

V70

# Vakuumphysik

Theodor Zies  
theodor.zies@tu-dortmund.de

Bastian Schuchardt  
bastian.schuchardt@tu-dortmund.de

Durchführung: 12.06.2023

Abgabe: DATUM

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung . . . . .	3
1.2	Theoretische Grundlagen . . . . .	3
1.3	Vakuumerzeugung . . . . .	4
1.4	Vakuummessung . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>8</b>
2.1	Versuchsaufbau . . . . .	8
2.2	Versuchsdurchführung . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>9</b>
3.1	Turbomolekularpumpe . . . . .	9
3.1.1	Leckratenmessung . . . . .	9
3.1.2	Evakuierungsmessung . . . . .	11
3.2	Drehschieberpumpe . . . . .	13
3.2.1	Leckratenmessung . . . . .	13
3.2.2	Evakuierungsmessung . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>21</b>
	<b>Literatur</b>	<b>22</b>

# 1 Theorie

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist es, die Erzeugung eines Vakuums mithilfe von zwei verschiedenen Pumpentypen zu verstehen und durchzuführen. Durch Aufnahme einer Evakuierungskurve sowie einer Leckratenmessung können die Herstellerangaben bezüglich des Saugvermögens der Pumpen überprüft werden. Aufgrund des immer geringeren Atmosphärendrucks in großen Höhen ist die Vakuumphysik in technischen Anwendungen von großer Bedeutung, um beispielsweise Werkstoffe für die Luft- und Raumfahrt zu entwickeln und zu testen. Auch auf dem Boden müssen viele Prozesse im Vakuum stattfinden, um den störenden Einfluss der Atmosphäre zu eliminieren. Ein Beispiel hierfür sind Teilchenbeschleuniger, die ein sehr gutes Vakuum erfordern, um Wechselwirkungen mit Gasteilchen zu verhindern.

## 1.2 Theoretische Grundlagen

Da ein perfektes Vakuum in der Praxis unmöglich zu erreichen ist, wird das Vakuum über verschiedene Druckbereiche definiert. Erst ab Drücken von  $p < 300$  mbar wird der Begriff Vakuum verwendet, da größere Drücke noch auf der Erdoberfläche anzutreffen sind. In Tabelle 1 sind die verschiedenen Druckbereiche mit der dazugehörigen Definition des Vakuums aufgeführt. In diesem Versuch wird maximal die Größenordnung eines Hochvakuums erreicht.

**Tabelle 1:** Druckbereiche in der Vakuumtechnik [3].

Druckbereich	Druck / mbar
Grobvakuum	300 – 1
Feinvakuum	1 – $10^{-3}$
Hochvakuum	$10^{-3}$ – $10^{-8}$
Ultrahochvakuum	$< 10^{-8}$

Die simpelste Beschreibung eines Gases liefert das Modell des idealen Gases. Hier werden alle Gasatome als punktförmig angenommen und die Teilchen wechselwirken nicht untereinander. Es finden lediglich elastische Stöße untereinander und mit den Außenwänden statt. Es gilt dann die Zustandsgleichung

$$pV = Nk_{\text{B}}T \quad (1)$$

wobei  $p$  für den Druck,  $V$  für das Volumen,  $N$  für die Teilchenzahl und  $T$  für die Temperatur steht,  $k_{\text{B}}$  ist die Boltzmann Konstante. Bei konstanter Temperatur folgt sofort das Boyle-Mariott'schen Gesetz

$$pV = \text{const} \quad (2)$$

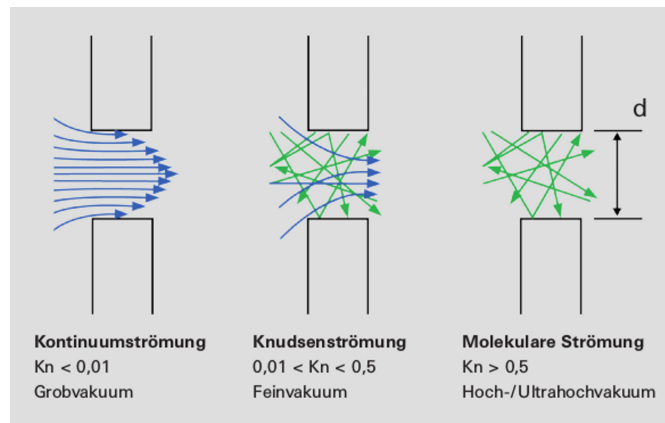
was einen antiproportionalen Zusammenhang zwischen  $p$  und  $V$  vorhersagt. Die getroffenen Annahmen sind jedoch nicht für alle Komponenten der Atmosphäre anwendbar, zum

Beispiel die stark polarisierten Wassermoleküle im Wasserdampf wechselwirken stark miteinander, und die oben beschriebenen Zusammenhänge verlieren ihre Gültigkeit. Um niedrige Drücke erreichen zu können, müssen derartige Verunreinigungen aus dem System entfernt werden.

