

v70

# Vakuumversuch

Joel Koch

joel.koch@tu-dortmund.de

Felix Symma

felix.symma@tu-dortmund.de

Durchführung: 17.05.2023

Abgabe: 10.06.2023

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Ziel</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Theorie des Vakuum . . . . .	3
2.2 Das ideale Gas . . . . .	4
2.3 Strömungsarten . . . . .	4
2.4 Verunreinigungen . . . . .	6
2.5 Saugvermögen und Saugleistung einer Vakuumpumpe . . . . .	6
2.6 Leckrate . . . . .	7
2.7 Leitwerte . . . . .	7
2.8 Drehschiebervakuumpumpe . . . . .	8
2.9 Turbomolekularpumpe . . . . .	8
2.10 Vakuummessgeräte . . . . .	9
2.10.1 Piezo-Vakuummeter . . . . .	9
2.10.2 Pirani-Messröhre . . . . .	10
2.10.3 Kaltkathoden-Ionisationsvakuummeter . . . . .	11
2.10.4 Heißkathoden-Ionisationsvakuummeter . . . . .	12
<b>3 Durchführung</b>	<b>13</b>
3.1 Versuchsaufbau . . . . .	13
3.2 Versuchsdurchführung . . . . .	14
<b>4 Auswertung</b>	<b>14</b>
4.1 Turbomolekularpumpe . . . . .	14
4.1.1 Leckratenmessung . . . . .	14
4.1.2 Evakuierungsmessung . . . . .	18
4.2 Drehschieberpumpe . . . . .	21
4.2.1 Leckratenmessung . . . . .	21
4.2.2 Evakuierungsmessung . . . . .	26
<b>5 Diskussion</b>	<b>29</b>
<b>Literatur</b>	<b>31</b>

# 1 Ziel

Ziel des Versuches ist es die Grundlagen der Vakuumphysik zu erlernen. Dafür wird eine Evakuierungskurve für zwei verschiedene Pumptypen, einer Drehschieberpumpe und einer Turbomolekularpumpe, durchgeführt. Es wird außerdem das effektive Saugvermögen beider Pumpen mithilfe einer Leckratenmessung bestimmt.

## 2 Theorie

### 2.1 Theorie des Vakuum

(Nach [1]) Als Vakuum wird der Zustand eines Gases bezeichnet, wenn der Druck innerhalb dieses Behälters unterhalb dem Druck außerhalb ist. Alternativ wird das Vakuum als Druckbereich unterhalb 300 mbar bezeichnet, dem geringstmöglichen Druck auf der Erdoberfläche ([2]). Eine Möglichkeit verschiedene Bereiche von Vakuen zu beschreiben ist über die mittlere freie Weglänge  $\bar{l}$ , die die Strecke beschreibt, bis ein Teilchen im Mittel auf ein anderes trifft. Sie ist definiert als

$$\bar{l} = \frac{k_B T}{\sqrt{2} p d_m^2}, \quad (1)$$

wobei  $d_m$  der Moleküldurchmesser,  $p$  der Druck,  $k_B$  die Boltzmann-Konstante und  $T$  die Temperatur ist. Das Vakuum ist dabei in verschiedene Teilbereiche einzuordnen, die in Abhängigkeit vom Druck und der mittleren freien Weglänge  $\bar{l}$ , in Tabelle 1 aufgetragen sind.

**Tabelle 1:** Druckbereiche in der Vakuumtechnik [1].

Druckbereich	Druck / hPa	mittlere freie Weglänge $\bar{l}$ / m
Atmosphärendruck	1.013,25	$6,8 \cdot 10^{-8}$
Großvakuum (GV)	300 – 1	$10^{-8} - 10^{-4}$
Feinvakuum (FV)	1 – $10^{-3}$	$10^{-4} - 10^{-1}$
Hochvakuum (HV)	$10^{-3} - 10^{-8}$	$10^{-1} - 10^4$
Ultrahochvakuum (UHV)	$10^{-8} - 10^{-11}$	$10^4 - 10^7$
Extrem hohes Vakuum (XHV)	$< 10^{-11}$	$< 10^{-7}$

Der Druck wird mithilfe der barometrischen Höhenformel als das Gewicht der über einer Fläche stehenden Luftsäule beschrieben,

$$p_h = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{\rho_0 g h}{p_0}\right). \quad (2)$$

Dabei ist  $p_h$  der Druck bei der Höhe  $h$ ,  $p_0$  der Atmosphärendruck auf Meereshöhe (1013,25 hPa),  $g$  die Erdbeschleunigung und  $\rho_0$  die Dichte der Luft auf Meereshöhe bei 0 °C (1,293 kg/m<sup>3</sup>). Wird angenommen, dass die Dichte der Luft, die Erdbeschleunigung und

der Atmosphärendruck auf Meereshöhe konstant sind, folgt eine vereinfachte Darstellung der barometrischen Höhenformel,

$$p_h = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{h}{8,005 \text{ m}}\right). \quad (3)$$

## 2.2 Das ideale Gas

Das Modell des idealen Gases ist eine vereinfachende Beschreibung für reale Gase. Die idealen Gasteilchen sind dabei frei und üben keine Anziehungs- oder Abstoßungskräfte aufeinander aus. Es finden lediglich elastische Stöße zwischen der Wand des Behälters, in dem sich das Gas befindet, und zwischen den Teilchen selber statt. Die Teilchen selber belegen dabei aber kein Volumen und können nicht rotieren oder vibrieren. Die kinetische Energie der Gasteilchen ist ausschließlich die translatorische Bewegung im Raum.

(Nach [1]) Aus dem Boyle-Mariott'schen Gesetz  $pV = \text{const}$  folgt, dass das Volumen einer Gasmenge bei konstanter Temperatur umgekehrt proportional zum Druck ist. Gemeinsam mit dem Gay-Lussac'schen Gesetz  $V = \text{const} \cdot T$ , der Stoffmenge, der allgemeinen Gaskonstanten mit der Avogadro-Konstanten, die die Boltzmann-Konstante bilden, folgt die allgemeine Gasgleichung,

$$pV = Nk_B T. \quad (4)$$

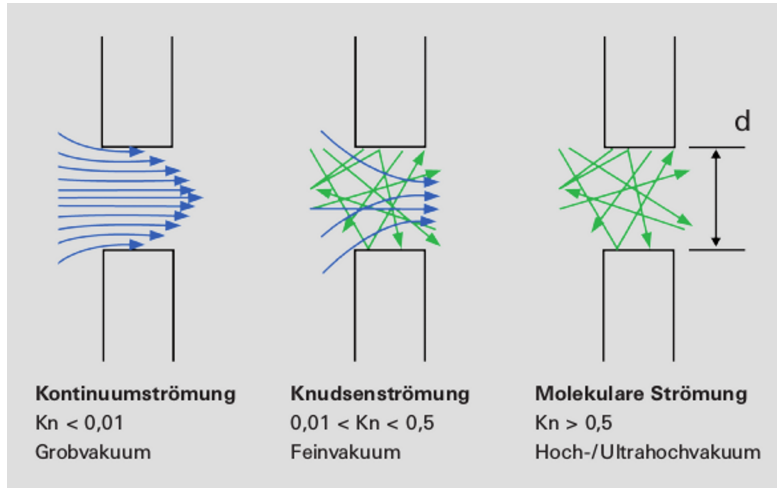
Dabei ist  $p$  der Druck,  $V$  das Volumen,  $N$  die Teilchenzahl und  $T$  die Temperatur.

## 2.3 Strömungsarten

Wenn von der Bewegung von flüssigen oder gasförmigen Teilchenmassen gesprochen wird, wird zwischen verschiedenen Arten der Bewegung unterschieden, den Strömungsarten. Das Verhältnis von mittlerer freier Weglänge  $\bar{l}$  und dem Durchmesser  $d$  des Strömungskanal wird zur Beschreibung von Strömungsarten verwendet und als Knudsenzahl bezeichnet,

$$Kn = \frac{\bar{l}}{d}. \quad (5)$$

Strömungen mit einer Knudsenzahl von  $Kn < 0,01$  werden als viskose oder Kontinuumsströmung bezeichnet und sind im Grobvakuum vorzufinden. Ab einer Knudsenzahl von  $Kn > 0,5$  wird von einer molekularen Strömung gesprochen und beschreibt Bewegungen im Hoch- und Ultrahochvakuum. Im Bereich  $(0,01 < Kn < 0,05)$  befindet sich die als Knudsenströmung bezeichnete Strömung, die sich im Feinvakuum befindet. In Abbildung 1 ist eine schematische Darstellung von verschiedenen Strömungsarten in Abhängigkeit der jeweiligen Knudsenzahl eingezeichnet.



**Abbildung 1:** Skizze der verschiedenen Strömungsarten in Abhängigkeit der Knudsenzahlen [1].

Bei viskosen Strömungen wird zusätzlich zwischen laminaren und turbulenten Strömungen unterschieden. Laminare Strömungen werden auch als Schichtströmungen bezeichnet, da die Gasteilchen immer in gleichen, parallelen Schichten zueinander transportiert werden. Wenn die Strömungsgeschwindigkeit steigt, dann lösen sich die Schichten der Gasteilchen auf und die Teilchen sind vollkommen ungeordnet. Es wird von einer turbulenten Strömung gesprochen. Die Grenze zwischen laminarer und turbulenter Strömung ist ein kontinuierlicher, der mathematisch durch die Reynoldszahl  $Re$  beschrieben wird. Sie berechnet sich über die Dichte des Fluids  $\rho$ , die Strömungsgeschwindigkeit  $\nu$ , die charakteristische Länge  $l$  und die dynamische Viskosität  $\eta$  über

$$Re = \frac{\rho \nu l}{\eta}. \quad (6)$$

Unter einer Reynoldszahl von  $Re < 2.300$  wird von laminaren und ab  $Re > 4.000$  von turbulenten Strömungen gesprochen. In Vakuum kommen turbulente Strömungen nur beim Abpumpen des Atmosphärendrucks oder bei schnellem Belüften vor. In Abbildung 2 ist eine schematische Darstellung von turbulenter und laminarer Strömung in einem Kanal dargestellt.

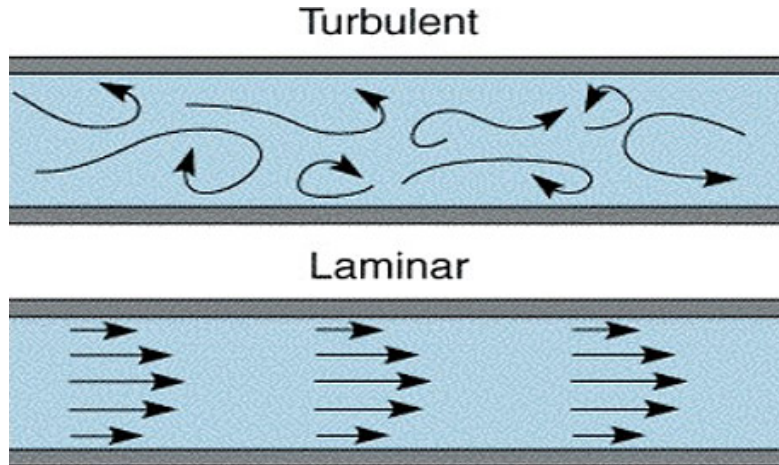


Abbildung 2: Laminare und turbulente Strömungen in einem Kanal [3].

