

V70

## Vakuumversuche

Sonia Chander  
sonia.chander@tu-dortmund.de

Jana Schlücking  
jana.schluecking@tu-dortmund.de

Durchführung: 13.06.2022

Abgabe: 24.06.2022

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 . . . . .	9
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 . . . . .	11
6.1.1 Leckratenmessung . . . . .	11
6.1.2 Evakuierungskurve . . . . .	13
6.2 Drehschieberpumpe . . . . .	14
6.2.1 Leckratenmessung . . . . .	15
6.2.2 Evakuierungskurve . . . . .	16
6.3 Tabellen der Messwerte . . . . .	18
<b>7 Diskussion</b>	<b>29</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. 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 Stöße unter den Teilchen vorherrschen als mit den Wänden des Raumes. Dadurch bewegen sich die Teilchen in Bahnen, parallel zueinander.

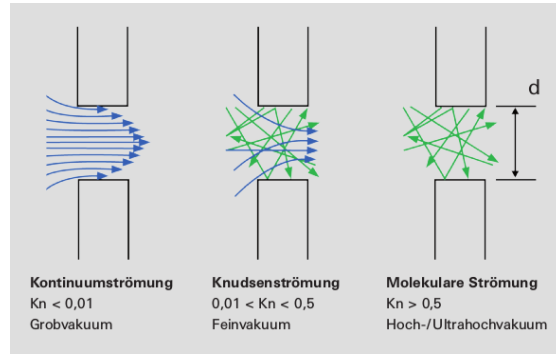
Das Feinvakuum beschreibt danach den Druckbereich von 300 mbar -  $1 \cdot 10^{-4}$  mbar. Hier sind Knudsenströmung auffindbar. Diese beschreiben den Übergang von viskoser zu molekularer Strömung. Die mittlere freie Weglänge ist hier in der Größenordnung des Strömungskanals.

Der Bereich von  $1 \cdot 10^{-3}$  mbar -  $1 \cdot 10^{-7}$  mbar beschreibt das Hochvakuum, das Ultravakuum geht dann bis  $1 \cdot 10^{-12}$  mbar. Molekulare Strömung ist hier vertreten. Die mittlere freie Weglänge der Teilchen ist hier größer als die Abmessung des Strömungskanals, die Gasteilchen stoßen vermehrt gegen die Wände des Raumes als untereinander. Drücke, die kleiner als  $1 \cdot 10^{-12}$  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.[6]

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.

## 2.5 Vakuumerzeugung

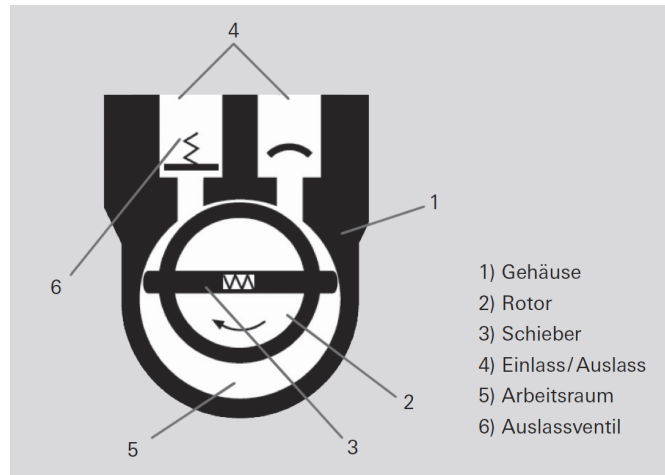
In diesem Versuch werden zwei Pumpen untersucht: die Drehschieberpumpe und die Turbomolekularpumpe. An sich werden verschiedenen Arten von Pumpen unterschieden. Unbeschränkt einsatzfähig sind gasfördernde Pumpe. Hier wird Gas in abgeschlossenen Volumina entweder komprimiert oder ausgedehnt. Ihre Funktionsweise 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 erhöhen somit das Vakuum. 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. Zweistufige Drehschieberpumpen können einen Druck von  $6 \cdot 10^{-4}$  mbar bis  $6 \cdot 10^{-5}$  mbar erzeugen. In diesem Versuch wird eine einstufige Drehschieberpumpe verwendet.



**Abbildung 2:** Schematischer Aufbau einer Drehschieberpumpe.[6]

### 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 Gasteilchen 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 kHz. So kann der Druck im Rezipienten schnell auf  $1 \cdot 10^{-4}$  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.[8]

## **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 steht bei M1. Weiterhin gibt es zwei Kaltkathoden-Vakuummeter M2 und M3. Eins ist dabei an der Turbomolekularpumpe angeschlossen, das andere hinter dem Dosierventil.



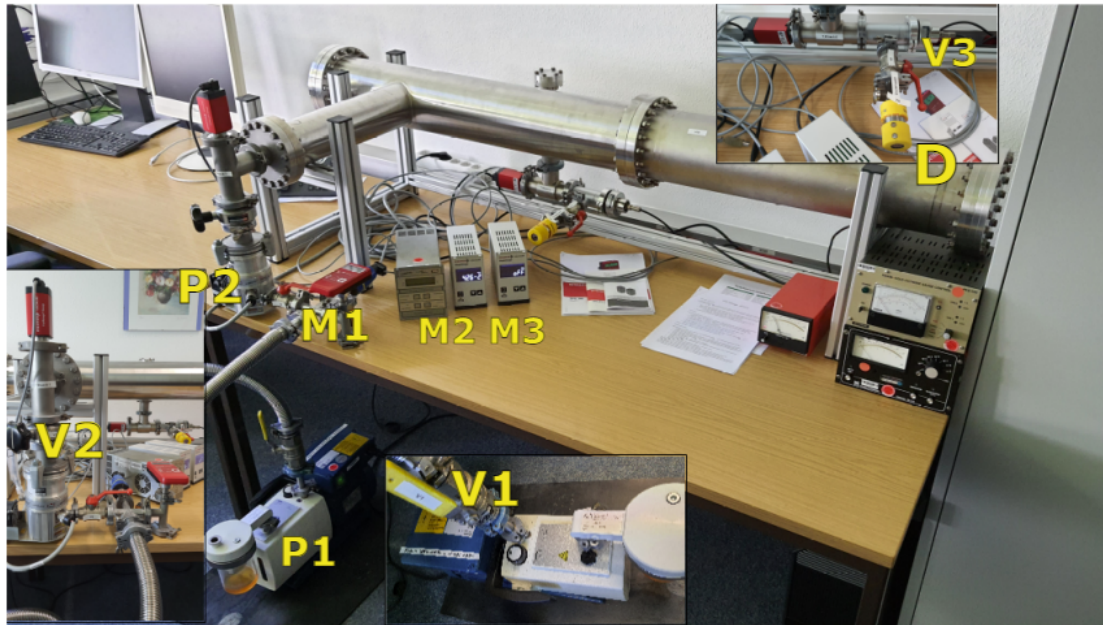


Abbildung 4: Der Versuchsaufbau.[1]

## 4 Durchführung

Während des Kolloquiums wird die Drehschieberpumpe gestartet. Und der Enddruck ermittelt. Daraufhin kann die Turbomolekularpumpe angeschaltet werden und ebenfalls der Enddruck ermittelt werden.

### 4.1 Turbomolekularpumpe

#### 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.

#### 4.1.2 Evakuierungskurve

Der Rezipient wird über das gelbe Dosierventil bis zu einem Anfangsdruck von  $5 \cdot 10^{-3}$  mbar gelüftet. Dann wird das Ventil schnell geschlossen und die Messung gestartet. Auch hier wird der Druck alle 10 s aufgenommen, sodass eine Messung 120 s dauert. Dieser Messvorgang wird insgesamt drei Mal durchlaufen.

## 4.2 Drehschieberpumpe

Die Messungen zur Drehschieberpumpe laufen analog zu der Messung mit der Turbomolekularpumpe ab.

### 4.2.1 Leckratenmessung

Analog wird ein Gleichgewichtsdruck mithilfe des gelben Dosierventils eingestellt und danach die Drehschieberpumpe abgeschoben. Der Druck wird alle 10 s 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. Der Druck wird dann alle 10 s aufgenommen, insgesamt für 600 s. Dieser Messvorgang wird insgesamt drei Mal durchgeführt.

## 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

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

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

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2} \quad (4)$$

gegeben. Die Genauigkeit der abgelesenen Druckwerte ist druckabhängig, das Messgeräte 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 Gauß'sche Fehlerfortpflanzung auf den Logarithmus Ausdruck  $\ln \left( \frac{p(t) - p_E}{p_0 - p_E} \right)$  angewendet, ergibt sich der Fehler

$$\sigma_{\ln} = \sqrt{\frac{\sigma_{p(t)}^2}{(p(t) - p_E)^2} + \frac{\sigma_{p_0}^2}{(p_0 - p_E)^2} + \sigma_{p_E}^2 \left( \frac{1}{p_0 - p_E} - \frac{1}{p(t) - p_E} \right)^2}, \quad (5)$$

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 [5] angewendet, die Fehler der Parameter werden automatisch analog zur linearen Regression berechnet. Damit ergeben sich für die folgenden Ausdrücke die folgenden Messunsicherheiten:

$$S = -m \cdot V \quad \rightarrow \sigma_S = \sqrt{V^2 \cdot \sigma_m^2 + m^2 \cdot \sigma_V^2} \quad (6)$$

$$S = \frac{m \cdot V}{p_G} \quad \rightarrow \sigma_S = \sqrt{\frac{V^2}{p_G^2} \sigma_m^2 + \frac{m^2}{p_G^2} \sigma_V^2 + \frac{m^2 V^2}{p_G^4} \sigma_{p_G}^2} \quad (7)$$

Bei der Mittelung von  $n$  fehlerbehafteten Größen  $x_i$  folgt aus der Fehlerfortpflanzung

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_i^n \sigma_{x_i}^2}. \quad (8)$$

## 6 Auswertung

Bei der Versuchsvorbereitung und 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  $p_E = (3,85 \pm 1,15) \cdot 10^{-3}$  mbar. Anschließend wird die Turbopumpe eingeschalten und auch von ihr der Enddruck bestimmt, welcher hier  $p_E = (10,90 \pm 3,27)$  nbar beträgt.

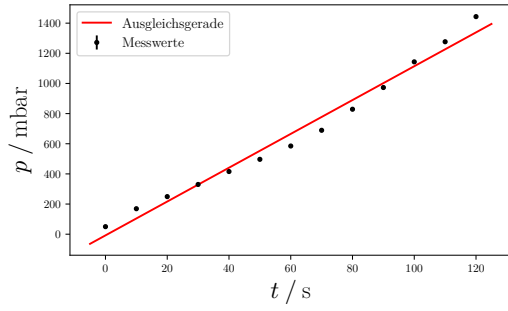
### 6.1 Turbopumpe

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

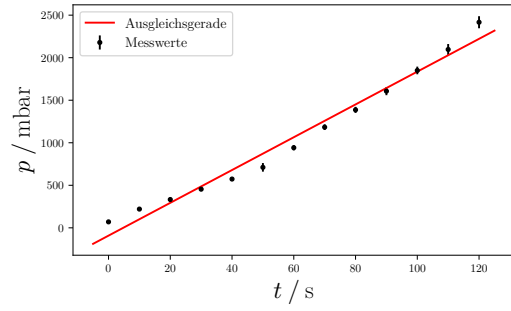
#### 6.1.1 Leckratenmessung

Es wurde, wie in der Abschnitt 4 beschrieben ein Gleichgewichtsdruck von  $p_G = 50$  nbar, 70 nbar, 100 nbar, 200 nbar eingestellt und bei  $t = 0$  s die Pumpe abgeschiebert und in Schritten von  $\Delta t = 10$  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  $p_G = 100$  nbar in der Tabelle 3, für 200 nbar in der Tabelle 4, für  $p_G = 50$  nbar in der Tabelle 5 und schließlich für 70 nbar in der Tabelle 6 zu finden.