Die gemeinsame Bewegung der Gasteilchen wird auch als *Strömung* bezeichnet und hängt stark vom vorherrschenden Druck ab. Je geringer der Druck, desto weniger Gasteilchen befinden sich im System und umso weniger Stöße finden untereinander statt. Der durchschnittliche Weg, den ein Teilchen ohne Wechselwirkungen zurücklegen kann, wird als *mittlere freie Weglänge* bezeichnet und nimmt mit sinkendem Druck stark zu. Ein Maß für die vorliegende Strömung ist die Knudsenzahl

$$K_n = \frac{\bar{l}}{d}$$

bei der  $\bar{l}$  für die mittlere freie Weglänge und  $d$  für den Durchmesser des Rohres steht. In Abbildung 1 sind die verschiedenen Arten von Strömungen in Abhängigkeit der Knudsenzahl dargestellt.



**Abbildung 1:** Übersicht über die verschiedenen Strömungsarten [3].

Im Grobvakuum liegt laminare Strömung vor, die Gasteilchen bewegen sich also in zueinander parallelen Schichten. Nimmt der Druck ab, so werden Wechselwirkungen zwischen den Teilchen immer seltener, bis schließlich nur noch Stöße mit den Wänden stattfinden. Alle Teilchen bewegen sich unabhängig von einander und man nennt dies molekulare Strömung.

### 1.3 Vakuumerzeugung

Um ein Vakuum zu erzeugen wird eine Pumpe benötigt, die das Gas gegen den Atmosphärendruck aus dem System pumpt. Das Saugvermögen einer Pumpe ist über die Änderung des Volumens definiert:

$$S = \frac{dV}{dt}. \quad (3)$$

Als Saugleistung bezeichnet man das Produkt aus Saugvermögen und Druck

$$q_{pV} = S \cdot P. \quad (4)$$

In der Praxis wird die theoretische Saugleistung  $S_0$  einer Pumpe nie ganz erreicht, da das sich zwangsläufig davorbefindende Rohr einen Leitwert  $L$  hat, der die Gasmenge begrenzt. Dieser kann analog zu einem reziproken elektrischen Widerstand verstanden werden. Daher wird die effektive Saugleistung  $S_{\text{eff}}$  verwendet, die sich gemäß

$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{S_0} + \frac{1}{L} \quad (5)$$

berechnet. In der Regel ist das Saugvermögen einer Pumpe nicht konstant, sondern Abhängig vom Druck. Nimmt man jedoch vereinfacht ein konstantes Saugvermögen an, so kann durch zeitliches Ableiten der Zustandsgleichung (1) die Differentialgleichung

$$\dot{p} \cdot V = -p \cdot S$$

aufgestellt werden. Deren Lösung beschreibt die sogenannte Evakuierungskurve  $p(t)$ , die den zeitlichen Verlauf des Druckes gemäß

$$p(t) = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{S}{V}t\right). \quad (6)$$

beschreibt. Ein System ist nie vollständig dicht, der Druckabfall durch verschiedene Lecks wird durch die Leckrate

