

**V70**

# **Der Vakuumversuch**

Ben Werner Grobecker

ben.grobecker@tu-dortmund.de

Sebastian Rüßmann

sebastian.ruessmann@tu-dortmund.de

Durchführung: 21.04.2022

Abgabe: 19. Mai 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 . . . . .	6
2.2 Vakuumerzeugung . . . . .	6
2.2.1 Grundlagen . . . . .	6
2.2.2 Enddruck . . . . .	7
2.2.3 Drehschiebervakuumpumpe . . . . .	7
2.2.4 Turbomolekularpumpe . . . . .	8
2.3 Saugvermögen . . . . .	9
2.3.1 Evakuierungskurve . . . . .	9
2.3.2 Leckratenmessung . . . . .	9
2.4 Druckmessung . . . . .	10
2.4.1 Pirani-Vakuummeter . . . . .	10
2.4.2 Kalt-/Heißkathode Ionisationvakuummeter . . . . .	10
<b>3 Durchführung</b>	<b>11</b>
3.1 Drehschieberpumpe . . . . .	11
3.2 Turbomolekularpumpe . . . . .	12
<b>4 Auswertung</b>	<b>12</b>
4.1 Drehschieberpumpe . . . . .	12
4.1.1 Evakuierungskurve . . . . .	13
4.1.2 Leckratenmessung . . . . .	17
4.2 Turbomolekularpumpe . . . . .	24
4.2.1 Evakuierungskurve . . . . .	24
4.2.2 Leckratenmessung . . . . .	26
<b>5 Diskussion</b>	<b>31</b>
<b>Literatur</b>	<b>35</b>

# 1 Zielsetzung

Der Vakuumversuch besteht aus 4 verschiedenen Messreihen, mit denen das effektive Saugvermögen zweier Vakuumpumpen verschiedener Bauart bestimmt werden. Dabei handelt es sich um eine *Drehzscheiben-* 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 wie die von Wikipedia [9, Vakuum ist in der technischen Praxis ein Raum mit weitgehender Abwesenheit von Materie.]. Normgerecht ist Vakuum definiert als [1, 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.] Fest steht, 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, sowie Arbeitsbereiche erschiedener Pumpbauweisen aufgelistet.

#### 2.1.2 Druck

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

$$p = \frac{F}{A}. \quad (1)$$

Der Einfachheit halber gehen wir im folgendem 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 punktförmig
- Ideale Gasteilchen Vibrieren und Rotieren nicht

Nun 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%) [4]. Dafür wird

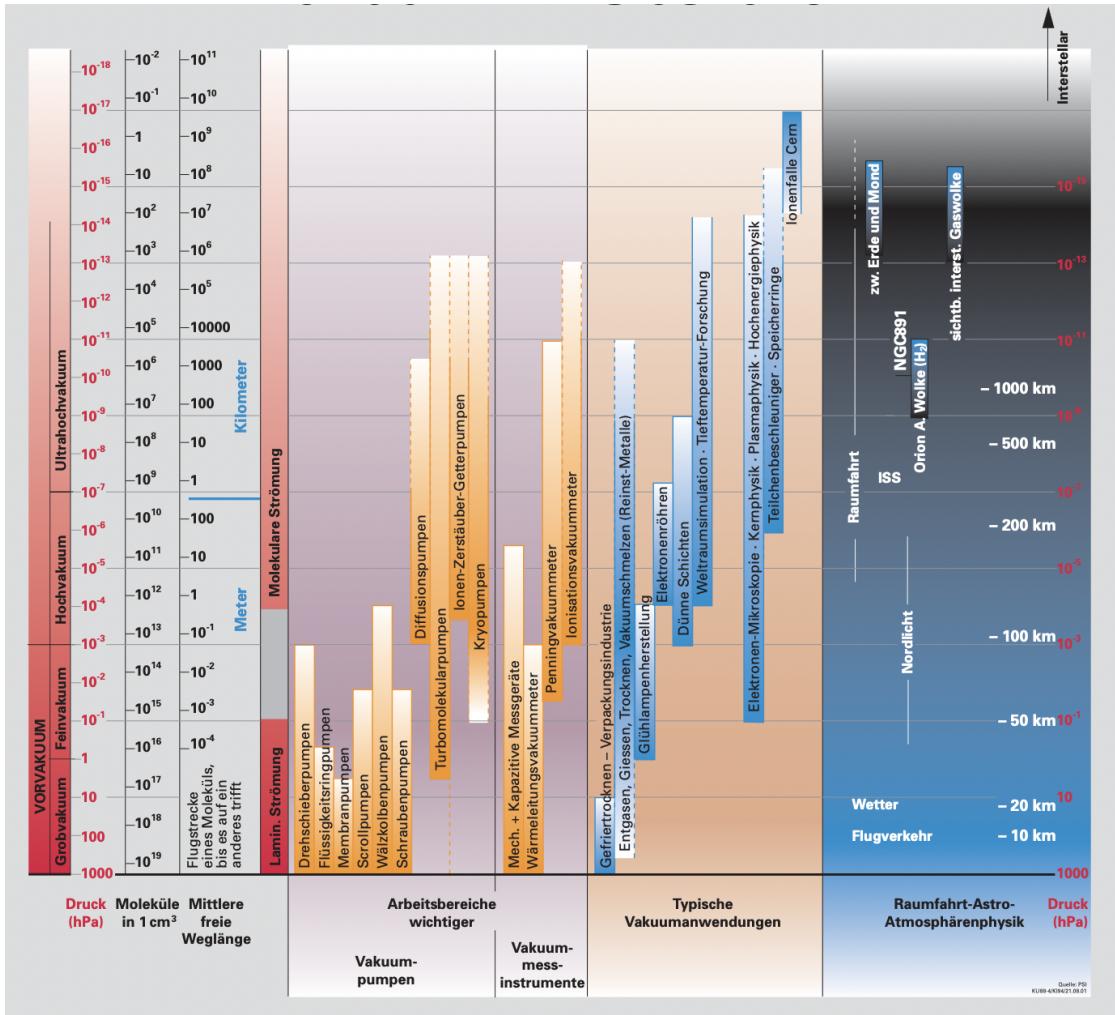


Abbildung 1: Vakuum im Überblicke [8]

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

$$p = \sum p_p. \quad (2)$$

### 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>

### 2.1.4 Mittlere freie Weglänge

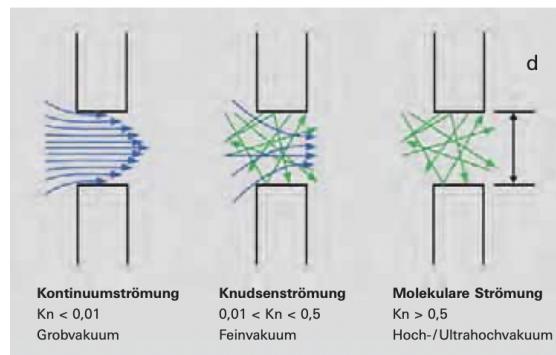
Der Fluss und die Ausbreitung von Gasmolekülen wird immer wieder unterbrochen durch Zusammenstöße zwischen den Gasteilchen. Der mittlere Weg, den ein Teilchen zurücklegen kann bevor es mit einem anderen kollidiert, wird die *mittlere freie Weglänge*  $\tilde{l}$  genannt. Sie ist abhängig von der Geschwindigkeit 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 *Visköse 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, da sie eine höhere Pumpleistung verlangen.