## 2.4 Verunreinigungen

In den zu vakuumierenden Behältern sind häufig Verunreinigungen. Das können Rückstände von der Produktion der Vakuumsysteme, Öle und Fette an Oberflächen, Schraubungen und Dichtungen sein. Es können auch Stäube und Partikel zurückbleiben, die das System verunreinigen. Abscheidungen flüssiger oder fester Stoffe aus der Gasphase, die als Kondensationen bezeichnet werden, setzen sich an den Behälterwänden ab. Die größte Verunreinigung ist dabei das kondensierte Wasserdampf aus der Umgebungsluft, welches sich an den Behälterwänden absetzt. Raumluft enthält in etwa 10 g Wasserdampf pro Kubikmeter, weshalb es sich an allen Oberflächen festsetzt.

Verunreinigungen sind deshalb ein Problem, weil sie, auch wenn bereits der Großteil des Gases abgepumpt wurde, von den Wänden gelöst werden und somit der Druck nicht auf das gewünschte Arbeitsniveau sinken kann.

## 2.5 Saugvermögen und Saugleistung einer Vakuumpumpe

Wird die allgemeine Gasgleichung (4) durch die Zeit  $t$  dividiert, so folgt ein Gasstrom

$$q_{pV} = \frac{p \cdot V}{t} = \frac{mRT}{Mt}. \quad (7)$$

Wird nun eine gleiche Temperatur angenommen, dann folgt ein konstant geförderter Massenstrom, der als pV-Durchfluss bezeichnet wird. Aus diesem folgt die Saugleistung einer Pumpe

$$q_{pV} = S \cdot P = \frac{dV}{dt} \cdot p, \quad (8)$$

die, dividiert durch den Eingangsdruck, das Saugvermögen ergibt,

$$S = \frac{dV}{dt}. \quad (9)$$

Wird ein konstantes Saugvermögen angenommen, so kann durch das Ableiten der allgemeinen Gasgleichung (4) nach der Zeit  $t$  die folgende Differentialgleichung aufgestellt werden

$$\dot{p}V = -pS, \quad (10)$$

dessen Lösung die Evakuierungskurve  $p(t)$  ist, die den zeitlichen Verlauf des Druckes gemäß

$$p(t) = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{S}{V} \cdot t\right) \quad (11)$$

beschreibt.

Es muss hierbei berücksichtigt werden, dass es, aufgrund von Lecks und Ausgasen von Innenwänden, immer einen endlichen Enddruck  $p_E$  gibt. Damit ergibt sich die Gleichung

$$p(t) = (p_0 - p_E) \cdot \exp\left(-\frac{S}{V} \cdot t\right) + p_E. \quad (12)$$

## 2.6 Leckrate

Neben offensichtlichen Lecks, wie undichte Flansche oder Schraubungen, können sogar aus Metallwänden kleine Gasströme entweichen. Solche Lecks werden als virtuelle Lecks bezeichnet. Der Permeationsgasstrom  $Q_{\text{Perm}}$ , also der Strom eines Gases, der durch eine Barriere diffundiert, ist proportional zum Druckgradienten über die Wandstärke mit einer materialabhängigen Permeationskonstanten  $k_{\text{Perm}}$ ,

$$Q_{\text{Perm}} = k_{\text{Perm}} A \cdot \frac{p_a}{d}, \quad (13)$$

wobei  $p_a$  der Druck außerhalb des Behälters,  $A$  die Oberfläche des Behälters und  $d$  die Wanddicke ist. Die Leckrate  $Q_L$  ist nun der Strom des Gases, der durch die Undichtigkeiten in den Behälter strömt, ist folgendermaßen definiert

$$Q_L = \frac{\Delta p V}{\Delta t}. \quad (14)$$

Die Druckänderung während der Messzeit ist dabei mit  $\Delta p$  bezeichnet worden,  $V$  ist das Volumen des Behälters und  $\Delta t$  die Messzeit.

## 2.7 Leitwerte

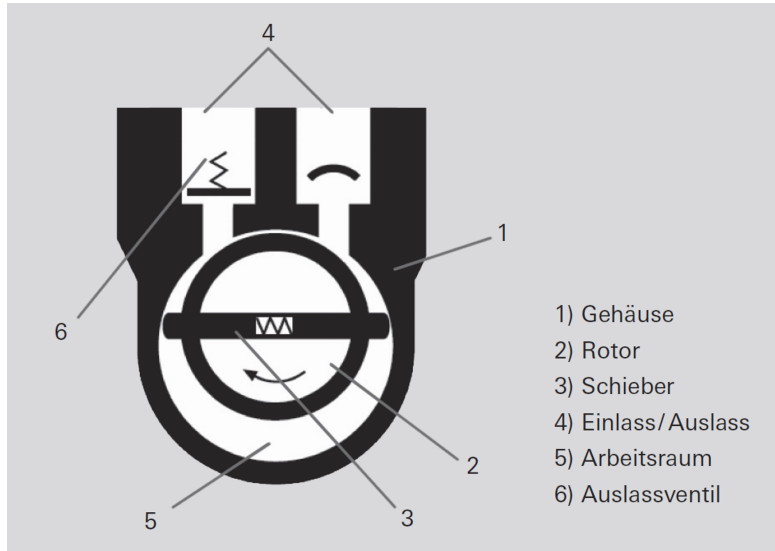
Ein vom Hersteller angegebenes Saugvermögen für eine Pumpe wird aufgrund von Strömungswiderständen in Leitungen und Verbindungsstücken nie erreicht. Das tatsächlich erreichte Saugvermögen wird als effektives Saugvermögen  $S_{\text{eff}}$  bezeichnet und ist als

$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{S_0} + \frac{1}{L} \quad (15)$$

definiert. Dabei ist  $S_0$  der vom Hersteller angegebene Wert für das Saugvermögen und  $L$  der Leitwert der Strömung. Dieser ist der reziproke Strömungswiderstand der Schläuche und Verbindungen.

## 2.8 Drehschiebervakuumpumpe

(Nach Quelle [4]) Die Drehschiebervakuumpumpe ist eine ölüberlagert Rotationsverdrängerpumpe. Ein schematischer Aufbau mit Beschriftung der einzelnen Komponenten ist in Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 3:** Schematische Darstellung einer Drehschiebervakuumpumpe [4].

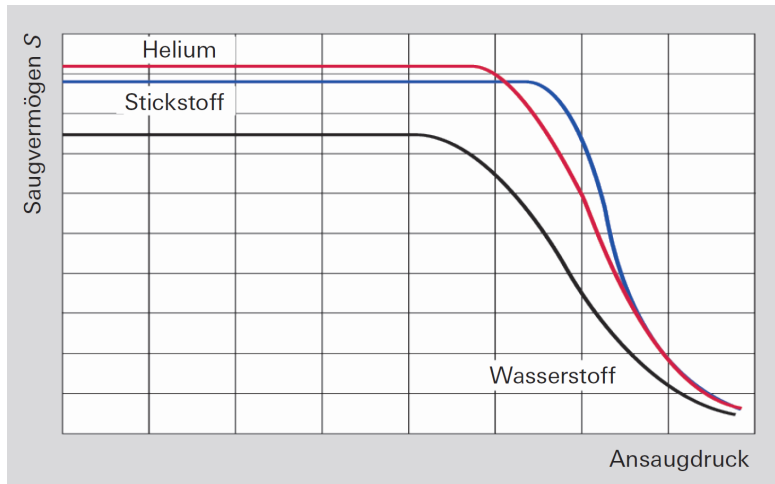
Der Rotor und der Schieber teilen den Arbeitsraum in zwei separate Räume mit variierbarem Volumen. Wenn sich der Rotor dreht, dann strömt Gas in den Schöpfraum, bis er durch den zweiten Schieber abgesperrt wird. Das eingeschlossene Gas wird dann so lange komprimiert, bis es durch den zweiten Schieber abgeschlossen wird und sich das Auslassventil gegen den Atmosphärendruck öffnet. Das Auslassventil ist ölüberlagert, wodurch beim Öffnen des Ventils eine kleine Menge Öl in den Schöpfraum dringt und den Schieber gleichzeitig gegen das Gehäuse abdichtet und schmiert. Drehschiebervakuumpumpen werden in ein- oder zweistufigen Ausführungen eingebaut und auch als Vorpumpen verwendet.

## 2.9 Turbomolekularpumpe

(Nach Quelle [5]) Turbomolekularpumpen zählen zu der Kategorie der kinetischen Vakuumpumpen und ähneln im Aufbau einer Turbine. In einem Gehäuse rotiert ein mehrstufiger, turbinenartiger Rotor mit Schaufeln, die die Luft beschleunigen und somit ein Vakuum erzeugen. Durch die Lagerung der Rotoren mit zwei mit Schmierstoffen beschichteten Kugellagern müssen beide Lager vor der Vakuumseite angeordnet werden. Turbomolekularpumpen werden zum evakuieren großer Gefäße mit Drehschiebervakuumpumpen als Vorpumpen betrieben. Durch die hohe Rotationsfrequenz von 1350 Hz ist es wichtig vor Betrieb einer Turbomolekularpumpe ein Vorvakuum zu erzeugen. Die zufälligen Kollisionen der Gasmoleküle werden dadurch unterdrückt und der Rotor wird nicht



so leicht durch Reibung beschädigt. Turbopumpen funktionieren bei einem geringeren Ansaugdruck besser, als bei einem höheren, weshalb es auch für die Effizienz besser ist ein Vorvakuum zu erzeugen. Ein typischer Verlauf des Saugvermögens in Abhängigkeit des Ansaugdruckes von Turbomolekularpumpen ist in Abbildung 4 abgebildet.



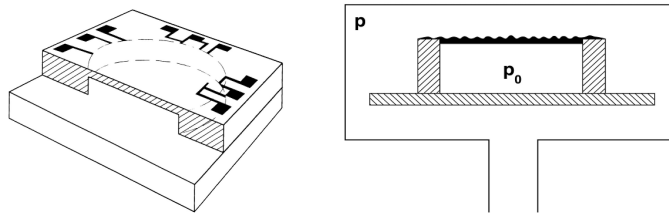
**Abbildung 4:** Typischer Verlauf des Saugvermögens einer Turbomolekularpumpe in Abhängigkeit des Ansaugdruckes [5].

## 2.10 Vakuummessgeräte

Im folgenden werden die im Versuch verwendeten Vakuummessgeräte nach Quelle [6] beschrieben.

### 2.10.1 Piezo-Vakuummeter

(Nach [7]) Ein Piezo-Vakuummeter ist ein direktes, gasartunabhängiges Membran-Vakuummeter. Bei Membran-Vakuummetern wirkt auf eine Membran der Fläche  $A$  der Druck  $p$  und lenkt die Membran proportional zum Druck aus. Im Falle eines Piezo-Vakuummeters wird der Druck durch piezo-resistive oder kapazitive Sensoren in ein elektrisches Signal umgewandelt, indem die Widerstandsänderung infolge der Membranauslenkung gemessen wird. Ein schematischer Aufbau eines Piezo-Membranvakuummeters ist in Abbildung 5 eingezeichnet. Dabei wird der Druck des evakuierten Volumens mit  $p$  und der Referenzdruck mit  $p_0$  bezeichnet.