$$Q = \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot V \quad (7)$$

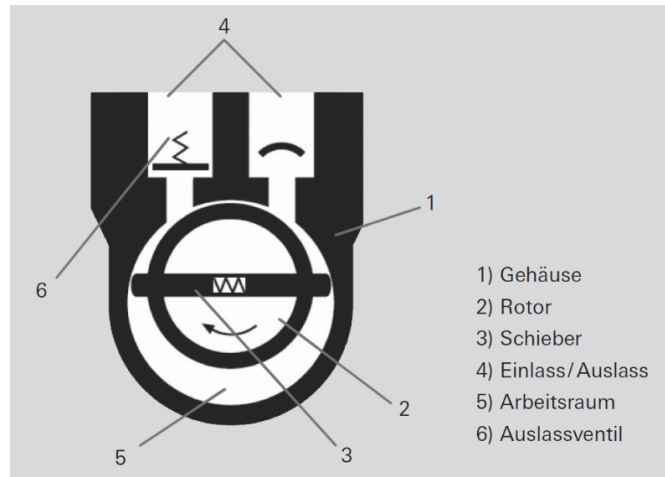
beschrieben, dabei steht  $\Delta p$  für den Druck, der in der Zeit  $\Delta t$  dazugekommen ist. Über die Leckrate  $Q$  lässt sich ebenfalls das zuvor beschriebene Saugvermögen  $S$  berechnen mit der Formel

$$S = \frac{Q}{p_G}. \quad (8)$$

Dafür muss der Gleichgewichtsdruck  $p_G$  bekannt sein. Bei diesem Druck gleicht sich die Saugleistung der Pumpe genau mit den Undichtigkeiten der Lecks aus, sodass ein Gleichgewicht entsteht.

Für unterschiedliche Druckbereiche gibt es verschiedene Funktionsprinzipien von Pumpen, in diesem Versuch werden zwei Typen von Vakuumpumpen verwendet:

1. Die **Drehschieberpumpe** zählt zur Kategorie der Transport- bzw. Verdrängerpumpen, das Arbeitsprinzip ist also der Abtransport von Gas durch Ansaugung und anschließende Verdrängung. Eine Skizze ihres Aufbaus ist in Abbildung 2 zu sehen.



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung des Aufbaus einer Drehschieberpumpe [2].

Im Gehäuse befindet sich ein sich drehender Rotor, der Schieber besitzt, um den Arbeitsraum zu teilen und abzudichten. Zu Beginn eines Arbeitstaktes strömt Gas durch den Einlass in den Arbeitsraum, da dieser sich expandiert und somit ein Druckgefälle vorliegt. Dannach wird der Raum durch den zweiten Schieber verschlossen und das Gas komprimiert. Sobald der Druck den Atmosphärendruck übersteigt, öffnet das Auslassventil und das Gas entweicht aus der Pumpe. In der Pumpe befindet sich zu jeder Zeit eine kleine Menge Öl, das eine Schmierung der Lager sowie eine saubere Abdichtung der Schieber und Ventile gewährleistet. Aufgrund der limitierten Kompressionsfähigkeit im Arbeitsraum durch konstruktionstechnisch bedingte Restvolumina ist der Druckbereich der Pumpe limitiert. Einstufige Ausführungen erreichen typischerweise Enddrücke von 0,1 mbar, durch weitere Stufen kann dies weiter verringert werden. Eine Drehschieberpumpe eignet sich somit zur Erzeugung eines Vorvakuums, das anschließend mit Pumpen anderer Bauart verfeinert werden kann.

2. Bei gegebenen Vorvakuum kann der Druck mithilfe einer **Turbomolekularpumpe** weiter verringert werden. In Abbildung 3 ist der grobe Aufbau dargestellt. Die Turbomolekularpumpe zählt zu den kinetischen Pumpen. Ein Rotor mit Schaufeln führt den Gasteilchen kinetische Energie zu, sodass sie sich zwischen Rotor und Stator entlang aus dem System heraus bewegen. Das Funktionsprinzip kann somit mit dem einer Turbine verglichen werden. Der Stator muss mit hoher Drehzahl betrieben werden, damit der Energieübertrag relevant gegenüber der thermischen Energie der Teilchen ist. Das Vorvakuum wird benötigt, um die zufälligen Kollisionen der Gasteilchen untereinander zu unterdrücken, da diese dem Pumpprozess entgegenwirken würden. Im Gegenzug können Drücke im Bereich  $1 \cdot 10^{-3}$  mbar und  $1 \cdot 10^{-10}$  mbar erreicht werden [5], was bereits einem Hochvakuum entspricht.



Es wird zwischen *Kaltkathoden-* und *Heißkathodenvakuummetern* unterschieden. Beim *Kaltkathodenvakuummeter* werden die Elektronen durch Feldemission erzeugt, während das *Heißkathodenvakuummeter* den glühelektrischen Effekt verwendet. Um den Messbereich zu erweitern werden die Elektronen durch ein Magnetfeld geschickt, die resultierenden Kreisbahnen erhöhen die Stoßwahrscheinlichkeit mit den Atomen signifikant. Somit lassen sich auf diese Art Drücke von bis zu  $1 \cdot 10^{-10}$  mbar nachweisen. [4]

## 2 Durchführung

### 2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau in in Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 4:** Verschiedene Aufnahmen des Versuchsaufbaus [6].