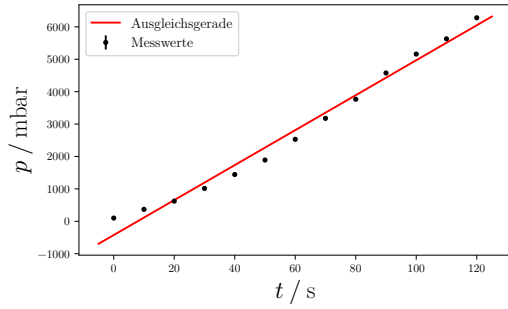
Die gemittelten Drücke werden gegen die Zeit in einem  $t - p$  Diagramm dargestellt. Diese sind für die verschiedenen Gleichgewichtsdrücke in der Abbildung 5 dargestellt. Es werden keine Messdaten exkludiert. Zusätzlich ist jeweils ein Fit der Form  $p(t) = m \cdot t + n$



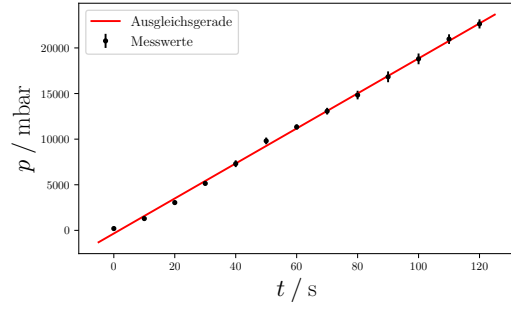
(a) Gleichgewichtsdruck  $p_G = 50$  nbar.



(b) Gleichgewichtsdruck  $p_G = 70$  nbar.



(c) Gleichgewichtsdruck  $p_G = 100$  nbar.



(d) Gleichgewichtsdruck  $p_G = 200$  nbar.

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

ingezeichnet. Dieser wird mithilfe von python [3] gemacht. Die Fitparameter ergeben sich zu den folgenden Werten.

Für  $p_G = 50$  nbar

$$m = (11,22 \pm 0,48) \frac{\text{nbar}}{\text{s}}$$

$$n = (-7,86 \pm 33,73) \text{ nbar}$$

Für  $p_G = 70$  nbar

$$m = (19,28 \pm 0,86) \frac{\text{nbar}}{\text{s}}$$

$$n = (-91,84 \pm 61,03) \text{ nbar}$$

Für  $p_G = 100$  nbar

$$m = (53,94 \pm 2,07) \frac{\text{nbar}}{\text{s}}$$

$$n = (-424,08 \pm 146,11) \text{ nbar}$$

Für  $p_G = 200$  nbar

$$m = (191,95 \pm 2,31) \frac{\text{nbar}}{\text{s}}$$

$$n = (-342,78 \pm 163,26) \text{ nbar}$$

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 berechnet:

für $p_G = 50 \text{ nbar}$ $S = (7,4060 \pm 2,3631) \text{ L/s}$	für $p_G = 70 \text{ nbar}$ $S = (9,0885 \pm 2,9030) \text{ L/s}$
für $p_G = 100 \text{ nbar}$ $S = (17,7988 \pm 5,6696) \text{ L/s}$	für $p_G = 200 \text{ nbar}$ $S = (31,6721 \pm 10,0229) \text{ L/s}$

Die Messunsicherheit des Saugvermögens berechnet sich nach der Gleichung (7).

### 6.1.2 Evakuierungskurve

Bei der Messung der Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe wird der Rezipient mit Luft befüllt bis zu einem Druck von  $p_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ . Dann wird der Rezipient abgedichtet und in Abständen von  $\Delta t = 10 \text{ s}$  wird der Druck abgelesen, bis  $t = 120 \text{ s}$  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 jeweiligen Logarithmusausdruck in der Tabelle 7 aufgelistet. Der Enddruck der Pumpe wurde zu  $p_E = (10,90 \pm 3,27) \text{ nbar}$  bestimmt. Der Fehler des Logarithmusausdruck berechnet sich nach (5).

Es wird der Logarithmusausdruck  $\ln(F)$  gegen die Zeit geplottet für jede einzelne Messung. In den Daten werden lineare Abhängigkeiten gesucht und dann in diesen Bereichen eine lineare Ausgleichsrechnung der Form

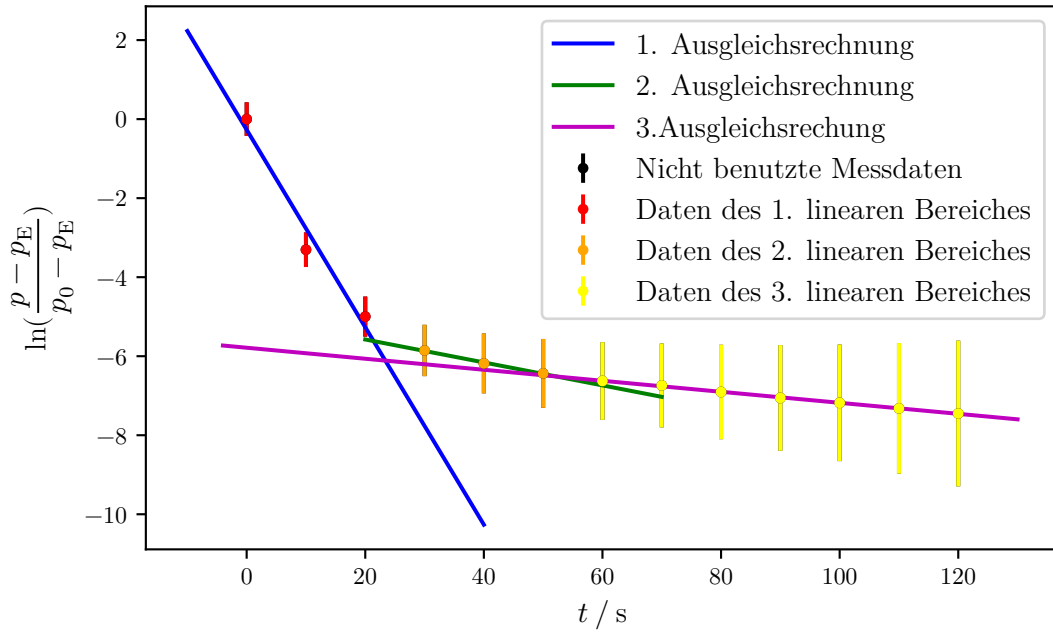
$$y = m \cdot t + n$$

mit Hilfe von [3] durchgeführt. Es werden drei Bereiche pro Messung gesucht.

Dieses Vorgehen ist für die erste Messung in der Abbildung 6 zu sehen, hier werden keine Datenpunkte exkludiert. Das gleiche Vorgehen wird für die beiden anderen Messreihen gemacht, dies ist in der Abbildung 7a für die zweite Messreihe zu sehen und für die Dritte in der Abbildung 7b. Es wird kein Datenpunkt exkludiert. Die Parameterdaten für die lineare Ausgleichsrechnung sind in der Tabelle 1 aufgelistet.

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

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



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

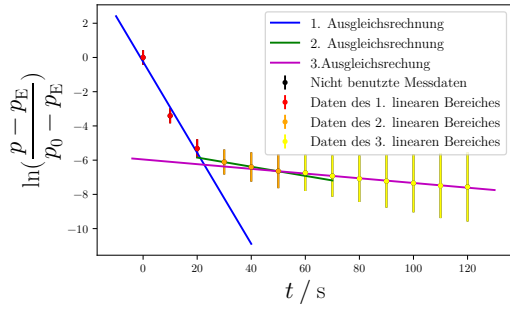
Dies folgt aus der Gleichung (1). Die entsprechenden Saugvermögen sind auch in der Tabelle 1 aufgelistet. Die Fehler der Werte werden mit der Gleichung (6) berechnet. Abschließend werden noch die Mittelwerte berechnet, die wie folgt lauten:

$$\begin{array}{ll}
 30 \text{ nbar} \leq p \leq 5000 \text{ nbar} & S = (8,4606 \pm 0,1325) \text{ L/s} \\
 29,9 \text{ nbar} \leq p \leq 17,5 \text{ nbar} & S = (0,9052 \pm 0,0218) \text{ L/s} \\
 17,4 \text{ nbar} \leq p \leq 13,5 \text{ nbar} & S = (0,4560 \pm 0,0029) \text{ L/s}
 \end{array}$$

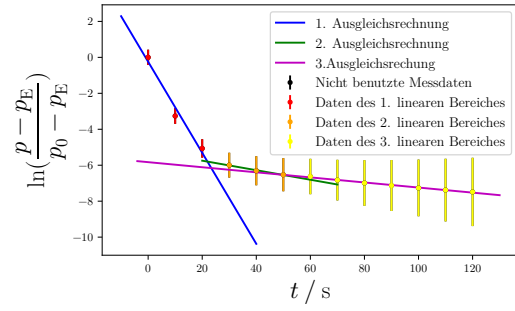
Hier berechnet sich der Fehler nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung nach Gleichung (8).

## 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  $V_{\text{Zusatz}} = 1,0 \text{ L}$ .



(a) Messung 2



(b) Messung 3

**Abbildung 7:** Die Messdaten der Evakuierungsmessungen der Turbomolekularpumpe aufgetragen in einem Logarithmusausdruck gegen die Zeit. Zusätzlich werden lineare Ausgleichsrechnungen in linear wirkende Bereiche gelegt.

### 6.2.1 Leckratenmessung

Analog zum Vorgehen bei der Turbomolekularpumpe wird ein Gleichgewichtsdruck eingestellt. Hier werden die Gleichgewichtsdrücke  $p_G = 0,5 \text{ mbar}$ ,  $10 \text{ mbar}$ ,  $50 \text{ mbar}$ ,  $100 \text{ mbar}$  benutzt. Für jeden Gleichgewichtsdruck werden drei Messungen durchgeführt. Der Messzeitraum beträgt  $200 \text{ s}$ , es werden in Schritten von  $\Delta t = 10 \text{ s}$  Daten aufgenommen. Über die drei aufgenommenen Messungen des Drucks wird das arithmetische Mittel genommen. Die Daten befinden sich für den Gleichgewichtsdruck  $p_G = 0,5 \text{ mbar}$  in der Tabelle 8, und für  $p_G = 10 \text{ mbar}$  in der Tabelle 9. Für den Gleichgewichtsdruck  $p_G = 50 \text{ mbar}$  sind die Messdaten in der Tabelle 10 und für  $p_G = 100 \text{ mbar}$  in der Tabelle 11.

