

**V70**

# **Der Vakuumversuch**

Ben Werner Grobecker

ben.grobecker@tu-dortmund.de

Sebastian Rüßmann

sebastian.ruessmann@tu-dortmund.de

Durchführung: 21. April 2022

Abgabe: 20. Juli 2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Grundlagen . . . . .	3
2.1.1 Vakuum . . . . .	3
2.1.2 Druck . . . . .	3
2.1.3 Ideale Gasgleichung . . . . .	4
2.1.4 Mittlere freie Weglänge . . . . .	5
2.1.5 Strömungsarten . . . . .	5
2.1.6 Leitwert . . . . .	5
2.1.7 Sorption und Lecks . . . . .	6
2.2 Vakuumerzeugung . . . . .	7
2.2.1 Grundlagen . . . . .	7
2.2.2 Enddruck . . . . .	7
2.2.3 Drehschiebervakuumpumpe . . . . .	7
2.2.4 Turbomolekularpumpe . . . . .	9
2.3 Saugvermögen . . . . .	10
2.3.1 Evakuierungskurve . . . . .	10
2.3.2 Leckratenmessung . . . . .	10
2.4 Druckmessung . . . . .	11
2.4.1 Pirani-Vakuummeter . . . . .	11
2.4.2 Kalt-/Heißkathode Ionisationsvakuummeter . . . . .	11
<b>3 Durchführung</b>	<b>12</b>
3.1 Drehschieberpumpe . . . . .	12
3.2 Turbomolekularpumpe . . . . .	13
<b>4 Auswertung</b>	<b>13</b>
4.1 Drehschieberpumpe . . . . .	14
4.1.1 Evakuierungskurve . . . . .	14
4.1.2 Leckratenmessung . . . . .	19
4.2 Turbomolekularpumpe . . . . .	26
4.2.1 Evakuierungskurve . . . . .	26
4.2.2 Leckratenmessung . . . . .	28
<b>5 Diskussion</b>	<b>33</b>
<b>Literatur</b>	<b>38</b>

# 1 Zielsetzung

Der Vakuumversuch besteht aus 4 verschiedenen Messreihen, mit denen das effektive Saugvermögen zweier Vakuumpumpen verschiedener Bauart bestimmt wird. Dabei handelt es sich um eine *Drehzscheibenpumpe* und eine *Turbomolekularpumpe*, welche durch verschiedene Prozesse ein Vakuum unterschiedlicher Güte erzeugen. Zur Bestimmung der Saugleistung werden die *Evakuierungskurven* der beiden Pumpen bestimmt sowie jeweils eine *Leckratenmessung* durchgeführt.

## 2 Theorie

### 2.1 Grundlagen

#### 2.1.1 Vakuum

Für den Begriff des Vakuums finden sich verschiedenen Definitionen. Auf Wikipedia wird er ein Raum in der technischen Praxis mit weitgehender Abwesenheit von Materie definiert[10]. Normgerecht ist Vakuum definiert als der Zustand eines Gases, wenn in einem Behälter der Druck des Gases und damit die Teilchenzahldichte niedriger ist als außerhalb oder wenn der Druck des Gases niedriger ist als 300 mbar, d. h. kleiner als der niedrigste auf der Erdoberfläche vorkommende Atmosphärendruck [1]. Der Vakuum Begriff hängt mit dem Begriff des Druckes zusammen. Dadurch gibt es nicht das eine Vakuum, sondern vielmehr eine druckabhängige Gliederung, welche in Abbildung 1 dargestellt ist. Zusätzlich sind in der Grafik typische Anwendungen dieser Druckbereiche, sowie Arbeitsbereiche erschiedener Pumpbauweisen aufgelistet.

#### 2.1.2 Druck

Der Druck  $p$  ist definiert als die Kraft  $F$ , die auf eine Fläche  $A$  wirkt

$$p = \frac{F}{A} \quad [p] = \text{Pa} = 10 \cdot 10^{-5} \text{ bar} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m s}^2}. \quad (1)$$

Der Einfachheit halber gehen wir im Folgenden davon aus, dass es sich bei den verwendeten Gasen um *Ideale Gase* handelt. Diese besitzen im Vergleich zu reellen Gasen folgende vereinfachende Eigenschaften:

- Ideale Gasteilchen bewegen sich frei und wechselwirken nur durch elastische Stöße
- Ideale Gasteilchen sind punktförmig
- Ideale Gasteilchen vibrieren und rotieren nicht

Demnachzufolge lässt sich der Druck als Impulsübertrag zwischen den Gasteilchen und der Fläche  $A$  verstehen.

Viele Gase treten nicht im einheitlichen Zustand auf, sondern als Gemisch. So ist die Luft größtenteils ein Gemisch aus Stickstoff (78%) und Sauerstoff (21%) [5]. Dafür wird

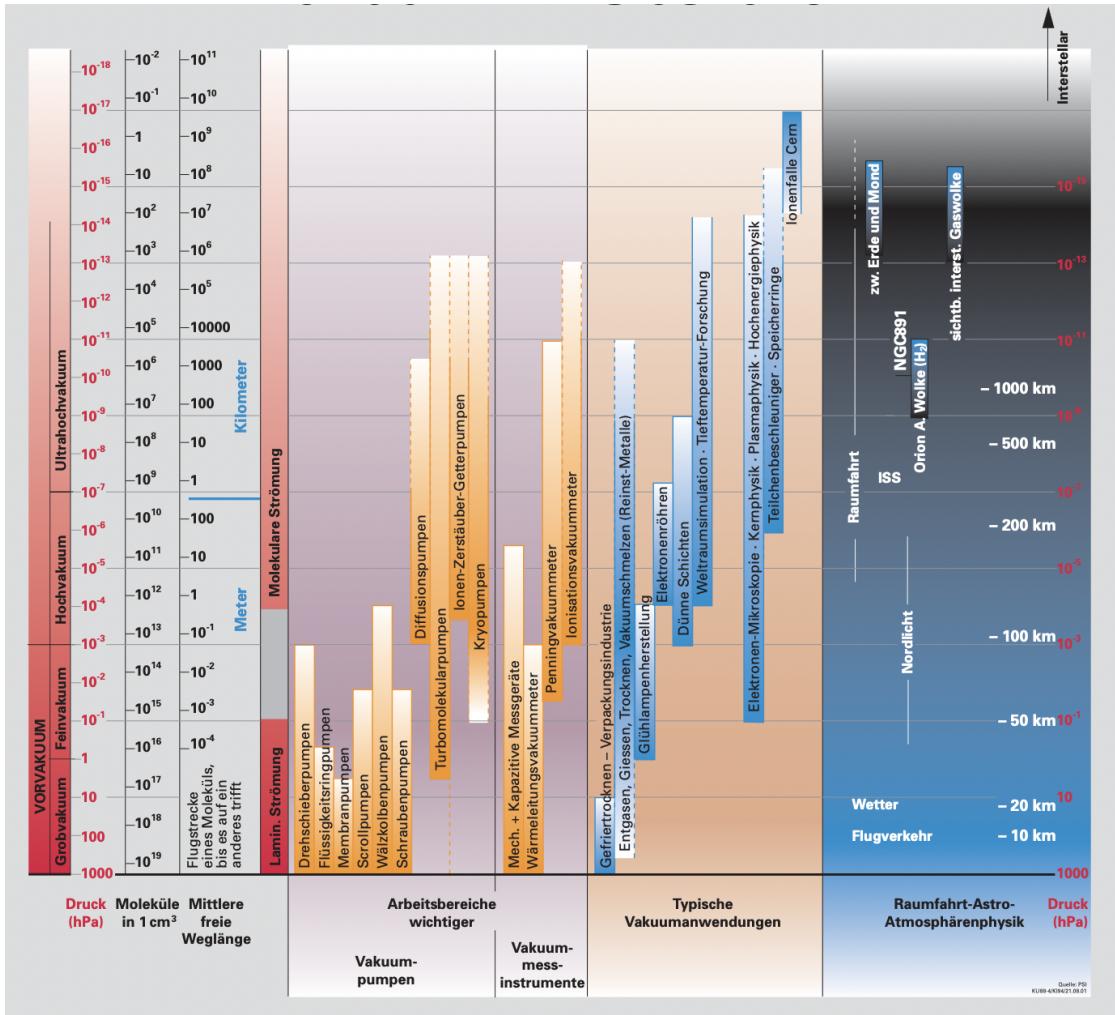


Abbildung 1: Vakuum im Überblicke [9].

der Partialdruck  $p_i$  eingeführt, welcher den Druck beschreibt den jede Gaskomponente unabhängig voneinander ausübt. Die Summe der Partialdrücke ergibt den Totaldruck

$$p_g = \sum_i p_i. \quad (2)$$

### 2.1.3 Ideale Gasgleichung

Wichtig zur Untersuchung von Gasen und somit auch für den Vakuumversuch sind neben dem *Druck* die Kennzahlen *Volumen*  $V$  und *Temperatur*  $T$ . Ihr Zusammenhang ist bei idealen Gasen gegeben durch die ideale Gasgleichung

$$pV = N \cdot k_b \cdot T. \quad (3)$$

Dabei steht  $k_b$  für die Boltzmann-Konstante<sup>1</sup> und  $N$  für die Teilchenzahl.

### 2.1.4 Mittlere freie Weglänge

Der Fluss und die Ausbreitung von Gasmolekülen wird immer wieder unterbrochen durch Zusammenstöße zwischen den Gasteilchen. Der mittlere Weg, den ein Teilchen zurücklegen kann bevor es mit einem anderen kollidiert, wird die *mittlere freie Weglänge*  $\tilde{L}$  genannt. Sie ist abhängig von der Geschwindigkeit der Teilchen, welche durch die Temperatur beschrieben werden kann, und der Teilchenzahldichte, welche proportional zum Druck ist.

### 2.1.5 Strömungsarten

Abhängig von der mittleren freien Weglänge und der Ausdehnung des Strömungskanals strömen die Gase unterschiedlich durch den Aufbau. Da  $\tilde{L}$  proportional zum Druck ist ändert sich die Strömungsart im besser werdenden Vakuum.

Herrscht im Aufbau ein Grobvakuum kommt es zu vielen Kollisionen zwischen den Teilchen, aber zu wenigen zwischen Teilchen und Gefäßwand. Die mittlere freie Weglänge ist deutlich kleiner als die Gefäßabmessungen. Diese Strömung wird *Viskose Strömung* genannt und kann in laminar und turbulent unterteilt werden. Bei der laminaren Strömung bleiben die Gasteilchen in parallelen Schichten mit verschiedener Geschwindigkeit. Mit hohen Geschwindigkeiten lösen sich diese Schichten auf, sodass von einer turbulenten Strömung gesprochen wird. Diese gilt es wenn möglich in der Vakuumtechnik zu vermeiden. Denn die Fluidteilchen laufen hierbei völlig durcheinander und rufen höhere Strömungswiderstände hervor. Demnach wird ein höheres Saugvermögen verlangt, das einhergeht mit einer höheren Pumpleistung.

Im Hoch- und Ultrahochvakuum geht die viskose Strömung in eine molekulare Strömung über. Die mittlere freie Weglänge ist nun deutlich größer als die Ausdehnung der Teilchen, damit findet so gut wie keine Wechselwirkung zwischen den Gasteilchen statt, sondern nur noch mit den Gefäßwänden. Dies wird später besonders für die Turbomolekularpumpe wichtig. In Abbildung (2) sind die verschiedenen Strömungsarten modellhaft dargestellt.

### 2.1.6 Leitwert

In den Röhren zwischen den Rezipienten<sup>2</sup> und den Vakuumpumpen kommt es zwischen dem Gas und den Wänden zu Reibung, ebenso zwischen den Gasteilchen selbst. Dies führt zu einem Strömungswiderstand  $W$  dessen Kehrwert den Leitwert  $L$  bildet

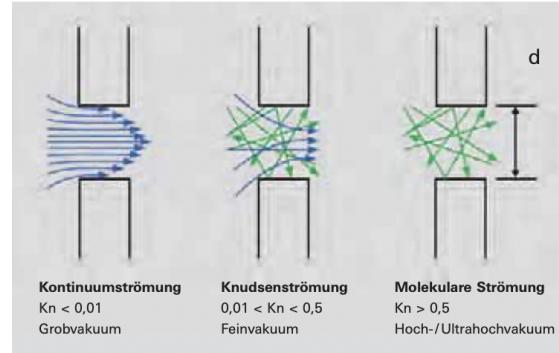
$$L = \frac{1}{W}. \quad (4)$$

Diese Gesetzmäßigkeit ist analog zum ohmschen Widerstand. Offensichtlich hängt der Leitwert von der vorliegenden Strömungsart ab und damit in Hinsicht der Vakuumphysik

---

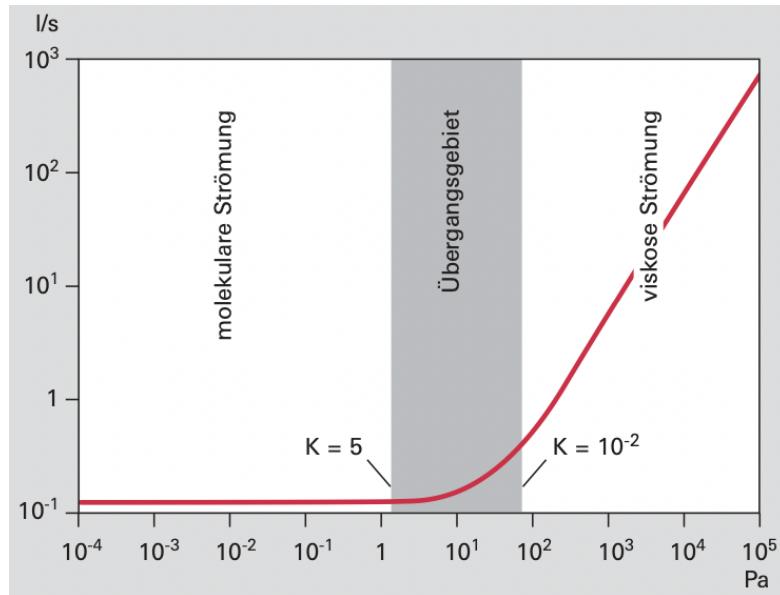
<sup>1</sup> $k_b = 1,3806649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

<sup>2</sup>Vakuumkammer



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung der verschiedenen Strömungsarten [9].

vom Druck. Dieser Zusammenhang zwischen Druck und Leitwert ist in Abbildung 3 dargestellt. Es ist zu beobachten, dass gerade für schlechte Vakuen der Leitwert besonders hoch ist, welches sich in einem Saugleistungsverlust der Pumpen bemerkbar macht. Der Übergangsbereich der beiden Strömungsarten bildet sich aus der Knudsenzahl  $K$ , die als Verhältnis der mittleren freien Weglänge und dem Durchmesser des Strömungskanals definiert ist.