Im Hoch- und Ultrahochvakuum geht die visköse 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.



**Abbildung 2:** Profile der Verschiedenen Strömungsarten [8]

---

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

### 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 vom Druck. Dieser Zusammenhang zwischen Druck und Leitwert ist in Abbildung 3 dargestellt. Es ist zu beobachten, dass gerade für schlechte Vakuume der Leitwert besonders hoch ist, welches sich in einem Saugleistungsverlust der Pumpen bemerkbar macht.

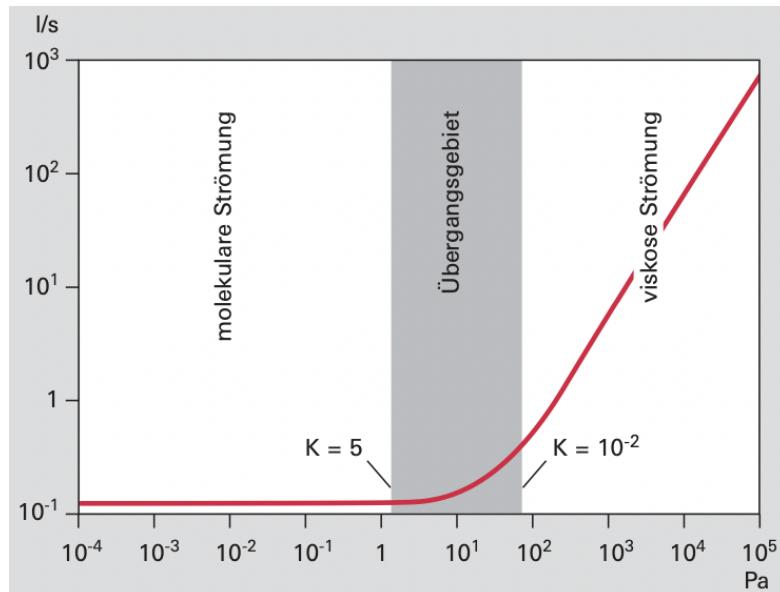


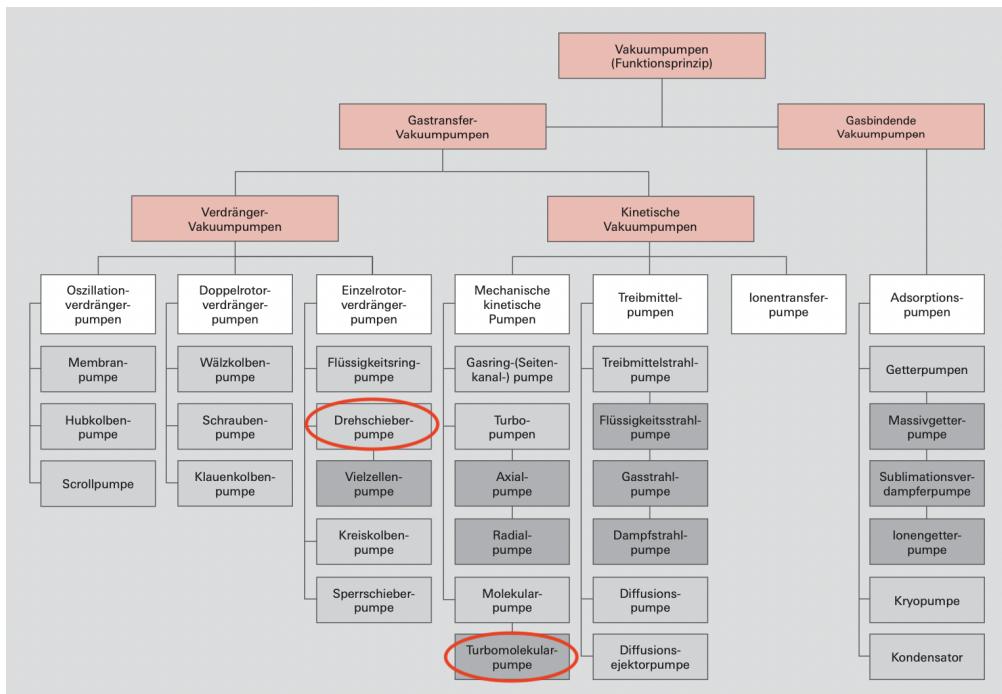
Abbildung 3: Leitwert eines runden glatten Rohrs [8]

## 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 Druck Bereich (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 *Saugleistung* und ihrem *Enddruck*.

<sup>2</sup>Vakuumkammer



**Abbildung 4:** Übersicht Vakuumpumpen[8]

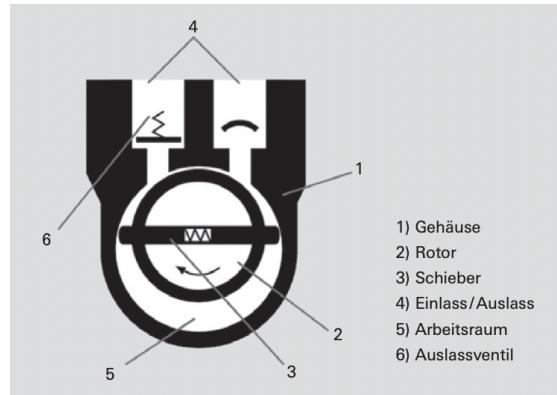
### 2.2.2 Enddruck

Der Enddruck ist der niedrigste Druck, den eine Pumpe theoretisch erreichen kann. Sie nährt 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. 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). Beim Auslassventil findet der inverse Prozess statt. Das Gas wird komprimiert, wodurch der Druck steigt und das Medium aus dem Ventil gedrückt wird.

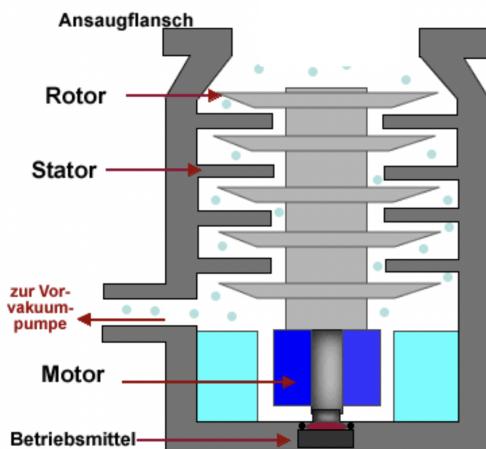
Die Drehschieberpumpe kann nur einen vergleichsweise hohen Enddruck erreichen, da der Ölfilm nur begrenzt dithält. Gleichzeitig gelangt auch immer ein kleiner Ölanteil in den Rezipienten.