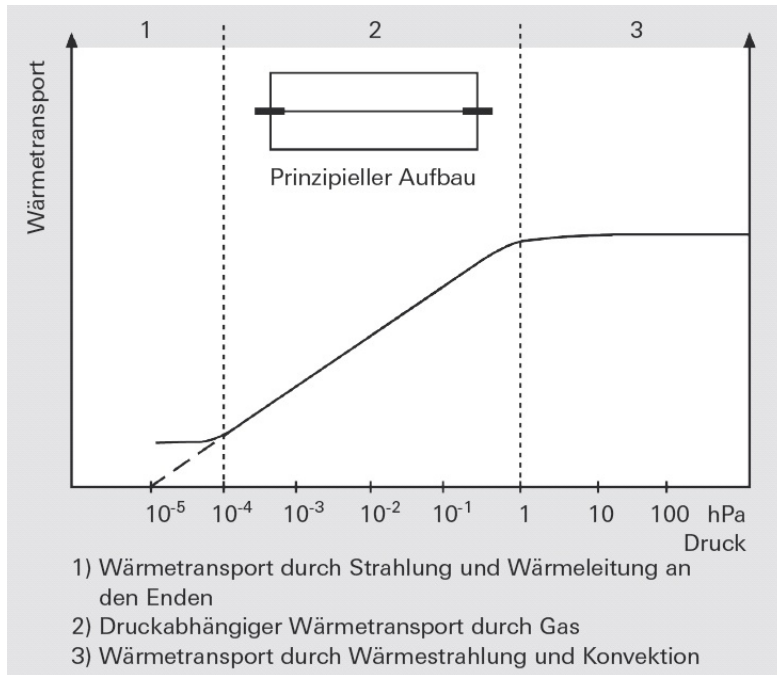


**Abbildung 5:** Schematischer Aufbau eines Piezo-Vakuummeters [7].

### 2.10.2 Pirani-Messröhre

Die Pirani-Messröhre ist ein Druckmessgerät für den Bereich von 10 hPa bis  $1 \cdot 10^{-2}$  hPa. Die Druckmessung beruht auf der linear druckabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Gasen in ebendiesem Druckbereich. Aufgrund der Wärmeleitung über die Aufhängung des Drahtes und der Wärmestrahlung ist der Zusammenhang zwischen Druck und Wärmeleitfähigkeit jedoch nicht überall linear. Bei Verringerung des Gasdruckes wird weniger Wärme abgeführt, wodurch sich die Temperatur des Drahtes und damit sein Widerstand erhöht. Da der Draht an eine Wheatstone'sche Brücke angeschlossen wird, wird ebendiese Differenz im Widerstand gemessen.

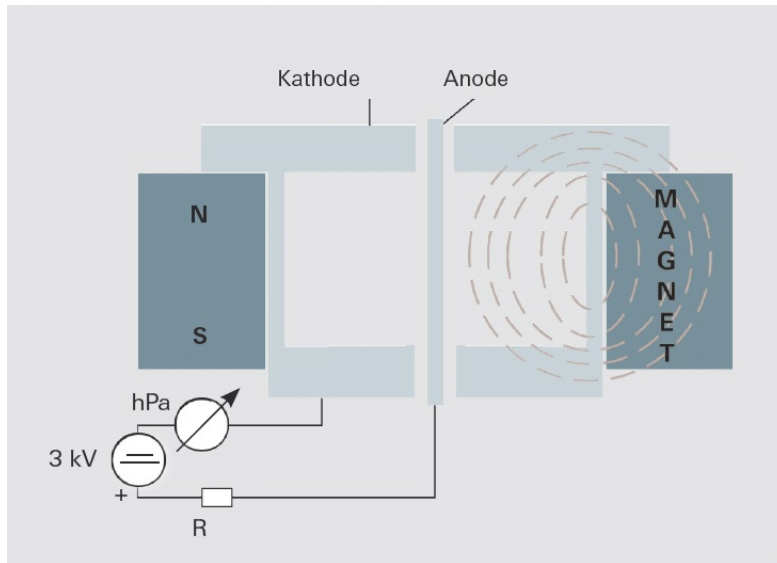
Im Bereich von hohen Drücken trägt die Konvektion zum Wärmeaustausch der Gasmoleküle bei, weshalb die Pirani-Messröhre im Bereich eines hohen Druckes nicht funktioniert. In Abbildung 6 ist die Funktionsweise einer Pirani-Messröhre aufgetragen.



**Abbildung 6:** Funktionsweise einer Pirani Messröhre [6].

### 2.10.3 Kaltkathoden-Ionisationsvakuummeter

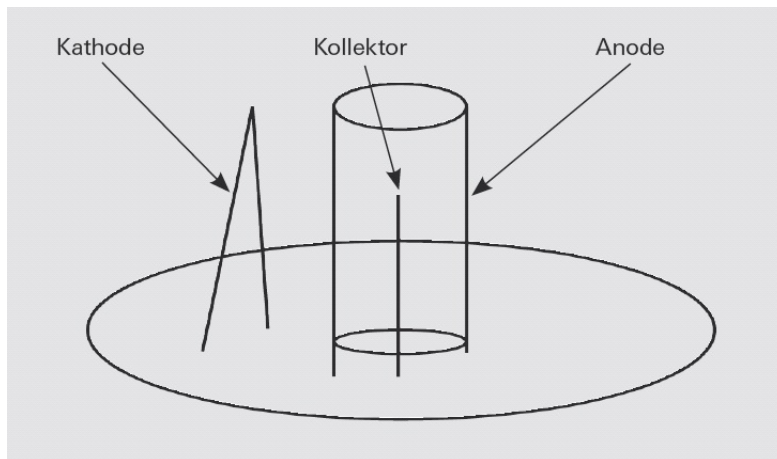
Kaltkathodenvakuummeter bestehen aus einer Anode und einer Kathode, zwischen denen über einen Vorwiderstand eine hohe Spannung angelegt wird. Die Elektronen der Kathode werden durch Feldemission emittiert und auf die Anode beschleunigt. Dabei ionisieren sie neutrale Gasteilchen, wodurch eine Gasentladung gezündet wird. Dieser Gasentladungsstrom ist ein Maß für den Druck. Da ab 1 hPa keine Elektronen das Gas ionisieren können, wird ein invertierbarer Magnetron installiert. Im Inneren der Anode befindet sich nun ein Magnetfeld, durch das sich die Elektronen auf einer Spiralbahn bewegen, wodurch die Wege der Elektronen verlängert und die Stoßwahrscheinlichkeit somit erhöht wird. Dadurch werden auch unter 1 hPa noch genügend Ionen erzeugt. In Abbildung 7 ist ein invertierbarer Magnetron nach Hobson und Redhead aufgezeichnet.



**Abbildung 7:** Aufbau eines invertierten Magnetrons [6].

#### 2.10.4 Heißkathoden-Ionisationsvakuummeter

Im Gegensatz zu Kaltkathodenvakuummeter werden bei Heißkathodenvakuummeter die Elektronen mithilfe einer beheizten Kathode über den glühelektrischen Effekt erzeugt. In der Mitte einer zylindrischen, gitterförmigen Anode ist ein dünner Draht, der die Ionen auffängt. Genau wie bei dem Kaltkathodenvakuummeter werden durch Elektronenstöße Gasmoleküle ionisiert, wodurch Drücke mit hoher Genauigkeit von bis zu  $1 \cdot 10^{-10}$  hPa gemessen werden können. Abbildung 8 zeigt den Aufbau einer Messröhre nach Bayard-Alpert.



**Abbildung 8:** Aufbau einer Bayard-Alpert Messröhre [6].

### 3 Durchführung

#### 3.1 Versuchsaufbau

Der Versuch wird nach Abbildung 9 aufgebaut.



Abbildung 9: Aufbau des Versuches [8].

Im Versuch wurde eine Drehschieberpumpe der Firma ILMVAC Typ 300883/AKD16 mit einem Saugvermögen von  $4,6 \text{ m}^3/\text{h}$  bis  $5,5 \text{ m}^3/\text{h}$  und einem Enddruck von  $2 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$  verwendet.

Die Turbomolekularpumpe SST81 von der Firma ILMVAC wird bei einer Frequenz von 1350 Hz betrieben. Die Herstellerangabe für das Saugvermögen beträgt 77 L. Als Messgeräte wurden die folgenden beiden Geräte verwendet:

1. PKR 360, Pfeiffer Vacuum, kombinierter Pirani/Kaltkathode-Sensor (2 x rote Messgeräte verbaut am Rezipienten) ausgelesen mit 2 x Anzeigegeräte TPG 361, Pfeiffer Vacuum („SingleGauge“): Messbereich:  $10 \cdot 10^{-9} \text{ hPa}$  bis  $1000 \text{ hPa}$ ; Messgenauigkeit ( $N_2$ ):  $10 \cdot 10^{-8} \text{ hPa}$  bis  $100 \text{ hPa}$  bei 30% des Messwertes und  $100 \text{ hPa}$  bis  $1000 \text{ hPa}$  bei 50% des Messwertes
2. TPG202, Pfeiffer Vacuum, kombinierter Piezo/Pirani-Sensor: Messbereich:  $1200 \text{ hPa}$  bis  $5 \cdot 10^{-4} \text{ hPa}$ ; Messgenauigkeit:  $1200 \text{ hPa}$  bis  $10 \text{ hPa}$  mit 0,3% vom Vollausschlag,  $10 \text{ hPa}$  bis  $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$  mit 10% vom Vollausschlag. Bei  $\leq 2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ : < Faktor 2 vom Messwert.

Die Volumina des Pumpstandes der Drehschieberpumpenmessung liegen bei  $(34,0 \pm 0,1) \text{ L}$  und bei der Turbopumpenmessung bei  $(33,0 \pm 0,1) \text{ L}$ .

## 3.2 Versuchsdurchführung

Als erstes wird die Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe bestimmt. Dafür wird mithilfe der Drehschieberpumpe ein Vorvakuum von 0,1 mbar erzeugt. Danach kann die Turbopumpe sicher eingeschaltet werden und die Drehzahl langsam auf die Betriebsfrequenz von 1350 Hz erhöht werden. Nachdem die Pumpe bereits einige Zeit läuft, kann die Messreihe gestartet werden. Dazu wird die Vakuumkammer bei laufender Turbopumpe und geöffnetem Handventil (V3) mithilfe des Dosierventils belüftet, bis ein Druck von etwa  $4 \cdot 10^{-3}$  mbar erreicht ist. Nun werden die Nadel- und Kugelventile möglichst schnell geschlossen und gleichzeitig die Messwerte im Abstand von 5 s aufgenommen. Die Messung wird mindestens dreimal durchgeführt.

Zur Bestimmung des Saugvermögens der Turbomolekularpumpe wird eine Leckratenmessung durchgeführt. Dazu wird mit geöffnetem Ventil (V3) mit dem Dosierventil ein Gleichgewichtsdruck und damit auch eine definierte Leckrate eingestellt. Mit schließen des Handventils oberhalb der Turbopumpe wird die Messung gestartet. Es werden vier Leckraten mit jeweils unterschiedlichem Gleichgewichtsdruck bei einer Messzeit von 120 s durchgeführt.

Die Messungen der Evakuierungskurve und die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe werden analog zu den Messungen an der Turbopumpe durchgeführt. Dort wird zum Abschiebern der Drehschieberpumpe das Ventil V1 benutzt.