**Abbildung 3:** Leitwert eines runden glatten Rohrs [9].

### 2.1.7 Sorption und Lecks

Treffen Atome oder Moleküle einer Gas- oder Dampfphase auf die Oberfläche eines Festkörpers, hier das innere des Rezipienten oder der Rohre, werden sie mit einer Haftwahrscheinlichkeit an dieser Oberfläche gehalten. Dieser Vorgang wird Adsorption genannt.

Die haftenden Teilchen, gennant das Adsorpt, werden entweder durch Dipolkräfte, van der Waals-Kräfte (Physisorption) oder durch Austauschkräfte (kovalente Bindung, Chemisorption) gehalten. Die daraus resultierende Bindungsenergie wird Adsorptionsenergie genannt. Wird eine Desorptionsenergie aufgebracht die gleich dieser Adsorptionsenergie ist, kann das Adsorpt wieder durch Desorption abgegeben werden.

Jedes Adteilchen eines Adsorpts kann grundsätzlich in das innere eines Festkörpers absorbiert werden, indem es auf Zwischengitterplätze oder Fehlstellen des Gitters springt. Dabei ist bei jedem Sprung eine Platzwechselenergie aufzubringen. Die Gesamtheit dieser Platzwechselprozesse der Teilchen wird Diffusion genannt. Eine absorbierte Teilchenmenge kann im Vergleich von der Anzahl an möglichen Plätzen im Innenraum zur Oberfläche wesentlich größer als eine adsorbierte sein.

Teilchen die an die Oberfläche diffundieren sind wiederum auch einer möglichen Desorption ausgesetzt. Selbst wenn die dabei auftretenden Gasmengen bzw. Gasströme gering sind, können sie die Ursache für vakuumtechnisch beträchtliche Druckänderungen sein. Dieses Durchdringen von Dichtungen oder sogar Metallwänden wird als virtuelles Leck wahrgenommen. Hingegen zu Lecks aus einer Undichtigkeit des Versuchsaufbaues sind sie nicht zu vermeiden und hängen von Material, Wandstärke und Oberfläche der Bauteile sowie des anliegenden Druckgradienten ab.

## 2.2 Vakuumerzeugung

### 2.2.1 Grundlagen

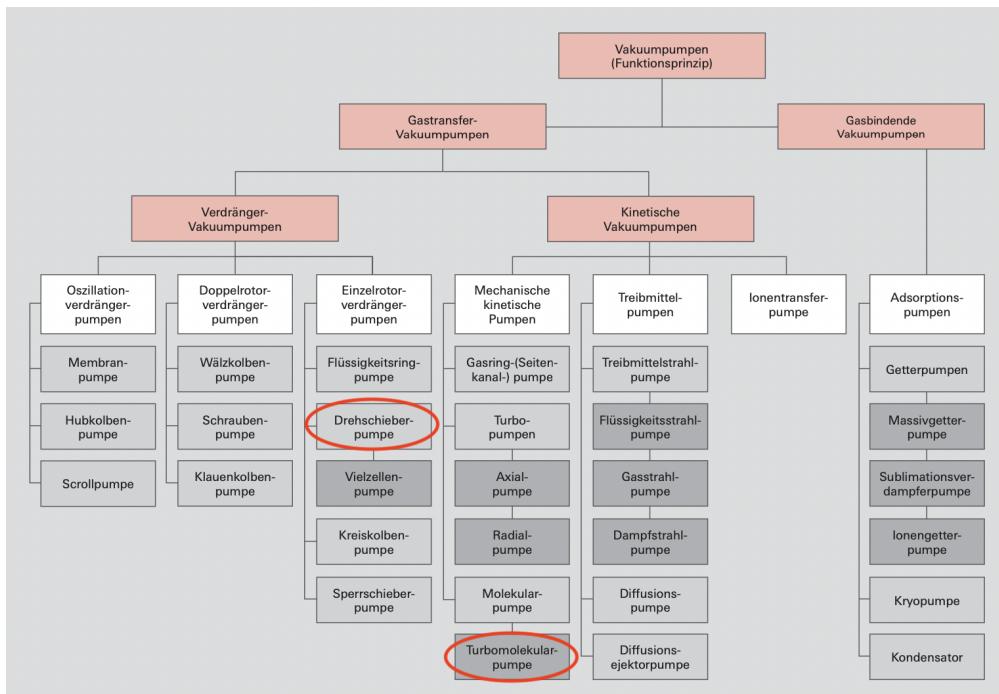
Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, gibt es eine Vielzahl verschiedener Pumpen, die sich in drei große Kategorien einteilen lassen: Verdränger-, kinetische und gasbindende Vakuumpumpen. Dabei liegt der Fokus in diesem Versuch auf der Drehschieberpumpe und der Turbomolekularpumpe (rot markiert). Beide Pumpen arbeiten in einem anderen Druckbereich (vgl. Abb. 1), sodass die Drehschieberpumpe der Turbomolekularpumpe vorangestellt werden muss (vgl. Kapitel 3). Klassifiziert werden die Pumpen neben ihrem Funktionsprinzip durch ihr *Saugvermögen*, ihre *Saugeleistung* und ihrem *Enddruck*.

### 2.2.2 Enddruck

Der Enddruck ist der niedrigste Druck den eine Pumpe theoretisch erreichen kann. Sie nähert sich ihm asymptotisch und kann ihn niemals ganz erreichen, da nahe des Enddruckes die Saugleistung null beträgt. In diesem Bereich arbeitet die Pumpe ausschließlich gegen ihren Rücklaufstrom.

### 2.2.3 Drehschiebervakuumpumpe

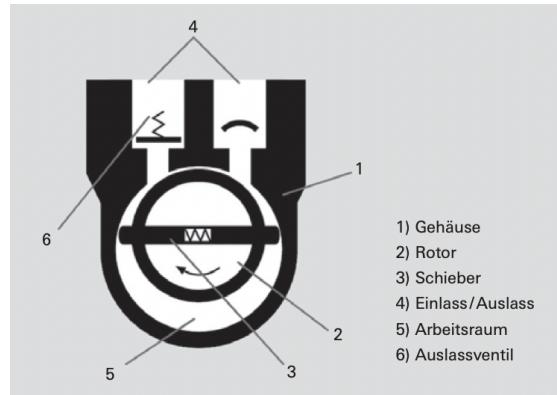
Die Drehschieberpumpe besteht aus einem asymmetrisch eingesetzten Schieber, welcher sich dreht und dadurch das Gas vom Einlassventil zum Auslassventil transportiert (vgl. Abb. 5). Abgedichtet wird der Aufbau durch eine dünne Ölschicht an den Innenwänden. Die Funktionsweise lässt sich gut durch die ideale Gasgleichung verstehen (3). Der Schieber entspannt zuerst das Gas, wodurch der Druck abnimmt (bei konstanter Temperatur).



**Abbildung 4:** Übersicht Vakuumpumpen[9].

Beim Auslassventil findet der inverse Prozess statt. Das Gas wird komprimiert, wodurch der Druck steigt und das Medium aus dem Ventil gedrückt wird.

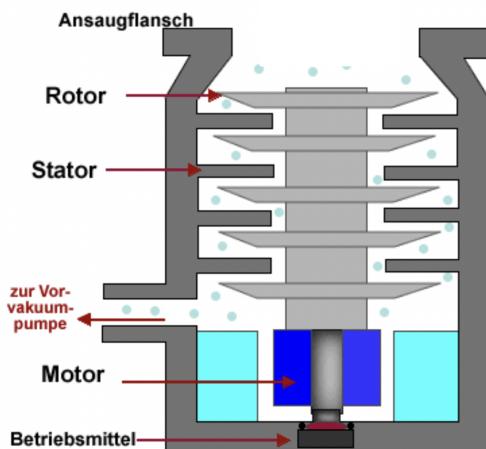
Die Drehschieberpumpe kann nur einen vergleichsweise hohen Enddruck erreichen, da der Ölfilm nur begrenzt dithält. Gleichzeitig gelangt auch immer ein kleiner Ölanteil in den Rezipienten.



**Abbildung 5:** Aufbau einer Drehschieberpumpe [9].

#### 2.2.4 Turbomolekularpumpe

Die Turbomolekularpumpe ist ähnlich einer Turbine aufgebaut. Sie besteht aus einem sich



**Abbildung 6:** Skizzenhafter Aufbau einer Turbomolekularpumpe [3].

schnell drehendem Rotor und einem Stator (vgl. Abb. 6). Das zugrundeliegende Funktionsprinzip ist die Impulsübertragung. Die Rotorblätter absorbieren die Gasmoleküle, wenn diese die Rotorblätter wieder verlassen, besitzen sie zusätzlich zu ihrer thermischen Geschwindigkeit den Impuls des Rotors. Damit die zusätzliche Geschwindigkeit nicht durch Kollisionen unter den Gasteilchen verloren geht, muss die mittlere freie Weglänge größer sein als der Schaufelabstand. Dies ist nur bei der molekularen Strömung der Fall. Daher benötigt die Turbomolekularpumpe eine Vorvakuumpumpe, welche den Druck entsprechend weit reduziert.

Der Vorteil der Turbomolekularpumpe gegenüber der Drehschieberpumpe ist, dass sie ohne Öl auskommt. Dadurch sind wesentlich niedrigere Enddrücke zu erreichen.

## 2.3 Saugvermögen

Das Saugvermögen ist gegeben durch

$$S = \frac{dV}{dt}. \quad (5)$$

Es gibt den mittleren Volumenstrom an, der durch die Ansaugöffnung der Vakuumpumpe pro Zeit durchgesetzt wird.

Die Saugleistung gibt das Saugvermögen in Abhängigkeit vom Ansaugdruck an

$$Q = S \cdot p, \quad (6)$$

da das Saugvermögen mit abnehmendem Druck ebenfalls abnimmt.

### 2.3.1 Evakuierungskurve

Für ideale Gase gilt nach Boyle[2] mit konstanter Temperatur  $T$ :

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

Durch Ableiten nach der Zeit ergibt sich

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

Aufgelöst nach  $p(t)$ , mit dem Rezipientenvolumen  $V_0$  und dem Anfangsdruck  $p_0$  ergibt sich unter der Berücksichtigung des Enddruckes  $p_E$

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

und damit für  $S$ :

$$\ln\left(\frac{p - p_E}{p - p_0}\right) = -\frac{S}{V_0}t \quad (7)$$

### 2.3.2 Leckrattemessung

Das manuelle Einstellen eines künstlichen Lecks führt zu einem Gleichgewichtsdruck  $p_g$ , wenn die Pumpe genauso viel Gas absaugen kann wie in den Rezipienten reinströmt. In diesem Zustand gilt nach Gleichung 6 bei Abschalten der Pumpe

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

mit der Leckrate

$$Q = V_0 \cdot \frac{dp}{dt}$$

und somit

$$S = \frac{V_0}{p_g} \cdot \frac{dp}{dt}. \quad (8)$$

## 2.4 Druckmessung

Der Druck ist definiert als Kraft pro Fläche. Dadurch lässt er sich direkt durch die Kraft, welche auf eine Membran wirkt, messen. Die Messung der Auslenkung erfolgt beispielweise durch einen Piezokristall. Nimmt der gemessene Druck allerdings stark ab, ist die auf die Membran wirkende Kraft irgendwann so klein, dass keine Auslenkung mehr gemessen werden kann. Der Druck muss ab diesen Punkt indirekt gemessen werden. Dies kann durch den Zusammenhang zwischen Druck und Wärmeleitfähigkeit oder auch durch die Beobachtung der Ionisationsströme geschehen.

### 2.4.1 Pirani-Vakuummeter

In einem gewissen Druckbereich (vgl. Abb. 7) ist die Wärmeleitfähigkeit linear abhängig vom Druck. In diesem Bereich kann der Druck mithilfe eines Pirani-Vakuummeters gemes-

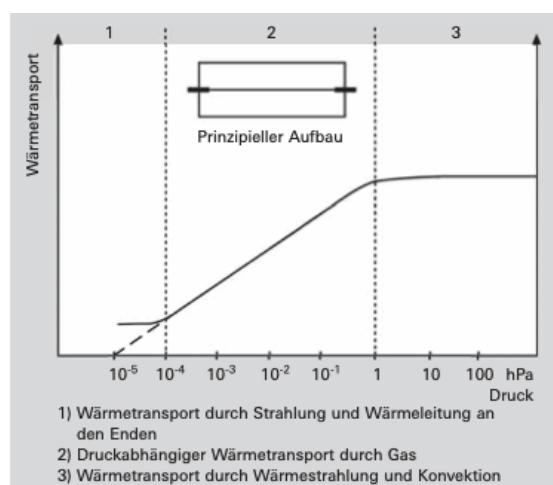


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Druck [9].

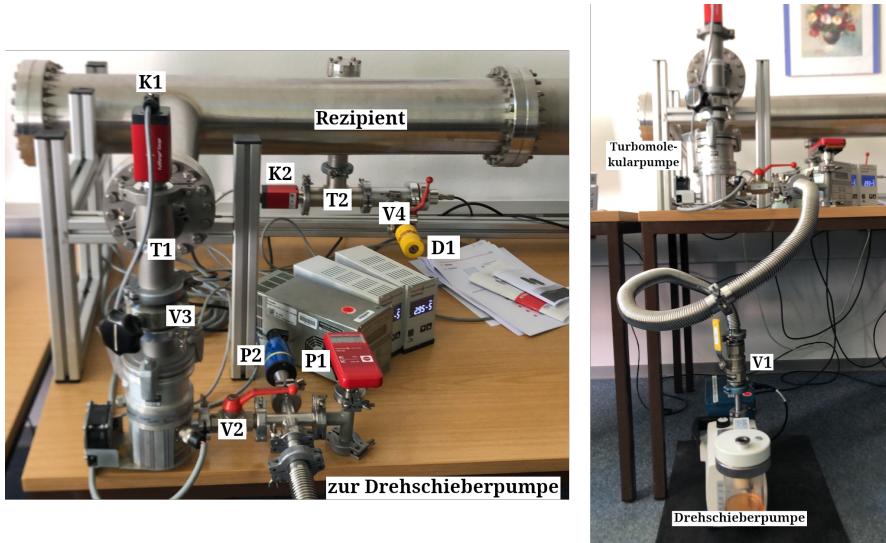
sen werden. Im Zentrum des Messgerätes wird ein Draht elektrisch durch Stromdurchgang auf eine konstante Temperatur geheizt. Durch das umgebene Gas wird die Wärme an eine Rohrwand übertragen. Der gemessene elektrische Widerstand des Drahtes gibt dabei Aufschluss über die anliegende Temperatur und somit über die druckabhängige Heizleistung. Zu beachten ist das jedes Gas eine eigene Kennlinie besitzt, auf die das Messgerät eingestellt werden muss.