Die wichtigsten Bestandteile sind die Drehschieberpumpe, die Turbomolekularpumpe und die beiden Druckmessgeräte. Beide Pumpen können mithilfe von Ventilen abgeschiebert werden. Das gelbe Ventil (Dosierventil) erlaubt es, ein präzise dosiertes Leck zu erzeugen. Die Volumina des Versuchsaufbaus werden für die späteren Rechnungen benötigt und sind bekannt, mit Drehschieberpumpe sind es  $(34,0 \pm 0,1)$  L und mit Turbomolekularpumpe  $(33,0 \pm 0,1)$  L. Im folgenden werden die wichtigsten Daten der verwendeten Gerätschaften aufgeführt. [6]

- Drehschieberpumpe: Firma ILMVAC, Typ 300883/AKD16, Saugvermögen  $4,6 \text{ m}^3/\text{h}$  bis  $5,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , Enddruck  $2 \cdot 10^{-3}$  mbar
- Turbomolekularpumpe: Firma ILMVAC, Typ SST81, Betriebsfrequenz 1350 Hz, Saugvermögen  $77 \text{ L/s}$



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

## 2.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn wird mit der Drehschieberpumpe ein Vorvakuum von 0,1 mbar erzeugt. Danach wird die Turbomolekularpumpe hinzugeschaltet, um ein möglichst hohes Vakuum zu erzeugen. Die Pumpe wird mindestens 30 min laufen gelassen, damit möglichst viele Rückstände aus dem Aufbau entfernt werden und der Enddruck  $p_E$  aufgenommen werden kann. Um die Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe aufzunehmen, wird mithilfe des Dosierventils ein Gleichgewichtsdruck von  $5 \cdot 10^{-3}$  mbar eingestellt. Anschließend wird das Leck verschlossen und für 120 s alle 5 s ein Messwert für den Druck genommen, diese Messung wird dreimal wiederholt. Um das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe zu bestimmen, wird eine Leckratenmessung durchgeführt. Dafür wird erneut wie zuvor beschrieben ein Gleichgewichtsdruck eingestellt, der also eine definierte Leckrate aufweist. Nun wird die Pumpe abgeschiebert und der Druckanstieg mit der Zeit mit den selben Messintervallen wie zuvor aufgenommen. Dieses Vorgehen wird für drei weitere Leckraten wiederholt.

Die Messungen für die Drehschieberpumpe werden analog durchgeführt, nachdem die Turbomolekularpumpe ausgeschaltet wurde. Die Evakuierungskurve wird ausgehend vom Atmosphärendruck für 600 s in 10 s Schritten aufgenommen. Bei der Leckratenmessung wird der Vorgang für eine der vier Leckraten dreimal wiederholt, um eine Aussage über die statistischen Fehler treffen zu können.