## 4 Auswertung

### 4.1 Turbomolekularpumpe

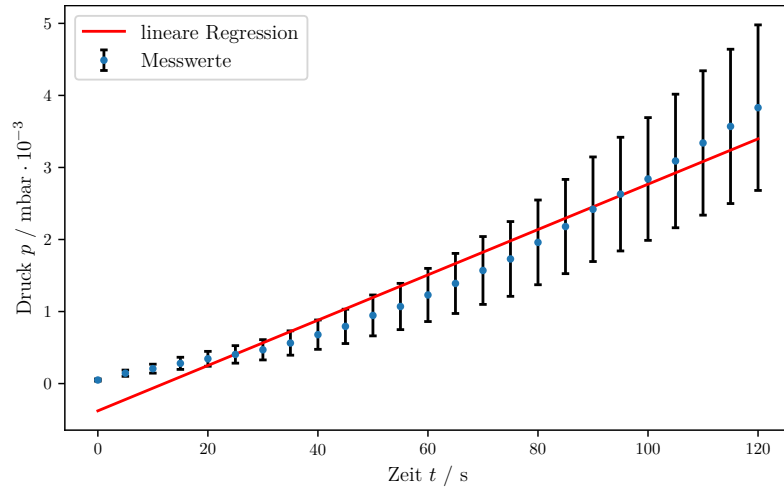
#### 4.1.1 Leckratenmessung

Für die Leckratenmessung der Turbomolekularpumpe wurden für 4 Gleichgewichtsdrücke  $p_1 \approx 5 \cdot 10^{-5}$  mbar,  $p_2 \approx 7 \cdot 10^{-5}$  mbar,  $p_3 \approx 1 \cdot 10^{-4}$  mbar und  $p_4 \approx 2 \cdot 10^{-4}$  mbar Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 2 abgebildet.

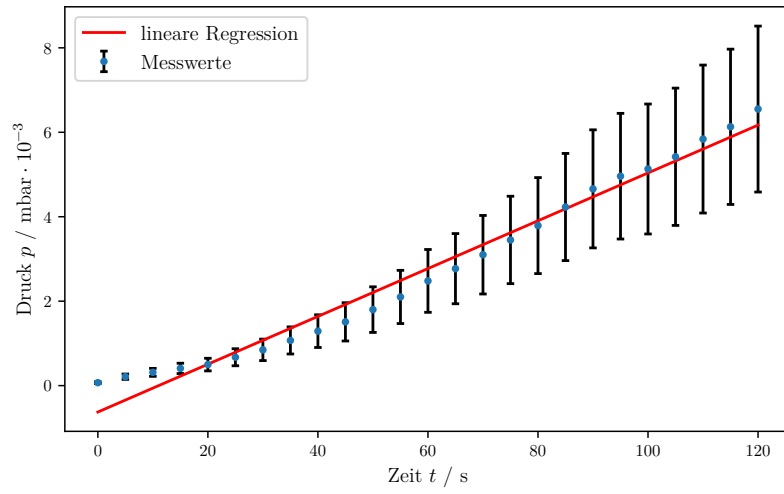
$t / \text{s}$	$p_1 / \text{mbar}$	$p_2 / \text{mbar}$	$p_3 / \text{mbar}$	$p_4 / \text{mbar}$
0	$(4,94 \pm 1,48) \cdot 10^{-5}$	$(6,95 \pm 2,09) \cdot 10^{-5}$	$(1,02 \pm 0,31) \cdot 10^{-4}$	$(2,07 \pm 0,62) \cdot 10^{-4}$
5	$(1,44 \pm 0,43) \cdot 10^{-4}$	$(2,11 \pm 0,63) \cdot 10^{-4}$	$(2,52 \pm 0,76) \cdot 10^{-4}$	$(6,41 \pm 1,92) \cdot 10^{-4}$
10	$(2,07 \pm 0,62) \cdot 10^{-4}$	$(3,14 \pm 0,94) \cdot 10^{-4}$	$(4,26 \pm 1,28) \cdot 10^{-4}$	$(1,38 \pm 0,41) \cdot 10^{-3}$
15	$(2,81 \pm 0,84) \cdot 10^{-4}$	$(4,08 \pm 1,22) \cdot 10^{-4}$	$(6,08 \pm 1,82) \cdot 10^{-4}$	$(2,51 \pm 0,75) \cdot 10^{-3}$
20	$(3,44 \pm 1,03) \cdot 10^{-4}$	$(4,98 \pm 1,49) \cdot 10^{-4}$	$(9,12 \pm 2,74) \cdot 10^{-4}$	$(3,60 \pm 1,08) \cdot 10^{-3}$
25	$(4,05 \pm 1,22) \cdot 10^{-4}$	$(6,72 \pm 2,02) \cdot 10^{-4}$	$(1,21 \pm 0,36) \cdot 10^{-3}$	$(4,99 \pm 1,50) \cdot 10^{-3}$
30	$(4,69 \pm 1,40) \cdot 10^{-4}$	$(8,47 \pm 2,54) \cdot 10^{-4}$	$(1,63 \pm 0,49) \cdot 10^{-3}$	$(6,08 \pm 1,82) \cdot 10^{-3}$
35	$(5,63 \pm 1,69) \cdot 10^{-4}$	$(1,07 \pm 0,32) \cdot 10^{-3}$	$(2,09 \pm 0,63) \cdot 10^{-3}$	$(8,01 \pm 2,40) \cdot 10^{-3}$
40	$(6,79 \pm 2,04) \cdot 10^{-4}$	$(1,29 \pm 0,38) \cdot 10^{-3}$	$(2,61 \pm 0,78) \cdot 10^{-3}$	$(9,89 \pm 2,97) \cdot 10^{-3}$
45	$(7,94 \pm 2,38) \cdot 10^{-4}$	$(1,51 \pm 0,45) \cdot 10^{-3}$	$(3,07 \pm 0,92) \cdot 10^{-3}$	$(1,07 \pm 0,32) \cdot 10^{-2}$
50	$(9,46 \pm 2,84) \cdot 10^{-4}$	$(1,80 \pm 0,54) \cdot 10^{-3}$	$(3,59 \pm 1,08) \cdot 10^{-3}$	$(1,16 \pm 0,35) \cdot 10^{-2}$
55	$(1,07 \pm 0,32) \cdot 10^{-3}$	$(2,10 \pm 0,63) \cdot 10^{-3}$	$(4,22 \pm 1,27) \cdot 10^{-3}$	$(1,25 \pm 0,38) \cdot 10^{-2}$
60	$(1,23 \pm 0,37) \cdot 10^{-3}$	$(2,48 \pm 0,74) \cdot 10^{-3}$	$(4,87 \pm 1,46) \cdot 10^{-3}$	$(1,38 \pm 0,41) \cdot 10^{-2}$
65	$(1,39 \pm 0,42) \cdot 10^{-3}$	$(2,77 \pm 0,83) \cdot 10^{-3}$	$(5,13 \pm 1,54) \cdot 10^{-3}$	$(1,48 \pm 0,44) \cdot 10^{-2}$
70	$(1,57 \pm 0,47) \cdot 10^{-3}$	$(3,10 \pm 0,93) \cdot 10^{-3}$	$(5,68 \pm 1,70) \cdot 10^{-3}$	$(1,60 \pm 0,48) \cdot 10^{-2}$
75	$(1,73 \pm 0,52) \cdot 10^{-3}$	$(3,45 \pm 1,04) \cdot 10^{-3}$	$(6,25 \pm 1,88) \cdot 10^{-3}$	$(1,75 \pm 0,53) \cdot 10^{-2}$
80	$(1,96 \pm 0,59) \cdot 10^{-3}$	$(3,79 \pm 1,14) \cdot 10^{-3}$	$(6,89 \pm 2,07) \cdot 10^{-3}$	$(1,91 \pm 0,57) \cdot 10^{-2}$
85	$(2,18 \pm 0,65) \cdot 10^{-3}$	$(4,23 \pm 1,27) \cdot 10^{-3}$	$(7,57 \pm 2,27) \cdot 10^{-3}$	$(2,02 \pm 0,61) \cdot 10^{-2}$
90	$(2,42 \pm 0,73) \cdot 10^{-3}$	$(4,66 \pm 1,40) \cdot 10^{-3}$	$(8,66 \pm 2,60) \cdot 10^{-3}$	$(2,12 \pm 0,64) \cdot 10^{-2}$
95	$(2,63 \pm 0,79) \cdot 10^{-3}$	$(4,96 \pm 1,49) \cdot 10^{-3}$	$(9,24 \pm 2,77) \cdot 10^{-3}$	$(2,22 \pm 0,67) \cdot 10^{-2}$
100	$(2,84 \pm 0,85) \cdot 10^{-3}$	$(5,13 \pm 1,54) \cdot 10^{-3}$	$(1,01 \pm 0,30) \cdot 10^{-2}$	$(2,31 \pm 0,69) \cdot 10^{-2}$
105	$(3,09 \pm 0,93) \cdot 10^{-3}$	$(5,42 \pm 1,63) \cdot 10^{-3}$	$(1,05 \pm 0,32) \cdot 10^{-2}$	$(2,44 \pm 0,76) \cdot 10^{-2}$
110	$(3,34 \pm 1,00) \cdot 10^{-3}$	$(5,84 \pm 1,75) \cdot 10^{-3}$	$(1,07 \pm 0,32) \cdot 10^{-2}$	$(2,54 \pm 0,76) \cdot 10^{-2}$
115	$(3,57 \pm 1,07) \cdot 10^{-3}$	$(6,13 \pm 1,84) \cdot 10^{-3}$	$(1,11 \pm 0,33) \cdot 10^{-2}$	$(2,65 \pm 0,79) \cdot 10^{-2}$
120	$(3,83 \pm 1,15) \cdot 10^{-3}$	$(6,55 \pm 1,97) \cdot 10^{-3}$	$(1,16 \pm 0,35) \cdot 10^{-2}$	$(2,78 \pm 0,83) \cdot 10^{-2}$

**Tabelle 2:** Messwerte zur Leckratenmessung der Turbomolekularpumpe bei Gleichgewichtsdrücken  $p_1 = (4,94 \pm 1,48) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$ ,  $p_2 = (6,95 \pm 2,09) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$ ,  $p_3 = (1,02 \pm 0,31) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$  und  $p_4 = (2,07 \pm 0,62) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$ , mit jeweils dem systematischen Fehler der Messgröße.

Die Messwerte sind in Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12 und Abbildung 13 graphisch dargestellt.

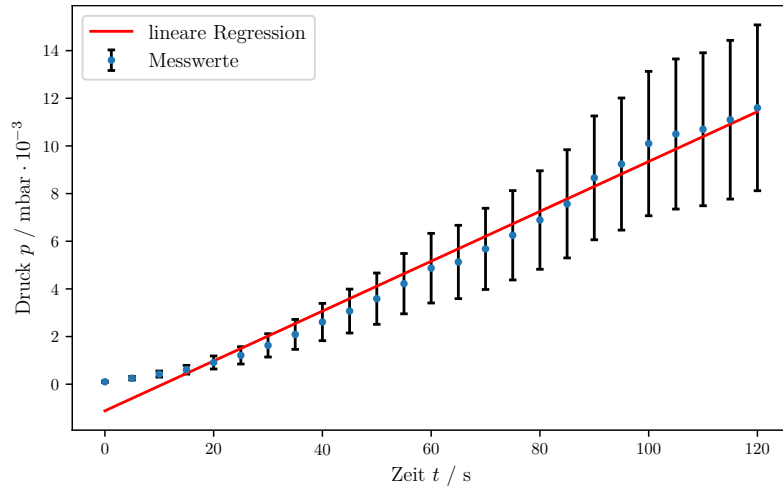


**Abbildung 10:** Grafische Darstellung der Messdaten von  $p_1 = (4,94 \pm 1,48) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$ .

