierungsmessung ( $10 \text{ mbar} \leq p \leq 1000 \text{ mbar}$ ) und bei der Leckratenmessung mit den Gleichgewichtsdrücken  $p_G = (50 \pm 15) \text{ mbar}$ ,  $(100 \pm 50) \text{ mbar}$  im Theoriebereich liegen. Dies bedeutet, dass der Fehler für die Messwerte sehr gut angenommen worden sind.

**Tabelle 14:** Die ermittelten Werte des Saugvermögens der Drehschieberpumpe mit der Abweichung von der oberen und unteren Grenze des vorgegebenen Bereiches.

Messung	$S / (1/s)$	$\Delta S_{\text{low}} / \%$	$\Delta S_{\text{high}} / \%$
Evakuierung 1	$1,25 \pm 0,14$	2,1	18,1
Evakuierung 2	$0,36 \pm 0,04$	71,9	76,5
Evakuierung 3	$0,15 \pm 0,02$	88,7	90,5
Leckrate $(5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-1}$ mbar	$0,13 \pm 0,05$	89,9	91,6
Leckrate $(10 \pm 3)$ mbar	$0,79 \pm 0,25$	38,5	48,6
Leckrate $(50 \pm 15)$ mbar	$1,49 \pm 0,48$	-16,4	2,7
Leckrate $(100 \pm 50)$ mbar	$1,96 \pm 1,01$	-52,9	-27,9

Das theoretisch zu erreichende Saugvermögen gilt nur für den optimalen Wirkungsbereich der Pumpe. Da eine Drehschieberpumpe ein Vorvakuum erzeugen soll, auf welches dann effektivere Pumpen, wie z.B. die Turbopumpe, angewendet werden können, und es sich um eine einstufige Drehschieberpumpe handelt, ist der Bereich von  $p \leq 10$  mbar schon nicht mehr im optimalen Wirkungsbereich der Pumpe. Dies kann die deutlich weniger nah am Theoriewert liegenden Werte der anderen Messungen erklären, welche alle in diesem Druckbereich gelten. Da dies für diesen Druckbereich unabhängig von der Messmethode passiert, verdeutlicht, dass es sich nicht um einen systematischen Fehler in einer Messung handelt.

Die Herstellerangabe für den kleinsten erreichbaren Druck der Drehschieberpumpe lautet  $p_E = 2,0 \cdot 10^{-3}$  mbar [1], im Experiment wurde der Wert  $p_E = (3,9 \pm 1,2) \cdot 10^{-3}$  mbar aufgenommen, das entspricht einer relativen Abweichung von 92,5 %. Diese hohe Abweichung vom Theoriewert ist damit zu begründen, dass der Rezipient immer wieder mit Luft geflutet wurde und dann evakuiert, was virtuelle Lecks recht wahrscheinlich macht. So kann selbst beim längeren Laufen der Pumpe der beste Druck nicht erreicht werden. Bei optimalen Bedingungen wird der Tank mit Stickstoff belüftet. Im Allgemeinen sollte nicht zu viel in die Ergebnisse der Drehschieberpumpe interpretiert werden, da mit einem falschen Messgerät gemessen worden ist.

Bei der Turbomolekularpumpe ist in der Abbildung 9b deutlich zu erkennen, dass die ermittelten Werte stark vom Theoriewert abweichen, dieser beträgt  $S_{\text{theo}} = 771/s$  [1]. Dies bestätigt sich auch bei Betrachtung der Werte und ihren relativen Abweichungen zum angegebenen Wert in der Tabelle 15.

Es ist auffällig, dass die ermittelten Werte für die Leckratenmessung insgesamt bessere Ergebnisse erzielen, besonders die Leckratenmessungen mit den Gleichgewichtsdrücken  $p_G = (1,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$  mbar und  $p_G = (2,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$  mbar liegen deutlich näher an der Herstellerangabe als die anderen ermittelten Werte. Dies ist ein Zeichen dafür, dass bei der Evakuierungsmessung, welche sehr empfindlich gegenüber Lecks ist, virtuelle Lecks aufgetreten sind. Also das ab einem bestimmten Druck kein Volumenstrom mehr abgepumpt wurde, sondern sich durch Desorption Teilchen von den Wänden gelöst haben und sich die Teilchenzahl im Rezipienten verändert hat. Bei der Evakuierungsmessung

**Tabelle 15:** Die ermittelten Werte des Saugvermögens der Turbomolekularpumpe mit der Abweichung von Theoriewert  $S_{\text{theo}} = 771/\text{s}$  [1].