Die gemittelten Drücke werden gegen die Zeit aufgetragen. Dies ist in den Abbildungen in der Abbildung 8 zu sehen. Dazu sind in lineare Ausgleichsrechnungen mit python [3] durchgeführt worden. Die Fitparameter ergeben sich zu:

Für  $p_G = 0,5 \text{ mbar}$

$$m = (1,8965 \pm 0,0005) \cdot 10^{-3} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$$

$$n = (0,4949 \pm 0,0006) \text{ mbar}$$

Für  $p_G = 10 \text{ mbar}$

$$m = (0,2313 \pm 0,0018) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$$

$$n = (10,1192 \pm 0,2055) \text{ mbar}$$

Für  $p_G = 50 \text{ mbar}$

$$m = (4,7505 \pm 0,2513) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$$

$$n = (-64,3325 \pm 29,3767) \text{ mbar}$$

Für  $p_G = 100 \text{ mbar}$

$$m = (4,9360 \pm 0,5869) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$$

$$n = (247,5253 \pm 68,6133) \text{ mbar}$$

Es werden keine Datenpunkte exkludiert.

Aus den Steigungen der linearen Ausgleichsrechnung werden die Saugvermögen berechnet durch Vergleich mit Gleichung (3), wobei sich die Messunsicherheit nach Gleichung (7)

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

Bereiche:	30 nbar $\leq p \leq$ 5000 nbar		29,9 nbar $\leq p \leq$ 17,5 nbar		17,4 nbar $\leq p \leq$ 13,5 nbar	
Messung 1						
$m / (1/s)$	-0,2499 $\pm$	0,0465	-0,0290 $\pm$	0,0022	-0,0139 $\pm$	0,0002
$n$	-0,2687 $\pm$	0,6009	-4,9961 $\pm$	0,0889	-5,7855 $\pm$	0,0227
$S / (L/s)$	8,2459 $\pm$	1,7434	0,9583 $\pm$	0,1198	0,4601 $\pm$	0,0467
Messung 2						
$m / (1/s)$	-0,2660 $\pm$	0,0432	-0,0268 $\pm$	0,0013	-0,0137 $\pm$	0,0007
$n$	-0,2494 $\pm$	0,5577	-5,3131 $\pm$	0,0545	-5,9593 $\pm$	0,0641
$S / (L/s)$	8,7787 $\pm$	1,6742	0,8830 $\pm$	0,0987	0,4537 $\pm$	0,0508
Messung 3						
$m / (1/s)$	-0,2533 $\pm$	0,0421	-0,0265 $\pm$	0,0026	-0,0141 $\pm$	0,0007
$n$	-0,2432 $\pm$	0,5439	-5,2174 $\pm$	0,1049	-5,8293 $\pm$	0,0609
$S / (L/s)$	8,3573 $\pm$	1,6221	0,8742 $\pm$	0,1218	0,4662 $\pm$	0,0515

berechnet:

für  $p_G = 0,5 \text{ mbar}$

$$S = (0,1290 \pm 0,0408) \text{ L/s}$$

für  $p_G = 10 \text{ mbar}$

$$S = (0,7865 \pm 0,2488) \text{ L/s}$$

für  $p_G = 50 \text{ mbar}$

$$S = (3,2303 \pm 1,0357) \text{ L/s}$$

für  $p_G = 100 \text{ mbar}$

$$S = (1,6782 \pm 0,5670) \text{ L/s}$$

### 6.2.2 Evakuierungskurve

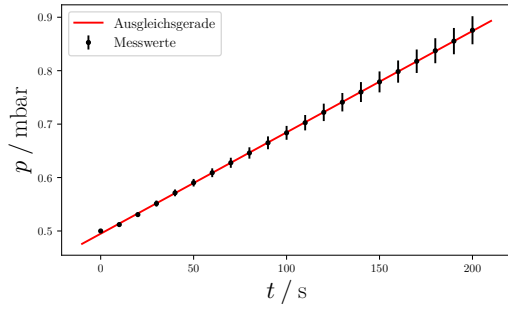
Die Drehschieberpumpe hat einen Enddruck von  $p_E = (3,85 \pm 1,15) \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ . Der Rezipient wird für die Aufnahme der Evakuierungskurve mit der Drehschieberpumpe bis zu einem Druck von  $p_0 = 1000 \text{ mbar}$  belüftet. Dann wird die Luftzufuhr abgeschiebert und der Druck in Abhängigkeit 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. Dort sind außerdem die Ergebnisse der Rechnung

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

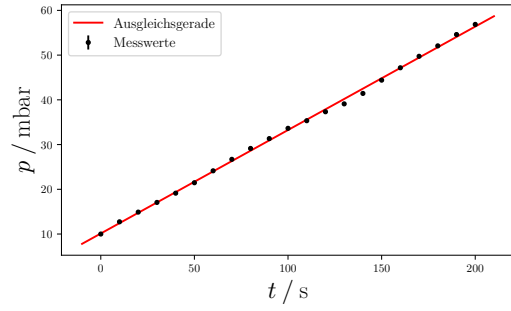
eingetragen, da diese für jeden Messung einzeln in ein  $t - \ln(F)$  Diagramm eingetragen werden. Die Fehler dieses Ausdruckes werden mit der Gleichung (5) berechnet.

Die Abbildungen werden auf lineares Verhalten untersucht, wobei jeweils drei verschiedene Bereiche mit linearem Verhalten identifiziert werden. Dies ist für die Messreihe 1 in der

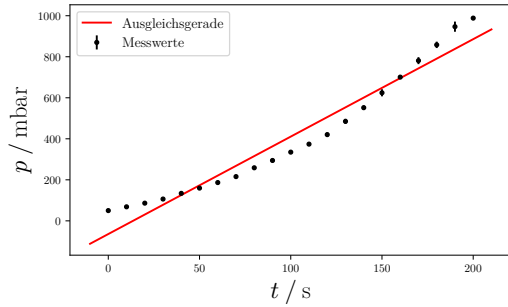




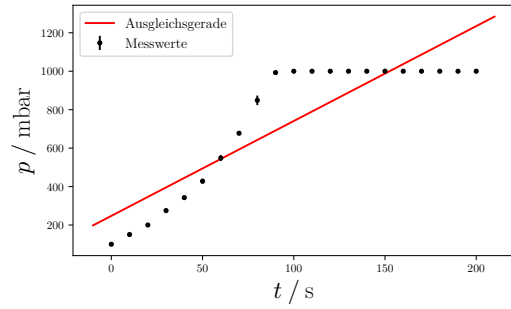
(a) Gleichgewichtsdruck  $p_G = 0,5$  mbar.



(b) Gleichgewichtsdruck  $p_G = 10$  mbar.



(c) Gleichgewichtsdruck  $p_G = 50$  mbar.



(d) Gleichgewichtsdruck  $p_G = 100$  mbar.

**Abbildung 8:** Die gemittelten Drücke der Messungen zu den verschiedenen Gleichgewichtsdrücken mit der jeweiligen linearen Ausgleichsrechnung.

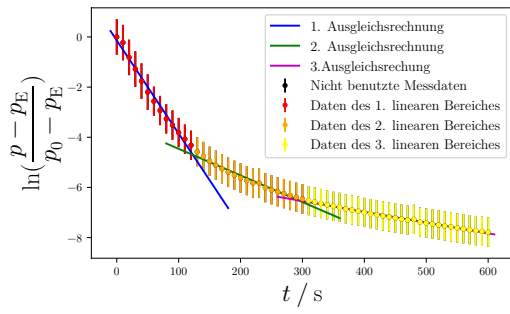
Abbildung 9a, für die Messreihe 2 in der Abbildung 9b und für die dritte Messreihe in der Abbildung 10 zu sehen. Bei der dritten Messreihe werden die ersten beiden Datenpunkte exkludiert, da diese so gut wie gleich dem dritten Punkt sind und sich daher vermuten lässt, dass die Zeitnahme begonnen hat, bevor der Rezipient komplett abgedichtet war. Die Parameterdaten der linearen Ausgleichsrechnungen sind in der Tabelle Tabelle 2 aufgelistet für die verschiedenen Druckbereiche. Das Saugvermögen berechnet sich aus der Steigung  $m$  durch

$$S = m \cdot V,$$

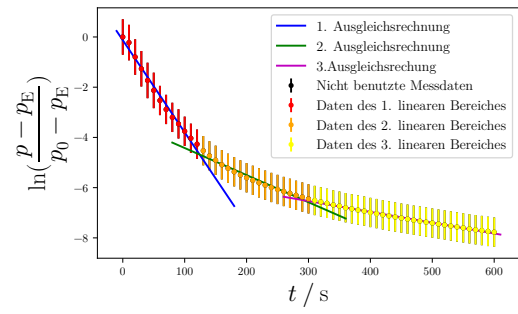
welches sich durch Vergleich mit Gleichung (1) ergibt. Die Werte für das Saugvermögen sind auch in der Tabelle 2 aufgelistet, der Fehler berechnet sich nach der Formel (7). Es werden über die einzelnen Bereiche der Mittelwert der pro Messung berechneten Saugvermögen berechnet. Diese Werte ergeben sich zu:

$10 \text{ nbar} \leq p \leq 1000 \text{ nbar}$	$S = (1,2830 \pm 0,0789) \text{ L/s}$
$1,5 \text{ nbar} \leq p \leq 10 \text{ nbar}$	$S = (0,3802 \pm 0,0240) \text{ L/s}$
$0,4 \text{ nbar} \leq p \leq 1,5 \text{ nbar}$	$S = (0,1476 \pm 0,0086) \text{ L/s}$

Hier wird der Fehler aus der Fehlerfortpflanzung nach Gauß nach Gleichung (8) berechnet.



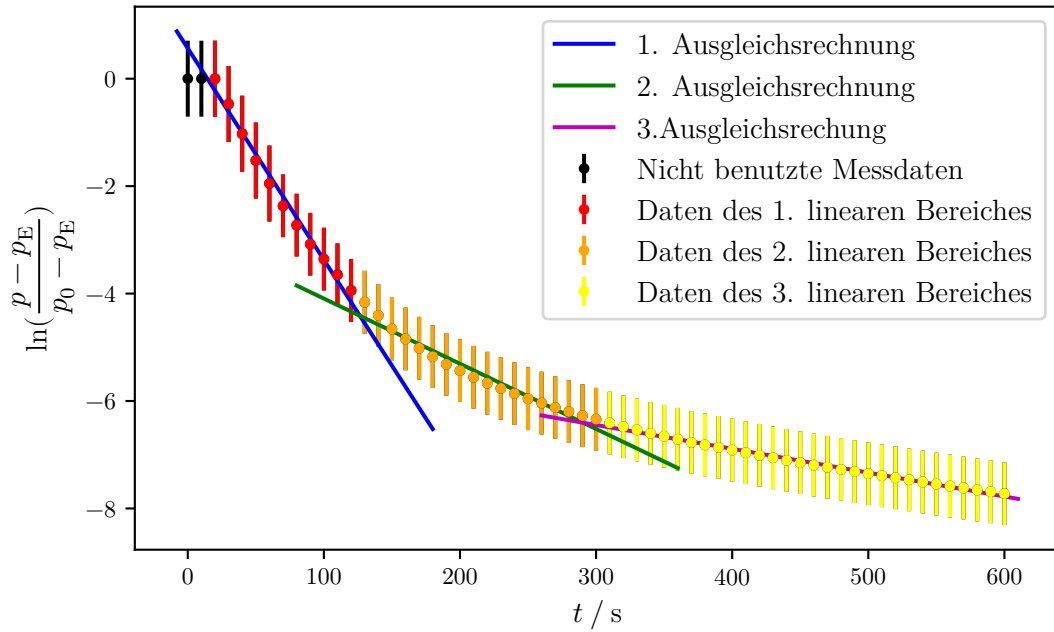
(a) Messung 1



(b) Messung 2

**Abbildung 9:** Die Messdaten der Evakuierungsmessungen der Drehschieberpumpe aufgetragen in einem Logarithmusausdruck gegen die Zeit. Zusätzlich werden lineare Ausgleichsrechnungen in linear wirkende Bereiche gelegt.