### 2.4.2 Kalt-/Heißkathode Ionisationsvakuummeter

Ionisationsvakuummeter bestehen aus einer Kathode und einer Anode, welche in einem Magnetfeld eingelassen sind. An der Kathode werden nun Elektronen emittiert, hierbei unterscheiden sich Kalt- und Heißkathode. Bei der Heißkathode geschieht dies durch thermische Elektronenemission, bei der Kaltkathode durch elektrische Feldemission aus

der Kathode. Die emittierten Elektronen fliegen durch die Lorentzkraft auf Kreisbahnen gezwungen Richtung Anode. Dabei Ionisieren sie die sich im Aufbau befindenden Gasteilchen. Der dadurch gemessene Ionisationsstrom ist proportional zum Druck. Die Kreisbahn ist dafür notwendig, um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, ein Gasmolekül zu ionisieren.

### 3 Durchführung



**Abbildung 8:** Aufbau des Versuches

Der Aufbau des Experimentes ist der Abbildung 8 zu entnehmen. Anfänglich lief die gesamte Apperatur etwas mehr als eine Stunde um einen Enddruck festzustellen.

#### 3.1 Drehschieberpumpe

Die Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe wurde aufgenommen, indem durch das Dosierventil D1 und Belüftungsventil V3, die mit dem kombinierten Pirani/Kaltkathoden-Sensor K2 am T-Rohr T2 angebracht sind, der Rezipient auf einen Normaldruck von 1000 mbar gebracht wurde. Nach anschließendem Verschließen von V3 wird der Druckabfall durch den kombinierten Piezo/Pirani-Sensor P1, der am Kreuzbauteil zwischen Drehschieber- und Turbomolekularpumpe angeschlossen ist, in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. Dabei liegen die Messintervalle bei 10 s und die Gesamtdauer bei 600 s. Diese Messung wird 3-mal wiederholt. Während dieser Messreihe läuft ausschließlich die Drehschieberpumpe und Ventile V1 und V2 sind offen.

Bei der Leckrattemessung wird V3 wieder geöffnet und ein Gleichgewichtsdruck  $p_g$  durch D1 hergestellt. Anschließend wird das Ventil V1 geschlossen, welches sich direkt hinter der Drehschieberpumpe befindet. V2 bleibt weiterhin offen. Somit wird ein Druckanstieg hervorgerufen, der wieder durch P1 gemessen wird. Ein einzelnes Messintervall

bleibt bei 10 s, jedoch verkürzt sich die Gesamtdauer der Messung auf lediglich 200 s. Diese Messung wird 3-mal wiederholt für 4 verschiedene  $p_g$ -Werte.

### 3.2 Turbomolekularpumpe

Zur Inbetriebnahme der Turbomolekularpumpe muss ein Vakuum durch die Drehschieberpumpe erzeugt werden, das unter 0,1 mbar liegt. Die Drehzahlbegrenzung beträgt 1350 Hz.

Das Messverfahren der Turbopumpe wird analog zur Drehschieberpumpe durchgeführt. Lediglich die Konstellation der einzelnen Ventile und Messgeräte ändert sich. Der Druck wird durch Ablesen des Anzeigegerätes des kombinierten Pirani/Kaltkathoden-Sensors K1, der hinter der Pumpe am T-Rohr T1 angebracht ist, abgelesen.

Die Evakuierungskurve wird wieder 3-mal während laufender Turbopumpe aufgenommen. Die Gesamtdauer der Messung verändert sich dabei zu 120 s. Dahingegen bleiben die Messintervalle gleich. Diese Änderung wird auch in der Leckrattemessung vorgenommen, bei der durch Schließen des Ventils V2 ein Druckanstieg verursacht wird.

## 4 Auswertung

Die Auswertung wurde mit Hilfe eines Programms in Python unter Verwendung der Pakete `numpy`[8] für numerische Rechnungen, `matplotlib`[6] für die graphische Darstellung und `uncertainties`[7] für die Fehlerrechnung ausgeführt. Die tatsächliche Fehlerberechnung erfolgt durch das Programm, welches auf der Gaußschen Fehlerfortpflanzung beruht. Im Folgenden werden für die Auswertung im Wesentlichen Produkte der Form

$$f(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n x_i$$

berechnet, wobei  $x_1, \dots, x_n$  fehlerbehaftete Größen sind. Dann hat die Größe  $f$  den Fehler

$$\Delta f = f(x_1, \dots, x_n) \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2}$$

und für Summen, die insbesondere bei der Mittelung verwendet werden, also für Funktionen vom Typ

$$g(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n x_i$$

ist der Fehler

$$\Delta g = g(x_1, \dots, x_n) \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}. \quad (9)$$

Die Fehler der einzelnen Messwerte hängen von der jeweiligen Messmethode ab. Bei jeglicher Zeitmessung wurde eine Abweichung von 0,2 s gewählt. Diese Wahl nimmt eine mögliche Ungenauigkeit des Ablesens durch das menschliche Auge jeglicher Messwerte an.

Auch wenn der Wert zuerst willkürlich erscheint, wurde durch eine mehrfache Messung der Reaktionszeit zwischen Abschließen des Messintervalls und Ablesen der Vakuummessgeräte eine großzügige Obergrenze angenommen. Nach 10 unabhängigen Messungen wurde höchstens eine Abweichung von einem Zehntel plus mehreren Hundertsteln Sekunden festgestellt. Die Fehlerwerte der Messergebnisse im Zusammenhang der Drehschieberpumpe folgen aus der Messgenauigkeit des verwendeten kombinierten Piezo-/Pirani-Sensors. Im Druckbereich von 1200 bis 10 mbar liegt sie bei 0,3 % und von 10 bis  $2 \cdot 10^{-3}$  mbar bei 10 % [4]. Dahingegen folgen sie bei den Messungen zur Turbomolekularpumpe aus der Messgenauigkeit des verwendeten kombinierten Pirani-/Kalthkatoden-Sensors. Diese liegt bei 30 % im gesamten relevanten Druckbereich [4]. Im Folgenden werden für jegliche Messungen beider Pumpen, auch Start- / und Enddruck, die Fehlerwerte aus diesen Angaben berechnet.

## 4.1 Drehschieberpumpe

Zur Auswertung wurde das Rezipientenvolumen  $V_0 = (34,0 \pm 3,4) \text{ L}$  [4], der Enddruck  $p_E = (6,7 \pm 0,7) \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$  und der Startdruck  $p_0 = (1000,0 \pm 0,3) \text{ mbar}$  benutzt.

### 4.1.1 Evakuierungskurve

In Tabelle 1 sind die Messergebnisse aufgelistet. Der Mittelwert  $p$  dieser Messreihe und der logarithmische Ausdruck  $\ln\left(\frac{p-p_E}{p_0-p_E}\right)$ , dessen Fehler sich mit dem Fehler des Mittelwertes  $\sigma_p$  (Gl. 9) explizit durch Gleichung 10 ausrechnen lässt, sind in Tabelle 2 aufgeführt.

$$\sigma_{ln} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_p}{p - p_E}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{p_0}}{p_0 - p_E}\right)^2 + \left(\frac{(p - p_0) \cdot \sigma_{p_E}}{(p - p_E)(p_0 - p_E)}\right)^2} \quad (10)$$

Durch eine lineare Ausgleichsrechnung

$$\ln\left(\frac{p - p_E}{p_0 - p_E}\right) = a_i \cdot t + b$$

an die drei Abschnitte des Ausdrucks ergeben sich folgende Parameter:

$$\begin{aligned} a_1 &= (-0,03152 \pm 0,00013) \frac{1}{\text{s}} & b_1 &= -0,049 \pm 0,012 \\ a_2 &= (-0,0107 \pm 0,0004) \frac{1}{\text{s}} & b_2 &= -4,14 \pm 0,12 \\ a_3 &= (-0,00424 \pm 0,00006) \frac{1}{\text{s}} & b_3 &= -6,349 \pm 0,027 \end{aligned}$$

Die zugehörigen Ausgleichsgeraden sind in Abbildung 9 eingezeichnet.

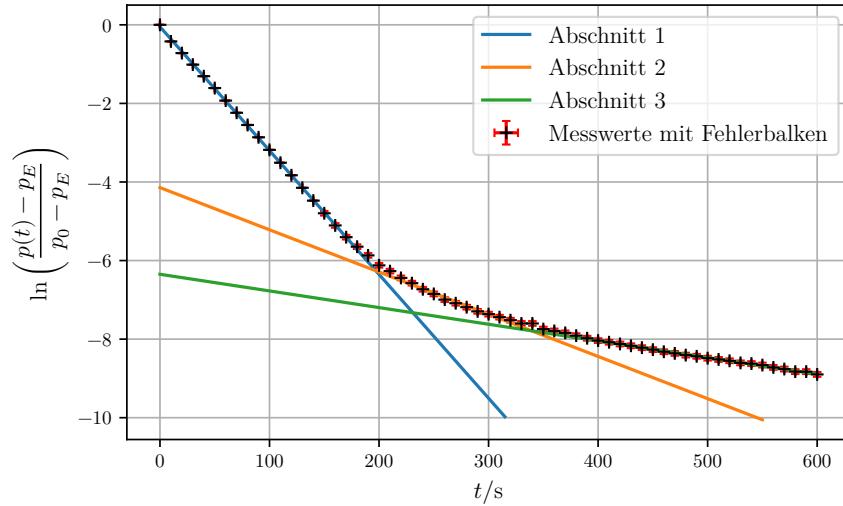
Nach Umstellen von Gleichung 7 und mit Einsetzen von  $a_i$  für  $\frac{dp}{dt}$  lässt sich das

Saugvermögen abschnittsweise berechnen zu:

$$S_1 = (1,07 \pm 0,11) \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$S_2 = (0,37 \pm 0,04) \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$S_3 = (0,144 \pm 0,014) \frac{\text{L}}{\text{s}}$$



**Abbildung 9:** Die logarithmische Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe.

**Tabelle 1:** Messergebnisse der Evakuierungskurve zur Drehschieberpumpe.

	$t/\text{s}$	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$
	$10,0 \pm 0,2$	$660,9 \pm 2,0$	$646,3 \pm 1,9$	$659,0 \pm 2,0$
	$20,0 \pm 0,2$	$488,1 \pm 1,5$	$498,3 \pm 1,5$	$474,6 \pm 1,4$
	$30,0 \pm 0,2$	$364,7 \pm 1,1$	$360,3 \pm 1,1$	$364,0 \pm 1,1$
	$40,0 \pm 0,2$	$271,50 \pm 0,81$	$268,60 \pm 0,81$	$271,60 \pm 0,81$
	$50,0 \pm 0,2$	$199,60 \pm 0,60$	$198,40 \pm 0,60$	$201,90 \pm 0,61$
	$60,0 \pm 0,2$	$145,10 \pm 0,44$	$144,20 \pm 0,43$	$146,80 \pm 0,44$
	$70,0 \pm 0,2$	$106,20 \pm 0,32$	$106,00 \pm 0,32$	$107,60 \pm 0,32$
	$80,0 \pm 0,2$	$79,30 \pm 0,24$	$77,10 \pm 0,23$	$78,10 \pm 0,23$
	$90,0 \pm 0,2$	$58,10 \pm 0,17$	$56,30 \pm 0,17$	$57,00 \pm 0,17$
	$100,0 \pm 0,2$	$41,90 \pm 0,13$	$40,90 \pm 0,12$	$41,60 \pm 0,12$

**Tabelle 1:** Messergebnisse der Evakuierungskurve zur Drehschieberpumpe.

$t/\text{s}$	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$
110,0 ± 0,2	30,20 ± 0,09	29,60 ± 0,09	29,90 ± 0,09
120,0 ± 0,2	21,80 ± 0,07	21,50 ± 0,07	21,90 ± 0,07
130,0 ± 0,2	16,00 ± 0,05	15,50 ± 0,05	15,90 ± 0,05
140,0 ± 0,2	11,30 ± 0,03	11,30 ± 0,03	11,60 ± 0,04
150,0 ± 0,2	8,30 ± 0,83	8,20 ± 0,82	8,30 ± 0,83
160,0 ± 0,2	6,10 ± 0,61	6,00 ± 0,60	6,10 ± 0,61
170,0 ± 0,2	4,50 ± 0,45	4,50 ± 0,45	4,50 ± 0,45
180,0 ± 0,2	3,60 ± 0,36	3,50 ± 0,35	3,50 ± 0,35
190,0 ± 0,2	2,90 ± 0,29	2,80 ± 0,28	2,80 ± 0,28
200,0 ± 0,2	2,20 ± 0,22	2,20 ± 0,22	2,20 ± 0,22
210,0 ± 0,2	1,90 ± 0,19	1,90 ± 0,19	1,90 ± 0,19
220,0 ± 0,2	1,60 ± 0,16	1,60 ± 0,16	1,60 ± 0,16
230,0 ± 0,2	1,40 ± 0,14	1,40 ± 0,14	1,40 ± 0,14
240,0 ± 0,2	1,20 ± 0,12	1,20 ± 0,12	1,20 ± 0,12
250,0 ± 0,2	1,00 ± 0,10	1,10 ± 0,11	1,10 ± 0,11
260,0 ± 0,2	0,900 ± 0,090	0,930 ± 0,093	0,940 ± 0,094
270,0 ± 0,2	0,840 ± 0,084	0,840 ± 0,084	0,850 ± 0,085
280,0 ± 0,2	0,760 ± 0,076	0,770 ± 0,077	0,760 ± 0,076
290,0 ± 0,2	0,680 ± 0,068	0,690 ± 0,069	0,690 ± 0,069
300,0 ± 0,2	0,640 ± 0,064	0,640 ± 0,064	0,640 ± 0,064
310,0 ± 0,2	0,600 ± 0,060	0,590 ± 0,059	0,590 ± 0,059
320,0 ± 0,2	0,550 ± 0,055	0,550 ± 0,055	0,550 ± 0,055
330,0 ± 0,2	0,500 ± 0,050	0,510 ± 0,051	0,510 ± 0,051
340,0 ± 0,2	0,570 ± 0,057	0,470 ± 0,047	0,480 ± 0,048
350,0 ± 0,2	0,440 ± 0,044	0,440 ± 0,044	0,440 ± 0,044
360,0 ± 0,2	0,420 ± 0,042	0,420 ± 0,042	0,420 ± 0,042
370,0 ± 0,2	0,400 ± 0,040	0,390 ± 0,039	0,410 ± 0,041
380,0 ± 0,2	0,370 ± 0,037	0,380 ± 0,038	0,370 ± 0,037
390,0 ± 0,2	0,350 ± 0,035	0,350 ± 0,035	0,350 ± 0,035
400,0 ± 0,2	0,330 ± 0,033	0,330 ± 0,033	0,330 ± 0,033
410,0 ± 0,2	0,320 ± 0,032	0,310 ± 0,031	0,320 ± 0,032
420,0 ± 0,2	0,310 ± 0,031	0,300 ± 0,030	0,300 ± 0,030
430,0 ± 0,2	0,290 ± 0,029	0,290 ± 0,029	0,290 ± 0,029
440,0 ± 0,2	0,280 ± 0,028	0,280 ± 0,028	0,270 ± 0,027
450,0 ± 0,2	0,270 ± 0,027	0,260 ± 0,026	0,260 ± 0,026
460,0 ± 0,2	0,250 ± 0,025	0,250 ± 0,025	0,250 ± 0,025
470,0 ± 0,2	0,240 ± 0,024	0,240 ± 0,024	0,240 ± 0,024
480,0 ± 0,2	0,230 ± 0,023	0,230 ± 0,023	0,230 ± 0,023
490,0 ± 0,2	0,230 ± 0,023	0,220 ± 0,022	0,220 ± 0,022
500,0 ± 0,2	0,220 ± 0,022	0,210 ± 0,021	0,210 ± 0,021