## 3 Auswertung

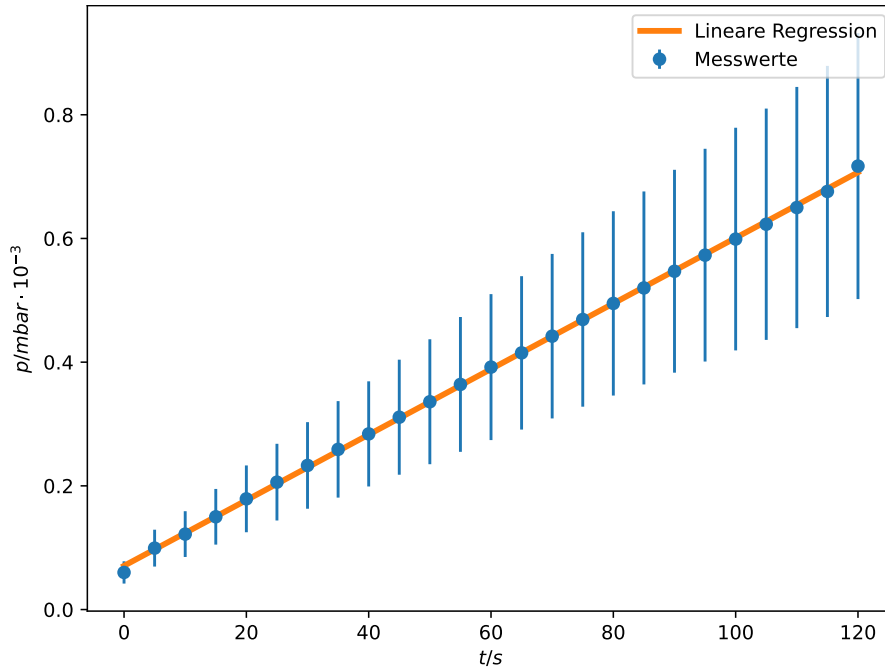
### 3.1 Turbomolekularpumpe

#### 3.1.1 Leckratenmessung

Es wird für die Leckratenmessung der Turbomolekularpumpe eine Messreihe aufgenommen. Die Messwerte sind in Tabelle 2 zu finden. In Abbildung 5 ist der Druck  $p$  in mbar gegen die Zeit  $t$  in s aufgetragen. Der Gleichgewichtsdruck ist  $p_G \approx 6 \cdot 10^{-5}$  mbar.

**Tabelle 2:** Leckratenmessung der Turbomolekularpumpe

$t/\text{s}$	$p/\text{mbar}$
0	$(6,00 \pm 1,80) \cdot 10^{-5}$
5	$(9,93 \pm 2,98) \cdot 10^{-5}$
10	$(1,22 \pm 0,37) \cdot 10^{-4}$
15	$(1,50 \pm 0,45) \cdot 10^{-4}$
20	$(1,79 \pm 0,54) \cdot 10^{-4}$
25	$(2,06 \pm 0,62) \cdot 10^{-4}$
30	$(2,33 \pm 0,70) \cdot 10^{-4}$
35	$(2,59 \pm 0,78) \cdot 10^{-4}$
40	$(2,84 \pm 0,85) \cdot 10^{-4}$
45	$(3,11 \pm 0,93) \cdot 10^{-4}$
50	$(3,36 \pm 1,01) \cdot 10^{-4}$
55	$(3,64 \pm 1,09) \cdot 10^{-4}$
60	$(3,92 \pm 1,18) \cdot 10^{-4}$
65	$(4,15 \pm 1,24) \cdot 10^{-4}$
70	$(4,42 \pm 1,33) \cdot 10^{-4}$
75	$(4,69 \pm 1,41) \cdot 10^{-4}$
80	$(4,95 \pm 1,49) \cdot 10^{-4}$
85	$(5,20 \pm 1,56) \cdot 10^{-4}$
90	$(5,47 \pm 1,64) \cdot 10^{-4}$
95	$(5,73 \pm 1,72) \cdot 10^{-4}$
100	$(5,99 \pm 1,80) \cdot 10^{-4}$
105	$(6,23 \pm 1,87) \cdot 10^{-4}$
110	$(6,50 \pm 1,95) \cdot 10^{-4}$
115	$(6,76 \pm 2,03) \cdot 10^{-4}$
120	$(7,17 \pm 2,15) \cdot 10^{-4}$



**Abbildung 5:** Grafische Darstellung der Messwerte für die Leckratenmessung der Tubromolekularpumpe.

Außerdem wurde eine lineare Regression der Form  $f(x) = ax + b$  durchgeführt. Dadurch lässt sich das Saugvermögen  $S$  durch  $S = \frac{V}{p_G} \cdot a$  bestimmen. Die Turbomolekularpumpe hat dabei ein Volumen von  $V = (33 \pm 0,1) \text{ L}$ .

$$a = (5,30 \pm 0,02) \cdot 10^{-5} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$$