### 6.3 Tabellen der Messwerte



**Abbildung 10:** Die Messdaten der dritten Evakuierungsmessung der Drehschieberpumpe aufgetragen in einem Logarithmusausdruck gegen die Zeit. Zusätzlich werden lineare Ausgleichsrechnungen in linear wirkende Bereiche gelegt.

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

Bereiche:	$10 \text{ mbar} \leq p \leq 1000 \text{ mbar}$		$1,5 \text{ mbar} \leq p \leq 10 \text{ mbar}$		$0,4 \text{ mbar} \leq p \leq 1,5 \text{ mbar}$	
Messung 1						
$m / (1/\text{s})$	$-0,0371 \pm$	$0,0014$	$-0,0106 \pm$	$0,0004$	$-0,0043 \pm$	$0,0001$
$n$	$-0,1380 \pm$	$0,0956$	$-3,3976 \pm$	$0,0929$	$-5,2577 \pm$	$0,0282$
$S / (\text{L/s})$	$1,2628 \pm$	$0,1344$	$0,3612 \pm$	$0,0388$	$0,1458 \pm$	$0,0147$
Messung 2						
$m / (1/\text{s})$	$-0,0367 \pm$	$0,0013$	$-0,0108 \pm$	$0,0004$	$-0,0043 \pm$	$0,0001$
$n$	$-0,1281 \pm$	$0,0901$	$-3,3426 \pm$	$0,0992$	$-5,2454 \pm$	$0,0289$
$S / (\text{L/s})$	$1,2475 \pm$	$0,1321$	$0,3670 \pm$	$0,0397$	$0,1462 \pm$	$0,0148$
Messung 3						
$m / (1/\text{s})$	$-0,0394 \pm$	$0,0015$	$-0,0121 \pm$	$0,0006$	$-0,0044 \pm$	$0,0001$
$n$	$0,5661 \pm$	$0,1173$	$-2,8796 \pm$	$0,1314$	$-5,1153 \pm$	$0,0320$
$S / (\text{L/s})$	$1,3389 \pm$	$0,1436$	$0,4125 \pm$	$0,0459$	$0,1508 \pm$	$0,0153$

**Tabelle 3:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Turbopumpe mit den Gleichgewichtsdruck  $P_G = 100$  nbar.

$t / s$	$p_{M1} / \text{nbar}$		$p_{M2} / \text{nbar}$		$p_{M3} / \text{nbar}$		$p_{\text{Mittel}} / \text{nbar}$	
0	100 $\pm$	30	100 $\pm$	30	100 $\pm$	30	100,00 $\pm$	0,00
10	360 $\pm$	108	358 $\pm$	107	388 $\pm$	116	368,67 $\pm$	7,91
20	592 $\pm$	177	655 $\pm$	196	618 $\pm$	185	621,67 $\pm$	14,92
30	1010 $\pm$	303	1020 $\pm$	306	1010 $\pm$	303	1013,33 $\pm$	2,72
40	1420 $\pm$	426	1430 $\pm$	429	1480 $\pm$	444	1443,33 $\pm$	15,15
50	1880 $\pm$	564	1890 $\pm$	567	1900 $\pm$	570	1890,00 $\pm$	4,71
60	2530 $\pm$	759	2500 $\pm$	750	2560 $\pm$	768	2530,00 $\pm$	14,14
70	3190 $\pm$	957	3170 $\pm$	951	3170 $\pm$	951	3176,67 $\pm$	5,44
80	3800 $\pm$	1140	3740 $\pm$	1122	3760 $\pm$	1128	3766,67 $\pm$	14,40
90	4620 $\pm$	1386	4490 $\pm$	1347	4620 $\pm$	1386	4576,67 $\pm$	35,38
100	5180 $\pm$	1554	5140 $\pm$	1542	5160 $\pm$	1548	5160,00 $\pm$	9,43
110	5710 $\pm$	1713	5600 $\pm$	1680	5580 $\pm$	1674	5630,00 $\pm$	33,00
120	6400 $\pm$	1920	6240 $\pm$	1872	6200 $\pm$	1860	6280,00 $\pm$	49,89

**Tabelle 4:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Turbopumpe mit den Gleichgewichtsdruck  $p_G = 200$  nbar.

$t / s$	$p_{M1} / \text{nbar}$		$p_{M2} / \text{nbar}$		$p_{M3} / \text{nbar}$		$p_{\text{Mittel}} / \text{nbar}$	
0	200 $\pm$	60	200 $\pm$	60	200 $\pm$	60	200,00 $\pm$	0,00
10	1130 $\pm$	339	1270 $\pm$	381	1480 $\pm$	444	1293,33 $\pm$	83,04
20	2780 $\pm$	834	3180 $\pm$	954	3180 $\pm$	954	3046,67 $\pm$	108,87
30	4830 $\pm$	1449	5430 $\pm$	1629	5180 $\pm$	1554	5146,67 $\pm$	142,07
40	6440 $\pm$	1932	7980 $\pm$	2394	7500 $\pm$	2250	7306,67 $\pm$	371,46
50	8920 $\pm$	2676	10 400 $\pm$	3120	10 100 $\pm$	3030	9806,67 $\pm$	368,82
60	10 700 $\pm$	3210	11 900 $\pm$	3570	11 400 $\pm$	3420	11 333,33 $\pm$	284,15
70	12 200 $\pm$	3660	13 700 $\pm$	4110	13 300 $\pm$	3990	13 066,67 $\pm$	366,16
80	13 700 $\pm$	4110	15 600 $\pm$	4680	15 200 $\pm$	4560	14 833,33 $\pm$	472,19
90	15 500 $\pm$	4650	18 000 $\pm$	5400	17 000 $\pm$	5100	16 833,33 $\pm$	593,17
100	17 500 $\pm$	5250	20 000 $\pm$	6000	18 900 $\pm$	5670	18 800,00 $\pm$	590,67
110	19 700 $\pm$	5910	21 800 $\pm$	6540	21 400 $\pm$	6420	20 966,67 $\pm$	525,64
120	21 500 $\pm$	6450	23 600 $\pm$	7080	22 800 $\pm$	6840	22 633,33 $\pm$	499,63

**Tabelle 5:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Turbopumpe mit den Gleichgewichtsdruck  $P_G = 50$  nbar.

$t / \text{s}$	$p_{M1} / \text{nbar}$		$p_{M2} / \text{nbar}$		$p_{M3} / \text{nbar}$		$p_{\text{Mittel}} / \text{nbar}$	
0,0	50,0 $\pm$	15,0	50,0 $\pm$	15,0	50,0 $\pm$	15,0	50,00 $\pm$	0,00
10,0	178,0 $\pm$	53,4	165,0 $\pm$	49,5	164,0 $\pm$	49,2	169,00 $\pm$	3,68
20,0	250,0 $\pm$	75,0	246,0 $\pm$	73,8	252,0 $\pm$	75,6	249,33 $\pm$	1,44
30,0	332,0 $\pm$	99,6	326,0 $\pm$	97,8	332,0 $\pm$	99,6	330,00 $\pm$	1,63
40,0	419,0 $\pm$	125,7	412,0 $\pm$	123,6	416,0 $\pm$	124,8	415,67 $\pm$	1,66
50,0	497,0 $\pm$	149,1	497,0 $\pm$	149,1	496,0 $\pm$	148,8	496,67 $\pm$	0,27
60,0	590,0 $\pm$	177,0	582,0 $\pm$	174,6	583,0 $\pm$	174,9	585,00 $\pm$	2,05
70,0	689,0 $\pm$	206,7	686,0 $\pm$	205,8	693,0 $\pm$	207,9	689,33 $\pm$	1,66
80,0	835,0 $\pm$	250,5	823,0 $\pm$	246,9	829,0 $\pm$	248,7	829,00 $\pm$	2,83
90,0	983,0 $\pm$	294,9	973,0 $\pm$	291,9	963,0 $\pm$	288,9	973,00 $\pm$	4,71
100,0	1150,0 $\pm$	345,0	1140,0 $\pm$	342,0	1140,0 $\pm$	342,0	1143,33 $\pm$	2,72
110,0	1280,0 $\pm$	384,0	1270,0 $\pm$	381,0	1280,0 $\pm$	384,0	1276,67 $\pm$	2,72
120,0	1450,0 $\pm$	435,0	1440,0 $\pm$	432,0	1440,0 $\pm$	432,0	1443,33 $\pm$	2,72

**Tabelle 6:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Turbopumpe mit den Gleichgewichtsdruck  $p_G = 70$  nbar.

$t / \text{s}$	$p_{M1} / \text{nbar}$		$p_{M2} / \text{nbar}$		$p_{M3} / \text{nbar}$		$p_{\text{Mittel}} / \text{nbar}$	
0,0	70,0 $\pm$	21,0	70,0 $\pm$	21,0	70,0 $\pm$	21,0	70,00 $\pm$	0,00
10,0	209,0 $\pm$	62,7	220,0 $\pm$	66,0	232,0 $\pm$	69,6	220,33 $\pm$	5,42
20,0	323,0 $\pm$	96,9	328,0 $\pm$	98,4	347,0 $\pm$	104,1	332,66 $\pm$	5,97
30,0	442,0 $\pm$	132,6	453,0 $\pm$	135,9	468,0 $\pm$	140,4	454,33 $\pm$	6,15
40,0	551,0 $\pm$	165,3	567,0 $\pm$	170,1	602,0 $\pm$	180,6	573,33 $\pm$	12,30
50,0	591,0 $\pm$	177,3	745,0 $\pm$	223,5	797,0 $\pm$	239,1	711,00 $\pm$	50,50
60,0	881,0 $\pm$	264,3	934,0 $\pm$	280,2	1010,0 $\pm$	303,0	941,66 $\pm$	30,57
70,0	1120,0 $\pm$	336,0	1170,0 $\pm$	351,0	1260,0 $\pm$	378,0	1183,33 $\pm$	33,44
80,0	1310,0 $\pm$	393,0	1390,0 $\pm$	417,0	1460,0 $\pm$	438,0	1386,66 $\pm$	35,38
90,0	1500,0 $\pm$	450,0	1620,0 $\pm$	486,0	1700,0 $\pm$	510,0	1606,66 $\pm$	47,45
100,0	1760,0 $\pm$	528,0	1840,0 $\pm$	552,0	1950,0 $\pm$	585,0	1850,00 $\pm$	44,97
110,0	1970,0 $\pm$	591,0	2080,0 $\pm$	624,0	2240,0 $\pm$	672,0	2096,66 $\pm$	64,00
120,0	2260,0 $\pm$	678,0	2430,0 $\pm$	729,0	2560,0 $\pm$	768,0	2416,66 $\pm$	70,92

**Tabelle 7:** Die einzelnen Messdaten der Evakuierungsmessung mit der Turbopumpe.  
Zusätzlich ist jeweils noch der Ausdruck  $\ln(F)$  aufgelistet, wobei  $F$  der  
Quotient  $F = \frac{p(t)-p_E}{p_0-p_E}$  ist.