**Tabelle 1:** Messergebnisse der Evakuierungskurve zur Drehschieberpumpe.

$t/\text{s}$	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$
510,0 $\pm$ 0,2	0,210 $\pm$ 0,021	0,200 $\pm$ 0,020	0,210 $\pm$ 0,021
520,0 $\pm$ 0,2	0,200 $\pm$ 0,020	0,200 $\pm$ 0,020	0,200 $\pm$ 0,020
530,0 $\pm$ 0,2	0,190 $\pm$ 0,019	0,190 $\pm$ 0,019	0,190 $\pm$ 0,019
540,0 $\pm$ 0,2	0,190 $\pm$ 0,019	0,190 $\pm$ 0,019	0,180 $\pm$ 0,018
550,0 $\pm$ 0,2	0,180 $\pm$ 0,018	0,180 $\pm$ 0,018	0,180 $\pm$ 0,018
560,0 $\pm$ 0,2	0,170 $\pm$ 0,017	0,170 $\pm$ 0,017	0,170 $\pm$ 0,017
570,0 $\pm$ 0,2	0,160 $\pm$ 0,016	0,170 $\pm$ 0,017	0,160 $\pm$ 0,016
580,0 $\pm$ 0,2	0,150 $\pm$ 0,015	0,160 $\pm$ 0,016	0,150 $\pm$ 0,015
590,0 $\pm$ 0,2	0,150 $\pm$ 0,015	0,160 $\pm$ 0,016	0,150 $\pm$ 0,015
600,0 $\pm$ 0,2	0,140 $\pm$ 0,014	0,150 $\pm$ 0,015	0,140 $\pm$ 0,014

**Tabelle 2:** Mittelwert und logarithmischer Ausdruck der Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe.

$t/\text{s}$	$p/\text{mbar}$	$\ln\left(\frac{p-p_E}{p_0-p_E}\right)$
10,0 $\pm$ 0,2	655,4 $\pm$ 1,1	-0,4225 $\pm$ 0,0024
20,0 $\pm$ 0,2	487,00 $\pm$ 0,84	-0,7195 $\pm$ 0,0024
30,0 $\pm$ 0,2	363,00 $\pm$ 0,63	-1,0134 $\pm$ 0,0024
40,0 $\pm$ 0,2	270,57 $\pm$ 0,47	-1,3073 $\pm$ 0,0024
50,0 $\pm$ 0,2	199,97 $\pm$ 0,35	-1,6096 $\pm$ 0,0024
60,0 $\pm$ 0,2	145,37 $\pm$ 0,25	-1,9285 $\pm$ 0,0024
70,0 $\pm$ 0,2	106,60 $\pm$ 0,18	-2,2387 $\pm$ 0,0024
80,0 $\pm$ 0,2	78,17 $\pm$ 0,14	-2,5490 $\pm$ 0,0024
90,0 $\pm$ 0,2	57,133 $\pm$ 0,099	-2,8625 $\pm$ 0,0024
100,0 $\pm$ 0,2	41,467 $\pm$ 0,072	-3,1830 $\pm$ 0,0024
110,0 $\pm$ 0,2	29,900 $\pm$ 0,052	-3,5101 $\pm$ 0,0024
120,0 $\pm$ 0,2	21,733 $\pm$ 0,038	-3,8292 $\pm$ 0,0025
130,0 $\pm$ 0,2	15,800 $\pm$ 0,027	-4,1482 $\pm$ 0,0025
140,0 $\pm$ 0,2	11,400 $\pm$ 0,020	-4,4747 $\pm$ 0,0025
150,0 $\pm$ 0,2	8,27 $\pm$ 0,48	-4,80 $\pm$ 0,06
160,0 $\pm$ 0,2	6,07 $\pm$ 0,35	-5,11 $\pm$ 0,06
170,0 $\pm$ 0,2	4,50 $\pm$ 0,26	-5,41 $\pm$ 0,06
180,0 $\pm$ 0,2	3,53 $\pm$ 0,20	-5,65 $\pm$ 0,06
190,0 $\pm$ 0,2	2,83 $\pm$ 0,16	-5,87 $\pm$ 0,06
200,0 $\pm$ 0,2	2,20 $\pm$ 0,13	-6,12 $\pm$ 0,06
210,0 $\pm$ 0,2	1,90 $\pm$ 0,11	-6,27 $\pm$ 0,06
220,0 $\pm$ 0,2	1,600 $\pm$ 0,092	-6,44 $\pm$ 0,06
230,0 $\pm$ 0,2	1,400 $\pm$ 0,081	-6,58 $\pm$ 0,06

**Tabelle 2:** Mittelwert und logarithmischer Ausdruck der Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe.

$t/\text{s}$	$p/\text{mbar}$	$\ln\left(\frac{p-p_E}{p_0-p_E}\right)$
240,0 ± 0,2	1,200 ± 0,069	-6,73 ± 0,06
250,0 ± 0,2	1,067 ± 0,062	-6,85 ± 0,06
260,0 ± 0,2	0,923 ± 0,053	-6,99 ± 0,06
270,0 ± 0,2	0,843 ± 0,049	-7,09 ± 0,06
280,0 ± 0,2	0,763 ± 0,044	-7,19 ± 0,06
290,0 ± 0,2	0,687 ± 0,040	-7,29 ± 0,06
300,0 ± 0,2	0,640 ± 0,037	-7,36 ± 0,06
310,0 ± 0,2	0,593 ± 0,034	-7,44 ± 0,06
320,0 ± 0,2	0,550 ± 0,032	-7,52 ± 0,06
330,0 ± 0,2	0,507 ± 0,029	-7,60 ± 0,06
340,0 ± 0,2	0,507 ± 0,029	-7,60 ± 0,06
350,0 ± 0,2	0,440 ± 0,025	-7,74 ± 0,06
360,0 ± 0,2	0,420 ± 0,024	-7,79 ± 0,06
370,0 ± 0,2	0,400 ± 0,023	-7,84 ± 0,06
380,0 ± 0,2	0,373 ± 0,022	-7,91 ± 0,06
390,0 ± 0,2	0,350 ± 0,020	-7,98 ± 0,06
400,0 ± 0,2	0,330 ± 0,019	-8,04 ± 0,06
410,0 ± 0,2	0,317 ± 0,018	-8,08 ± 0,06
420,0 ± 0,2	0,303 ± 0,018	-8,12 ± 0,06
430,0 ± 0,2	0,290 ± 0,017	-8,17 ± 0,06
440,0 ± 0,2	0,277 ± 0,016	-8,22 ± 0,06
450,0 ± 0,2	0,263 ± 0,015	-8,27 ± 0,06
460,0 ± 0,2	0,250 ± 0,014	-8,32 ± 0,06
470,0 ± 0,2	0,240 ± 0,014	-8,36 ± 0,06
480,0 ± 0,2	0,230 ± 0,013	-8,41 ± 0,06
490,0 ± 0,2	0,223 ± 0,013	-8,44 ± 0,06
500,0 ± 0,2	0,213 ± 0,012	-8,48 ± 0,06
510,0 ± 0,2	0,207 ± 0,012	-8,52 ± 0,06
520,0 ± 0,2	0,200 ± 0,012	-8,55 ± 0,06
530,0 ± 0,2	0,190 ± 0,011	-8,60 ± 0,06
540,0 ± 0,2	0,187 ± 0,011	-8,62 ± 0,06
550,0 ± 0,2	0,180 ± 0,010	-8,66 ± 0,06
560,0 ± 0,2	0,1700 ± 0,0098	-8,72 ± 0,06
570,0 ± 0,2	0,1633 ± 0,0094	-8,76 ± 0,06
580,0 ± 0,2	0,1533 ± 0,0089	-8,83 ± 0,06
590,0 ± 0,2	0,1533 ± 0,0089	-8,83 ± 0,06
600,0 ± 0,2	0,1433 ± 0,0083	-8,90 ± 0,06

### 4.1.2 Leckratenmessung

Die Messung wurde mit den Gleichgewichtsdrücken  $p_g = 0.5; 10; 50;$  und  $100 \text{ mbar}$  durchgeführt. Die zugehörigen Messergebnisse sind in Tabellen 4, 5, 6 und 7 gelistet. Dabei wurde der Fehler des Mittelwertes nach Gleichung 9 berechnet.

Der lineare Ausgleichsparameter  $a$  aus

$$p(t) = a \cdot t + b$$

wird benötigt um als Steigung  $\frac{dp}{dt}$  der  $p(t)$  Kurve in Gleichung 8 einzusetzen. Die erhaltenen Parameter und die daraus resultierenden Saugvermögen sind in Abhängigkeit der anfänglichen Gleichgewichtsdrücke in Tabelle 3 aufgeführt. Mit

$$\sigma_Q = \sqrt{(a \cdot \sigma_{V_0})^2 + (V_0 \cdot \sigma_a)^2}$$

lässt sich der Fehler des Saugvermögens

$$\sigma_S = \sqrt{\left(\frac{\sigma_Q}{p_g}\right)^2 + (Q \cdot \sigma_{p_g})^2} = \sqrt{\frac{1}{p_g^2} [(a \cdot \sigma_{V_0})^2 + (V_0 \cdot \sigma_a)^2] + (Q \cdot \sigma_{p_g})^2} \quad (11)$$

berechnen.

In Abbildungen 10, 11, 12 und 13 sind die  $p(t)$ -Kurven samt ihrer Ausgleichsgeraden graphisch dargestellt.

**Tabelle 3:** Ausgleichsparameter und Saugvermögen der Leckratenmessung zur Dreh-schieberpumpe.

$p_g/\text{mbar}$	$a/\text{mbar/s}$	$b/\text{mbar}$	$S/\text{L/s}$
0.5	$0,009\,07 \pm 0,000\,10$	$1,637 \pm 0,011$	$0,62 \pm 0,07$
10	$0,385\,00 \pm 0,000\,28$	$15,967 \pm 0,034$	$1,31 \pm 0,13$
50	$1,7246 \pm 0,0016$	$58,30 \pm 0,20$	$1,17 \pm 0,12$
100	$3,223 \pm 0,022$	$120,4 \pm 2,7$	$1,10 \pm 0,11$

**Tabelle 4:** Messergebnisse der Leckratenmessung zur Drehschieberpumpe für  $p_g = 0,5$  mbar.

$t/\text{s}$	$p_g = 0,5$ mbar			Mittelwert
	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$	$p/\text{mbar}$
10,0 ± 0,2	1,70 ± 0,17	1,70 ± 0,17	1,70 ± 0,17	1,70 ± 0,10
20,0 ± 0,2	1,80 ± 0,18	1,80 ± 0,18	1,80 ± 0,18	1,80 ± 0,10
30,0 ± 0,2	1,90 ± 0,19	1,90 ± 0,19	1,90 ± 0,19	1,90 ± 0,11
40,0 ± 0,2	2,00 ± 0,20	2,00 ± 0,20	2,00 ± 0,20	2,00 ± 0,12
50,0 ± 0,2	2,10 ± 0,21	2,10 ± 0,21	2,10 ± 0,21	2,10 ± 0,12
60,0 ± 0,2	2,10 ± 0,21	2,20 ± 0,22	2,20 ± 0,22	2,17 ± 0,13
70,0 ± 0,2	2,20 ± 0,22	2,30 ± 0,23	2,30 ± 0,23	2,27 ± 0,13
80,0 ± 0,2	2,30 ± 0,23	2,40 ± 0,24	2,40 ± 0,24	2,37 ± 0,14
90,0 ± 0,2	2,40 ± 0,24	2,50 ± 0,25	2,50 ± 0,25	2,47 ± 0,14
100,0 ± 0,2	2,50 ± 0,25	2,60 ± 0,26	2,60 ± 0,26	2,57 ± 0,15
110,0 ± 0,2	2,60 ± 0,26	2,70 ± 0,27	2,70 ± 0,27	2,67 ± 0,15
120,0 ± 0,2	2,70 ± 0,27	2,80 ± 0,28	2,80 ± 0,28	2,77 ± 0,16
130,0 ± 0,2	2,80 ± 0,28	2,90 ± 0,29	2,90 ± 0,29	2,87 ± 0,17
140,0 ± 0,2	2,90 ± 0,29	3,00 ± 0,30	2,90 ± 0,29	2,93 ± 0,17
150,0 ± 0,2	2,90 ± 0,29	3,00 ± 0,30	3,00 ± 0,30	2,97 ± 0,17
160,0 ± 0,2	3,00 ± 0,30	3,10 ± 0,31	3,10 ± 0,31	3,07 ± 0,18
170,0 ± 0,2	3,10 ± 0,31	3,20 ± 0,32	3,20 ± 0,32	3,17 ± 0,18
180,0 ± 0,2	3,20 ± 0,32	3,30 ± 0,33	3,30 ± 0,33	3,27 ± 0,19
190,0 ± 0,2	3,20 ± 0,32	3,40 ± 0,34	3,40 ± 0,34	3,33 ± 0,19
200,0 ± 0,2	3,30 ± 0,33	3,50 ± 0,35	3,50 ± 0,35	3,43 ± 0,20