$$p_G = (6,00 \pm 1,80) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$$

$$S = (29 \pm 9) \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

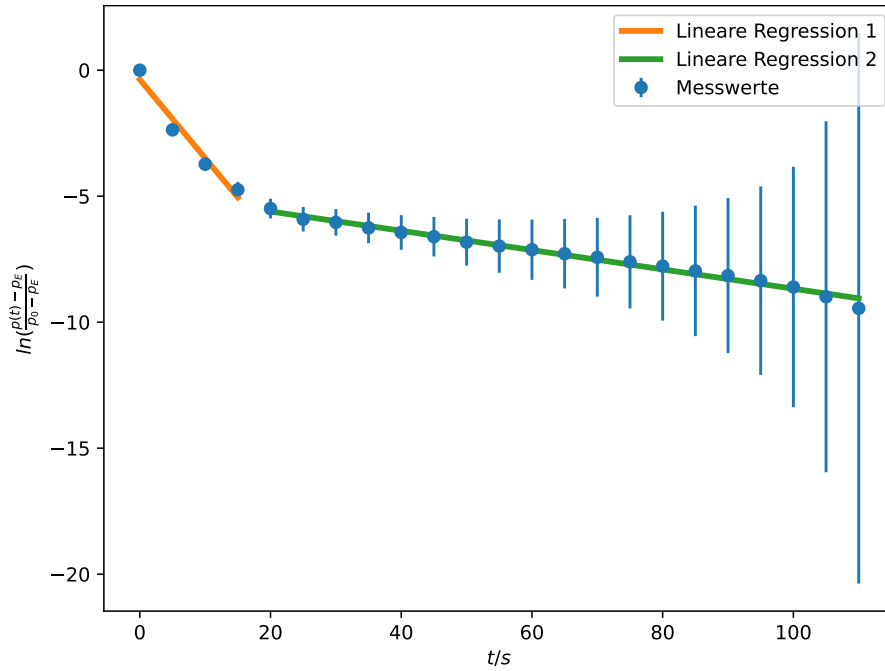
bestimmen.

### 3.1.2 Evakuierungsmessung

Es wurden für den Startdruck  $p_0 \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$  drei Messreihen aufgenommen und gemittelt. Für die weitere Auswertung wurde noch  $\ln\left(\frac{p(t)-p_0}{p_0-p_E}\right)$  bestimmt und gegen die Zeit  $t$  in s aufgetragen. Die entsprechenden Werte und die dazu passende grafische Abbildung sind in Tabelle 3 und Abbildung 6 zu finden.