$t / s$	Messung 1			Messung 2			Messung 3		
	$p / \text{nbar}$		$\ln(F)$	$p / \text{nbar}$		$\ln(F)$	$p / \text{nbar}$		$\ln(F)$
0	5000,00 $\pm$	1500,00	0,00 $\pm$ 0,42	5000,00 $\pm$	1500,00	0,00 $\pm$ 0,42	5000,00 $\pm$	1500,00	0,00 $\pm$ 0,42
10	194,00 $\pm$	58,20	-3,31 $\pm$ 0,43	176,00 $\pm$	52,80	-3,40 $\pm$ 0,43	202,00 $\pm$	60,60	-3,26 $\pm$ 0,43
20	44,60 $\pm$	13,38	-4,99 $\pm$ 0,50	35,30 $\pm$	10,59	-5,32 $\pm$ 0,54	42,40 $\pm$	12,72	-5,06 $\pm$ 0,51
30	25,20 $\pm$	7,56	-5,85 $\pm$ 0,64	22,00 $\pm$	6,60	-6,10 $\pm$ 0,72	23,30 $\pm$	6,99	-5,99 $\pm$ 0,69
40	21,20 $\pm$	6,36	-6,18 $\pm$ 0,75	19,20 $\pm$	5,76	-6,39 $\pm$ 0,85	20,00 $\pm$	6,00	-6,30 $\pm$ 0,80
50	18,90 $\pm$	5,67	-6,43 $\pm$ 0,87	17,40 $\pm$	5,22	-6,64 $\pm$ 0,99	18,20 $\pm$	5,46	-6,52 $\pm$ 0,92
60	17,50 $\pm$	5,25	-6,62 $\pm$ 0,98	16,80 $\pm$	5,04	-6,74 $\pm$ 1,06	17,50 $\pm$	5,25	-6,62 $\pm$ 0,98
70	16,80 $\pm$	5,04	-6,74 $\pm$ 1,06	15,80 $\pm$	4,74	-6,92 $\pm$ 1,21	16,30 $\pm$	4,89	-6,82 $\pm$ 1,12
80	15,90 $\pm$	4,77	-6,90 $\pm$ 1,19	15,10 $\pm$	4,53	-7,07 $\pm$ 1,36	15,50 $\pm$	4,65	-6,98 $\pm$ 1,27
90	15,20 $\pm$	4,56	-7,05 $\pm$ 1,33	14,50 $\pm$	4,35	-7,23 $\pm$ 1,54	14,90 $\pm$	4,47	-7,12 $\pm$ 1,41
100	14,70 $\pm$	4,41	-7,18 $\pm$ 1,47	14,10 $\pm$	4,23	-7,35 $\pm$ 1,69	14,40 $\pm$	4,32	-7,26 $\pm$ 1,57
110	14,20 $\pm$	4,26	-7,32 $\pm$ 1,65	13,70 $\pm$	4,11	-7,48 $\pm$ 1,89	14,00 $\pm$	4,20	-7,38 $\pm$ 1,74
120	13,80 $\pm$	4,14	-7,45 $\pm$ 1,84	13,50 $\pm$	4,05	-7,55 $\pm$ 2,02	13,70 $\pm$	4,11	-7,48 $\pm$ 1,89

**Tabelle 8:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit den Gleichgewichtsdruck  $p_G = 0,5 \text{ mbar}$ .

$t / \text{s}$	$p_{M1} / \mu\text{bar}$		$p_{M2} / \mu\text{bar}$		$p_{M3} / \mu\text{bar}$		$p_{\text{Mittel}} / \text{mbar}$
0	500,0	$\pm 150,0$	500,0	$\pm 150,0$	500,0	$\pm 150,0$	$0,5000 \pm 0,0000$
10	513,0	$\pm 153,9$	506,0	$\pm 151,8$	517,0	$\pm 155,1$	$0,5120 \pm 0,0026$
20	532,0	$\pm 159,6$	522,0	$\pm 156,6$	538,0	$\pm 161,4$	$0,5307 \pm 0,0038$
30	552,0	$\pm 165,6$	539,0	$\pm 161,7$	563,0	$\pm 168,9$	$0,5513 \pm 0,0057$
40	571,0	$\pm 171,3$	558,0	$\pm 167,4$	585,0	$\pm 175,5$	$0,5713 \pm 0,0064$
50	591,0	$\pm 177,3$	575,0	$\pm 172,5$	605,0	$\pm 181,5$	$0,5903 \pm 0,0071$
60	608,0	$\pm 182,4$	592,0	$\pm 177,6$	627,0	$\pm 188,1$	$0,6090 \pm 0,0083$
70	627,0	$\pm 188,1$	608,0	$\pm 182,4$	648,0	$\pm 194,4$	$0,6277 \pm 0,0094$
80	645,0	$\pm 193,5$	624,0	$\pm 187,2$	669,0	$\pm 200,7$	$0,6460 \pm 0,0106$
90	664,0	$\pm 199,2$	640,0	$\pm 192,0$	691,0	$\pm 207,3$	$0,6650 \pm 0,0120$
100	682,0	$\pm 204,6$	657,0	$\pm 197,1$	712,0	$\pm 213,6$	$0,6837 \pm 0,0130$
110	701,0	$\pm 210,3$	673,0	$\pm 201,9$	734,0	$\pm 220,2$	$0,7027 \pm 0,0144$
120	719,0	$\pm 215,7$	689,0	$\pm 206,7$	758,0	$\pm 227,4$	$0,7220 \pm 0,0163$
130	738,0	$\pm 221,4$	706,0	$\pm 211,8$	779,0	$\pm 233,7$	$0,7410 \pm 0,0172$
140	757,0	$\pm 227,1$	722,0	$\pm 216,6$	801,0	$\pm 240,3$	$0,7600 \pm 0,0187$
150	776,0	$\pm 232,8$	739,0	$\pm 221,7$	822,0	$\pm 246,6$	$0,7790 \pm 0,0196$
160	795,0	$\pm 238,5$	756,0	$\pm 226,8$	844,0	$\pm 253,2$	$0,7983 \pm 0,0208$
170	814,0	$\pm 244,2$	773,0	$\pm 231,9$	866,0	$\pm 259,8$	$0,8177 \pm 0,0220$
180	833,0	$\pm 249,9$	790,0	$\pm 237,0$	889,0	$\pm 266,7$	$0,8373 \pm 0,0234$
190	850,0	$\pm 255,0$	806,0	$\pm 241,8$	910,0	$\pm 273,0$	$0,8553 \pm 0,0246$
200	870,0	$\pm 261,0$	823,0	$\pm 246,9$	934,0	$\pm 280,2$	$0,8757 \pm 0,0263$

**Tabelle 9:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit den Gleichgewichtsdruck  $p_G = 10 \text{ mbar}$ .

$t / \text{s}$	$p_{M1} / \text{mbar}$	$p_{M2} / \text{mbar}$	$p_{M3} / \text{mbar}$	$p_{\text{Mittel}} / \text{mbar}$
0	$10,0 \pm 3,00$	$10,0 \pm 3,00$	$10,0 \pm 3,00$	$10,00 \pm 0,00$
10	$12,7 \pm 3,81$	$12,6 \pm 3,78$	$12,9 \pm 3,87$	$12,73 \pm 0,07$
20	$14,9 \pm 4,47$	$14,8 \pm 4,44$	$15,0 \pm 4,50$	$14,90 \pm 0,05$
30	$17,0 \pm 5,10$	$17,0 \pm 5,10$	$17,2 \pm 5,16$	$17,07 \pm 0,05$
40	$19,1 \pm 5,73$	$19,1 \pm 5,73$	$19,2 \pm 5,76$	$19,13 \pm 0,03$
50	$21,3 \pm 6,39$	$21,5 \pm 6,45$	$21,6 \pm 6,48$	$21,47 \pm 0,07$
60	$24,0 \pm 7,20$	$24,1 \pm 7,23$	$24,3 \pm 7,29$	$24,13 \pm 0,07$
70	$26,6 \pm 7,98$	$26,7 \pm 8,01$	$26,8 \pm 8,04$	$26,70 \pm 0,04$
80	$29,1 \pm 8,73$	$29,1 \pm 8,73$	$29,2 \pm 8,76$	$29,13 \pm 0,03$
90	$31,3 \pm 9,39$	$31,3 \pm 9,39$	$31,4 \pm 9,42$	$31,33 \pm 0,03$
100	$33,5 \pm 10,05$	$33,9 \pm 10,17$	$33,5 \pm 10,05$	$33,63 \pm 0,11$
110	$35,3 \pm 10,59$	$35,3 \pm 10,59$	$35,4 \pm 10,62$	$35,33 \pm 0,03$
120	$37,2 \pm 11,16$	$37,4 \pm 11,22$	$37,4 \pm 11,22$	$37,33 \pm 0,05$
130	$39,1 \pm 11,73$	$39,0 \pm 11,70$	$39,2 \pm 11,76$	$39,10 \pm 0,05$
140	$41,4 \pm 12,42$	$41,4 \pm 12,42$	$41,5 \pm 12,45$	$41,43 \pm 0,03$
150	$44,4 \pm 13,32$	$44,4 \pm 13,32$	$44,4 \pm 13,32$	$44,40 \pm 0,00$
160	$47,0 \pm 14,10$	$47,3 \pm 14,19$	$47,2 \pm 14,16$	$47,17 \pm 0,07$
170	$49,6 \pm 14,88$	$49,8 \pm 14,94$	$49,8 \pm 14,94$	$49,73 \pm 0,05$
180	$52,1 \pm 15,63$	$51,9 \pm 15,57$	$52,2 \pm 15,66$	$52,06 \pm 0,07$
190	$54,6 \pm 16,38$	$54,5 \pm 16,35$	$54,7 \pm 16,41$	$54,60 \pm 0,05$
200	$56,9 \pm 17,07$	$56,8 \pm 17,04$	$56,9 \pm 17,07$	$56,87 \pm 0,03$



**Tabelle 10:** Die Messwerte der einzelnen Messungen und der daraus gemittelte Druckwert für die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit den Gleichgewichtsdruck  $p_G = 50 \text{ mbar}$ .