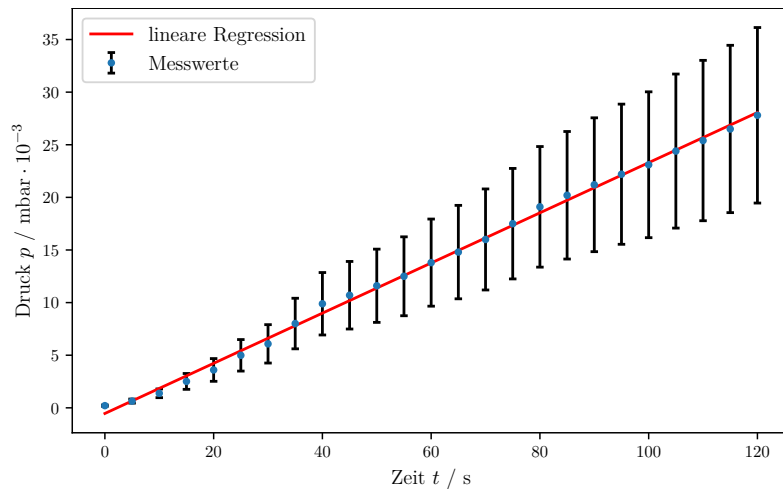


**Abbildung 11:** Grafische Darstellung der Messdaten von  $p_2 = (6,95 \pm 2,09) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$ .





**Abbildung 12:** Grafische Darstellung der Messdaten von  $p_3 = (1,02 \pm 0,31) \cdot 10^{-4}$  mbar.



**Abbildung 13:** Grafische Darstellung der Messdaten von  $p_4 = (2,07 \pm 0,62) \cdot 10^{-4}$  mbar.

Es wurde jeweils eine lineare Ausgleichsrechnung der Form

$$y(x) = mx + b \quad (16)$$

durchgeführt. Über den Steigungsparameter  $m$  kann nun jeweils das Saugvermögen  $S$ , durch  $S = \frac{V}{p_G} m$  berechnet werden. Dafür wird ein Volumen von  $V = (33 \pm 3,3 \text{ L})$  angenommen.

Abbildung 10 :

$$\begin{aligned} p_1 &= (4,94 \pm 1,48) \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \\ m_1 &= (3,15 \pm 0,14) \cdot 10^{-5} \text{ mbar/s} \\ S_1 &= (21 \pm 7) \text{ l/s} \end{aligned}$$

Abbildung 11 :

$$\begin{aligned}p_2 &= (6,95 \pm 2,09) \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \\m_2 &= (5,66 \pm 0,18) \cdot 10^{-5} \text{ mbar/s} \\S_2 &= (27 \pm 9) \text{ l/s}\end{aligned}$$

Abbildung 12 :

$$\begin{aligned}p_3 &= (1,02 \pm 0,31) \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \\m_3 &= (1,05 \pm 0,03) \cdot 10^{-4} \text{ mbar/s} \\S_3 &= (34 \pm 14) \text{ l/s}\end{aligned}$$

Abbildung 13 :

$$\begin{aligned}p_4 &= (2,07 \pm 0,62) \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \\m_4 &= (2,38 \pm 0,02) \cdot 10^{-4} \text{ mbar/s} \\S_4 &= (38 \pm 13) \text{ l/s}\end{aligned}$$

#### 4.1.2 Evakuierungsmessung

Die Messwerte der Evakuierungsmessung der Turbomolekularpumpe sind in Tabelle 3 abgebildet. Die Messung wurde drei Mal mit einem Anfangsdruck von  $p \approx 5 \cdot 10^{-3}$  mbar durchgeführt und daraus der Mittelwert  $p_m$  gebildet.

$t / \text{s}$	$p_1 / \text{mbar}$	$p_2 / \text{mbar}$	$p_3 / \text{mbar}$	$p_m / \text{mbar}$
0	$(5,01 \pm 1,50) \cdot 10^{-3}$	$(4,98 \pm 1,49) \cdot 10^{-3}$	$(5,03 \pm 1,51) \cdot 10^{-3}$	$(5,01 \pm 0,015) \cdot 10^{-3}$
5	$(1,65 \pm 0,50) \cdot 10^{-3}$	$(3,47 \pm 1,04) \cdot 10^{-4}$	$(1,76 \pm 0,53) \cdot 10^{-3}$	$(1,25 \pm 0,46) \cdot 10^{-3}$
6	$(1,23 \pm 0,37) \cdot 10^{-3}$	$(2,98 \pm 0,89) \cdot 10^{-4}$	$(6,85 \pm 2,05) \cdot 10^{-4}$	$(7,38 \pm 2,71) \cdot 10^{-4}$
7	$(6,91 \pm 2,07) \cdot 10^{-4}$	$(2,23 \pm 0,67) \cdot 10^{-4}$	$(6,11 \pm 1,83) \cdot 10^{-4}$	$(5,08 \pm 1,45) \cdot 10^{-4}$
8	$(4,37 \pm 1,31) \cdot 10^{-4}$	$(1,56 \pm 0,47) \cdot 10^{-4}$	$(3,72 \pm 1,12) \cdot 10^{-4}$	$(3,22 \pm 0,85) \cdot 10^{-4}$
9	$(3,10 \pm 0,93) \cdot 10^{-4}$	$(1,13 \pm 0,34) \cdot 10^{-4}$	$(2,73 \pm 0,82) \cdot 10^{-4}$	$(2,32 \pm 0,61) \cdot 10^{-4}$
10	$(2,67 \pm 0,80) \cdot 10^{-4}$	$(8,79 \pm 2,64) \cdot 10^{-5}$	$(2,03 \pm 0,61) \cdot 10^{-4}$	$(1,86 \pm 0,53) \cdot 10^{-4}$
11	$(1,67 \pm 0,50) \cdot 10^{-4}$	$(7,19 \pm 2,16) \cdot 10^{-5}$	$(1,44 \pm 0,43) \cdot 10^{-4}$	$(1,28 \pm 0,29) \cdot 10^{-4}$
12	$(1,29 \pm 0,39) \cdot 10^{-4}$	$(5,75 \pm 1,73) \cdot 10^{-5}$	$(1,05 \pm 0,32) \cdot 10^{-4}$	$(9,72 \pm 2,10) \cdot 10^{-5}$
13	$(9,21 \pm 2,76) \cdot 10^{-5}$	$(4,29 \pm 1,29) \cdot 10^{-5}$	$(8,79 \pm 2,64) \cdot 10^{-5}$	$(7,43 \pm 1,58) \cdot 10^{-5}$
14	$(8,58 \pm 2,57) \cdot 10^{-5}$	$(3,63 \pm 1,09) \cdot 10^{-5}$	$(6,33 \pm 1,90) \cdot 10^{-5}$	$(6,18 \pm 1,43) \cdot 10^{-5}$
15	$(5,92 \pm 1,78) \cdot 10^{-5}$	$(2,93 \pm 0,88) \cdot 10^{-5}$	$(5,25 \pm 1,58) \cdot 10^{-5}$	$(4,70 \pm 0,91) \cdot 10^{-5}$
20	$(2,47 \pm 0,74) \cdot 10^{-5}$	$(1,49 \pm 0,45) \cdot 10^{-5}$	$(2,06 \pm 0,62) \cdot 10^{-5}$	$(2,01 \pm 0,29) \cdot 10^{-5}$
25	$(1,46 \pm 0,44) \cdot 10^{-5}$	$(1,15 \pm 0,35) \cdot 10^{-5}$	$(1,30 \pm 0,39) \cdot 10^{-5}$	$(1,30 \pm 0,09) \cdot 10^{-5}$
30	$(1,18 \pm 0,35) \cdot 10^{-5}$	$(1,01 \pm 0,30) \cdot 10^{-5}$	$(1,08 \pm 0,32) \cdot 10^{-5}$	$(1,09 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$
35	$(1,04 \pm 0,31) \cdot 10^{-5}$	$(9,34 \pm 2,80) \cdot 10^{-6}$	$(9,65 \pm 2,90) \cdot 10^{-6}$	$(9,80 \pm 0,32) \cdot 10^{-6}$
40	$(9,63 \pm 2,89) \cdot 10^{-6}$	$(8,65 \pm 2,60) \cdot 10^{-6}$	$(8,90 \pm 2,67) \cdot 10^{-6}$	$(9,06 \pm 0,30) \cdot 10^{-6}$
45	$(9,10 \pm 2,73) \cdot 10^{-6}$	$(8,21 \pm 2,46) \cdot 10^{-6}$	$(8,40 \pm 2,52) \cdot 10^{-6}$	$(8,57 \pm 0,27) \cdot 10^{-6}$
50	$(8,59 \pm 2,58) \cdot 10^{-6}$	$(7,78 \pm 2,33) \cdot 10^{-6}$	$(7,92 \pm 2,38) \cdot 10^{-6}$	$(8,10 \pm 0,25) \cdot 10^{-6}$
55	$(8,17 \pm 2,45) \cdot 10^{-6}$	$(7,50 \pm 2,25) \cdot 10^{-6}$	$(7,55 \pm 2,27) \cdot 10^{-6}$	$(7,74 \pm 0,22) \cdot 10^{-6}$
60	$(7,80 \pm 2,34) \cdot 10^{-6}$	$(7,21 \pm 2,13) \cdot 10^{-6}$	$(7,23 \pm 2,17) \cdot 10^{-6}$	$(7,41 \pm 0,20) \cdot 10^{-6}$
65	$(7,52 \pm 2,26) \cdot 10^{-6}$	$(6,97 \pm 2,09) \cdot 10^{-6}$	$(6,98 \pm 2,09) \cdot 10^{-6}$	$(7,16 \pm 0,19) \cdot 10^{-6}$
70	$(7,27 \pm 2,18) \cdot 10^{-6}$	$(6,79 \pm 2,04) \cdot 10^{-6}$	$(6,78 \pm 2,03) \cdot 10^{-6}$	$(6,95 \pm 0,17) \cdot 10^{-6}$
75	$(7,05 \pm 2,12) \cdot 10^{-6}$	$(6,61 \pm 1,98) \cdot 10^{-6}$	$(6,55 \pm 1,97) \cdot 10^{-6}$	$(6,74 \pm 0,16) \cdot 10^{-6}$
80	$(6,89 \pm 2,07) \cdot 10^{-6}$	$(6,43 \pm 1,93) \cdot 10^{-6}$	$(6,40 \pm 1,92) \cdot 10^{-6}$	$(6,57 \pm 0,16) \cdot 10^{-6}$
85	$(6,71 \pm 2,01) \cdot 10^{-6}$	$(6,27 \pm 1,88) \cdot 10^{-6}$	$(6,23 \pm 1,87) \cdot 10^{-6}$	$(6,40 \pm 0,16) \cdot 10^{-6}$
90	$(6,57 \pm 1,97) \cdot 10^{-6}$	$(6,16 \pm 1,85) \cdot 10^{-6}$	$(6,12 \pm 1,84) \cdot 10^{-6}$	$(6,28 \pm 0,15) \cdot 10^{-6}$
95	$(6,40 \pm 1,92) \cdot 10^{-6}$	$(6,02 \pm 1,81) \cdot 10^{-6}$	$(6,00 \pm 1,80) \cdot 10^{-6}$	$(6,14 \pm 0,13) \cdot 10^{-6}$
100	$(6,28 \pm 1,88) \cdot 10^{-6}$	$(5,93 \pm 1,78) \cdot 10^{-6}$	$(5,87 \pm 1,76) \cdot 10^{-6}$	$(6,03 \pm 0,13) \cdot 10^{-6}$
105	$(6,15 \pm 1,85) \cdot 10^{-6}$	$(5,83 \pm 1,75) \cdot 10^{-6}$	$(5,76 \pm 1,73) \cdot 10^{-6}$	$(5,91 \pm 0,12) \cdot 10^{-6}$
110	$(6,06 \pm 1,82) \cdot 10^{-6}$	$(5,74 \pm 1,72) \cdot 10^{-6}$	$(5,67 \pm 1,70) \cdot 10^{-6}$	$(5,82 \pm 0,12) \cdot 10^{-6}$
115	$(5,99 \pm 1,80) \cdot 10^{-6}$	$(5,65 \pm 1,70) \cdot 10^{-6}$	$(5,59 \pm 1,68) \cdot 10^{-6}$	$(5,74 \pm 0,13) \cdot 10^{-6}$
120	$(5,87 \pm 1,76) \cdot 10^{-6}$	$(5,59 \pm 1,68) \cdot 10^{-6}$	$(5,51 \pm 1,65) \cdot 10^{-6}$	$(5,66 \pm 0,11) \cdot 10^{-6}$