Messung	$S / (1/\text{s})$	$\Delta S / \%$
Evakuierung 1	$8,4 \pm 1,2$	89,0
Evakuierung 2	$1,3 \pm 0,3$	98,3
Evakuierung 3	$0,5 \pm 0,1$	99,4
Leckrate $(5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$	$7,4 \pm 2,4$	90,4
Leckrate $(7,0 \pm 2,1) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$	$9,1 \pm 3,0$	88,2
Leckrate $(1,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$	$17,8 \pm 9,2$	76,9
Leckrate $(2,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$	$31,7 \pm 10,1$	58,9

wurde im ersten Bereich ( $10^{-5} \text{ mbar} \leq p \leq 10^{-3} \text{ mbar}$ ) noch das höchste Saugvermögen ermittelt. Dies lässt wieder darauf schließen, dass dort der optimale Arbeitsbereich der Pumpe liegt und in dem niedrigeren Druckbereich ein schlechteres Saugvermögen durch virtuelle Lecks vorliegt.

Generell ist das deutlich geringere Saugvermögen damit zu erklären, dass die Turbomolekularpumpe durch ein Rohr mit geringerem Querschnitt mit dem Rezipienten verbunden ist. Daher ist das effektiv zu messende Saugvermögen von dem Leitwert des Rohrs abhängig, was das theoretisch zu erreichende Saugvermögen nochmal heruntersetzt, siehe Unterabschnitt 2.4.

Im Allgemeinen wird durch das Benutzen zweier verschiedener Verfahren die Messgenauigkeit erhöht. Die Leckratenmessung ist gegenüber virtuellen Lecks sehr unempfindlich, was ein Vorteil dieses Verfahrens ist. Die Evakuierungsmessung ist im Gegensatz dazu sehr empfindlich gegenüber virtuellen Lecks. Da der Rezipient immer wieder mit Luft belüftet wird, ist es möglich, dass sich gerade die Wassermoleküle an den Wänden des Rezipient anordnen und im geringere Druckbereich der Rezipient nicht weiter evakuiert wird sondern gegen virtuelle Lecks gearbeitet wird. Diese Fehler können verkleinert werden, wenn Stickstoff statt Luft zum Befüllen des Rezipienten genutzt wird. Ein systematischer Fehler ist dadurch gegeben, dass die Druckwerte gerade zu Beginn der Evakuierungsmessung exponentiell abfallen, sich somit sehr schnell ändern und das Ablesen der Werte sehr schwierig ist. Um das Aufnehmen der Messwerte weniger willkürlich zu gestalten, wurde in der Versuchsdurchführung das entsprechende Messgerät im Messzeitraum abgefilmt. Anschließend wurden diese Videos langsam durchgegangen und die der Zeit entsprechenden Messwerte notiert.

Das Ergebnis des Versuches kann eventuell dadurch verbessert werden, dass der Druck an mehreren Messgeräten abgelesen wird und mit Beachtung der Leitwerte der Bauteile die Auswertung mit mehreren aufgenommenen Daten durchgeführt wird. In der Durchführung wurden pro Messung drei Messreihen aufgenommen, welches die statistischen Fehler verringert. Die Betrachtung von verschiedenen Messgeräten, die an verschiedenen Stellen am Rezipienten angebracht sind, würde zusätzlich eine räumliche Betrachtung hinzufügen und systematische Fehler verringern.

Es ist zu sagen, dass bei dem Versuch schon viele Fehler verringert werden durch geschickte

Durchführung und sich das auch in Auswertung der Drehschieberpumpe zeigt, wo hier trotz der Benutzung eines falschen Messgerätes, die Ergebnisse annehmbar sind. Bei der Turbomolekularpumpe sind die Ergebnisse akzeptabel, da sich viele der nicht verminderten Fehler stärker bei niedrigerem Druck bemerkbar machen.