$t / \text{s}$	$p_{M1} / \text{mbar}$	$p_{M2} / \text{mbar}$	$p_{M3} / \text{mbar}$	$p_{\text{Mittel}} / \text{mbar}$
0	$50,0 \pm 15,00$	$50,0 \pm 15,00$	$50,0 \pm 15,00$	$50,00 \pm 0,00$
10	$68,9 \pm 20,67$	$69,5 \pm 20,85$	$66,8 \pm 20,04$	$68,40 \pm 0,67$
20	$87,5 \pm 26,25$	$86,8 \pm 26,04$	$84,5 \pm 25,35$	$86,27 \pm 0,74$
30	$109,0 \pm 54,50$	$108,0 \pm 54,00$	$102,0 \pm 51,00$	$106,33 \pm 1,78$
40	$135,0 \pm 67,50$	$137,0 \pm 68,50$	$130,0 \pm 65,00$	$134,00 \pm 1,70$
50	$161,0 \pm 80,50$	$163,0 \pm 81,50$	$155,0 \pm 77,50$	$159,67 \pm 1,96$
60	$190,0 \pm 95,00$	$189,0 \pm 94,50$	$181,0 \pm 90,50$	$186,67 \pm 2,33$
70	$221,0 \pm 110,50$	$218,0 \pm 109,00$	$208,0 \pm 104,00$	$215,67 \pm 3,29$
80	$264,0 \pm 132,00$	$266,0 \pm 133,00$	$246,0 \pm 123,00$	$258,67 \pm 5,19$
90	$297,0 \pm 148,50$	$302,0 \pm 151,00$	$284,0 \pm 142,00$	$294,33 \pm 4,38$
100	$342,0 \pm 171,00$	$338,0 \pm 169,00$	$325,0 \pm 162,50$	$335,00 \pm 4,19$
110	$374,0 \pm 187,00$	$379,0 \pm 189,50$	$369,0 \pm 184,50$	$374,00 \pm 2,36$
120	$431,0 \pm 215,50$	$435,0 \pm 217,50$	$395,0 \pm 197,50$	$420,33 \pm 10,36$
130	$502,0 \pm 251,00$	$498,0 \pm 249,00$	$455,0 \pm 227,50$	$485,00 \pm 12,28$
140	$560,0 \pm 280,00$	$569,0 \pm 284,50$	$526,0 \pm 263,00$	$551,67 \pm 10,69$
150	$642,0 \pm 321,00$	$649,0 \pm 324,50$	$582,0 \pm 291,00$	$624,33 \pm 17,36$
160	$710,0 \pm 355,00$	$704,0 \pm 352,00$	$688,0 \pm 344,00$	$700,67 \pm 5,36$
170	$795,0 \pm 397,50$	$808,0 \pm 404,00$	$740,0 \pm 370,00$	$781,00 \pm 17,02$
180	$874,0 \pm 437,00$	$880,0 \pm 440,00$	$820,0 \pm 410,00$	$858,00 \pm 15,58$
190	$945,0 \pm 472,50$	$1000,0 \pm 500,00$	$895,0 \pm 447,50$	$946,67 \pm 24,76$
200	$1000,0 \pm 500,00$	$1000,0 \pm 500,00$	$965,0 \pm 482,50$	$988,33 \pm 9,53$

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

$t / \text{s}$	$p_{M1} / \text{mbar}$	$p_{M2} / \text{mbar}$	$p_{M3} / \text{mbar}$	$p_{\text{Mittel}} / \text{mbar}$
0	$100,0 \pm 30,0$	$100,0 \pm 30,0$	$100,0 \pm 30,0$	$100,00 \pm 0,00$
10	$138,0 \pm 69,0$	$156,0 \pm 78,0$	$158,0 \pm 79,0$	$150,67 \pm 5,19$
20	$186,0 \pm 93,0$	$206,0 \pm 103,0$	$208,0 \pm 104,0$	$200,00 \pm 5,73$
30	$253,0 \pm 126,5$	$281,0 \pm 140,5$	$291,0 \pm 145,5$	$275,00 \pm 9,29$
40	$323,0 \pm 161,5$	$349,0 \pm 174,5$	$356,0 \pm 178,0$	$342,67 \pm 8,20$
50	$397,0 \pm 198,5$	$439,0 \pm 219,5$	$448,0 \pm 224,0$	$428,00 \pm 12,83$
60	$512,0 \pm 256,0$	$556,0 \pm 278,0$	$577,0 \pm 288,5$	$548,33 \pm 15,64$
70	$655,0 \pm 327,5$	$683,0 \pm 341,5$	$694,0 \pm 347,0$	$677,33 \pm 9,48$
80	$788,0 \pm 394,0$	$882,0 \pm 441,0$	$876,0 \pm 438,0$	$848,67 \pm 24,81$
90	$979,0 \pm 489,5$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$993,00 \pm 5,72$
100	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,00 \pm 0,00$
110	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,00 \pm 0,00$
120	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,00 \pm 0,00$
130	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,00 \pm 0,00$
140	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,00 \pm 0,00$
150	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,00 \pm 0,00$
160	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,00 \pm 0,00$
170	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,00 \pm 0,00$
180	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,00 \pm 0,00$
190	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,00 \pm 0,00$
200	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,0 \pm 500,0$	$1000,00 \pm 0,00$

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

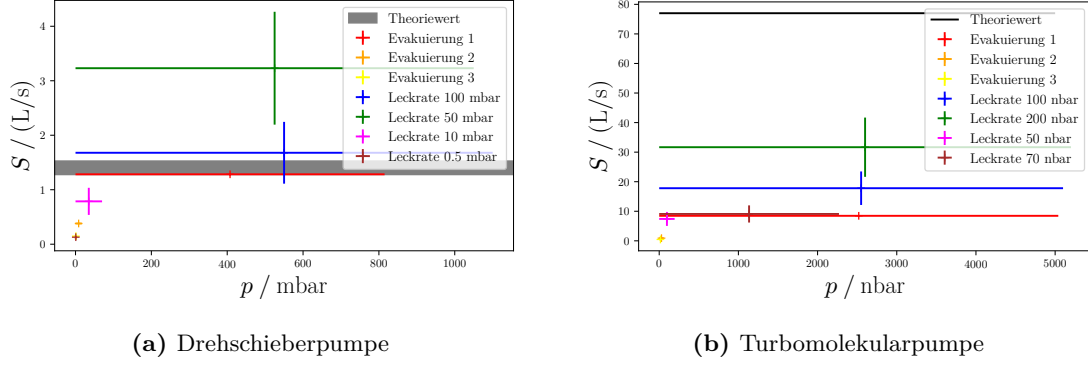
$t / \text{s}$	Messung 1		Messung 2		Messung 3	
	$p / \text{nbar}$	$\ln(F)$	$p / \text{nbar}$	$\ln(F)$	$p / \text{nbar}$	$\ln(F)$
0	$1000,00 \pm 500,00$	$0,00 \pm 0,70$	$1000,00 \pm 500,00$	$0,00 \pm 0,70$	$1000,00 \pm 500,00$	$0,00 \pm 0,70$
10	$798,00 \pm 399,00$	$-0,22 \pm 0,70$	$800,00 \pm 400,00$	$-0,22 \pm 0,70$	$1000,00 \pm 500,00$	$0,00 \pm 0,70$
20	$442,00 \pm 221,00$	$-0,81 \pm 0,70$	$450,00 \pm 225,00$	$-0,79 \pm 0,70$	$1000,00 \pm 500,00$	$0,00 \pm 0,70$
30	$278,00 \pm 139,00$	$-1,28 \pm 0,70$	$282,00 \pm 141,00$	$-1,26 \pm 0,70$	$624,00 \pm 312,00$	$-0,47 \pm 0,70$
40	$172,00 \pm 86,00$	$-1,76 \pm 0,70$	$177,00 \pm 88,50$	$-1,73 \pm 0,70$	$359,00 \pm 179,50$	$-1,02 \pm 0,70$
50	$111,00 \pm 55,50$	$-2,19 \pm 0,70$	$119,00 \pm 59,50$	$-2,12 \pm 0,70$	$218,00 \pm 109,00$	$-1,52 \pm 0,70$
60	$77,10 \pm 23,13$	$-2,56 \pm 0,58$	$79,70 \pm 23,91$	$-2,52 \pm 0,58$	$142,00 \pm 71,00$	$-1,95 \pm 0,70$
70	$53,20 \pm 15,96$	$-2,93 \pm 0,58$	$55,80 \pm 16,74$	$-2,88 \pm 0,58$	$93,80 \pm 28,14$	$-2,36 \pm 0,58$
80	$38,20 \pm 11,46$	$-3,26 \pm 0,58$	$40,70 \pm 12,21$	$-3,20 \pm 0,58$	$65,50 \pm 19,65$	$-2,72 \pm 0,58$
90	$29,80 \pm 8,94$	$-3,51 \pm 0,58$	$31,40 \pm 9,42$	$-3,46 \pm 0,58$	$45,90 \pm 13,77$	$-3,08 \pm 0,58$
100	$22,10 \pm 6,63$	$-3,81 \pm 0,58$	$23,40 \pm 7,02$	$-3,75 \pm 0,58$	$34,80 \pm 10,44$	$-3,35 \pm 0,58$
110	$17,00 \pm 5,10$	$-4,07 \pm 0,58$	$17,70 \pm 5,31$	$-4,03 \pm 0,58$	$26,00 \pm 7,80$	$-3,64 \pm 0,58$
120	$13,30 \pm 3,99$	$-4,32 \pm 0,58$	$14,00 \pm 4,20$	$-4,26 \pm 0,58$	$19,40 \pm 5,82$	$-3,94 \pm 0,58$
130	$10,30 \pm 3,09$	$-4,57 \pm 0,58$	$10,80 \pm 3,24$	$-4,52 \pm 0,58$	$15,60 \pm 4,68$	$-4,16 \pm 0,58$
140	$8,52 \pm 2,55$	$-4,76 \pm 0,58$	$8,81 \pm 2,64$	$-4,73 \pm 0,58$	$12,20 \pm 3,66$	$-4,40 \pm 0,58$
150	$7,04 \pm 2,11$	$-4,95 \pm 0,58$	$7,37 \pm 2,21$	$-4,91 \pm 0,58$	$9,48 \pm 2,84$	$-4,65 \pm 0,58$
160	$6,02 \pm 1,80$	$-5,11 \pm 0,58$	$6,17 \pm 1,85$	$-5,08 \pm 0,58$	$7,88 \pm 2,36$	$-4,84 \pm 0,58$
170	$5,21 \pm 1,56$	$-5,25 \pm 0,58$	$5,36 \pm 1,60$	$-5,22 \pm 0,58$	$6,63 \pm 1,98$	$-5,01 \pm 0,58$
180	$4,57 \pm 1,37$	$-5,38 \pm 0,58$	$4,67 \pm 1,40$	$-5,36 \pm 0,58$	$5,67 \pm 1,70$	$-5,17 \pm 0,58$
190	$4,03 \pm 1,20$	$-5,51 \pm 0,58$	$4,12 \pm 1,23$	$-5,49 \pm 0,58$	$4,91 \pm 1,47$	$-5,31 \pm 0,58$
200	$3,61 \pm 1,08$	$-5,62 \pm 0,58$	$3,68 \pm 1,10$	$-5,60 \pm 0,58$	$4,37 \pm 1,31$	$-5,43 \pm 0,58$
210	$3,26 \pm 0,97$	$-5,72 \pm 0,58$	$3,32 \pm 0,99$	$-5,70 \pm 0,58$	$3,86 \pm 1,15$	$-5,55 \pm 0,58$
220	$2,95 \pm 0,88$	$-5,82 \pm 0,58$	$3,01 \pm 0,90$	$-5,80 \pm 0,58$	$3,46 \pm 1,03$	$-5,66 \pm 0,58$
230	$2,96 \pm 0,88$	$-5,82 \pm 0,58$	$2,74 \pm 0,82$	$-5,90 \pm 0,58$	$3,14 \pm 0,94$	$-5,76 \pm 0,58$
240	$2,46 \pm 0,73$	$-6,00 \pm 0,58$	$2,50 \pm 0,75$	$-5,99 \pm 0,58$	$2,85 \pm 0,85$	$-5,86 \pm 0,58$
250	$2,26 \pm 0,67$	$-6,09 \pm 0,58$	$2,31 \pm 0,69$	$-6,07 \pm 0,58$	$2,59 \pm 0,77$	$-5,95 \pm 0,58$
260	$2,09 \pm 0,62$	$-6,17 \pm 0,58$	$2,13 \pm 0,63$	$-6,15 \pm 0,58$	$2,39 \pm 0,71$	$-6,03 \pm 0,58$
270	$1,94 \pm 0,58$	$-6,24 \pm 0,58$	$1,98 \pm 0,59$	$-6,22 \pm 0,58$	$2,20 \pm 0,66$	$-6,12 \pm 0,58$
280	$1,80 \pm 0,54$	$-6,32 \pm 0,58$	$1,83 \pm 0,54$	$-6,30 \pm 0,58$	$2,04 \pm 0,61$	$-6,19 \pm 0,58$
290	$1,68 \pm 0,50$	$-6,39 \pm 0,58$	$1,71 \pm 0,51$	$-6,37 \pm 0,58$	$1,89 \pm 0,56$	$-6,27 \pm 0,58$
300	$1,57 \pm 0,47$	$-6,45 \pm 0,58$	$1,59 \pm 0,47$	$-6,44 \pm 0,58$	$1,77 \pm 0,53$	$-6,33 \pm 0,58$