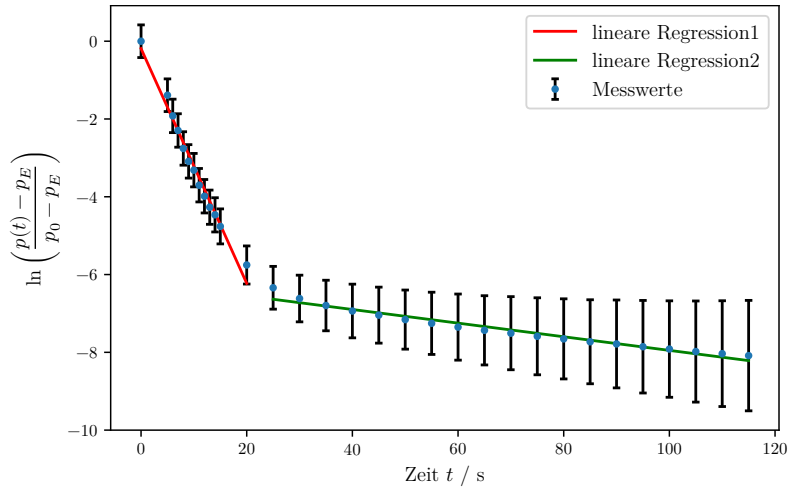
**Tabelle 3:** Messwerte für die Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe mit jeweils dem systematischen Fehler der Messgröße und dem statistischen Fehler des Mittelwerts.

Da der statistische Fehler des Mittelwerts klein gegen den systematischen Fehler ist, wird im Folgenden lediglich der systematische Fehler berücksichtigt. Die Daten der Mittelwertsmessung sind in Tabelle 4 als  $\ln\left(\frac{p(t)-p_E}{p_0-p_E}\right)$  abgebildet. Dabei sind  $p_0 = (5,01 \pm 1,50) \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$  und  $p_E = (4,2 \pm 1,26) \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$ .

$t/s$	$\ln(\frac{p(t)-p_0}{p_0-p_E})$
0	0,0
5	$-1,39 \pm 0,42$
6	$-1,92 \pm 0,43$
7	$-2,3 \pm 0,43$
8	$-2,76 \pm 0,43$
9	$-3,09 \pm 0,43$
10	$-3,32 \pm 0,43$
11	$-3,7 \pm 0,43$
12	$-3,99 \pm 0,43$
13	$-4,27 \pm 0,44$
14	$-4,46 \pm 0,44$
15	$-4,76 \pm 0,45$
20	$-5,75 \pm 0,49$
25	$-6,34 \pm 0,55$
30	$-6,62 \pm 0,6$
35	$-6,8 \pm 0,65$
40	$-6,94 \pm 0,69$
45	$-7,04 \pm 0,72$
50	$-7,16 \pm 0,76$
55	$-7,25 \pm 0,8$
60	$-7,35 \pm 0,85$
65	$-7,43 \pm 0,89$
70	$-7,51 \pm 0,94$
75	$-7,59 \pm 0,99$
80	$-7,65 \pm 1,03$
85	$-7,73 \pm 1,08$
90	$-7,78 \pm 1,13$
95	$-7,86 \pm 1,19$
100	$-7,92 \pm 1,24$
105	$-7,98 \pm 1,3$
110	$-8,03 \pm 1,36$
115	$-8,08 \pm 1,42$
120	$-8,14 \pm 1,48$

**Tabelle 4:**  $\ln(\frac{p(t)-p_0}{p_0-p_E})$  bestimmt aus den Messwerten der Evakuierungsmessung.

Sie sind ebenfalls in Abbildung 14 graphisch dargestellt.



**Abbildung 14:** Logarithmische Darstellung der Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe.

Es wurden erneut lineare Ausgleichsrechnungen der Form

$$y(x) = mx + b \quad (17)$$

durchgeführt, wobei die Messdaten in zwei Bereiche mit unterschiedlichen Steigungen unterteilt wurden. Aus den Regressionsparametern  $m$  können dann die Saugvermögen in den Bereichen über  $S = -mV$  bestimmt werden.

Bereich 1:  $5 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \geq p \geq 2 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$

$$m_1 = -(0,302 \pm 0,012) \text{ 1/s}$$

$$S_1 = (10,0 \pm 1,1) \text{ l/s}$$

Bereich 2:  $2 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \geq p \geq 5 \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$

$$m_2 = -(0,018 \pm 0,001) \text{ 1/s}$$

$$S_2 = (0,59 \pm 0,07) \text{ l/s}$$

## 4.2 Drehschieberpumpe

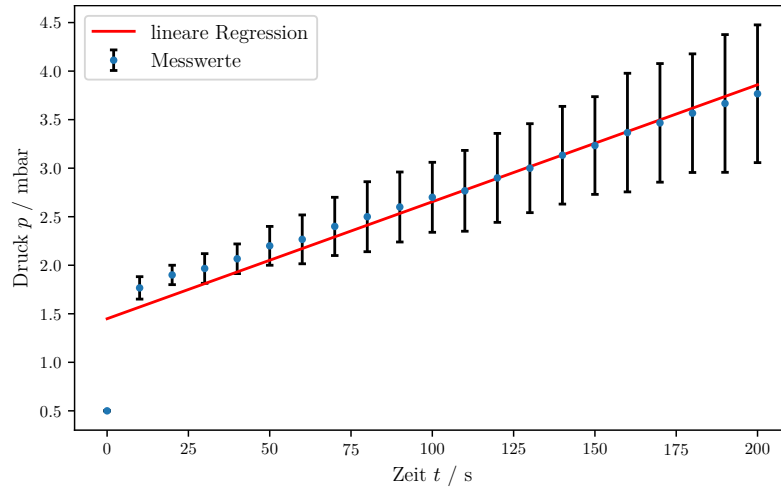
### 4.2.1 Leckratenmessung

Für die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe wurden ebenfalls 4 Gleichgewichtsdrücke vermessen. Für den ersten Wert von  $p_1 \approx 0,5 \text{ mbar}$  wurde die Messung drei mal durchgeführt und daraus der Mittelwert gebildet. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 5 abgebildet.

$t / \text{s}$	$p_1 / \text{mbar}$	$p_2 / \text{mbar}$	$p_3 / \text{mbar}$	$p_m / \text{mbar}$
0	$0,5 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,01$
10	$1,9 \pm 0,19$	$1,7 \pm 0,17$	$1,7 \pm 0,17$	$1,77 \pm 0,07$
20	$2,0 \pm 0,20$	$1,9 \pm 0,19$	$1,8 \pm 0,18$	$1,9 \pm 0,06$
30	$2,1 \pm 0,21$	$2,0 \pm 0,20$	$1,8 \pm 0,18$	$1,97 \pm 0,09$
40	$2,2 \pm 0,22$	$2,1 \pm 0,21$	$1,9 \pm 0,19$	$2,07 \pm 0,09$
50	$2,4 \pm 0,24$	$2,2 \pm 0,22$	$2,0 \pm 0,20$	$2,2 \pm 0,12$
60	$2,5 \pm 0,25$	$2,3 \pm 0,23$	$2,0 \pm 0,20$	$2,27 \pm 0,15$
70	$2,7 \pm 0,27$	$2,4 \pm 0,24$	$2,1 \pm 0,21$	$2,4 \pm 0,17$
80	$2,8 \pm 0,28$	$2,6 \pm 0,26$	$2,1 \pm 0,21$	$2,5 \pm 0,21$
90	$2,9 \pm 0,29$	$2,7 \pm 0,27$	$2,2 \pm 0,22$	$2,6 \pm 0,21$
100	$3,0 \pm 0,30$	$2,8 \pm 0,28$	$2,3 \pm 0,23$	$2,7 \pm 0,21$
110	$3,1 \pm 0,31$	$2,9 \pm 0,29$	$2,3 \pm 0,23$	$2,77 \pm 0,24$
120	$3,3 \pm 0,33$	$3,0 \pm 0,30$	$2,4 \pm 0,24$	$2,9 \pm 0,26$
130	$3,4 \pm 0,34$	$3,1 \pm 0,31$	$2,5 \pm 0,25$	$3,0 \pm 0,26$
140	$3,6 \pm 0,36$	$3,2 \pm 0,32$	$2,6 \pm 0,26$	$3,13 \pm 0,29$
150	$3,7 \pm 0,37$	$3,3 \pm 0,33$	$2,7 \pm 0,27$	$3,23 \pm 0,29$
160	$3,9 \pm 0,39$	$3,5 \pm 0,35$	$2,7 \pm 0,27$	$3,37 \pm 0,35$
170	$4,0 \pm 0,40$	$3,6 \pm 0,36$	$2,8 \pm 0,28$	$3,47 \pm 0,35$
180	$4,1 \pm 0,41$	$3,7 \pm 0,37$	$2,9 \pm 0,29$	$3,57 \pm 0,35$
190	$4,3 \pm 0,43$	$3,8 \pm 0,38$	$2,9 \pm 0,29$	$3,67 \pm 0,41$
200	$4,4 \pm 0,44$	$3,9 \pm 0,39$	$3,0 \pm 0,30$	$3,77 \pm 0,41$

**Tabelle 5:** Messwerte für die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit jeweils dem systematischen Fehler der Messgröße und dem statistischen Fehler des Mittelwerts.

Da der statistische Fehler erneut klein gegen den systematischen Fehler ist, wird lediglich der systematische Fehler berücksichtigt. Die Werte des Mittelwerts sind in Abbildung 15 graphisch dargestellt.



**Abbildung 15:** Grafische Darstellung der Messdaten von  $p_m = (0,5 \pm 0,05)$  mbar.

Identisch zur Turbomolekularpumpe kann über die Regressionsparameter  $m$  das Saugvermögen bestimmt werden.