**Tabelle 5:** Messergebnisse der Leckratenmessung zur Drehschieberpumpe für  $p_g = 10$  mbar.

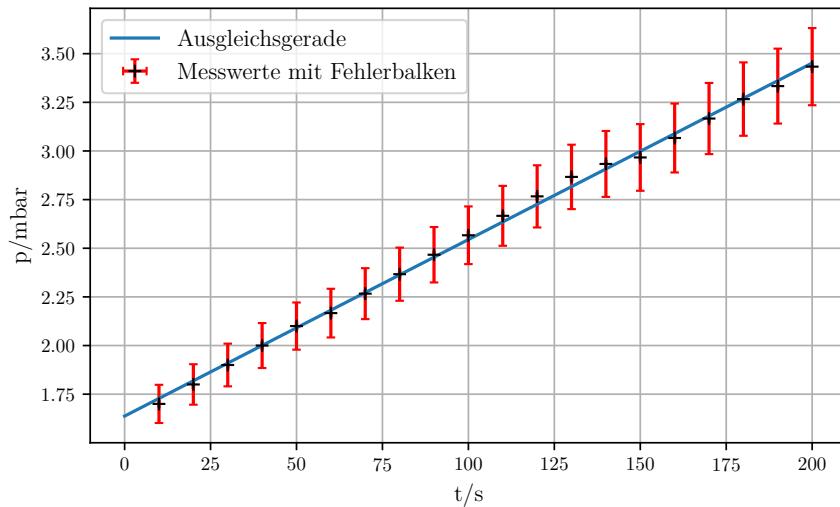
$t/\text{s}$	$p_g = 10$ mbar			Mittelwert
	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$	$p/\text{mbar}$
10,0 ± 0,2	19,30 ± 0,06	20,00 ± 0,06	19,80 ± 0,06	19,70 ± 0,03
20,0 ± 0,2	23,20 ± 0,07	23,90 ± 0,07	23,80 ± 0,07	23,63 ± 0,04
30,0 ± 0,2	27,10 ± 0,08	27,70 ± 0,08	27,60 ± 0,08	27,47 ± 0,05
40,0 ± 0,2	30,90 ± 0,09	31,60 ± 0,09	31,50 ± 0,09	31,33 ± 0,05
50,0 ± 0,2	35,10 ± 0,11	35,40 ± 0,11	35,30 ± 0,11	35,27 ± 0,06
60,0 ± 0,2	38,90 ± 0,12	39,40 ± 0,12	39,20 ± 0,12	39,17 ± 0,07
70,0 ± 0,2	42,90 ± 0,13	43,10 ± 0,13	43,00 ± 0,13	43,00 ± 0,07
80,0 ± 0,2	46,60 ± 0,14	47,10 ± 0,14	46,90 ± 0,14	46,87 ± 0,08
90,0 ± 0,2	50,10 ± 0,15	50,80 ± 0,15	50,60 ± 0,15	50,50 ± 0,09
100,0 ± 0,2	54,30 ± 0,16	54,70 ± 0,16	54,60 ± 0,16	54,53 ± 0,09
110,0 ± 0,2	58,20 ± 0,17	58,50 ± 0,18	58,30 ± 0,17	58,33 ± 0,10
120,0 ± 0,2	61,70 ± 0,19	62,40 ± 0,19	62,20 ± 0,19	62,10 ± 0,11
130,0 ± 0,2	65,80 ± 0,20	66,20 ± 0,20	66,10 ± 0,20	66,03 ± 0,11
140,0 ± 0,2	69,70 ± 0,21	70,10 ± 0,21	70,00 ± 0,21	69,93 ± 0,12
150,0 ± 0,2	73,50 ± 0,22	74,00 ± 0,22	73,80 ± 0,22	73,77 ± 0,13
160,0 ± 0,2	77,40 ± 0,23	77,70 ± 0,23	77,60 ± 0,23	77,57 ± 0,13
170,0 ± 0,2	81,20 ± 0,24	81,60 ± 0,24	81,50 ± 0,24	81,43 ± 0,14
180,0 ± 0,2	84,70 ± 0,25	85,50 ± 0,26	85,70 ± 0,26	85,30 ± 0,15
190,0 ± 0,2	88,90 ± 0,27	89,00 ± 0,27	89,10 ± 0,27	89,00 ± 0,15
200,0 ± 0,2	92,70 ± 0,28	93,10 ± 0,28	92,90 ± 0,28	92,90 ± 0,16

**Tabelle 6:** Messergebnisse der Leckratenmessung zur Drehschieberpumpe für  $p_g = 50$  mbar.

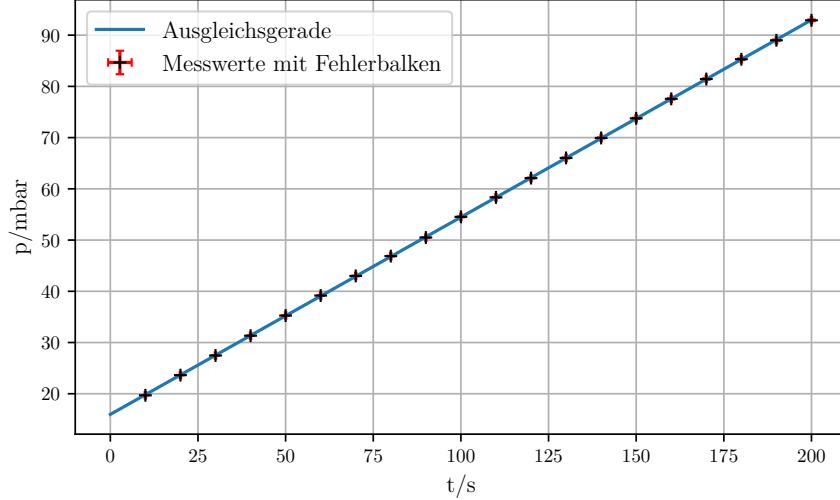
$t/\text{s}$	$p_g = 50 \text{ mbar}$			Mittelwert
	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$	$p/\text{mbar}$
10,0 ± 0,2	74,20 ± 0,22	75,50 ± 0,23	76,10 ± 0,23	75,27 ± 0,13
20,0 ± 0,2	91,20 ± 0,27	93,10 ± 0,28	93,40 ± 0,28	92,57 ± 0,16
30,0 ± 0,2	108,20 ± 0,32	110,40 ± 0,33	110,90 ± 0,33	109,83 ± 0,19
40,0 ± 0,2	125,1 ± 0,4	127,8 ± 0,4	128,2 ± 0,4	127,03 ± 0,22
50,0 ± 0,2	142,0 ± 0,4	145,1 ± 0,4	145,5 ± 0,4	144,20 ± 0,25
60,0 ± 0,2	159,0 ± 0,5	162,6 ± 0,5	162,9 ± 0,5	161,50 ± 0,28
70,0 ± 0,2	176,3 ± 0,5	181,5 ± 0,5	180,2 ± 0,5	179,33 ± 0,31
80,0 ± 0,2	194,5 ± 0,6	197,1 ± 0,6	197,5 ± 0,6	196,37 ± 0,34
90,0 ± 0,2	208,9 ± 0,6	215,3 ± 0,6	218,7 ± 0,7	214,3 ± 0,4
100,0 ± 0,2	227,6 ± 0,7	232,4 ± 0,7	233,2 ± 0,7	231,1 ± 0,4
110,0 ± 0,2	244,5 ± 0,7	250,0 ± 0,8	250,6 ± 0,8	248,4 ± 0,4
120,0 ± 0,2	261,5 ± 0,8	267,4 ± 0,8	267,9 ± 0,8	265,6 ± 0,5
130,0 ± 0,2	280,0 ± 0,8	284,8 ± 0,9	285,2 ± 0,9	283,3 ± 0,5
140,0 ± 0,2	293,4 ± 0,9	302,2 ± 0,9	302,5 ± 0,9	299,4 ± 0,5
150,0 ± 0,2	310,6 ± 0,9	319,4 ± 1,0	319,8 ± 1,0	316,6 ± 0,5
160,0 ± 0,2	329,2 ± 1,0	336,8 ± 1,0	337,4 ± 1,0	334,5 ± 0,6
170,0 ± 0,2	346,2 ± 1,0	354,2 ± 1,1	354,7 ± 1,1	351,7 ± 0,6
180,0 ± 0,2	363,0 ± 1,1	371,5 ± 1,1	370,1 ± 1,1	368,2 ± 0,6
190,0 ± 0,2	379,9 ± 1,1	388,8 ± 1,2	387,5 ± 1,2	385,4 ± 0,7
200,0 ± 0,2	396,7 ± 1,2	405,9 ± 1,2	406,5 ± 1,2	403,0 ± 0,7

**Tabelle 7:** Messergebnisse der Leckratenmessung zur Drehschieberpumpe für  $p_g = 100$  mbar.

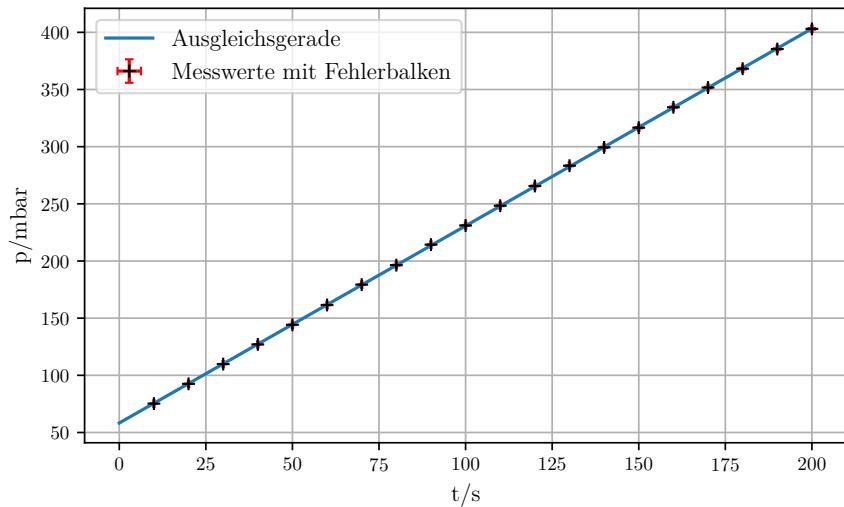
$t/\text{s}$	$p_g = 100$ mbar			Mittelwert
	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$	$p/\text{mbar}$
10,0 ± 0,2	145,8 ± 0,4	147,1 ± 0,4	146,3 ± 0,4	146,4 ± 0,3
20,0 ± 0,2	179,6 ± 0,5	177,6 ± 0,5	180,2 ± 0,5	179,1 ± 0,3
30,0 ± 0,2	212,0 ± 0,6	213,4 ± 0,6	212,5 ± 0,6	212,6 ± 0,4
40,0 ± 0,2	245,7 ± 0,7	247,1 ± 0,7	246,4 ± 0,7	246,4 ± 0,4
50,0 ± 0,2	279,5 ± 0,8	280,0 ± 0,8	280,1 ± 0,8	279,9 ± 0,5
60,0 ± 0,2	313,2 ± 0,9	314,6 ± 0,9	313,9 ± 0,9	313,9 ± 0,5
70,0 ± 0,2	347,0 ± 1,0	351,7 ± 1,1	347,5 ± 1,0	348,7 ± 0,6
80,0 ± 0,2	380,5 ± 1,1	382,0 ± 1,1	381,1 ± 1,1	381,2 ± 0,7
90,0 ± 0,2	414,0 ± 1,2	415,4 ± 1,2	414,6 ± 1,2	414,7 ± 0,7
100,0 ± 0,2	447,3 ± 1,3	448,5 ± 1,3	447,8 ± 1,3	447,9 ± 0,8
110,0 ± 0,2	480,3 ± 1,4	481,4 ± 1,4	484,0 ± 1,5	481,9 ± 0,8
120,0 ± 0,2	513,0 ± 1,5	514,0 ± 1,5	513,4 ± 1,5	513,5 ± 0,9
130,0 ± 0,2	545,0 ± 1,6	546,0 ± 1,6	545,5 ± 1,6	545,5 ± 0,9
140,0 ± 0,2	576,4 ± 1,7	578,0 ± 1,7	577,0 ± 1,7	577,1 ± 1,0
150,0 ± 0,2	607,8 ± 1,8	608,9 ± 1,8	608,1 ± 1,8	608,3 ± 1,1
160,0 ± 0,2	638,3 ± 1,9	639,2 ± 1,9	638,5 ± 1,9	638,7 ± 1,1
170,0 ± 0,2	667,9 ± 2,0	668,9 ± 2,0	668,3 ± 2,0	668,4 ± 1,2
180,0 ± 0,2	696,5 ± 2,1	697,0 ± 2,1	697,0 ± 2,1	696,8 ± 1,2
190,0 ± 0,2	724,6 ± 2,2	725,3 ± 2,2	724,7 ± 2,2	724,9 ± 1,3
200,0 ± 0,2	751,2 ± 2,3	752,1 ± 2,3	751,5 ± 2,3	751,6 ± 1,3



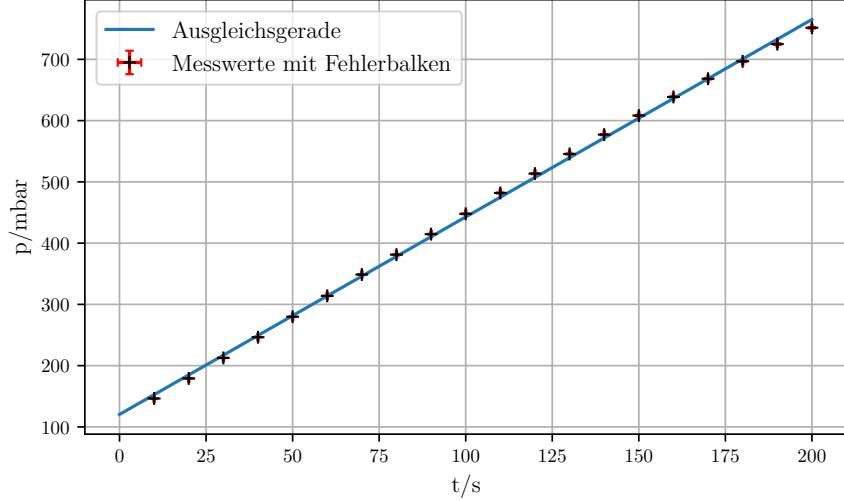
**Abbildung 10:** Messergebnisse und Ausgleichsgeraden der Leckratenmessung zur Dreh-schieberpumpe mit  $p_g = 0,5$  mbar.



**Abbildung 11:** Messergebnisse und Ausgleichsgeraden der Leckratenmessung zur Dreh-schieberpumpe mit  $p_g = 10$  mbar.



**Abbildung 12:** Messergebnisse und Ausgleichsgeraden der Leckrattemessung zur Dreh-schieberpumpe mit  $p_g = 50$  mbar.



**Abbildung 13:** Messergebnisse und Ausgleichsgeraden der Leckrattemessung zur Dreh-schieberpumpe mit  $p_g = 100$  mbar.

## 4.2 Turbomolekularpumpe

Zur Auswertung wurde das Rezipientenvolumen  $V_0 = (33,0 \pm 3,3) \text{ L}$ [4], der Enddruck  $p_E = (1,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$  und der Startdruck  $p_0 = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$  benutzt.