**Abbildung 5:** Aufbau einer Drehschieberpumpe [8]

#### 2.2.4 Turbomolekularpumpe

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



**Abbildung 6:** Skizzenhafter Aufbau einer Turbomolekularpumpe [2]

schnell drehendem Rotor und einem Stator (vgl. Abb. 20). 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

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

Sie gibt den mittlere 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 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 erbringt einen 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-

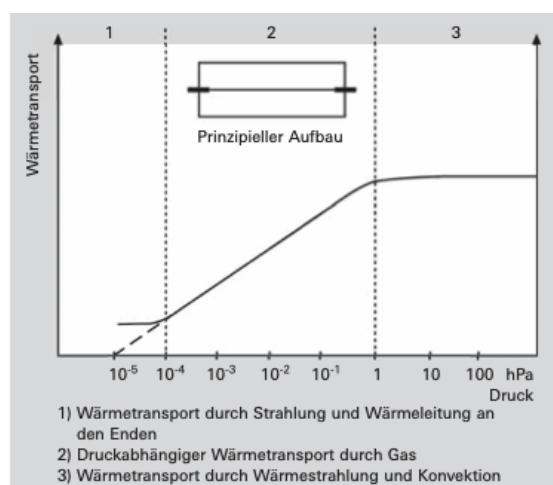


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Druck [8]

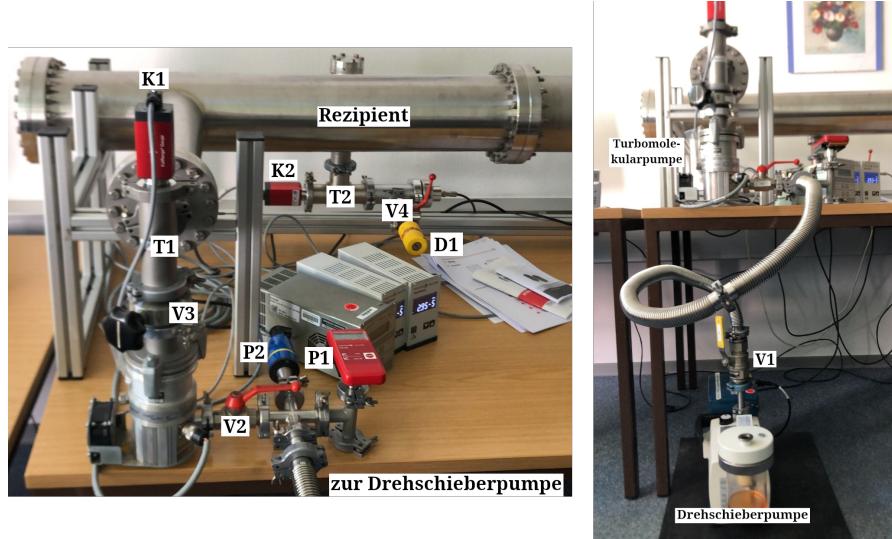
sen werden. Im Zentrum des Messgerätes wird ein Draht auf eine konstante Temperatur geheizt. Durch das umgebene Gas wird die Wärme an eine Rohrwand übertragen. Die dort gemessene Temperatur gibt Aufschluss über den Druck. Zu beachten ist das jedes Gas eine eigene Kennlinie besitzt, auf die das Messgerät eingestellt werden muss.

### 2.4.2 Kalt-/Heißkathode Ionisationvakuummeter

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 den glühelektrischen Effekt, bei der Kaltkathode durch eine angelegte Spannung. 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 auf lediglich 200 s. Diese Messung wird 3-mal wiederholt für 4 verschiedene  $p_g$ .

### 3.2 Turbomolekularpumpe

Zur Inbetriebnahme der Turbomolekularpumpe muss ein Vorkauum 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`[7] für numerische Rechnungen, `matplotlib`[5] für die graphische Darstellung und `uncertainties`[6] für die Fehlerrechnung. 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 Mittlung verwendet werden, also für Funktionen vom Typ

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

ist der Fehler

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

### 4.1 Drehschieberpumpe

Zur Auswertung wurde das Rezipientenvolumen  $V_0 = (34,0 \pm 3,4) \text{ L}$ [3], der Enddruck  $p_E = (6,7 \pm 0,7) \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$  und der Umgebungsdruck  $p_0 = (1000,0 \pm 0,3) \text{ mbar}$  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  $\sigma_p$  (9) explizit durch Gleichung 10 ausrechnen lässt, sind in Tabelle 2 zu sehen.

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

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:

$$\begin{aligned} S_1 &= (1,07 \pm 0,11) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\ S_2 &= (0,37 \pm 0,04) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\ S_3 &= (0,144 \pm 0,014) \frac{\text{L}}{\text{s}} \end{aligned}$$

**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 $\pm 0,44$	

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

$t/\text{s}$	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$
70,0 ± 0,2	106,20 ± 0,32	106,00 ± 0,32	107,60 ± 0,32
80,0 ± 0,2	79,30 ± 0,24	77,10 ± 0,23	78,10 ± 0,23
90,0 ± 0,2	58,10 ± 0,17	56,30 ± 0,17	57,00 ± 0,17
100,0 ± 0,2	41,90 ± 0,13	40,90 ± 0,12	41,60 ± 0,12
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

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

$t/\text{s}$	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$
470,0 $\pm$ 0,2	0,240 $\pm$ 0,024	0,240 $\pm$ 0,024	0,240 $\pm$ 0,024
480,0 $\pm$ 0,2	0,230 $\pm$ 0,023	0,230 $\pm$ 0,023	0,230 $\pm$ 0,023
490,0 $\pm$ 0,2	0,230 $\pm$ 0,023	0,220 $\pm$ 0,022	0,220 $\pm$ 0,022
500,0 $\pm$ 0,2	0,220 $\pm$ 0,022	0,210 $\pm$ 0,021	0,210 $\pm$ 0,021
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

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

$t/\text{s}$	$p/\text{mbar}$	$\ln\left(\frac{p-p_E}{p_0-p_E}\right)$
190,0 ± 0,2	2,83 ± 0,16	-5,87 ± 0,06
200,0 ± 0,2	2,20 ± 0,13	-6,12 ± 0,06
210,0 ± 0,2	1,90 ± 0,11	-6,27 ± 0,06
220,0 ± 0,2	1,600 ± 0,092	-6,44 ± 0,06
230,0 ± 0,2	1,400 ± 0,081	-6,58 ± 0,06
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

**Tabelle 2:** Mittelwert und logarithmischer Ausdruck der Evakuierungskurve der Dreh-schieberpumpe

$t/\text{s}$	$p/\text{mbar}$	$\ln\left(\frac{p-p_E}{p_0-p_E}\right)$
$590,0 \pm 0,2$	$0,1533 \pm 0,0089$	$-8,83 \pm 0,06$
$600,0 \pm 0,2$	$0,1433 \pm 0,0083$	$-8,90 \pm 0,06$

#### 4.1.2 Leckratennmessung

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  $p$  nach Gleichung 9 berechnet.