Abbildung 15 :

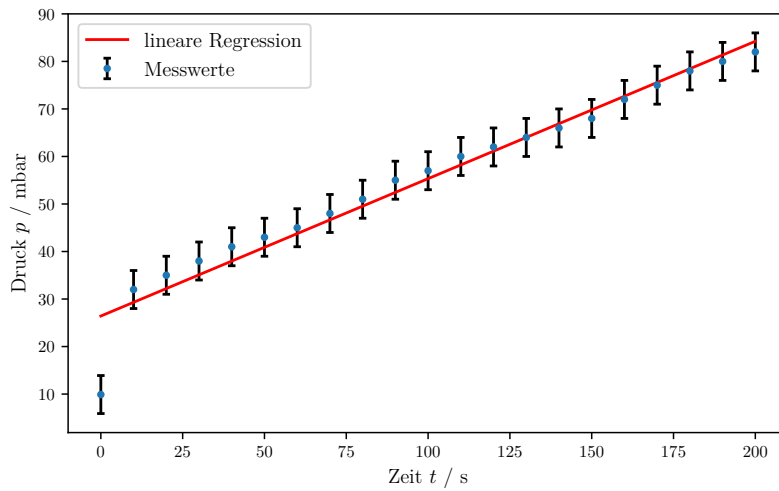
$$\begin{aligned}
 p_m &= (0,50 \pm 0,15) \text{ mbar} \\
 m_m &= (0,012 \pm 0,001) \text{ mbar/s} \\
 S_m &= (0,82 \pm 0,27) \text{ l/s}
 \end{aligned}$$

Die restlichen Messwerte für  $p_1 \approx 10$  mbar,  $p_2 \approx 50$  mbar und  $p_3 \approx 100$  mbar sind in Tabelle 6 zu finden.

$t / \text{s}$	$p_1 / \text{mbar}$	$p_2 / \text{mbar}$	$p_3 / \text{mbar}$
0	$9,9 \pm 4$	$50,3 \pm 4$	$99,7 \pm 4$
10	$32,0 \pm 4$	$76,3 \pm 4$	$143,8 \pm 4$
20	$35,0 \pm 4$	$94,2 \pm 4$	$181,7 \pm 4$
30	$38,0 \pm 4$	$112,2 \pm 4$	$214,7 \pm 4$
40	$41,0 \pm 4$	$130,0 \pm 4$	$249,0 \pm 4$
50	$43,0 \pm 4$	$147,9 \pm 4$	$283,4 \pm 4$
60	$45,0 \pm 4$	$165,8 \pm 4$	$317,7 \pm 4$
70	$48,0 \pm 4$	$183,7 \pm 4$	$351,8 \pm 4$
80	$51,0 \pm 4$	$202,5 \pm 4$	$382,5 \pm 4$
90	$55,0 \pm 4$	$220,4 \pm 4$	$416,5 \pm 4$
100	$57,0 \pm 4$	$238,2 \pm 4$	$450,4 \pm 4$
110	$60,0 \pm 4$	$256,1 \pm 4$	$487,2 \pm 4$
120	$62,0 \pm 4$	$274,0 \pm 4$	$520,3 \pm 4$
130	$64,0 \pm 4$	$291,9 \pm 4$	$553,1 \pm 4$
140	$66,0 \pm 4$	$309,7 \pm 4$	$585,5 \pm 4$
150	$68,0 \pm 4$	$327,5 \pm 4$	$617,1 \pm 4$
160	$72,0 \pm 4$	$345,5 \pm 4$	$648,0 \pm 4$
170	$75,0 \pm 4$	$363,3 \pm 4$	$678,0 \pm 4$
180	$78,0 \pm 4$	$381,2 \pm 4$	$707,1 \pm 4$
190	$80,0 \pm 4$	$399,0 \pm 4$	$735,2 \pm 4$
200	$82,0 \pm 4$	$416,6 \pm 4$	$762,2 \pm 4$

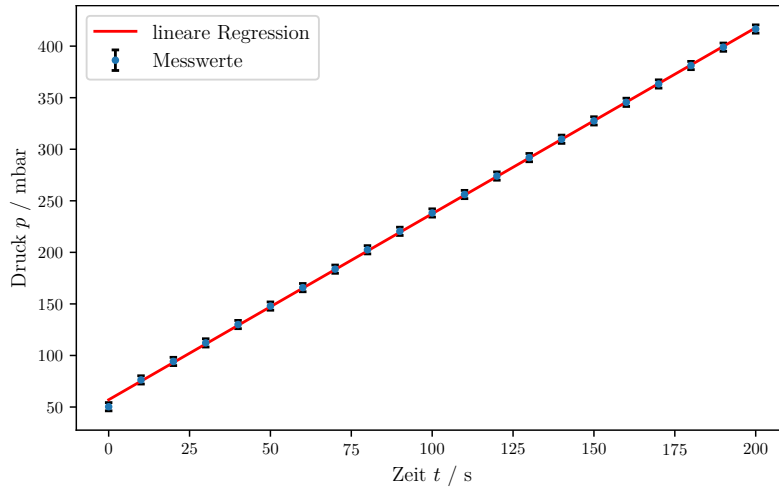
**Tabelle 6:** Messwerte für die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit jeweils dem systematischen Fehler.

Ebenfalls Identisch zur Turbomolekularpumpe sind die restlichen Messwerte in Abbildung 16, Abbildung 17 und Abbildung 18 graphisch dargestellt.

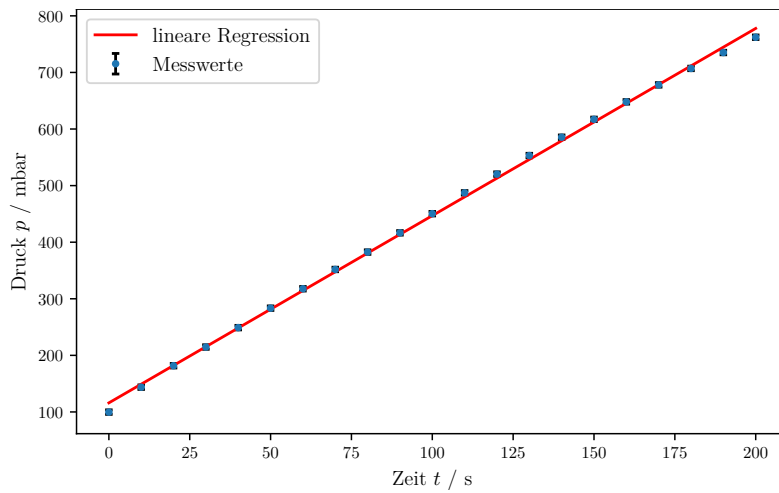


**Abbildung 16:** Grafische Darstellung der Messdaten von  $p_1 = (9,9 \pm 4) \text{ mbar}$ .





**Abbildung 17:** Grafische Darstellung der Messdaten von  $p_2 = (50,3 \pm 4)$  mbar.



**Abbildung 18:** Grafische Darstellung der Messdaten von  $p_3 = (99,7 \pm 4)$  mbar.

Die Steigungsparameter  $m$  werden erneut genutzt, um über  $S = \frac{V}{p_G} m$  das Saugvermögen  $S$  zu berechnen. Hierbei wird allerdings ein Volumen von  $V = (34 \pm 3,4 \text{ L})$  angenommen. Abbildung 16 :

$$\begin{aligned} p_1 &= (9,9 \pm 4) \text{ mbar} \\ m_1 &= (0,289 \pm 0,015) \text{ mbar/s} \\ S_1 &= (0,99 \pm 0,40) \text{ l/s} \end{aligned}$$

Abbildung 17 :

$$\begin{aligned}p_2 &= (50,3 \pm 4) \text{ mbar} \\m_2 &= (1,804 \pm 0,006) \text{ mbar/s} \\S_2 &= (1,22 \pm 0,16) \text{ l/s}\end{aligned}$$

Abbildung 18 :

$$\begin{aligned}p_3 &= (99,7 \pm 4) \text{ mbar} \\m_3 &= (3,309 \pm 0,025) \text{ mbar/s} \\S_3 &= (1,13 \pm 0,12) \text{ l/s}\end{aligned}$$

#### **4.2.2 Evakuierungsmessung**

Die Messwerte für die Evakuierungsmessung der Drehschieberpumpe sind in Tabelle 7 abgebildet.

$t / \text{s}$	$p / \text{mbar}$	$t / \text{s}$	$p / \text{mbar}$
0	$1012,0 \pm 4$	300	$0,67 \pm 0,07$
10	$636,3 \pm 4$	310	$0,63 \pm 0,07$
20	$474,6 \pm 4$	320	$0,59 \pm 0,06$
30	$356,4 \pm 4$	330	$0,54 \pm 0,06$
40	$266,5 \pm 4$	340	$0,51 \pm 0,06$
50	$195,5 \pm 4$	350	$0,48 \pm 0,05$
60	$142,3 \pm 4$	360	$0,45 \pm 0,05$
70	$103,8 \pm 4$	370	$0,42 \pm 0,05$
80	$76,3 \pm 4$	380	$0,40 \pm 0,04$
90	$55,2 \pm 4$	390	$0,38 \pm 0,04$
100	$40,1 \pm 4$	400	$0,36 \pm 0,04$
110	$28,6 \pm 4$	410	$0,34 \pm 0,04$
120	$20,8 \pm 4$	420	$0,33 \pm 0,04$
130	$14,9 \pm 4$	430	$0,3 \pm 0,03$
140	$11,5 \pm 4$	440	$0,29 \pm 0,03$
150	$8,9 \pm 0,89$	450	$0,28 \pm 0,03$
160	$6,6 \pm 0,66$	460	$0,27 \pm 0,03$
170	$5,0 \pm 0,50$	470	$0,26 \pm 0,03$
180	$3,9 \pm 0,39$	480	$0,24 \pm 0,03$
190	$3,0 \pm 0,30$	490	$0,23 \pm 0,03$
200	$2,5 \pm 0,25$	500	$0,22 \pm 0,03$
210	$2,0 \pm 0,20$	510	$0,22 \pm 0,03$
220	$1,7 \pm 0,17$	520	$0,21 \pm 0,03$
230	$1,5 \pm 0,15$	530	$0,20 \pm 0,02$
240	$1,3 \pm 0,13$	540	$0,20 \pm 0,02$
250	$1,1 \pm 0,11$	550	$0,19 \pm 0,02$
260	$0,99 \pm 0,10$	560	$0,19 \pm 0,02$
270	$0,90 \pm 0,09$	570	$0,18 \pm 0,02$
280	$0,82 \pm 0,09$	580	$0,17 \pm 0,02$
290	$0,75 \pm 0,08$	590	$0,17 \pm 0,02$
300	$0,67 \pm 0,07$	600	$0,16 \pm 0,02$

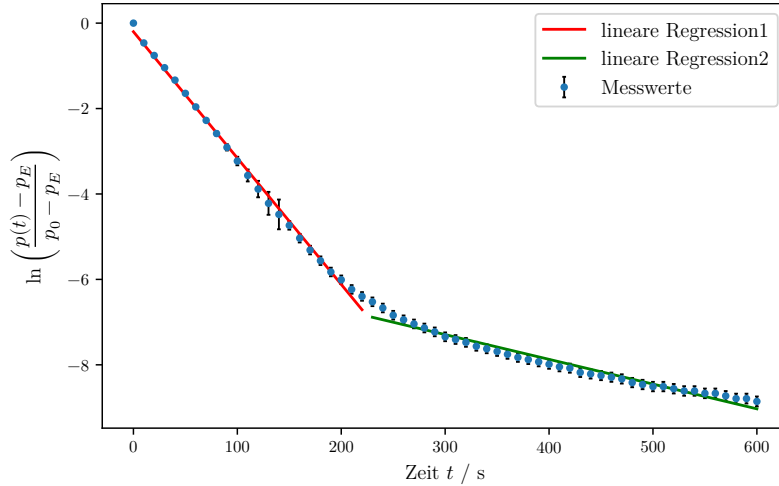
**Tabelle 7:** Messwerte für die Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe mit jeweils dem systematischen Fehler.