### 4.2.1 Evakuierungskurve

In Tabelle 8 sind die Messergebnisse aufgelistet. Der Mittelwert  $p$  dieser Messreihe und der logarithmische Ausdruck  $\ln\left(\frac{p-p_E}{p_0-p_E}\right)$ , dessen Fehler sich analog zu Gleichung 10 berechnen lässt. Durch eine lineare Ausgleichsrechnung

$$\ln\left(\frac{p-p_E}{p_0-p_E}\right) = a_i \cdot t + b_i$$

an die drei Abschnitte des Ausdrucks ergeben sich folgende Parameter:

$$\begin{array}{ll} a_1 = -0,350\,38 \frac{1}{\text{s}} & b_1 = -1,57 \\ a_2 = -0,116\,26 \frac{1}{\text{s}} & b_2 = -2,341 \\ a_3 = (-0,004\,39 \pm 0,000\,29) \frac{1}{\text{s}} & b_3 = -4,837 \pm 0,023 \end{array}$$

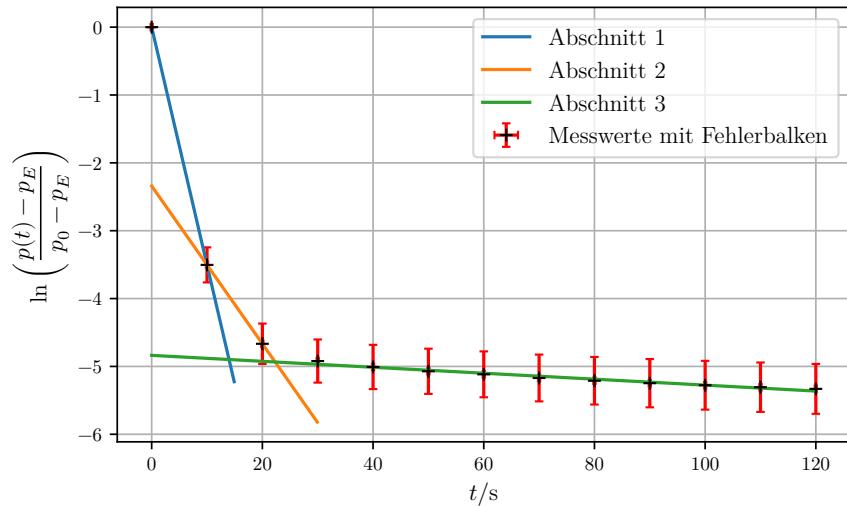
Hierbei enthalten die Parameter für den ersten und zweiten Abschnitt keine Abweichungen, da jeweils lediglich zwei Messwerte benutzt werden können und eine direkte Verbindung dieser Beiden Steigung und Startwert der Ausgleichsgerade festlegt. Es bräuchte mindestens einen weiteren Messwert um durch die lineare Regression eine Kovarianz zu erhalten. Die zugehörigen Ausgleichsgeraden sind in Abbildung 14 eingezeichnet. Aufgrund der logarithmischen Skala ist zu Beginn der Messung nur schwer ein Messfehler zu erkennen, da er ausreichend klein ist, um in der graphischen Darstellung fast gänzlich hinter der Markierung des Messwertes zu verschwinden.

Nach Umstellen von Gleichung 7 und mit Einsetzen von  $a_i$  für  $\frac{dp}{dt}$  lässt sich das Saugvermögen abschnittsweise berechnen zu:

$$S_1 = (11,56 \pm 1,16) \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$S_2 = (3,84 \pm 0,38) \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$S_3 = (0,14 \pm 0,01) \frac{\text{L}}{\text{s}}$$



**Abbildung 14:** Die logarithmische Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe.

**Tabelle 8:** Messergebnisse der Evakuierungskurve zur Turbomolekularpumpe.

$t/s$	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$
$10,0 \pm 0,2$	$(1,60 \pm 0,48) \cdot 10^{-4}$	$(1,67 \pm 0,50) \cdot 10^{-4}$	$(1,65 \pm 0,49) \cdot 10^{-4}$
$20,0 \pm 0,2$	$(6,2 \pm 1,9) \cdot 10^{-5}$	$(6,0 \pm 1,8) \cdot 10^{-5}$	$(6,0 \pm 1,8) \cdot 10^{-5}$
$30,0 \pm 0,2$	$(5,1 \pm 1,5) \cdot 10^{-5}$	$(5,1 \pm 1,5) \cdot 10^{-5}$	$(4,9 \pm 1,5) \cdot 10^{-5}$
$40,0 \pm 0,2$	$(4,8 \pm 1,4) \cdot 10^{-5}$	$(4,7 \pm 1,4) \cdot 10^{-5}$	$(4,7 \pm 1,4) \cdot 10^{-5}$
$50,0 \pm 0,2$	$(4,5 \pm 1,4) \cdot 10^{-5}$	$(4,6 \pm 1,4) \cdot 10^{-5}$	$(4,4 \pm 1,3) \cdot 10^{-5}$
$60,0 \pm 0,2$	$(4,6 \pm 1,4) \cdot 10^{-5}$	$(4,4 \pm 1,3) \cdot 10^{-5}$	$(4,2 \pm 1,3) \cdot 10^{-5}$
$70,0 \pm 0,2$	$(4,4 \pm 1,3) \cdot 10^{-5}$	$(4,2 \pm 1,3) \cdot 10^{-5}$	$(4,0 \pm 1,2) \cdot 10^{-5}$
$80,0 \pm 0,2$	$(4,3 \pm 1,3) \cdot 10^{-5}$	$(4,1 \pm 1,2) \cdot 10^{-5}$	$(3,9 \pm 1,2) \cdot 10^{-5}$
$90,0 \pm 0,2$	$(4,2 \pm 1,3) \cdot 10^{-5}$	$(4,0 \pm 1,2) \cdot 10^{-5}$	$(3,8 \pm 1,2) \cdot 10^{-5}$
$100,0 \pm 0,2$	$(4,1 \pm 1,2) \cdot 10^{-5}$	$(3,9 \pm 1,2) \cdot 10^{-5}$	$(3,8 \pm 1,1) \cdot 10^{-5}$
$110,0 \pm 0,2$	$(4,0 \pm 1,2) \cdot 10^{-5}$	$(3,9 \pm 1,2) \cdot 10^{-5}$	$(3,7 \pm 1,1) \cdot 10^{-5}$
$120,0 \pm 0,2$	$(4,0 \pm 1,2) \cdot 10^{-5}$	$(3,8 \pm 1,1) \cdot 10^{-5}$	$(3,6 \pm 1,1) \cdot 10^{-5}$

**Tabelle 9:** Messergebnisse der Evakuierungskurve zur Turbomolekularpumpe.

$t/\text{s}$	$p/\text{mbar}$	$\ln\left(\frac{p-p_E}{p_0-p_E}\right)$
$10,0 \pm 0,2$	$(1,64 \pm 0,28) \cdot 10^{-4}$	$-3,50 \pm 0,26$
$20,0 \pm 0,2$	$(6,1 \pm 1,1) \cdot 10^{-5}$	$-4,67 \pm 0,30$
$30,0 \pm 0,2$	$(5,04 \pm 0,87) \cdot 10^{-5}$	$-4,92 \pm 0,32$
$40,0 \pm 0,2$	$(4,73 \pm 0,82) \cdot 10^{-5}$	$-5,01 \pm 0,33$
$50,0 \pm 0,2$	$(4,53 \pm 0,79) \cdot 10^{-5}$	$-5,07 \pm 0,33$
$60,0 \pm 0,2$	$(4,39 \pm 0,76) \cdot 10^{-5}$	$-5,12 \pm 0,34$
$70,0 \pm 0,2$	$(4,23 \pm 0,73) \cdot 10^{-5}$	$-5,17 \pm 0,34$
$80,0 \pm 0,2$	$(4,12 \pm 0,71) \cdot 10^{-5}$	$-5,21 \pm 0,35$
$90,0 \pm 0,2$	$(4,02 \pm 0,70) \cdot 10^{-5}$	$-5,2 \pm 0,4$
$100,0 \pm 0,2$	$(3,95 \pm 0,68) \cdot 10^{-5}$	$-5,3 \pm 0,4$
$110,0 \pm 0,2$	$(3,87 \pm 0,67) \cdot 10^{-5}$	$-5,3 \pm 0,4$
$120,0 \pm 0,2$	$(3,81 \pm 0,66) \cdot 10^{-5}$	$-5,3 \pm 0,4$

#### 4.2.2 Leckratenmessung

Die Messung wurde mit den Gleichgewichtsdrücken  $p_g = 2 \cdot 10^{-4}; 1 \cdot 10^{-4}; 7 \cdot 10^{-5}$ ; und  $5 \cdot 10^{-5}$  mbar durchgeführt. Die zugehörigen Messergebnisse sind in Tabellen 11, 12, 13 und 14 gelistet. Dabei wurde der Fehler des Mittelwertes nach Gleichung 9 berechnet.

Der lineare Ausgleichsparameter  $a$  aus

$$p(t) = a \cdot t + b$$

wird benötigt um als Steigung  $\frac{dp}{dt}$  der  $p(t)$  Kurve in Gleichung 8 einzusetzen. Die erhaltenen Parameter und die daraus resultierenden Saugvermögen sind in Abhängigkeit der anfänglichen Gleichgewichtsdrücke in Tabelle 10 aufgeführt. Dabei wird der Fehler des Saugvermögens analog zu Gleichung 11 berechnet. In Abbildungen 15, 16, 17 und 18 sind die  $p(t)$ -Kurven samt ihrer Ausgleichsgeraden graphisch dargestellt.

**Tabelle 10:** Ausgleichsparameter und Saugvermögen der Leckratenmessung zur Turbomolekularpumpe.

$p_g/\text{mbar}$	$a/\text{mbar/s}$	$b/\text{mbar}$	$S/\text{L/s}$
$2 \cdot 10^{-4}$	$(5,29 \pm 0,15) \cdot 10^{-5}$	$(-3,48 \pm 1,07) \cdot 10^{-4}$	$8,72 \pm 1,76$
$1 \cdot 10^{-4}$	$(1,56 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$	$(2,26 \pm 3,51) \cdot 10^{-5}$	$5,15 \pm 1,04$
$7 \cdot 10^{-5}$	$(9,49 \pm 0,25) \cdot 10^{-6}$	$(7,53 \pm 1,82) \cdot 10^{-5}$	$4,48 \pm 0,90$
$5 \cdot 10^{-5}$	$(5,90 \pm 0,09) \cdot 10^{-6}$	$(8,82 \pm 0,63) \cdot 10^{-5}$	$3,89 \pm 0,78$

**Tabelle 11:** Messergebnisse der Leckratenmessung zur Turbomolekularpumpe für  $p_g = 2 \cdot 10^{-4}$  mbar.

$t/s$	$p_g = 2 \cdot 10^{-4}$ mbar			Mittelwert
	$p_1/10^{-3}$ /mbar	$p_2/10^{-3}$ /mbar	$p_3/10^{-3}$ /mbar	$p/10^{-3}$ /mbar
10,0 ± 0,2	(0,520 ± 0,156)	(0,500 ± 0,150)	(0,500 ± 0,150)	(0,507 ± 0,088)
20,0 ± 0,2	(0,814 ± 0,244)	(0,793 ± 0,238)	(0,784 ± 0,235)	(0,797 ± 0,138)
30,0 ± 0,2	(1,24 ± 0,37)	(1,23 ± 0,37)	(1,18 ± 0,35)	(1,22 ± 0,21)
40,0 ± 0,2	(1,68 ± 0,50)	(1,68 ± 0,50)	(1,63 ± 0,49)	(1,66 ± 0,29)
50,0 ± 0,2	(2,22 ± 0,67)	(2,15 ± 0,64)	(2,08 ± 0,62)	(2,15 ± 0,37)
60,0 ± 0,2	(2,66 ± 0,80)	(2,64 ± 0,79)	(2,58 ± 0,77)	(2,63 ± 0,45)
70,0 ± 0,2	(3,25 ± 0,97)	(3,24 ± 0,97)	(3,13 ± 0,94)	(3,21 ± 0,56)
80,0 ± 0,2	(3,82 ± 1,15)	(3,81 ± 1,14)	(3,68 ± 1,10)	(3,77 ± 0,65)
90,0 ± 0,2	(4,41 ± 1,32)	(4,30 ± 1,29)	(4,26 ± 1,28)	(4,32 ± 0,75)
100,0 ± 0,2	(4,99 ± 1,50)	(4,98 ± 1,49)	(4,87 ± 1,46)	(4,95 ± 0,86)
110,0 ± 0,2	(5,71 ± 1,71)	(5,72 ± 1,72)	(5,57 ± 1,67)	(5,67 ± 0,98)
120,0 ± 0,2	(6,24 ± 1,87)	(6,21 ± 1,86)	(6,12 ± 1,84)	(6,19 ± 1,07)

**Tabelle 12:** Messergebnisse der Leckratenmessung zur Turbomolekularpumpe für  $p_g = 1 \cdot 10^{-4}$  mbar.

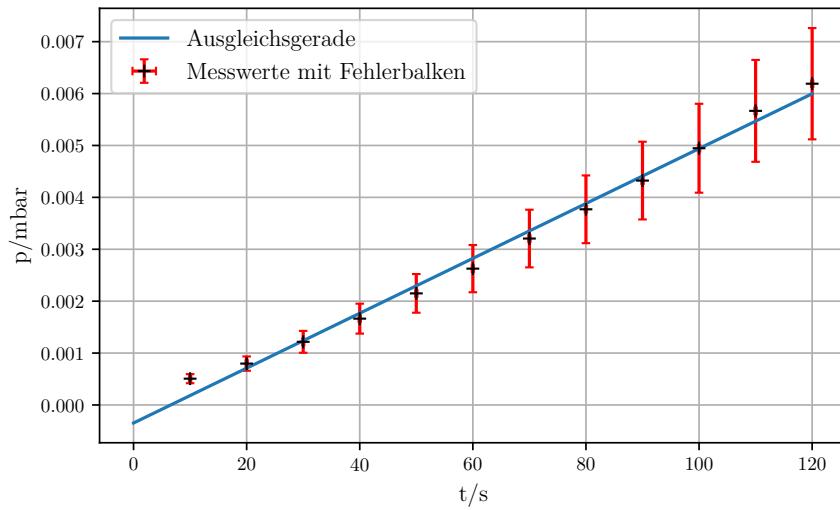
$t/s$	$p_g = 1 \cdot 10^{-4}$ mbar			Mittelwert
	$p_1/10^{-3}$ /mbar	$p_2/10^{-3}$ /mbar	$p_3/10^{-3}$ /mbar	$p/10^{-3}$ /mbar
10,0 ± 0,2	(0,253 ± 0,076)	(0,245 ± 0,073)	(0,257 ± 0,077)	(0,252 ± 0,044)
20,0 ± 0,2	(0,392 ± 0,118)	(0,382 ± 0,115)	(0,396 ± 0,119)	(0,390 ± 0,068)
30,0 ± 0,2	(0,507 ± 0,152)	(0,500 ± 0,150)	(0,514 ± 0,154)	(0,507 ± 0,088)
40,0 ± 0,2	(0,621 ± 0,186)	(0,620 ± 0,186)	(0,632 ± 0,190)	(0,624 ± 0,108)
50,0 ± 0,2	(0,740 ± 0,222)	(0,732 ± 0,070)	(0,747 ± 0,224)	(0,740 ± 0,108)
60,0 ± 0,2	(0,890 ± 0,267)	(0,883 ± 0,265)	(0,806 ± 0,242)	(0,860 ± 0,149)
70,0 ± 0,2	(1,06 ± 0,32)	(1,05 ± 0,32)	(1,06 ± 0,32)	(1,06 ± 0,18)
80,0 ± 0,2	(1,25 ± 0,38)	(1,23 ± 0,37)	(1,24 ± 0,37)	(1,24 ± 0,21)
90,0 ± 0,2	(1,44 ± 0,43)	(1,42 ± 0,43)	(1,43 ± 0,43)	(1,43 ± 0,25)
100,0 ± 0,2	(1,61 ± 0,48)	(1,59 ± 0,48)	(1,61 ± 0,48)	(1,60 ± 0,28)
110,0 ± 0,2	(1,81 ± 0,54)	(1,78 ± 0,53)	(1,75 ± 0,52)	(1,78 ± 0,31)
120,0 ± 0,2	(1,99 ± 0,60)	(1,93 ± 0,58)	(1,93 ± 0,58)	(1,95 ± 0,34)