Der lineare Ausgleichsparameter  $a$  aus

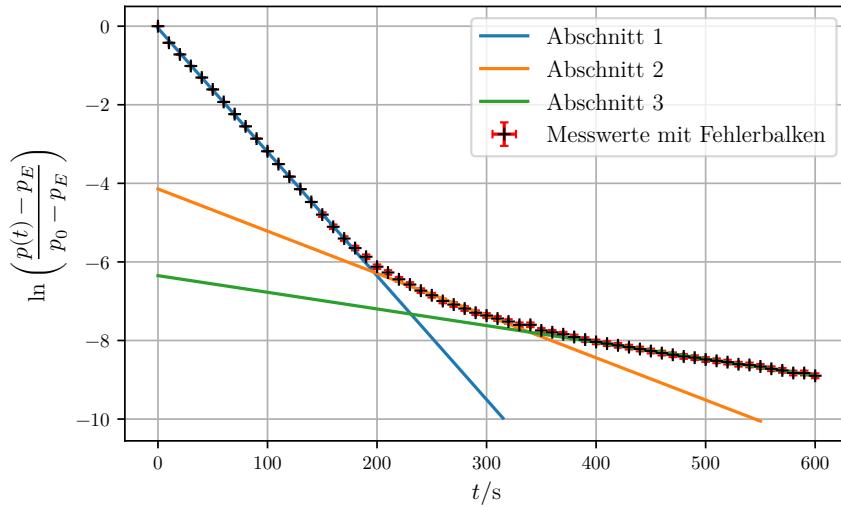
$$p(t) = a \cdot t + b$$

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.

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

**Tabelle 3:** Ausgleichsparameter und Saugvermögen der Leckratennmessung 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	$3,223 \pm 0,022$	$120,4 \pm 2,7$	$1,10 \pm 0,11$



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

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

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

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

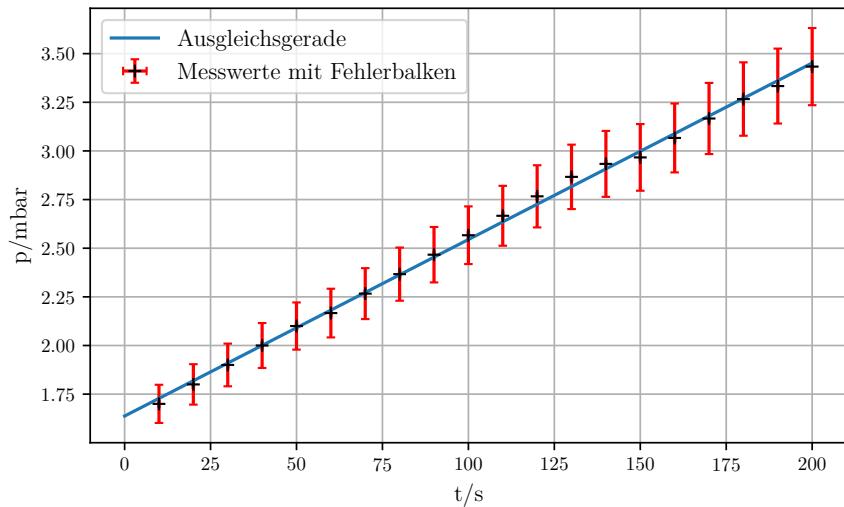
$t/\text{s}$	$p_g = 10 \text{ mbar}$			Mittelwert
	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$	$p/\text{mbar}$
10,0 ± 0,2	19,30 ± 0,06	20,00 ± 0,06	19,80 ± 0,06	19,70 ± 0,03
20,0 ± 0,2	23,20 ± 0,07	23,90 ± 0,07	23,80 ± 0,07	23,63 ± 0,04
30,0 ± 0,2	27,10 ± 0,08	27,70 ± 0,08	27,60 ± 0,08	27,47 ± 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

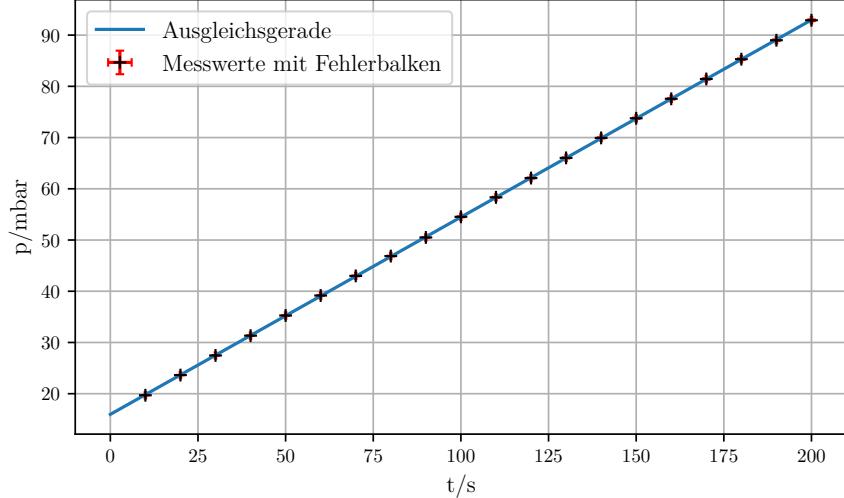
$t/\text{s}$	$p_g = 50 \text{ mbar}$			Mittelwert
	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$	$p/\text{mbar}$
10,0 ± 0,2	74,20 ± 0,22	75,50 ± 0,23	76,10 ± 0,23	75,27 ± 0,13
20,0 ± 0,2	91,20 ± 0,27	93,10 ± 0,28	93,40 ± 0,28	92,57 ± 0,16
30,0 ± 0,2	108,20 ± 0,32	110,40 ± 0,33	110,90 ± 0,33	109,83 ± 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

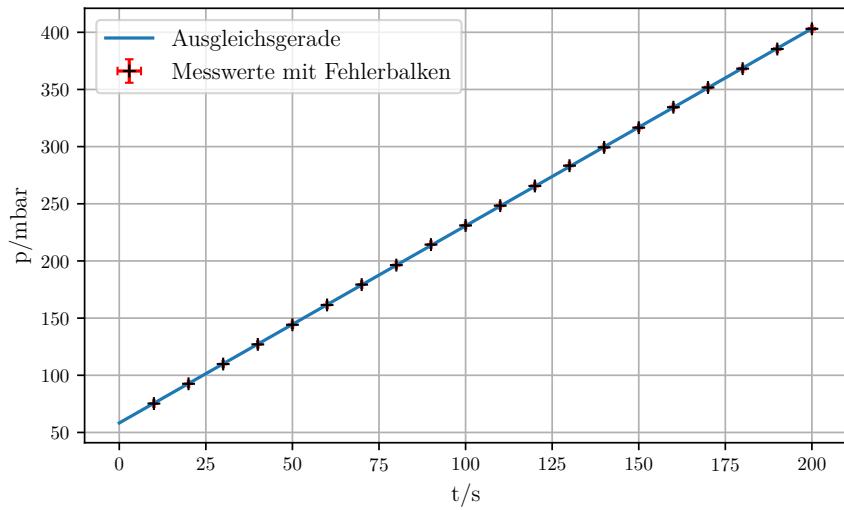
$t/\text{s}$	$p_g = 100$ mbar			Mittelwert
	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$	$p/\text{mbar}$
10,0 ± 0,2	145,8 ± 0,4	147,1 ± 0,4	146,3 ± 0,4	146,4 ± 0,3
20,0 ± 0,2	179,6 ± 0,5	177,6 ± 0,5	180,2 ± 0,5	179,1 ± 0,3
30,0 ± 0,2	212,0 ± 0,6	213,4 ± 0,6	212,5 ± 0,6	212,6 ± 0,4
40,0 ± 0,2	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