**Tabelle 3:** Messdaten und daraus berechnete Größen der Evakuierungsmessung.

$t/s$	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$	$p_m/\text{mbar}$
0	$(5,02 \pm 1,51) \cdot 10^{-3}$	$(5,17 \pm 1,55) \cdot 10^{-3}$	$(5,12 \pm 1,54) \cdot 10^{-3}$	$(5,10 \pm 0,89) \cdot 10^{-3}$
5	$(4,93 \pm 1,48) \cdot 10^{-4}$	$(4,78 \pm 1,43) \cdot 10^{-4}$	$(5,15 \pm 1,55) \cdot 10^{-4}$	$(4,95 \pm 0,86) \cdot 10^{-4}$
10	$(1,39 \pm 0,42) \cdot 10^{-4}$	$(1,32 \pm 0,40) \cdot 10^{-4}$	$(1,49 \pm 0,45) \cdot 10^{-4}$	$(1,40 \pm 0,24) \cdot 10^{-4}$
15	$(6,01 \pm 1,80) \cdot 10^{-5}$	$(6,05 \pm 1,82) \cdot 10^{-5}$	$(6,52 \pm 1,96) \cdot 10^{-5}$	$(6,19 \pm 1,07) \cdot 10^{-5}$
20	$(3,65 \pm 1,10) \cdot 10^{-5}$	$(3,78 \pm 1,13) \cdot 10^{-5}$	$(4,16 \pm 1,25) \cdot 10^{-5}$	$(3,86 \pm 0,67) \cdot 10^{-5}$
25	$(3,04 \pm 0,91) \cdot 10^{-5}$	$(3,04 \pm 0,91) \cdot 10^{-5}$	$(3,34 \pm 1,00) \cdot 10^{-5}$	$(3,14 \pm 0,54) \cdot 10^{-5}$
30	$(2,75 \pm 0,83) \cdot 10^{-5}$	$(3,17 \pm 0,95) \cdot 10^{-5}$	$(3,02 \pm 0,91) \cdot 10^{-5}$	$(2,98 \pm 0,52) \cdot 10^{-5}$
35	$(2,56 \pm 0,77) \cdot 10^{-5}$	$(2,86 \pm 0,86) \cdot 10^{-5}$	$(2,80 \pm 0,84) \cdot 10^{-5}$	$(2,74 \pm 0,48) \cdot 10^{-5}$
40	$(2,44 \pm 0,73) \cdot 10^{-5}$	$(2,67 \pm 0,80) \cdot 10^{-5}$	$(2,63 \pm 0,79) \cdot 10^{-5}$	$(2,58 \pm 0,45) \cdot 10^{-5}$
45	$(2,34 \pm 0,70) \cdot 10^{-5}$	$(2,52 \pm 0,76) \cdot 10^{-5}$	$(2,50 \pm 0,75) \cdot 10^{-5}$	$(2,45 \pm 0,43) \cdot 10^{-5}$
50	$(2,26 \pm 0,68) \cdot 10^{-5}$	$(2,32 \pm 0,70) \cdot 10^{-5}$	$(2,38 \pm 0,71) \cdot 10^{-5}$	$(2,32 \pm 0,40) \cdot 10^{-5}$
55	$(2,19 \pm 0,66) \cdot 10^{-5}$	$(2,24 \pm 0,67) \cdot 10^{-5}$	$(2,29 \pm 0,69) \cdot 10^{-5}$	$(2,24 \pm 0,39) \cdot 10^{-5}$
60	$(2,13 \pm 0,64) \cdot 10^{-5}$	$(2,18 \pm 0,65) \cdot 10^{-5}$	$(2,22 \pm 0,67) \cdot 10^{-5}$	$(2,18 \pm 0,38) \cdot 10^{-5}$
65	$(2,08 \pm 0,62) \cdot 10^{-5}$	$(2,12 \pm 0,64) \cdot 10^{-5}$	$(2,15 \pm 0,65) \cdot 10^{-5}$	$(2,12 \pm 0,37) \cdot 10^{-5}$
70	$(2,04 \pm 0,61) \cdot 10^{-5}$	$(2,07 \pm 0,62) \cdot 10^{-5}$	$(2,10 \pm 0,63) \cdot 10^{-5}$	$(2,07 \pm 0,36) \cdot 10^{-5}$
75	$(1,99 \pm 0,60) \cdot 10^{-5}$	$(2,02 \pm 0,61) \cdot 10^{-5}$	$(2,05 \pm 0,62) \cdot 10^{-5}$	$(2,02 \pm 0,35) \cdot 10^{-5}$
80	$(1,96 \pm 0,59) \cdot 10^{-5}$	$(1,98 \pm 0,59) \cdot 10^{-5}$	$(2,00 \pm 0,60) \cdot 10^{-5}$	$(1,98 \pm 0,34) \cdot 10^{-5}$
85	$(1,92 \pm 0,58) \cdot 10^{-5}$	$(1,95 \pm 0,59) \cdot 10^{-5}$	$(1,96 \pm 0,59) \cdot 10^{-5}$	$(1,94 \pm 0,34) \cdot 10^{-5}$
90	$(1,90 \pm 0,57) \cdot 10^{-5}$	$(1,91 \pm 0,57) \cdot 10^{-5}$	$(1,93 \pm 0,58) \cdot 10^{-5}$	$(1,91 \pm 0,33) \cdot 10^{-5}$
95	$(1,87 \pm 0,56) \cdot 10^{-5}$	$(1,89 \pm 0,57) \cdot 10^{-5}$	$(1,90 \pm 0,57) \cdot 10^{-5}$	$(1,89 \pm 0,33) \cdot 10^{-5}$
100	$(1,85 \pm 0,56) \cdot 10^{-5}$	$(1,86 \pm 0,56) \cdot 10^{-5}$	$(1,87 \pm 0,56) \cdot 10^{-5}$	$(1,86 \pm 0,32) \cdot 10^{-5}$
105	$(1,82 \pm 0,55) \cdot 10^{-5}$	$(1,83 \pm 0,55) \cdot 10^{-5}$	$(1,84 \pm 0,55) \cdot 10^{-5}$	$(1,83 \pm 0,32) \cdot 10^{-5}$
110	$(1,80 \pm 0,54) \cdot 10^{-5}$	$(1,81 \pm 0,54) \cdot 10^{-5}$	$(1,81 \pm 0,54) \cdot 10^{-5}$	$(1,81 \pm 0,31) \cdot 10^{-5}$
115	$(1,78 \pm 0,53) \cdot 10^{-5}$	$(1,79 \pm 0,54) \cdot 10^{-5}$	$(1,79 \pm 0,54) \cdot 10^{-5}$	$(1,79 \pm 0,31) \cdot 10^{-5}$
120	$(1,76 \pm 0,53) \cdot 10^{-5}$	$(1,77 \pm 0,53) \cdot 10^{-5}$	$(1,77 \pm 0,53) \cdot 10^{-5}$	$(1,77 \pm 0,31) \cdot 10^{-5}$