**Tabelle 13:** Messergebnisse der Leckratenmessung zur Turbomolekularpumpe für  $p_g = 7 \cdot 10^{-5}$  mbar.

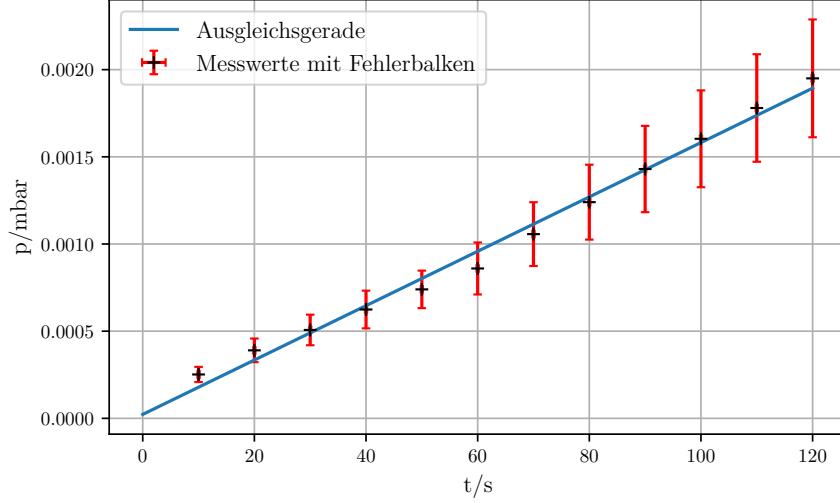
$t/\text{s}$	$p_g = 7 \cdot 10^{-5}$ mbar			Mittelwert
	$p_1/10^{-4}/\text{mbar}$	$p_2/10^{-4}/\text{mbar}$	$p_3/10^{-4}/\text{mbar}$	$p/10^{-4}/\text{mbar}$
10,0 ± 0,2	(1,78 ± 0,53)	(1,87 ± 0,56)	(1,78 ± 0,53)	(1,81 ± 0,31)
20,0 ± 0,2	(2,81 ± 0,84)	(2,94 ± 0,88)	(2,78 ± 0,83)	(2,84 ± 0,49)
30,0 ± 0,2	(3,73 ± 1,12)	(3,80 ± 1,14)	(3,78 ± 1,13)	(3,77 ± 0,65)
40,0 ± 0,2	(4,58 ± 1,37)	(4,67 ± 1,40)	(4,67 ± 1,40)	(4,64 ± 0,80)
50,0 ± 0,2	(5,38 ± 1,61)	(5,45 ± 1,64)	(5,53 ± 1,66)	(5,45 ± 0,95)
60,0 ± 0,2	(6,20 ± 1,86)	(6,29 ± 1,89)	(6,39 ± 1,92)	(6,29 ± 1,09)
70,0 ± 0,2	(7,03 ± 2,11)	(7,07 ± 2,12)	(7,12 ± 2,14)	(7,07 ± 1,23)
80,0 ± 0,2	(7,91 ± 2,37)	(7,96 ± 2,39)	(8,05 ± 2,42)	(7,97 ± 1,38)
90,0 ± 0,2	(8,95 ± 2,69)	(8,99 ± 2,70)	(9,13 ± 2,74)	(9,02 ± 1,56)
100,0 ± 0,2	(10,0 ± 3,0)	(10,1 ± 3,0)	(10,3 ± 3,1)	(10,1 ± 1,8)
110,0 ± 0,2	(11,2 ± 3,4)	(11,2 ± 3,4)	(11,4 ± 3,4)	(11,3 ± 2,0)
120,0 ± 0,2	(12,4 ± 3,7)	(12,4 ± 3,7)	(13,6 ± 4,1)	(12,8 ± 2,2)

**Tabelle 14:** Messergebnisse der Leckratenmessung zur Drehschieberpumpe für  $p_g = 5 \cdot 10^{-5}$  mbar.

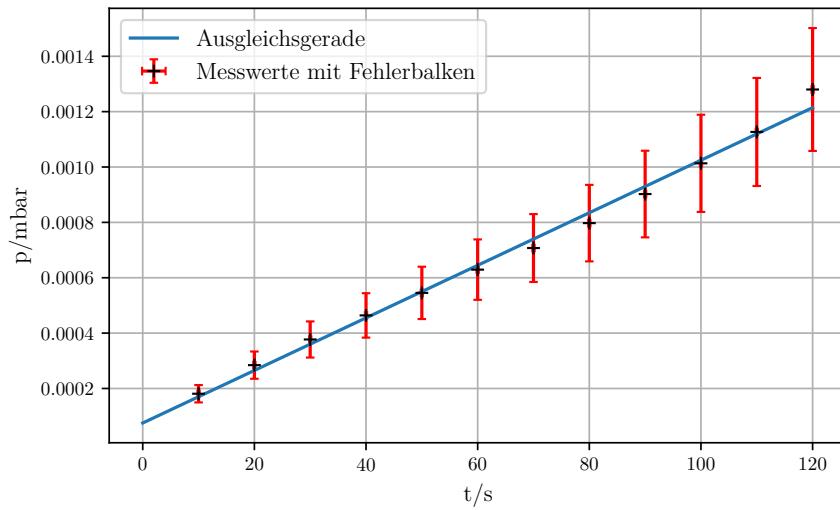
$t/\text{s}$	$p_g = 5 \cdot 10^{-5}$ mbar			Mittelwert
	$p_1/10^{-4}/\text{mbar}$	$p_2/10^{-4}/\text{mbar}$	$p_3/10^{-4}/\text{mbar}$	$p/10^{-4}/\text{mbar}$
10,0 ± 0,2	(1,25 ± 0,37)	(1,33 ± 0,40)	(1,29 ± 0,39)	(1,29 ± 0,22)
20,0 ± 0,2	(1,97 ± 0,59)	(2,00 ± 0,60)	(1,98 ± 0,59)	(1,98 ± 0,34)
30,0 ± 0,2	(2,64 ± 0,79)	(2,67 ± 0,80)	(2,66 ± 0,80)	(2,66 ± 0,46)
40,0 ± 0,2	(3,31 ± 0,99)	(3,36 ± 1,01)	(3,31 ± 0,99)	(3,33 ± 0,58)
50,0 ± 0,2	(3,95 ± 1,19)	(3,98 ± 1,19)	(3,98 ± 1,19)	(3,97 ± 0,69)
60,0 ± 0,2	(4,53 ± 1,36)	(4,56 ± 1,37)	(4,51 ± 1,35)	(4,53 ± 0,79)
70,0 ± 0,2	(5,07 ± 1,52)	(5,11 ± 1,53)	(5,05 ± 1,52)	(5,08 ± 0,88)
80,0 ± 0,2	(5,64 ± 1,69)	(5,67 ± 1,70)	(5,66 ± 1,70)	(5,66 ± 0,98)
90,0 ± 0,2	(6,21 ± 1,86)	(6,22 ± 1,87)	(6,15 ± 1,85)	(6,19 ± 1,07)
100,0 ± 0,2	(6,72 ± 2,02)	(6,75 ± 2,03)	(6,72 ± 2,02)	(6,73 ± 1,17)
110,0 ± 0,2	(7,28 ± 2,18)	(7,28 ± 2,18)	(7,25 ± 2,18)	(7,27 ± 1,26)
120,0 ± 0,2	(7,87 ± 2,36)	(7,92 ± 2,38)	(7,88 ± 2,36)	(7,89 ± 1,37)



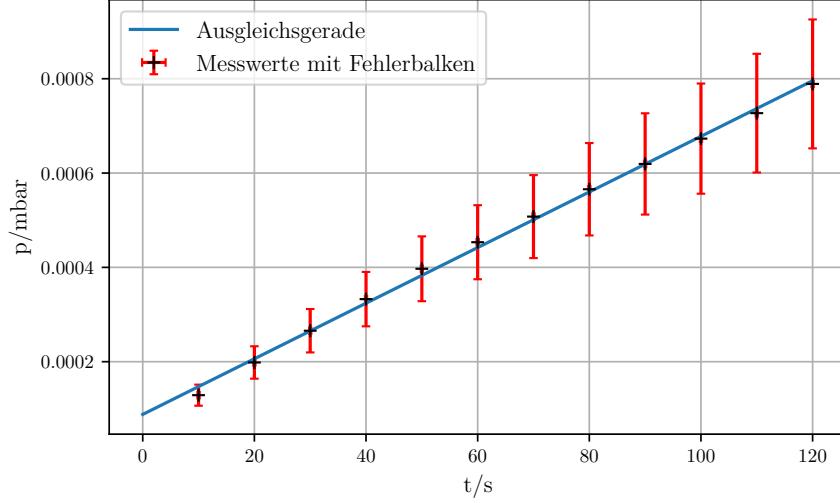
**Abbildung 15:** Messergebnisse und Ausgleichsgeraden der Leckratenmessung zur Turbomolekularpumpe mit  $p_g = 2 \cdot 10^{-4}$  mbar.



**Abbildung 16:** Messergebnisse und Ausgleichsgeraden der Leckratenmessung zur Turbomolekularpumpe mit  $p_g = 1 \cdot 10^{-4}$  mbar.



**Abbildung 17:** Messergebnisse und Ausgleichsgeraden der Leckratenmessung zur Turbomolekularpumpe mit  $p_g = 7 \cdot 10^{-5}$  mbar.

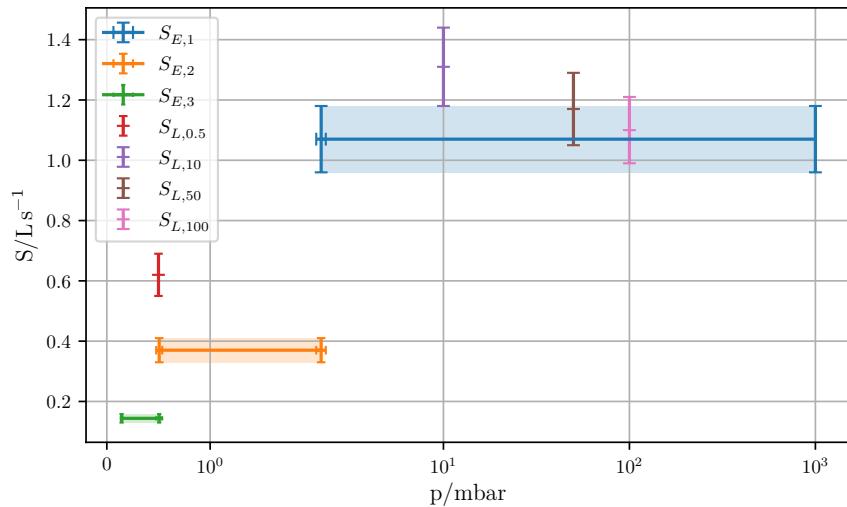


**Abbildung 18:** Messergebnisse und Ausgleichsgeraden der Leckratenmessung zur Turbomolekularpumpe mit  $p_g = 5 \cdot 10^{-5}$  mbar.

## 5 Diskussion

Die Evakuierungskurven der Pumpen (vgl. Abb. 9 und 14) sind erwartungsgemäß aufgenommen worden. Bei der Drehschieberpumpe ist eine Einteilung in 3 Bereiche möglich. Lediglich waren bei der Turbomolekularpumpe die Messintervalle zu groß und die Bereiche des konstanten logarithmischen Ausdruckes sind nicht einwandfrei erkennbar. Durch eine momentane Verkürzung der Messintervalle innerhalb der ersten 30 s könnte eine deutlich bessere Gliederung der einzelnen Abschnitte gelingen. Demnach profitiere auch die Genauigkeit der damit berechneten Saugvermögen.

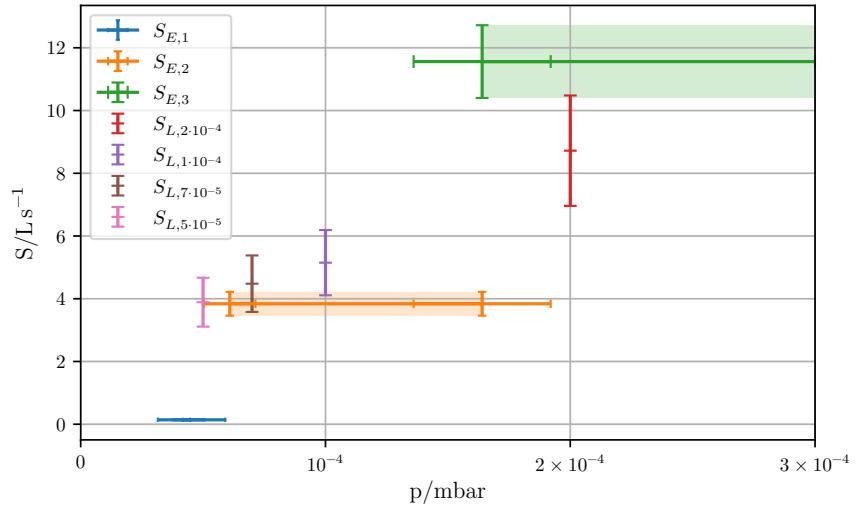
Bei allen Leckrattemessungen konnte für beide Pumpentypen ein linearer Druckanstieg gemessen werden (vgl. Abb. 10 bis 13 und 15 bis 18).



**Abbildung 19:** Die Saugvermögen der verschiedenen Messreihen und Messmethoden zur Drehschieberpumpe im Vergleich.

In Abbildung 19 sind die verschiedenen Saugvermögen der einzelnen Methoden und Messreihen der Drehschieberpumpe aufgeführt. In Abbildung 20 die der Turbomolekularpumpe. Bei der Drehschieberpumpe bietet sich aufgrund der großen Unterschiede der Druckbereiche ein halblogarithmischer Plot an. Alle Saugvermögen sind samt ihrer fortgepflanzten Fehlerbalken dargestellt. Da aus den Berechnungen der Evakuierungskurven ein Saugvermögen für einen Druckbereich resultiert, ist der Fehlerwert über den gesamten Druckbereich als farbig hinterlegter Balken dargestellt. Im Idealfall liegen die Saugvermögen aus der Leckrattemessung, abhängig von ihrem Startdruck, innerhalb dieser Fehlerbalken um eine Äquivalenz der beiden Methoden zu zeigen. Ferner ist ein Überschneiden der Fehler ausreichend um eine Übereinstimmung nicht ausschließen zu können. Dies ist der Fall beim dritten Abschnitt der Drehschieberpumpe sowie beim zweiten und dritten Abschnitt der Turbomolekularpumpe.