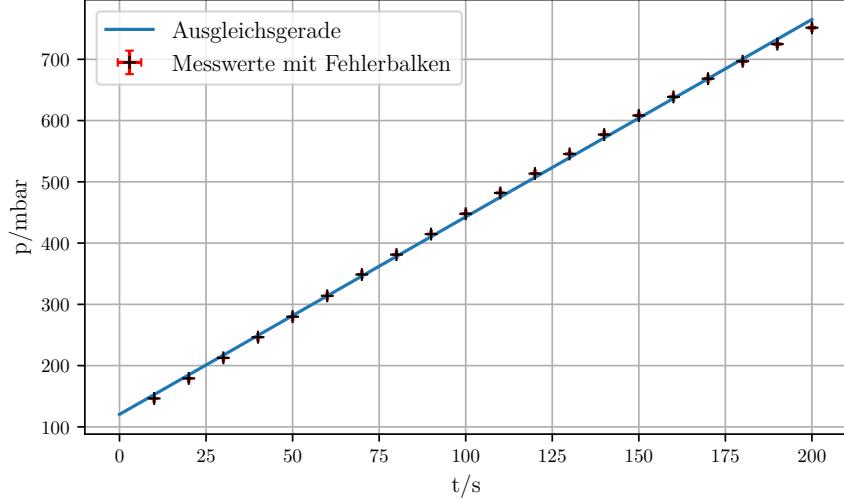
**Abbildung 10:** Messergebnisse und Ausgleichsgeraden der Leckratenmessung zur Dreh-schieberpumpe mit  $p_g = 0,5 \text{ mbar}$



**Abbildung 11:** Messergebnisse und Ausgleichsgeraden der Leckratenmessung zur Dreh-schieberpumpe mit  $p_g = 10 \text{ mbar}$



**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  $V_0 = (33,0 \pm 3,3) \text{ L}$ [3], der Enddruck  $p_E = (1,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$  und der Umgebungsdruck  $p_0 = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$  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

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

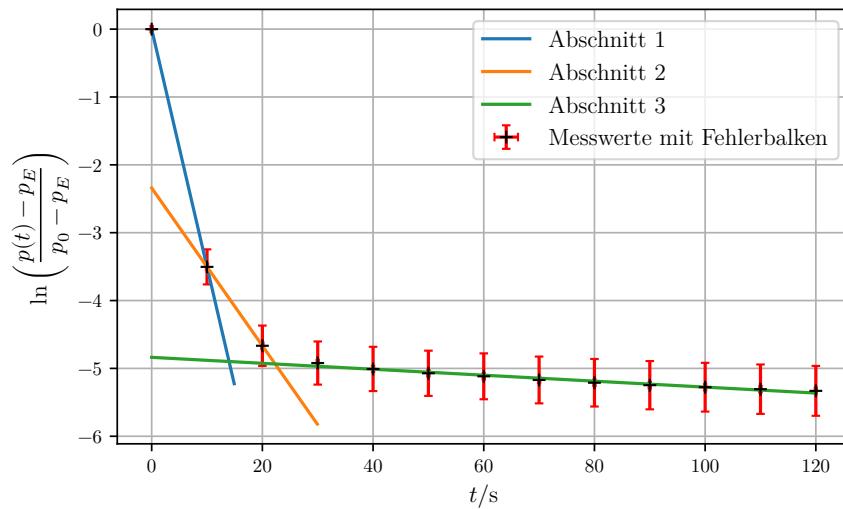
an die drei Abschnitte des Ausdrucks ergeben sich folgende Parameter:

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

Hierbei enthalten die Parameter für den ersten und zweiten Abschnitt keine Abweichungen, da jeweils nicht genügend Messwerte verfügbar sind um den Grad der linearen Regression zu übersteigen. Die zugehörigen Ausgleichsgeraden sind in Abbildung 14 eingezeichnet.

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

$$\begin{aligned} S_1 &= (11,56 \pm 1,16) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\ S_2 &= (3,84 \pm 0,38) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\ S_3 &= (0,14 \pm 0,01) \frac{\text{L}}{\text{s}} \end{aligned}$$



**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  $p$  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.

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

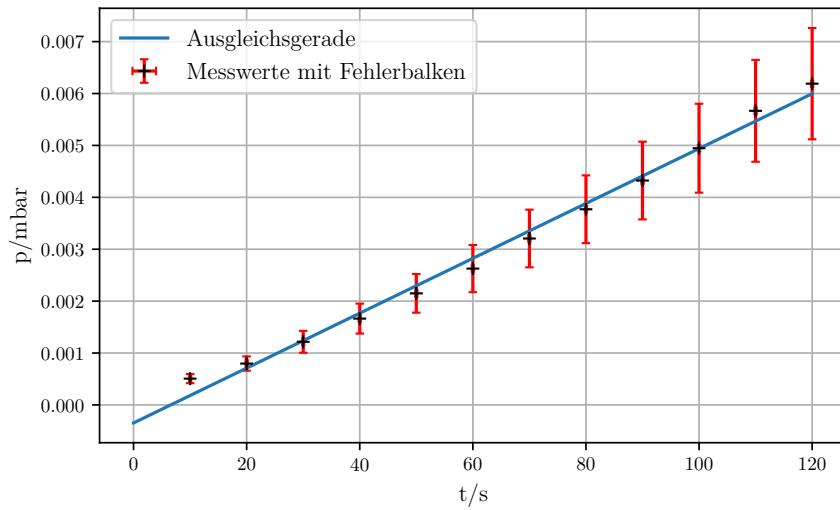
$t/s$	$p_g = 1 \cdot 10^{-4}$ mbar			Mittelwert
	$p_1/10^{-3}$ /mbar	$p_2/10^{-3}$ /mbar	$p_3/10^{-3}$ /mbar	$p/10^{-3}$ /mbar
10,0 ± 0,2	(0,253 ± 0,076)	(0,245 ± 0,073)	(0,257 ± 0,077)	(0,252 ± 0,044)
20,0 ± 0,2	(0,392 ± 0,118)	(0,382 ± 0,115)	(0,396 ± 0,119)	(0,390 ± 0,068)
30,0 ± 0,2	(0,507 ± 0,152)	(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

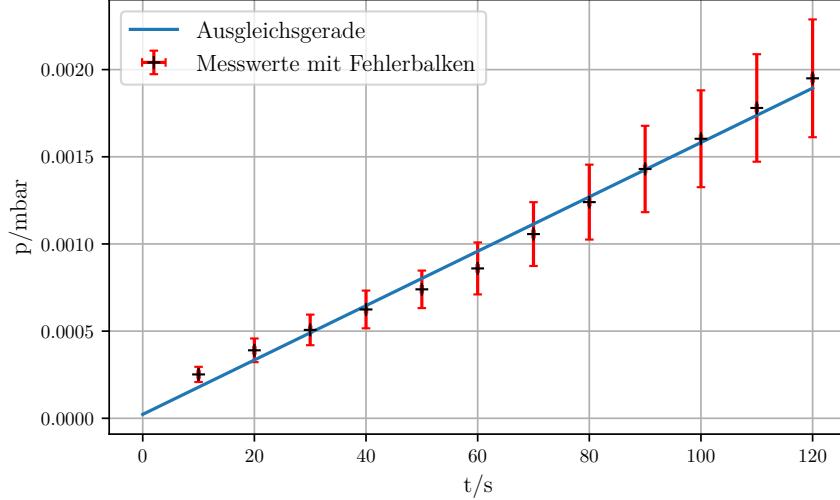
$t/\text{s}$	$p_g = 7 \cdot 10^{-5}$ mbar			Mittelwert
	$p_1/10^{-4}/\text{mbar}$	$p_2/10^{-4}/\text{mbar}$	$p_3/10^{-4}/\text{mbar}$	$p/10^{-4}/\text{mbar}$
10,0 ± 0,2	(1,78 ± 0,53)	(1,87 ± 0,56)	(1,78 ± 0,53)	(1,81 ± 0,31)
20,0 ± 0,2	(2,81 ± 0,84)	(2,94 ± 0,88)	(2,78 ± 0,83)	(2,84 ± 0,49)
30,0 ± 0,2	(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