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

$t / \text{s}$	Messung 1			Messung 2			Messung 3		
	$p / \text{nbar}$		$\ln(F)$	$p / \text{nbar}$		$\ln(F)$	$p / \text{nbar}$		$\ln(F)$
300	1,57 ±	0,47	-6,45 ± 0,58	1,59 ±	0,47	-6,44 ± 0,58	1,77 ±	0,53	-6,33 ± 0,58
310	1,47 ±	0,44	-6,52 ± 0,58	1,49 ±	0,44	-6,51 ± 0,58	1,65 ±	0,49	-6,40 ± 0,58
320	1,39 ±	0,41	-6,58 ± 0,58	1,41 ±	0,42	-6,56 ± 0,58	1,54 ±	0,46	-6,47 ± 0,58
330	1,31 ±	0,39	-6,64 ± 0,58	1,33 ±	0,39	-6,62 ± 0,58	1,45 ±	0,43	-6,53 ± 0,58
340	1,24 ±	0,37	-6,69 ± 0,58	1,25 ±	0,37	-6,68 ± 0,58	1,36 ±	0,40	-6,60 ± 0,58
350	1,17 ±	0,35	-6,75 ± 0,58	1,19 ±	0,35	-6,73 ± 0,58	1,29 ±	0,38	-6,65 ± 0,58
360	1,12 ±	0,33	-6,79 ± 0,58	1,12 ±	0,33	-6,79 ± 0,58	1,22 ±	0,36	-6,71 ± 0,58
370	1,06 ±	0,31	-6,85 ± 0,58	1,07 ±	0,32	-6,84 ± 0,58	1,15 ±	0,34	-6,77 ± 0,58
380	1,01 ±	0,30	-6,90 ± 0,58	1,02 ±	0,30	-6,89 ± 0,58	1,10 ±	0,33	-6,81 ± 0,58
390	0,96 ±	0,29	-6,94 ± 0,58	0,97 ±	0,29	-6,93 ± 0,58	1,05 ±	0,31	-6,86 ± 0,58
400	0,91 ±	0,27	-6,99 ± 0,58	0,92 ±	0,27	-6,98 ± 0,58	0,99 ±	0,29	-6,91 ± 0,58
410	0,87 ±	0,26	-7,04 ± 0,58	0,88 ±	0,26	-7,03 ± 0,58	0,95 ±	0,28	-6,96 ± 0,58
420	0,83 ±	0,25	-7,08 ± 0,58	0,84 ±	0,25	-7,08 ± 0,58	0,90 ±	0,27	-7,01 ± 0,58
430	0,80 ±	0,24	-7,13 ± 0,58	0,80 ±	0,24	-7,12 ± 0,58	0,86 ±	0,25	-7,05 ± 0,58
440	0,76 ±	0,22	-7,17 ± 0,58	0,77 ±	0,23	-7,16 ± 0,58	0,82 ±	0,24	-7,10 ± 0,58
450	0,73 ±	0,22	-7,21 ± 0,58	0,74 ±	0,22	-7,21 ± 0,58	0,79 ±	0,23	-7,14 ± 0,58
460	0,70 ±	0,21	-7,26 ± 0,58	0,71 ±	0,21	-7,25 ± 0,58	0,75 ±	0,22	-7,19 ± 0,58
470	0,67 ±	0,20	-7,30 ± 0,58	0,68 ±	0,20	-7,29 ± 0,58	0,72 ±	0,21	-7,23 ± 0,58
480	0,69 ±	0,20	-7,27 ± 0,58	0,65 ±	0,19	-7,33 ± 0,58	0,69 ±	0,20	-7,27 ± 0,58
490	0,62 ±	0,18	-7,38 ± 0,58	0,63 ±	0,18	-7,37 ± 0,58	0,67 ±	0,20	-7,31 ± 0,58
500	0,60 ±	0,18	-7,42 ± 0,58	0,60 ±	0,18	-7,41 ± 0,58	0,64 ±	0,19	-7,35 ± 0,58
510	0,58 ±	0,17	-7,45 ± 0,58	0,58 ±	0,17	-7,45 ± 0,58	0,62 ±	0,18	-7,39 ± 0,58
520	0,55 ±	0,16	-7,49 ± 0,58	0,56 ±	0,16	-7,48 ± 0,58	0,59 ±	0,17	-7,42 ± 0,58
530	0,53 ±	0,16	-7,54 ± 0,58	0,54 ±	0,16	-7,52 ± 0,58	0,57 ±	0,17	-7,46 ± 0,58
540	0,51 ±	0,15	-7,57 ± 0,58	0,52 ±	0,15	-7,56 ± 0,58	0,55 ±	0,16	-7,50 ± 0,58
550	0,49 ±	0,14	-7,61 ± 0,58	0,50 ±	0,15	-7,60 ± 0,58	0,53 ±	0,15	-7,54 ± 0,58
560	0,48 ±	0,14	-7,64 ± 0,58	0,48 ±	0,14	-7,63 ± 0,58	0,51 ±	0,15	-7,58 ± 0,58
570	0,46 ±	0,13	-7,68 ± 0,58	0,46 ±	0,14	-7,67 ± 0,58	0,49 ±	0,14	-7,61 ± 0,58
580	0,44 ±	0,13	-7,72 ± 0,58	0,45 ±	0,13	-7,70 ± 0,58	0,47 ±	0,14	-7,65 ± 0,58
590	0,43 ±	0,13	-7,75 ± 0,58	0,43 ±	0,13	-7,74 ± 0,58	0,46 ±	0,13	-7,68 ± 0,58
600	0,42 ±	0,12	-7,78 ± 0,58	0,42 ±	0,12	-7,77 ± 0,58	0,44 ±	0,13	-7,72 ± 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 11 graphisch dargestellt und in den Tabellen 14 für die Drehschieberpumpe und 15 für die Turbomolekularpumpe aufgelistet mit den jeweiligen Abweichungen zu den Theoriewerten.



**Abbildung 11:** 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  $S_{\text{theo}} \in [1,277 \text{ L/s}, 1,527 \text{ L/s}]$  an. In der Tabelle 14 sind die relativen Abweichungen des experimentellen Wertes von dem theoretischen Wert 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 Betrachtung der ermittelten Werte ist auffällig, dass bei der Evakuierungskurve im ersten Druckbereich ( $10 \text{ mbar} \leq p \leq 1000 \text{ mbar}$ ) der ermittelte Wert im theoretisch möglichem Bereich liegt. Auch der ermittelte Wert bei der Leckratenmessung mit dem Gleichgewichtsdruck  $p_G = 100 \text{ mbar}$  liegt sehr nah am Theoriebereich. Die Leckratenmessung mit dem Gleichgewichtsdruck  $p_G = 50 \text{ mbar}$  fällt sehr aus dem Muster, weil er deutlich größer als die Theoriewerte ist. Bei der Betrachtung der Abbildung 8c ist der erwartete lineare Verlauf nicht so deutlich ausgeprägt, wie bei den anderen Leckratenmessungen.

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  $p \leq 10 \text{ mbar}$  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

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

Messung	$S$ / (L/s)	$\Delta S_{\text{low}}$ / %	$\Delta S_{\text{high}}$ / %
Evakuierung 1	$1,2831 \pm 0,0231$	-0,41	16,01
Evakuierung 2	$0,3803 \pm 0,0132$	70,23	75,10
Evakuierung 3	$0,1476 \pm 0,0013$	88,44	90,33
Leckrate 0,5 mbar	$0,1289 \pm 0,0408$	89,90	91,55
Leckrate 10 mbar	$0,7865 \pm 0,2488$	38,44	48,52
Leckrate 50 mbar	$3,2303 \pm 1,0357$	-152,80	-111,43
Leckrate 100 mbar	$1,6782 \pm 0,5670$	-31,34	-9,84

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, im Experiment wurde der Wert  $p_E = (3,85 \pm 1,15) \cdot 10^{-3}$  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.

Bei der Turbomolekularpumpe ist in der Abbildung 11b deutlich zu erkennen, dass die ermittelten Werte deutlich vom Theoriewert abweichen, dieser beträgt  $S_{\text{theo}} = 77$  L/s [1]. Dies bestätigt sich auch bei Betrachtung der Werte und ihren relativen Abweichungen zum angegebenen Wert in der Tabelle 15.

**Tabelle 15:** Die ermittelten Werte des Saugvermögens der Turbomolekularpumpe mit der Abweichung von Theoriewert  $S_{\text{theo}} = 77$  L/s [1].

Messung	$S$ / (L/s)	$\Delta S$ / %
Evakuierung 1	$8,4606 \pm 0,1324$	89,01
Evakuierung 2	$0,9051 \pm 0,0218$	98,82
Evakuierung 3	$0,4599 \pm 0,0029$	99,40
Leckrate 50 nbar	$7,4060 \pm 2,3630$	90,38
Leckrate 70 nbar	$9,0884 \pm 2,9026$	88,19
Leckrate 100 nbar	$17,7988 \pm 5,6696$	76,88
Leckrate 200 nbar	$31,6721 \pm 10,0228$	58,86

Es ist auch auffällig, dass die ermittelten Werte für den ersten Bereich der Evakuierungskurve ( $10 \text{ nbar} \leq p \leq 1000 \text{ nbar}$ ) und die Leckratenmessung mit den Gleichgewichtsdrücken  $p_G = 100 \text{ nbar}$  und  $p_G = 200 \text{ nbar}$  deutlich näher an der Herstellerangabe liegen als

die anderen ermittelten Werte. 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.

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. Das benutzte Messgerät hat einen Messbereich bis maximal 1000 mbar, sodass bei manchen Messungen nur diese Zahl angezeigt wurde, obwohl davon auszugehen ist, dass der Druck im Rezipienten größer war. Jedoch müsste der Messbereich nur minimal größer sein, da der Druck nicht so viel höher wird, da der Druck bei Normatmosphäre  $p = 1013$  mbar beträgt. Ein Messbereich, der 20 mbar bis 30 mbar größer ist, würde die Messungen bei der Drehschieberpumpe noch etwas verbessern. 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.