Die Herstellerangaben der Pumpen sind 77 L/s für die Turbomolekularpumpe und 1.28 bis 1.53 L/s für die Drehschieberpumpe. Zumindest kann der Wert  $S_{L,2}$ , mit  $p_g = 10$  mbar



**Abbildung 20:** Die Saugvermögen der verschiedenen Messreihen und Messmethoden zur Turbomolekularpumpe im Vergleich.

**Tabelle 15:** Die Saugvermögen der verschiedenen Messreihen und Messmethoden im Vergleich.

Pumpe:	Drehschieber		Turbomolekular	
	$S$ /L/s	$\Delta S$ /%	$S$ /L/s	$\Delta S$ /%
Saugvermögen				
$S_{E,1}$	$1,07 \pm 0,11$	16.4 - 30.1	$11,56 \pm 1,16$	85,0
$S_{E,2}$	$0,37 \pm 0,04$	71.1 - 75.8	$3,84 \pm 0,38$	95,0
$S_{E,3}$	$0,144 \pm 0,014$	88.8 - 90.6	$0,14 \pm 0,01$	99,8
$S_{L,1}$	$0,62 \pm 0,07$	51.6 - 59.5	$8,72 \pm 1,76$	88,7
$S_{L,2}$	$1,31 \pm 0,13$	2.3 - 14.4	$5,15 \pm 1,04$	93,3
$S_{L,3}$	$1,17 \pm 0,12$	8.6 - 23.5	$4,48 \pm 0,90$	94,2
$S_{L,4}$	$1,10 \pm 0,11$	14.1 - 28.1	$3,89 \pm 0,78$	94,5

der Drehschieberpumpe den Hersteller in seinem Fehler bestätigen. Die Ergebnisse sind samt ihrer relativen Abweichungen nach

$$\Delta S = \left| \frac{S_{lit} - S_{exp}}{S_{lit}} \right| \quad (12)$$

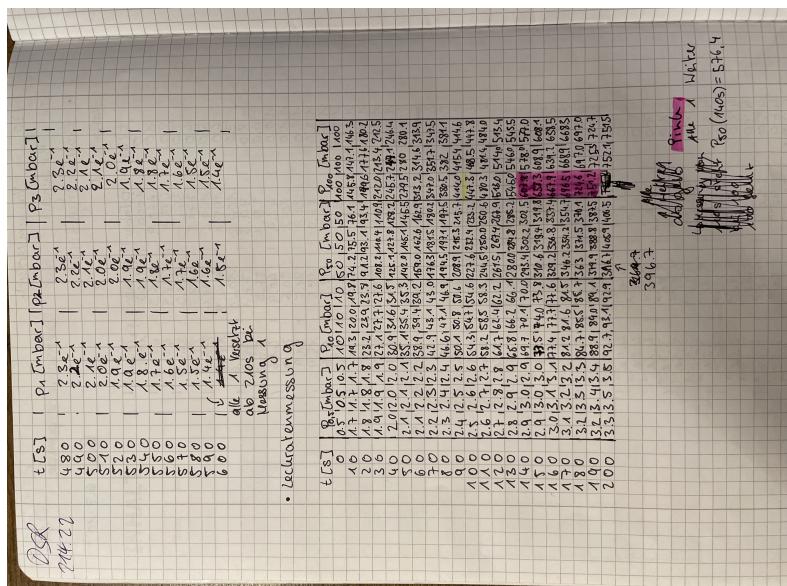
in Tabelle 15 aufgeführt. Es muss berücksichtigt werden, dass lediglich das effektive Saugvermögen

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

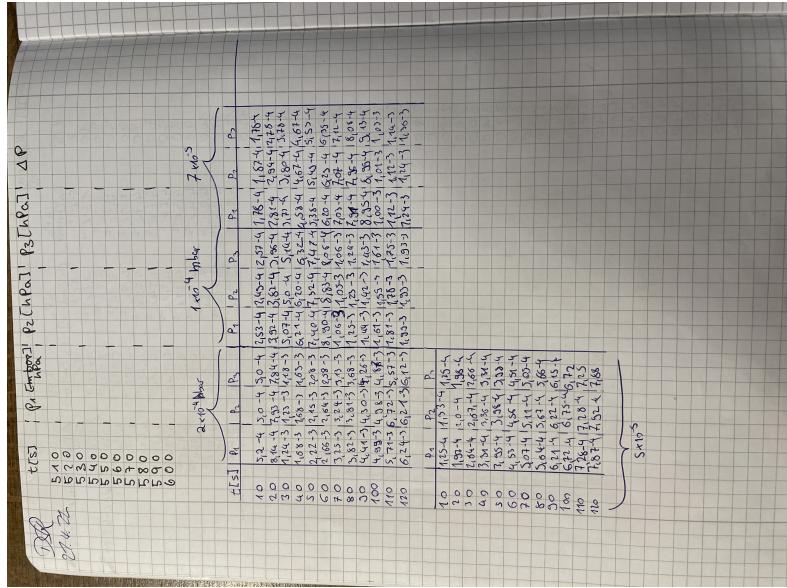
mit dem Leitwert  $L$  der Rohre und dem theoretischen Saugvermögen  $S_0$  bestimmt werden kann.

Der Hersteller ist unter professionellen Laborbedingungen daran interessiert mit einer höchstmöglichen Saugleistung sein Produkt zu bewerben. Demnachzufolge ist jede mögliche Erhöhung des Strömungswiderstandes zu minimieren, beispielsweise durch ein regelmäßiges Ausheizen der Messapparatur und der Vakuumpumpe. Zudem sollte in Anbetracht der benötigten Desorptionsenergie während einer möglichst tiefen Temperatur gemessen werden, damit die Energieschwelle der Adsorbierten und durch Diffusion durchdringenden Teilchen möglichst groß ist. Abzuwägen ist demnach jedoch, ob und wie eine tiefere Temperatur andere kontraproduktive Einflüsse ausübt.

V10 Volumenversuch			
Durchschnittsbeompfe $\rho_{\text{V10}} = 6.7 \cdot 10^{-3}$			
t [s]	Wiederholungsteile	Wiederholungen	Durchschnittsbeompfe
0.0	1	1	1
1.0	1	1	1
2.0	1	1	1
3.0	1	1	1
4.0	1	1	1
5.0	1	1	1
6.0	1	1	1
7.0	1	1	1
8.0	1	1	1
9.0	1	1	1
10.0	1	1	1
11.0	1	1	1
12.0	1	1	1
13.0	1	1	1
14.0	1	1	1
15.0	1	1	1
16.0	1	1	1
17.0	1	1	1
18.0	1	1	1
19.0	1	1	1
20.0	1	1	1
21.0	1	1	1
22.0	1	1	1
23.0	1	1	1
24.0	1	1	1
25.0	1	1	1
26.0	1	1	1
27.0	1	1	1
28.0	1	1	1
29.0	1	1	1
30.0	1	1	1
31.0	1	1	1
32.0	1	1	1
33.0	1	1	1
34.0	1	1	1
35.0	1	1	1
36.0	1	1	1
37.0	1	1	1
38.0	1	1	1
39.0	1	1	1
40.0	1	1	1
41.0	1	1	1
42.0	1	1	1
43.0	1	1	1
44.0	1	1	1
45.0	1	1	1
46.0	1	1	1
47.0	1	1	1
48.0	1	1	1
49.0	1	1	1
50.0	1	1	1
51.0	1	1	1
52.0	1	1	1
53.0	1	1	1
54.0	1	1	1
55.0	1	1	1
56.0	1	1	1
57.0	1	1	1
58.0	1	1	1
59.0	1	1	1
60.0	1	1	1
61.0	1	1	1
62.0	1	1	1
63.0	1	1	1
64.0	1	1	1
65.0	1	1	1
66.0	1	1	1
67.0	1	1	1
68.0	1	1	1
69.0	1	1	1
70.0	1	1	1
71.0	1	1	1
72.0	1	1	1
73.0	1	1	1
74.0	1	1	1
75.0	1	1	1
76.0	1	1	1
77.0	1	1	1
78.0	1	1	1
79.0	1	1	1
80.0	1	1	1
81.0	1	1	1
82.0	1	1	1
83.0	1	1	1
84.0	1	1	1
85.0	1	1	1
86.0	1	1	1
87.0	1	1	1
88.0	1	1	1
89.0	1	1	1
90.0	1	1	1
91.0	1	1	1
92.0	1	1	1
93.0	1	1	1
94.0	1	1	1
95.0	1	1	1
96.0	1	1	1
97.0	1	1	1
98.0	1	1	1
99.0	1	1	1
100.0	1	1	1
101.0	1	1	1
102.0	1	1	1
103.0	1	1	1
104.0	1	1	1
105.0	1	1	1
106.0	1	1	1
107.0	1	1	1
108.0	1	1	1
109.0	1	1	1
110.0	1	1	1
111.0	1	1	1
112.0	1	1	1
113.0	1	1	1
114.0	1	1	1
115.0	1	1	1
116.0	1	1	1
117.0	1	1	1
118.0	1	1	1
119.0	1	1	1
120.0	1	1	1
121.0	1	1	1
122.0	1	1	1
123.0	1	1	1
124.0	1	1	1
125.0	1	1	1
126.0	1	1	1
127.0	1	1	1
128.0	1	1	1
129.0	1	1	1
130.0	1	1	1
131.0	1	1	1
132.0	1	1	1
133.0	1	1	1
134.0	1	1	1
135.0	1	1	1
136.0	1	1	1
137.0	1	1	1
138.0	1	1	1
139.0	1	1	1
140.0	1	1	1
141.0	1	1	1
142.0	1	1	1
143.0	1	1	1
144.0	1	1	1
145.0	1	1	1
146.0	1	1	1
147.0	1	1	1
148.0	1	1	1
149.0	1	1	1
150.0	1	1	1
151.0	1	1	1
152.0	1	1	1
153.0	1	1	1
154.0	1	1	1
155.0	1	1	1
156.0	1	1	1
157.0	1	1	1
158.0	1	1	1
159.0	1	1	1
160.0	1	1	1
161.0	1	1	1
162.0	1	1	1
163.0	1	1	1
164.0	1	1	1
165.0	1	1	1
166.0	1	1	1
167.0	1	1	1
168.0	1	1	1
169.0	1	1	1
170.0	1	1	1
171.0	1	1	1
172.0	1	1	1
173.0	1	1	1
174.0	1	1	1
175.0	1	1	1
176.0	1	1	1
177.0	1	1	1
178.0	1	1	1
179.0	1	1	1
180.0	1	1	1
181.0	1	1	1
182.0	1	1	1
183.0	1	1	1
184.0	1	1	1
185.0	1	1	1
186.0	1	1	1
187.0	1	1	1
188.0	1	1	1
189.0	1	1	1
190.0	1	1	1
191.0	1	1	1
192.0	1	1	1
193.0	1	1	1
194.0	1	1	1
195.0	1	1	1
196.0	1	1	1
197.0	1	1	1
198.0	1	1	1
199.0	1	1	1
200.0	1	1	1



$t$ [s]	$p_1$ [mbar]	$p_2$ [mbar]	$p_3$ [mbar]	$p_4$	$P_{ende,1} = 1.4 \cdot 10^{-5}$ hPa
0	$5 \cdot 10^{-3}$	-	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
10	$1.6 \cdot 10^{-4}$	-	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$1.67 \cdot 10^{-4}$	$1.65 \cdot 10^{-4}$
20	$6.2 \cdot 10^{-5}$	-	$6.2 \cdot 10^{-5}$	$6.04 \cdot 10^{-5}$	$6.03 \cdot 10^{-5}$
30	$5.8 \cdot 10^{-5}$	-	$5.1 \cdot 10^{-5}$	$5.09 \cdot 10^{-5}$	$4.92 \cdot 10^{-5}$
40	$5.0 \cdot 10^{-5}$	-	$4.8 \cdot 10^{-5}$	$4.70 \cdot 10^{-5}$	$4.70 \cdot 10^{-5}$
50	$4.7 \cdot 10^{-5}$	-	$4.55 \cdot 10^{-5}$	$4.62 \cdot 10^{-5}$	$4.41 \cdot 10^{-5}$
60	$4.6 \cdot 10^{-5}$	-	$4.54 \cdot 10^{-5}$	$4.40 \cdot 10^{-5}$	$4.20 \cdot 10^{-5}$
70	$4.6 \cdot 10^{-5}$	-	$4.41 \cdot 10^{-5}$	$4.24 \cdot 10^{-5}$	$4.05 \cdot 10^{-5}$
80	$4.5 \cdot 10^{-5}$	-	$4.30 \cdot 10^{-5}$	$4.12 \cdot 10^{-5}$	$3.94 \cdot 10^{-5}$
90	$4.4 \cdot 10^{-5}$	-	$4.20 \cdot 10^{-5}$	$4.02 \cdot 10^{-5}$	$3.85 \cdot 10^{-5}$
100	$4.3 \cdot 10^{-5}$	-	$4.13 \cdot 10^{-5}$	$3.94 \cdot 10^{-5}$	$3.77 \cdot 10^{-5}$
110	$4.2 \cdot 10^{-5}$	-	$4.05 \cdot 10^{-5}$	$3.87 \cdot 10^{-5}$	$3.70 \cdot 10^{-5}$
120	$4.2 \cdot 10^{-5}$	-	$3.99 \cdot 10^{-5}$	$3.81 \cdot 10^{-5}$	$3.64 \cdot 10^{-5}$
130	-	-	-	-	Nur 2 min ...
140	-	-	-	-	
150	-	-	-	-	
160	-	-	-	-	
170	-	-	-	-	
180	-	-	-	-	
190	-	-	-	-	
200	-	-	-	-	
210	-	-	-	-	



## Literatur

- [1] DIN 28400-1. *Titel (deutsch): Vakuumtechnik; Benennung und Definitionen; Allgemeine Benennungen.* 1990-05.
- [2] Robert Boyle. *New experiments physico-mechanical, touching the air.* London, 1682.
- [3] Chemgaroo. [Online; Stand 4. Mai 2022]. URL: [http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/3/anc/masse/ms\\_vakuumssystem.vlu/Page/vsc/de/ch/3/anc/masse/2\\_massenspektrometer/2\\_2\\_vakuumssystem/2\\_2\\_2\\_turbop/turbomol\\_ms5ht0202.vscml.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/3/anc/masse/ms_vakuumssystem.vlu/Page/vsc/de/ch/3/anc/masse/2_massenspektrometer/2_2_vakuumssystem/2_2_2_turbop/turbomol_ms5ht0202.vscml.html).
- [4] TU Dortmund. *V70 Vakuumversuch.* 2022.
- [5] Umwelt und Geologie Hessisches Landesamt für Naturschutz. [Online; Stand 4. Mai 2022]. URL: <https://www.hlnug.de/themen/luft/grundlagen>.
- [6] 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/>.
- [7] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties.* Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [8] 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/>.
- [9] Pfeifer Vacuum. *The Vacuum Technology Book Volume 2.*
- [10] Wikipedia. *Vakuum — Wikipedia, die freie Enzyklopädie.* [Online; Stand 4. Mai 2022]. 2022. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Vakuum&oldid=221079316>.