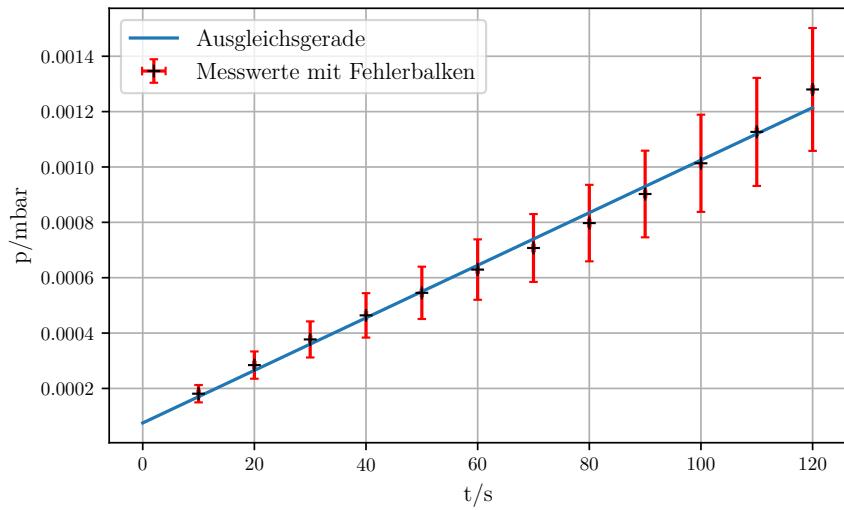
$t/\text{s}$	$p_g = 5 \cdot 10^{-5}$ mbar			Mittelwert
	$p_1/10^{-4}/\text{mbar}$	$p_2/10^{-4}/\text{mbar}$	$p_3/10^{-4}/\text{mbar}$	$p/10^{-4}/\text{mbar}$
10,0 ± 0,2	(1,25 ± 0,37)	(1,33 ± 0,40)	(1,29 ± 0,39)	(1,29 ± 0,22)
20,0 ± 0,2	(1,97 ± 0,59)	(2,00 ± 0,60)	(1,98 ± 0,59)	(1,98 ± 0,34)
30,0 ± 0,2	(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)



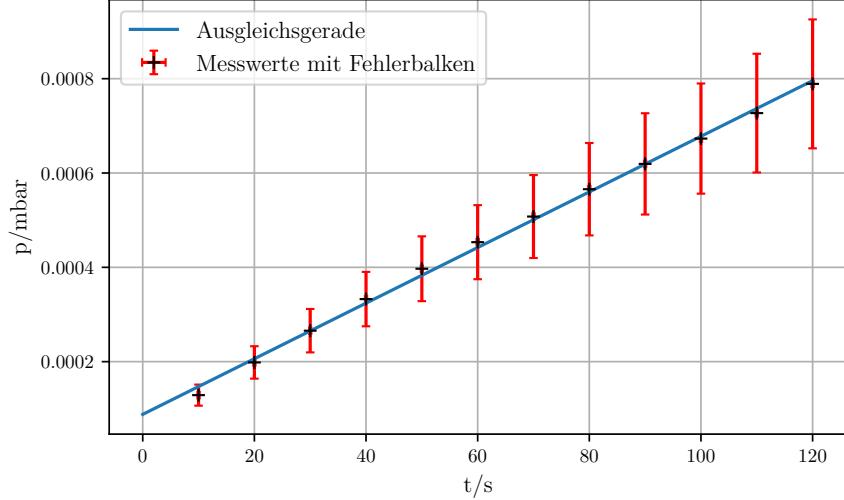
**Abbildung 15:** Messergebnisse und Ausgleichsgeraden der Leckratenmessung zur Turbomolekularpumpe mit  $p_g = 2 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$



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



**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 gewissermaßen erfolgreich gelungen. Bei der Drehschieberpumpe ist eine hervorragende Einteilung der gewünschten 3 Bereiche möglich. Lediglich waren bei der Turbomolekularpumpe die Messintervalle zu groß und die Bereiche des konstanten logarithmischen Ausdruckes leideten darunter. Somit war eine Berechnung der Saugvermögen im Entfernten des Enddruckes nur wage möglich.

Bei den Leckratenmessungen hingegen klappte es beide Male für alle Gleichgewichtsdrücke den linearen Druckanstieg deutlich zu machen (vgl. Abb. 10 bis 13 und 15 bis 18).

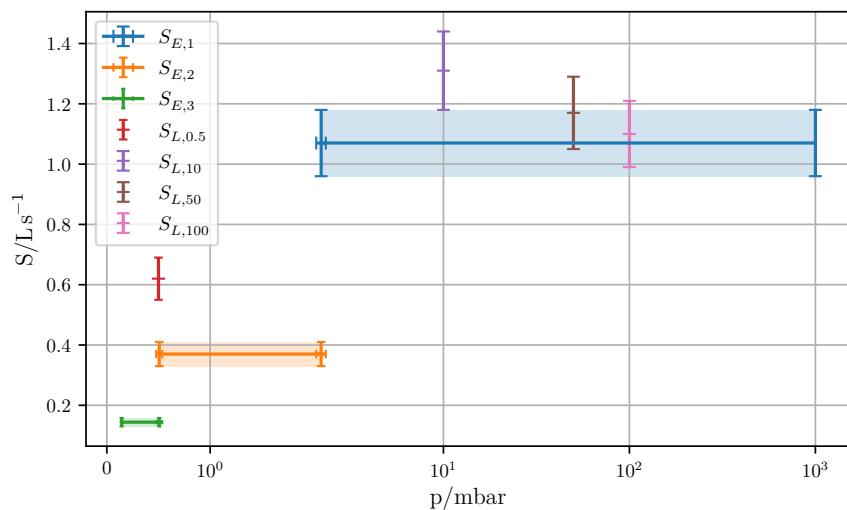
In Abbildung 19 sind die verschiedenen Saugvermögen der einzelnen Methoden und Messreihen der Drehschieberpumpe aufgeführt, in Abbildung 20 die der Turbomolekularpumpe. Bei der Drehschieberpumpe bietet sich aufgrund der großen Unterschiede der Druckbereiche ein halblogarithmischer Plot an.