## 8 Anhang

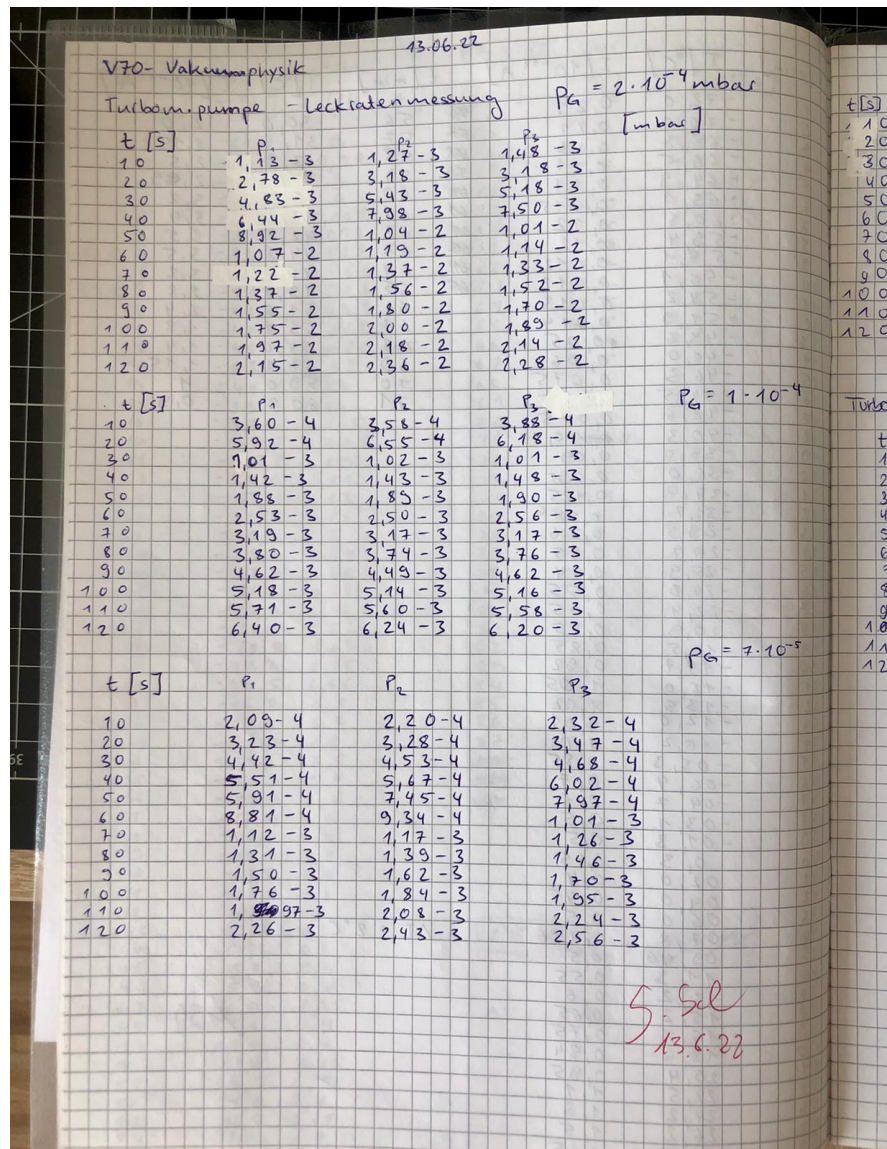


Abbildung 10: Die Originaldaten von der Versuchsdurchführung.