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. Bei der Turbomolekularpumpe sind die Ergebnisse akzeptabel, da sich viele der nicht verminderten Fehler stärker bei niedrigerem Druck bemerkbar machen.

## 8 Anhang

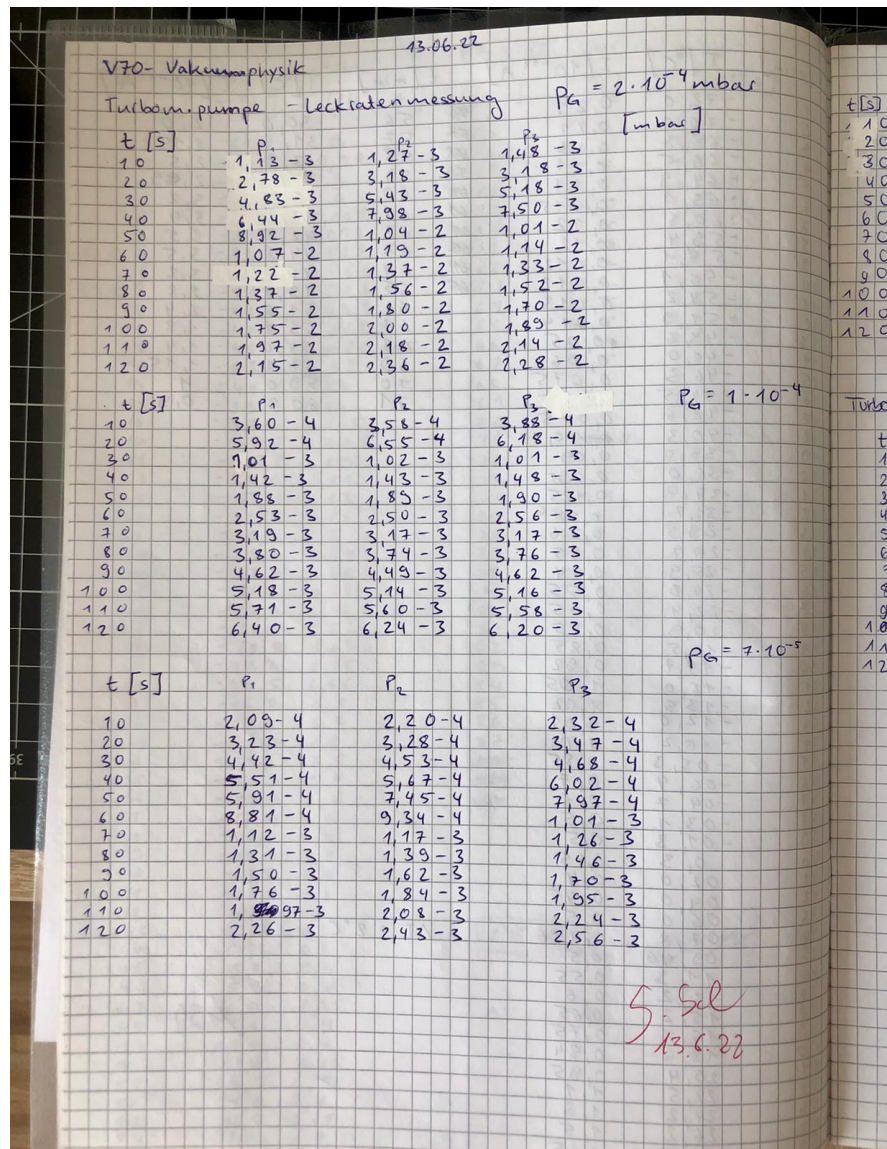


Abbildung 12: Die Originaldaten von der Versuchsdurchführung.



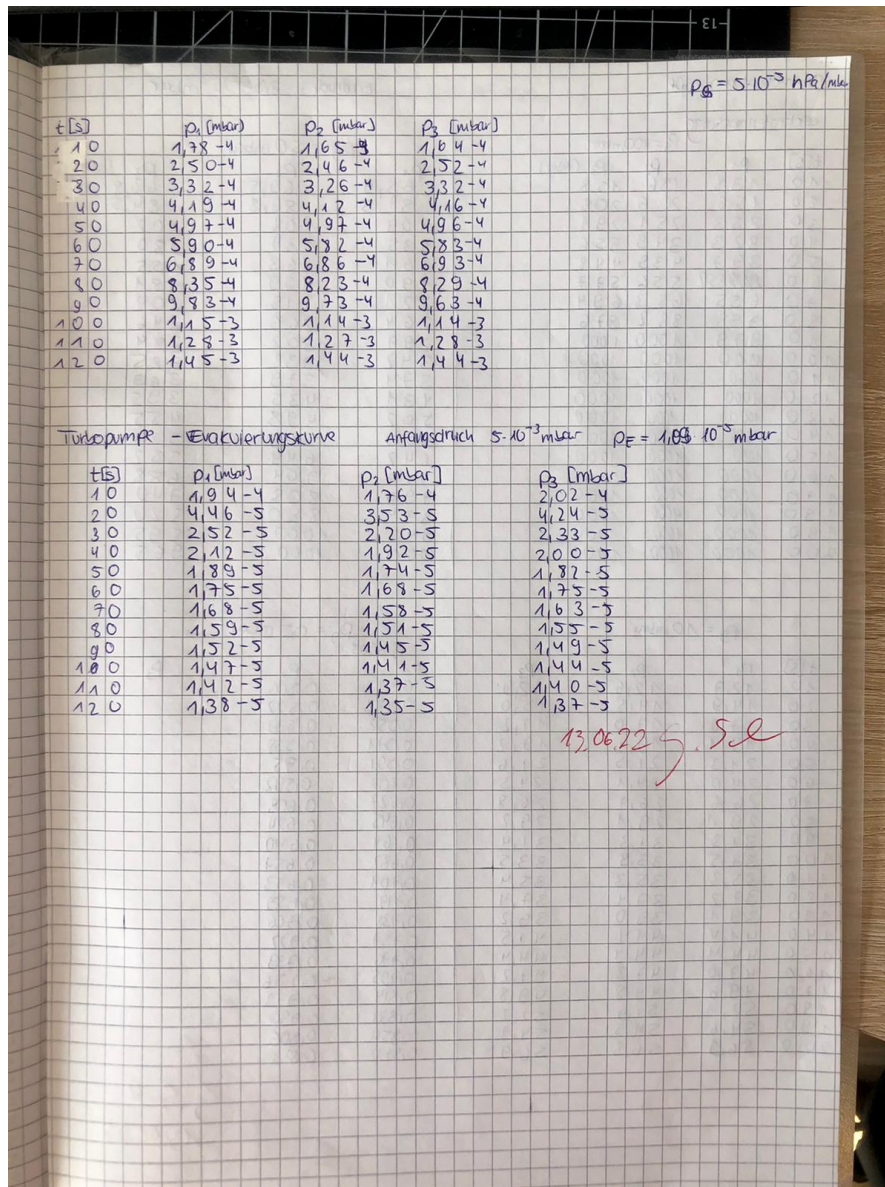


Abbildung 13: Die Originaldaten von der Versuchsdurchführung.

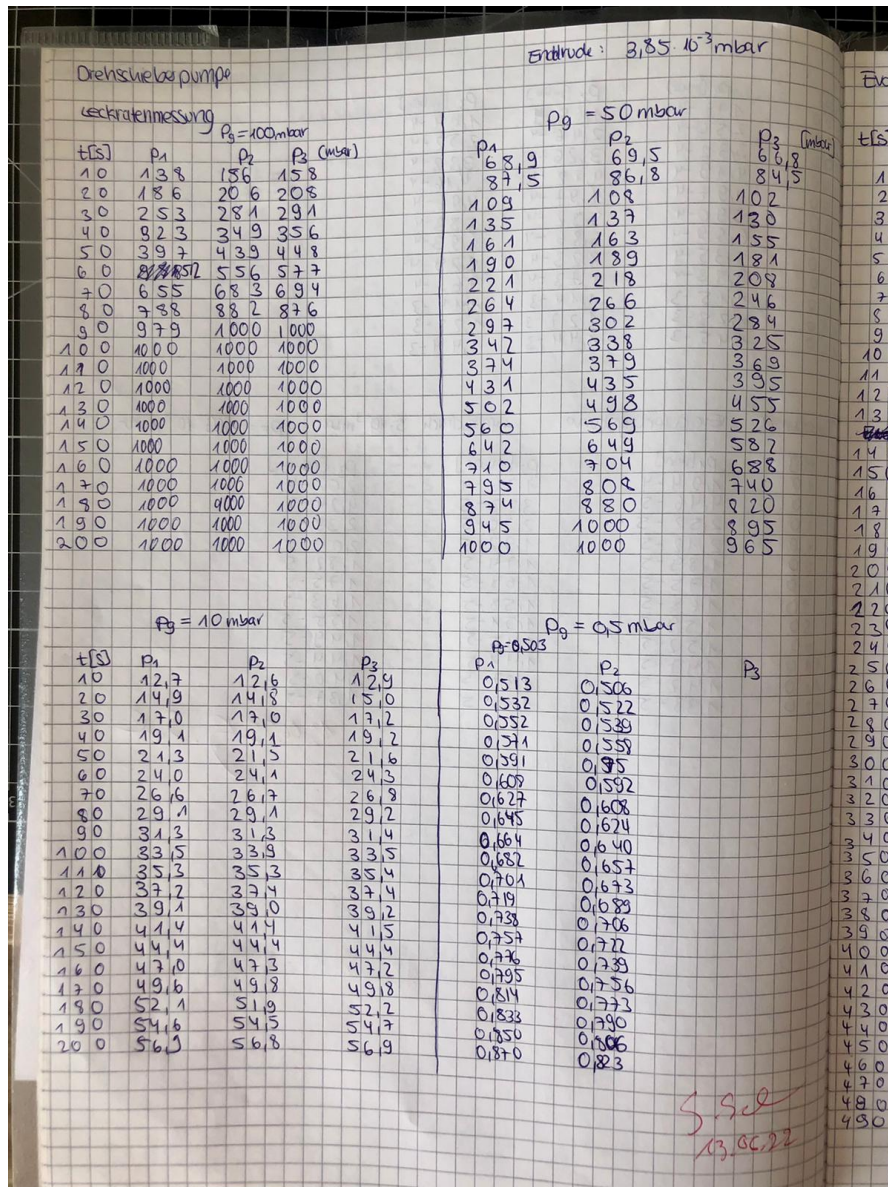


Abbildung 14: Die Originaldaten von der Versuchsdurchführung.



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 15: Die Originaldaten von der Versuchsdurchführung.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *V70 Vakuumversuch*. 2022.
- [2] 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/>.
- [3] 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/>.
- [4] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [5] 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/>.
- [6] Pfeiffer Vakuum. *Einführung in die Vakuumtechnik*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/> (besucht am 23.06.2022).
- [7] Wikipedia. *Sorption*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sorption> (besucht am 23.06.2022).
- [8] Wikipedia. *Turbomolekularpumpe*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Turbomolekularpumpe> (besucht am 23.06.2022).