Die Herstellerangaben der Pumpen sind 77 L/s für die Turbomolekularpumpe und 1.28 bis 1.53 L/s für die Drehschieberpumpe. Hierbei ist wohl am deutlichsten zu erkennen, dass vor allem die Messung der Turbomolekularpumpe eine deutliche Abweichung dieser hervorweist. Dahingegen kann zumindest der Wert  $S_{L,10}$  der Drehschieberpumpe den Hersteller in seinem Fehler bestätigen. Ob aber dadurch von einem Erfolg der Messreihe zu sprechen ist, ist fraglich. Es fällt jedoch auf, dass sich trotz dieser deutlichen Differenzen mehrfach die Methoden der Evakuierungskurve und der Leckratenmessung in ihren Fehlern überschneiden.

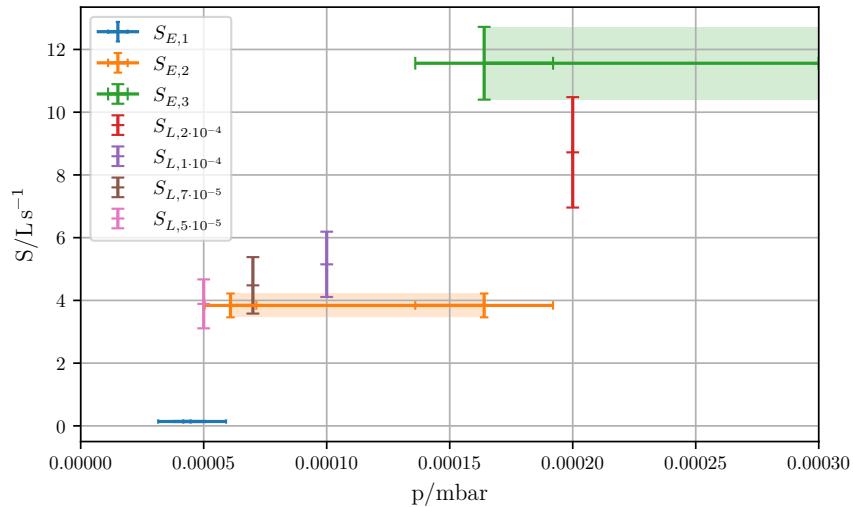
Es muss natürlich in Anbetracht gezogen werden, dass lediglich das effektive Saugvermögen

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

mit dem Leitwert  $L$  der Rohre und dem theoretischen Saugvermögen  $S_0$  bestimmt werden kann. Der Hersteller ist natürlich unter professionellen Laborbedingungen daran interessiert mit einer höchstmöglichen Saugleistung sein Produkt zu bewerben. Von daher werden sicherlich maßgefertigte Anpassungen an der Messvorrichtung vorgenommen um beispielsweise genannte Leitwerte zu minimieren und der ausgewählten Pumpe eine möglichst ideale Umgebung zu schaffen.



**Abbildung 19:** Die Saugvermögen der verschiedenen Messreihen zur Drehschieberpumpe

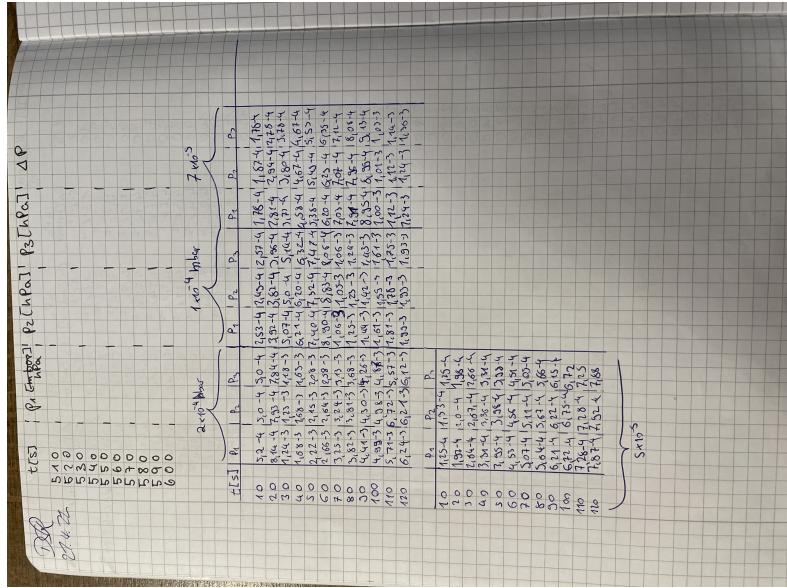


**Abbildung 20:** Die Saugvermögen der verschiedenen Messreihen zur Turbomolekularpumpe

V1.0	Vakuumversuch	27.4.7 DSR
(1)	Messungen zur Geschwindigkeitspumpe	$\rho_{\text{Fluid}} = 67 \cdot 10^3$
• Erhaltungssätze		
messung	1	2
t [s]	Plattform [m] $\rho_2$ [kg/m³] $P_2$ [bar] $P_1$ [bar]	3
0	1000	1
10	600,4	6460,5
20	480,1	6349,6
30	390,5	5860,0
40	291,5	5364,0
50	196,6	4950,0
60	105,1	4468,8
70	106,2	4060,0
80	104,8	378,1
90	58,1	577,1
100	41,9	563,3
110	30,2	40,9
120	21,8	29,6
130	16,0	29,9
140	11,3	15,9
150	9,2	8,3
160	6,7	3,5
170	4,5	2,2
180	3,0	2,8
190	2,0	-
200	1,0	-
210	1,6	1,6
220	1,4	1,4
230	1,2	1,2
240	1,0	1,0
250	0,9	0,46
260	0,6	0,36
270	0,4	0,24
280	0,2	0,14
290	0,1	0,04
300	0,0	0,0
310	0,0	0,0
320	0,0	0,0
330	0,0	0,0
340	0,0	0,0
350	0,0	0,0
360	0,0	0,0
370	0,0	0,0
380	0,0	0,0
390	0,0	0,0
400	0,0	0,0
410	0,0	0,0
420	0,0	0,0
430	0,0	0,0
440	0,0	0,0
450	0,0	0,0
460	0,0	0,0
470	0,0	0,0
480	0,0	0,0
490	0,0	0,0
500	0,0	0,0
510	0,0	0,0
520	0,0	0,0
530	0,0	0,0
540	0,0	0,0
550	0,0	0,0
560	0,0	0,0
570	0,0	0,0
580	0,0	0,0
590	0,0	0,0
600	0,0	0,0
610	0,0	0,0
620	0,0	0,0
630	0,0	0,0
640	0,0	0,0
650	0,0	0,0
660	0,0	0,0
670	0,0	0,0
680	0,0	0,0
690	0,0	0,0
700	0,0	0,0
710	0,0	0,0
720	0,0	0,0
730	0,0	0,0
740	0,0	0,0
750	0,0	0,0
760	0,0	0,0
770	0,0	0,0
780	0,0	0,0
790	0,0	0,0
800	0,0	0,0
810	0,0	0,0
820	0,0	0,0
830	0,0	0,0
840	0,0	0,0
850	0,0	0,0
860	0,0	0,0
870	0,0	0,0
880	0,0	0,0
890	0,0	0,0
900	0,0	0,0
910	0,0	0,0
920	0,0	0,0
930	0,0	0,0
940	0,0	0,0
950	0,0	0,0
960	0,0	0,0
970	0,0	0,0
980	0,0	0,0
990	0,0	0,0
1000	0,0	0,0