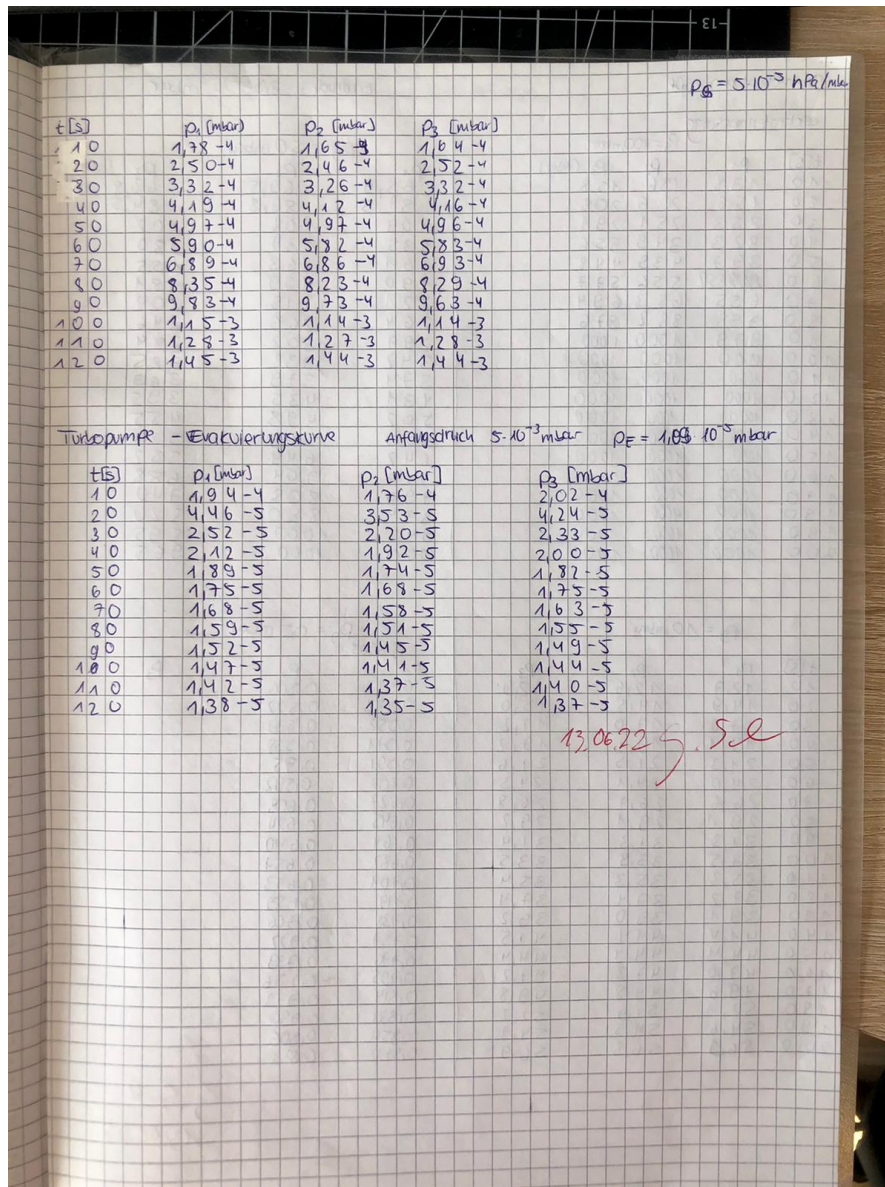


Abbildung 11: Die Originaldaten von der Versuchsdurchführung.