Die Messwerte sind erneut in Tabelle 8 als  $\ln\left(\frac{p(t)-p_E}{p_0-p_E}\right)$  abgebildet. Dabei ist nun  $p_0 = (1012,0 \pm 4) \text{ mbar}$  und  $p_E = (1,6 \pm 0,16) \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$ .

$t / \text{s}$	$\ln \left( \frac{p(t)-p_E}{p_0-p_E} \right)$	$t / \text{s}$	$\ln \left( \frac{p(t)-p_E}{p_0-p_E} \right)$
0	0.0	300	$-7,34 \pm 0,103$
10	$-0,46 \pm 0,008$	310	$-7,41 \pm 0,103$
20	$-0,76 \pm 0,010$	320	$-7,47 \pm 0,103$
30	$-1,04 \pm 0,012$	330	$-7,57 \pm 0,104$
40	$-1,33 \pm 0,016$	340	$-7,62 \pm 0,104$
50	$-1,64 \pm 0,021$	350	$-7,69 \pm 0,104$
60	$-1,96 \pm 0,029$	360	$-7,75 \pm 0,104$
70	$-2,28 \pm 0,039$	370	$-7,83 \pm 0,105$
80	$-2,59 \pm 0,053$	380	$-7,88 \pm 0,105$
90	$-2,91 \pm 0,073$	390	$-7,93 \pm 0,105$
100	$-3,23 \pm 0,100$	400	$-7,99 \pm 0,105$
110	$-3,57 \pm 0,140$	410	$-8,05 \pm 0,106$
120	$-3,89 \pm 0,193$	420	$-8,08 \pm 0,106$
130	$-4,22 \pm 0,269$	430	$-8,18 \pm 0,106$
140	$-4,48 \pm 0,349$	440	$-8,21 \pm 0,107$
150	$-4,74 \pm 0,101$	450	$-8,25 \pm 0,107$
160	$-5,04 \pm 0,101$	460	$-8,29 \pm 0,107$
170	$-5,31 \pm 0,101$	470	$-8,33 \pm 0,107$
180	$-5,56 \pm 0,101$	480	$-8,42 \pm 0,108$
190	$-5,83 \pm 0,101$	490	$-8,46 \pm 0,108$
200	$-6,01 \pm 0,101$	500	$-8,51 \pm 0,109$
210	$-6,23 \pm 0,101$	510	$-8,51 \pm 0,109$
220	$-6,40 \pm 0,102$	520	$-8,56 \pm 0,109$
230	$-6,52 \pm 0,102$	530	$-8,61 \pm 0,110$
240	$-6,67 \pm 0,102$	540	$-8,61 \pm 0,110$
250	$-6,84 \pm 0,102$	550	$-8,67 \pm 0,110$
260	$-6,95 \pm 0,102$	560	$-8,67 \pm 0,110$
270	$-7,04 \pm 0,102$	570	$-8,73 \pm 0,111$
280	$-7,14 \pm 0,103$	580	$-8,79 \pm 0,111$
290	$-7,23 \pm 0,103$	590	$-8,79 \pm 0,111$
300	$-7,34 \pm 0,103$	600	$-8,86 \pm 0,112$

**Tabelle 8:**  $\ln\left(\frac{p(t)-p_0}{p_0-p_E}\right)$  bestimmt aus den Messwerten der Evakuierungsmessung.

Die Werte aus Tabelle 8 sind ebenfalls in Abbildung 19 graphisch dargestellt.



**Abbildung 19:** Grafische Darstellung der Messdaten von  $p$ .

Durch die Regressionsparameter  $m$  kann erneut für jeweils beide Bereiche über  $S = -mV$  das Saugvermögen  $S$  berechnet werden.

Bereich 1:  $1.000 \text{ mbar} \geq p \geq 2 \text{ mbar}$

$$m_1 = -(0,0296 \pm 0,0004) \text{ 1/s}$$

$$S_1 = (1,01 \pm 0,11) \text{ l/s}$$

Bereich 2:  $2 \text{ mbar} \geq p \geq 1,5 \cdot 10^{-1} \text{ mbar}$

$$m_2 = -(0,0058 \pm 0,0002) \text{ 1/s}$$

$$S_2 = (0,197 \pm 0,021) \text{ l/s}$$

## 5 Diskussion

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Messungen ohne Schwierigkeiten verliefen und die Messergebnisse den Erwartungen entsprechen. Lediglich bei der Leckratenmessung der Drehschieberpumpe lieferten die drei identischen Messungen stark variierende Ergebnisse. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine nicht ausreichende Genauigkeit beim Einstellen des Gleichgewichtsdrucks zurückzuführen. Die bestimmten Werte für das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe sind in Tabelle 9 zusammen mit der relativen Abweichung zum Wert, der vom Hersteller angegeben wurde, abgebildet. Für die Turbomolekularpumpe sind dies  $S = 771 \text{ l/s}$ . Von der Evakuierungsmessung wurde hierbei lediglich der Wert des ersten Bereiches verwendet.

Verfahren	$S / \text{L/s}$	relative Abweichung / %
Evakuierung	$10,0 \pm 1,1$	87,01
Leck $5 \cdot 10^{-5}$ mbar	$21 \pm 7$	72,73
Leck $7 \cdot 10^{-5}$ mbar	$27 \pm 9$	64,94
Leck $1 \cdot 10^{-4}$ mbar	$34 \pm 14$	55,84
Leck $2 \cdot 10^{-4}$ mbar	$38 \pm 13$	50,65

**Tabelle 9:** Saugvermögen und relative Abweichungen zur Herstellerangabe der Turbomolekularpumpe.

Es fällt auf, dass die Messwerte allesamt stark vom angegebenen Wert abweichen, dabei aber für einen steigenden Gleichgewichtsdruck zu Beginn der Messung immer mehr dem Herstellerwert entsprechen. Abweichungen könnten hierbei auf den verwendeten Aufbau zurückzuführen sein, bei dem der Druck weit entfernt von der Pumpe gemessen wurde. Es muss hierbei der Leitwert des Vakuumgefäßes beachtet werden.

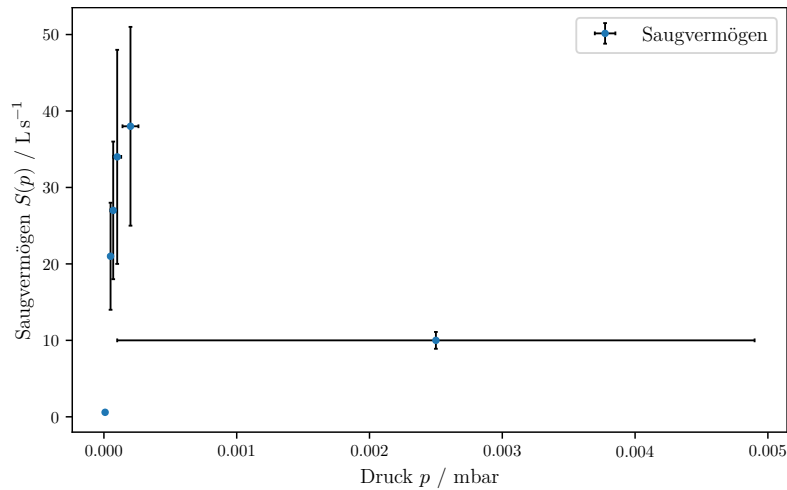
Die Werte des Saugvermögens der Drehschieberpumpe sind ebenfalls in Tabelle 10 zusammen mit ihren Abweichungen dargestellt. Das Saugvermögen der Pumpe ist vom Hersteller als  $S = 1,1 \text{ l/s}$  gegeben.

Messverfahren	$S / \text{L/s}$	relative Abweichung / %
Evakuierung	$1,01 \pm 0,10$	8,18
Leck 0,5 mbar	$0,82 \pm 0,09$	25,45
Leck 10 mbar	$0,99 \pm 0,32$	10,0
Leck 50 mbar	$1,2 \pm 0,4$	9,09
Leck 100 mbar	$1,1 \pm 0,4$	0

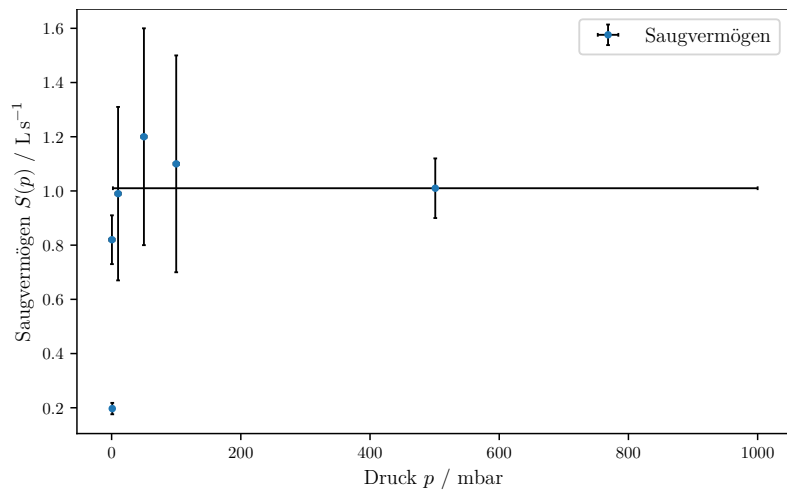
**Tabelle 10:** Saugvermögen und relative Abweichungen zur Herstellerangabe der Drehschieberpumpe.

Hierbei wurde von der Evakuierungsmessung erneut nur der Wert des ersten Bereichs berücksichtigt. Die berechneten Werte liegen insgesamt sehr viel näher an den Herstellerangaben, als die der Turbomolekularpumpe und stimmen im Rahmen des Messfehlers mit den Herstellerangaben überein.

Die Druckabhängigkeit des Saugvermögens beider Pumpen ist in den folgenden Abbildungen graphisch dargestellt.



**Abbildung 20:** Grafische Darstellung der Druckabhängigkeit des Saugvermögens der Turbomolekularpumpe.



**Abbildung 21:** Grafische Darstellung der Druckabhängigkeit des Saugvermögens der Drehschieberpumpe.

## Literatur

- [1] pfeiffer-vacuum.com. *Einführung in die Vakuumtechnik*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/einfuehrung-in-die-vakuumtechnik/> (besucht am 15. 05. 2023).
- [2] *Vakuumtechnik; Benennung und Definitionen; Allgemeine Benennungen*. 1990-05. DIN 28400-1, 1990.

- [3] E-Cooling. *Strömungssimulation - physikalische Vorbetrachtungen*. URL: <https://e-cooling.de/de/physikalische-vorbetrachtungen.htm> (besucht am 18.05.2023).
- [4] pfeiffer-vacuum.com. *Drehschiebervakuumpumpen*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/vakuumerzeugung/drehschiebervakuumpumpen/aufbau-funktionsprinzip/> (besucht am 15.05.2023).
- [5] pfeiffer-vacuum.com. *Turbomolekularpumpen*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/vakuumerzeugung/turbomolekularpumpen/aufbau-funktionsprinzip/> (besucht am 15.05.2023).
- [6] pfeiffer-vacuum.com. *Grundlagen der Totaldruckmessung*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/vakuummessgeraete/grundlagen-der-totaldruckmessung/indirekte-gasartabhaengige-druckmessung/> (besucht am 15.05.2023).
- [7] pfeiffer-vacuum.com. *Direkte, gasartunabhängige Druckmessung*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/vakuummessgeraete/grundlagen-der-totaldruckmessung/direkte-gasartunabhaengige-druckmessung/>.
- [8] *v70 - Vakuumversuch*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2018.