$t [s]$	P1 [mbar]	P2 [mbar]	P3 [mbar]
14.22			
4.80	-	2.3e-1	2.3e-1
4.90	-	2.2e-1	2.2e-1
5.00	-	2.1e-1	2.1e-1
5.10	-	2.0e-1	2.0e-1
5.20	-	2.0e-1	2.0e-1
5.30	-	1.9e-1	1.9e-1
5.40	-	1.9e-1	1.9e-1
5.50	-	1.8e-1	1.8e-1
5.60	-	1.7e-1	1.7e-1
5.70	-	1.7e-1	1.7e-1
5.80	-	1.6e-1	1.6e-1
5.90	-	1.5e-1	1.5e-1
6.00	-	1.4e-1	1.4e-1
6.10	all 1.3e-1	1.5e-1	1.5e-1
6.20	all 2.1e-1		
6.30	all 2.1e-1		
6.40	all 2.1e-1		
6.50	all 2.1e-1		
6.60	all 2.1e-1		
6.70	all 2.1e-1		
6.80	all 2.1e-1		
6.90	all 2.1e-1		
7.00	all 2.1e-1		
7.10	all 2.1e-1		
7.20	all 2.1e-1		
7.30	all 2.1e-1		
7.40	all 2.1e-1		
7.50	all 2.1e-1		
7.60	all 2.1e-1		
7.70	all 2.1e-1		
7.80	all 2.1e-1		
7.90	all 2.1e-1		
8.00	all 2.1e-1		
8.10	all 2.1e-1		
8.20	all 2.1e-1		
8.30	all 2.1e-1		
8.40	all 2.1e-1		
8.50	all 2.1e-1		
8.60	all 2.1e-1		
8.70	all 2.1e-1		
8.80	all 2.1e-1		
8.90	all 2.1e-1		
9.00	all 2.1e-1		
9.10	all 2.1e-1		
9.20	all 2.1e-1		
9.30	all 2.1e-1		
9.40	all 2.1e-1		
9.50	all 2.1e-1		
9.60	all 2.1e-1		
9.70	all 2.1e-1		
9.80	all 2.1e-1		
9.90	all 2.1e-1		
10.00	all 2.1e-1		
10.10	all 2.1e-1		
10.20	all 2.1e-1		
10.30	all 2.1e-1		
10.40	all 2.1e-1		
10.50	all 2.1e-1		
10.60	all 2.1e-1		
10.70	all 2.1e-1		
10.80	all 2.1e-1		
10.90	all 2.1e-1		
11.00	all 2.1e-1		
11.10	all 2.1e-1		
11.20	all 2.1e-1		
11.30	all 2.1e-1		
11.40	all 2.1e-1		
11.50	all 2.1e-1		
11.60	all 2.1e-1		
11.70	all 2.1e-1		
11.80	all 2.1e-1		
11.90	all 2.1e-1		
12.00	all 2.1e-1		
12.10	all 2.1e-1		
12.20	all 2.1e-1		
12.30	all 2.1e-1		
12.40	all 2.1e-1		
12.50	all 2.1e-1		
12.60	all 2.1e-1		
12.70	all 2.1e-1		
12.80	all 2.1e-1		
12.90	all 2.1e-1		
13.00	all 2.1e-1		
13.10	all 2.1e-1		
13.20	all 2.1e-1		
13.30	all 2.1e-1		
13.40	all 2.1e-1		
13.50	all 2.1e-1		
13.60	all 2.1e-1		
13.70	all 2.1e-1		
13.80	all 2.1e-1		
13.90	all 2.1e-1		
14.00	all 2.1e-1		
14.10	all 2.1e-1		
14.20	all 2.1e-1		
14.30	all 2.1e-1		
14.40	all 2.1e-1		
14.50	all 2.1e-1		
14.60	all 2.1e-1		
14.70	all 2.1e-1		
14.80	all 2.1e-1		
14.90	all 2.1e-1		
15.00	all 2.1e-1		
15.10	all 2.1e-1		
15.20	all 2.1e-1		
15.30	all 2.1e-1		
15.40	all 2.1e-1		
15.50	all 2.1e-1		
15.60	all 2.1e-1		
15.70	all 2.1e-1		
15.80	all 2.1e-1		
15.90	all 2.1e-1		
16.00	all 2.1e-1		
16.10	all 2.1e-1		
16.20	all 2.1e-1		
16.30	all 2.1e-1		
16.40	all 2.1e-1		
16.50	all 2.1e-1		
16.60	all 2.1e-1		
16.70	all 2.1e-1		
16.80	all 2.1e-1		
16.90	all 2.1e-1		
17.00	all 2.1e-1		
17.10	all 2.1e-1		
17.20	all 2.1e-1		
17.30	all 2.1e-1		
17.40	all 2.1e-1		
17.50	all 2.1e-1		
17.60	all 2.1e-1		
17.70	all 2.1e-1		
17.80	all 2.1e-1		
17.90	all 2.1e-1		
18.00	all 2.1e-1		
18.10	all 2.1e-1		
18.20	all 2.1e-1		
18.30	all 2.1e-1		
18.40	all 2.1e-1		
18.50	all 2.1e-1		
18.60	all 2.1e-1		
18.70	all 2.1e-1		
18.80	all 2.1e-1		
18.90	all 2.1e-1		
19.00	all 2.1e-1		
19.10	all 2.1e-1		
19.20	all 2.1e-1		
19.30	all 2.1e-1		
19.40	all 2.1e-1		
19.50	all 2.1e-1		
19.60	all 2.1e-1		
19.70	all 2.1e-1		
19.80	all 2.1e-1		
19.90	all 2.1e-1		
20.00	all 2.1e-1		

$t$ [s]	$P_1$ [mbar]	$P_2$ [mbar]	$P_3$ [mbar]	$P_4$	$P_{ende,1} = 1.4 \cdot 10^{-8}$ 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] Chemgaroo. [Online; Stand 4. Mai 2022]. URL: [http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/3/anc/masse/ms\\_vakuumsystem.vlu/Page/vsc/de/ch/3/anc/masse/2\\_massenspektrometer/2\\_2\\_vakuumsystem/2\\_2\\_2\\_turbop/turbomol\\_ms5ht0202.vscml.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/3/anc/masse/ms_vakuumsystem.vlu/Page/vsc/de/ch/3/anc/masse/2_massenspektrometer/2_2_vakuumsystem/2_2_2_turbop/turbomol_ms5ht0202.vscml.html).
- [3] TU Dortmund. *V70 Vakuumversuch.* 2022.
- [4] Umwelt und Geologie Hessisches Landesamt für Naturschutz. [Online; Stand 4. Mai 2022]. URL: <https://www.hlnug.de/themen/luft/grundlagen>.
- [5] 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/>.
- [6] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties.* Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [7] 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/>.
- [8] Pfeifer Vacuum. *The Vacuum Technology Book Volume 2.*
- [9] Wikipedia. *Vakuum — Wikipedia, die freie Enzyklopädie.* [Online; Stand 4. Mai 2022]. 2022. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Vakuum&oldid=221079316>.