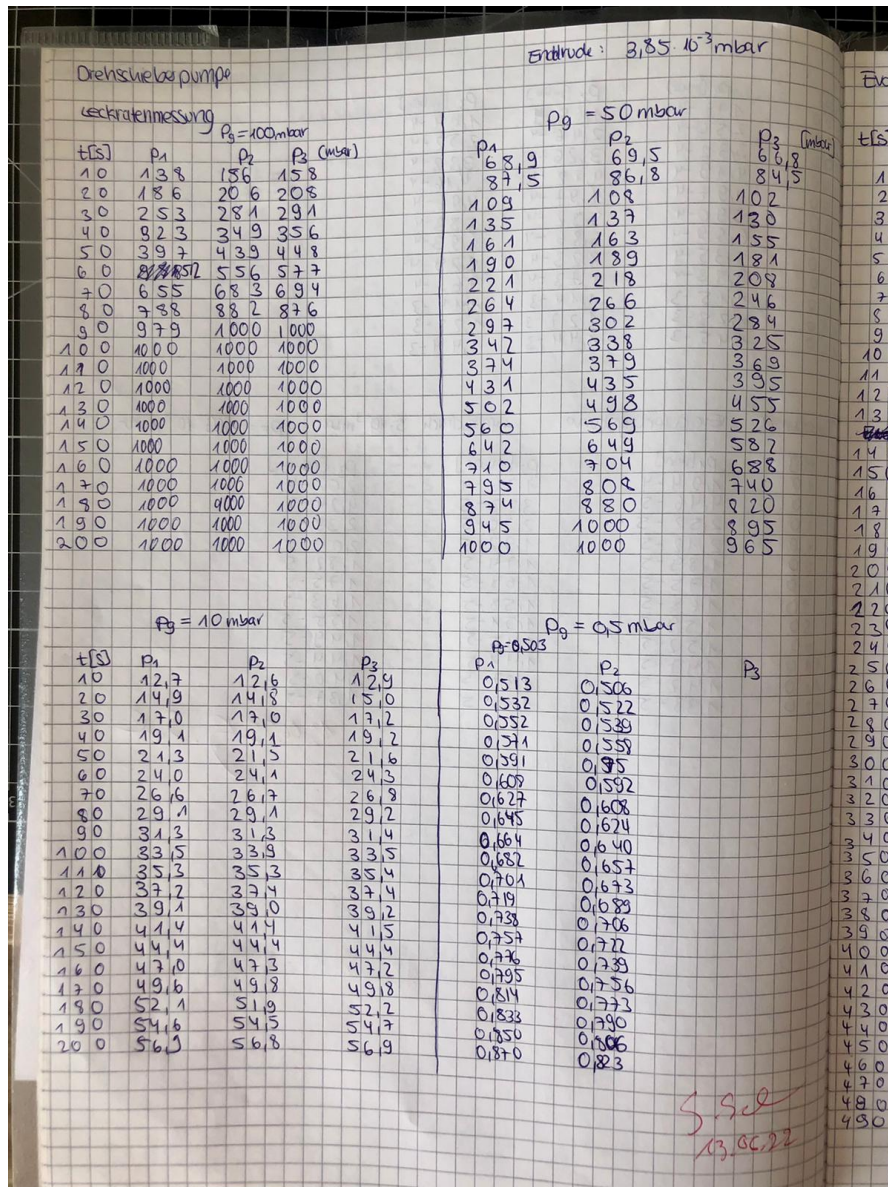


Abbildung 12: Die Originaldaten von der Versuchsdurchführung.



Evakuierungskurve Drehschlepppumpe  $p_E = 3,85 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$ ,  $p_A = 1000 \text{ mbar}$

t[s]	p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>	p <sub>3</sub>	t[s]	p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>	p <sub>3</sub>
10	708	4800	1000	500	0,603	0,605	0,645
20	442	450	1000	510	0,581	0,585	0,621
30	278	282	624	520	0,558	0,564	0,598
40	172	177	359	530	0,538	0,542	0,576
50	111	119	218	540	0,517	0,522	0,558
60	77,1	73,7	142	550	0,498	0,504	0,532
70	53,2	55,8	93,8	560	0,481	0,485	0,513
80	38,2	40,7	65,5	570	0,464	0,468	0,495
90	29,8	31,4	45,9	580	0,447	0,453	0,477
100	22,1	23,4	34,8	590	0,434	0,438	0,462
110	17,0	17,7	26,0	600	0,420	0,425	0,446
120	13,3	14,0	19,4				
130	10,3	10,8	15,6				
<hr/>							
140	8,52	8,81	12,2				
150	7,04	7,37	9,48				
160	6,02	6,17	7,88				
170	5,21	5,36	6,63				
180	4,57	4,67	5,67				
190	4,03	4,12	4,91				
200	3,61	3,68	4,37				
210	3,26	3,32	3,86				
220	2,95	3,01	3,46				
230	2,66	2,74	3,14				
240	2,46	2,50	2,85				
250	2,26	2,31	2,59				
260	2,09	2,13	2,39				
270	1,94	1,98	2,20				
280	1,80	1,83	2,04				
290	1,68	1,71	1,89				
300	1,57	1,59	1,77				
310	1,47	1,49	1,65				
320	1,39	1,41	1,54				
330	1,31	1,33	1,45				
340	1,24	1,25	1,36				
350	1,17	1,19	1,29				
360	1,12	1,12	1,22				
370	1,06	1,07	1,15				
380	1,01	1,02	1,10				
390	0,969	0,979	1,05				
400	0,917	0,926	0,999				
410	0,876	0,886	0,951				
420	0,838	0,843	0,906				
430	0,801	0,807	0,866				
440	0,766	0,774	0,825				
450	0,739	0,741	0,791				
460	0,704	0,710	0,757				
470	0,672	0,682	0,726				
480	0,638	0,658	0,697				
490	0,626	0,632	0,670				

Abbildung 13: Die Originaldaten von der Versuchsdurchführung.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *V70 Vakuumversuch*. 2022.
- [2] Christian Edelmann. *Vakuumphysik und -technik*. Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig K.-G., 1978.
- [3] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [4] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [5] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [6] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [7] Pfeiffer Vakuum. *Einführung in die Vakuumtechnik*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/> (besucht am 23.06.2022).
- [8] Wikipedia. *Sorption*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sorption> (besucht am 23.06.2022).
- [9] Wikipedia. *Turbomolekularpumpe*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Turbomolekularpumpe> (besucht am 23.06.2022).