**Abbildung 6:** Grafische Darstellung der Messwerte für die Evakuierungsmessung der Tubromolekularpumpe.

Es wurden für zwei Bereiche jeweils lineare Ausgleichsrechnungen der Form  $f(x) = ax + b$  durchgeführt und deren Parameter bestimmt. Aus  $S = -aV$  lässt sich das Saugvermögen der Pumpe bestimmen. Für den ersten Bereich ergibt sich

$$a = (-0,312 \pm 0,044) \frac{1}{s}$$

$$S = (10,3 \pm 1,5) \frac{L}{s}.$$

Und für den zweiten Bereich

$$a = (-0,038 \pm 0,001) \frac{1}{s}$$

$$S = (1,254 \pm 0,033) \frac{L}{s}.$$

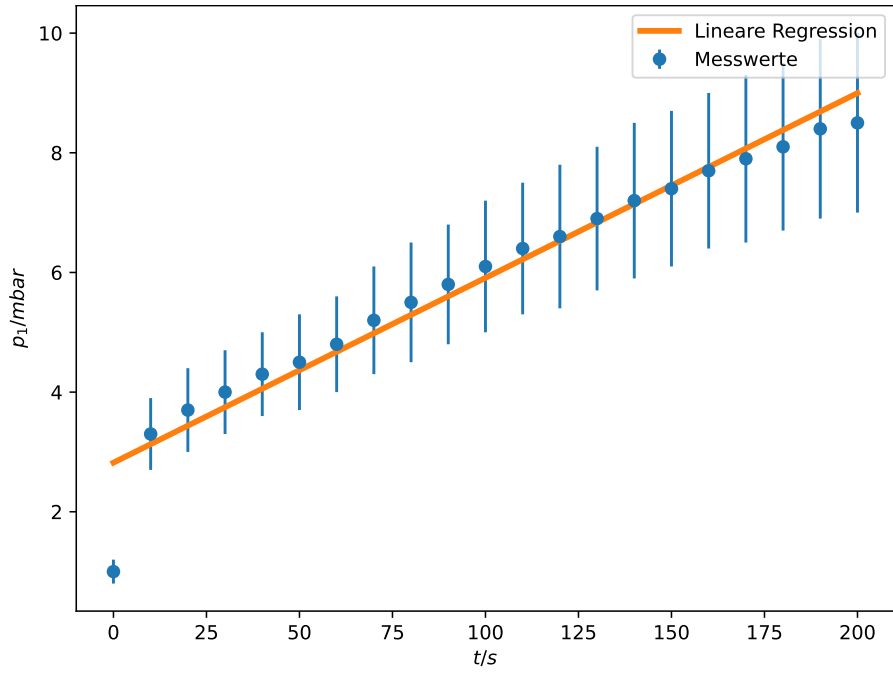
## 3.2 Drehschieberpumpe

### 3.2.1 Leckratenmessung

Für die Leckratenmessung wurden Messwerte für vier Gleichgewichtsdrücke aufgenommen. Für den ersten Gleichgewichtsdruck von  $p_{1,2,3} \approx 1,0 \text{ mbar}$  wurde dreimal gemessen. Die Messwerte und der daraus bestimmte Mittelwert sind in Tabelle 4 zu finden. Der entsprechende Plot ist in Abbildung 7 dargestellt.

**Tabelle 4:** Messwerte für den ersten Gleichgewichtsdruck und der daraus resultierende Mittelwert.

$t/s$	$p_1/\text{mbar}$	$p_2/\text{mbar}$	$p_3/\text{mbar}$	$p_m/\text{mbar}$
0	$1,0 \pm 0,3$	$1,0 \pm 0,3$	$1,0 \pm 0,3$	$1,0 \pm 0,2$
10	$3,3 \pm 1,0$	$3,5 \pm 1,1$	$3,2 \pm 1,0$	$3,3 \pm 0,6$
20	$3,7 \pm 1,1$	$3,9 \pm 1,2$	$3,6 \pm 1,1$	$3,7 \pm 0,7$
30	$4,0 \pm 1,1$	$4,1 \pm 1,2$	$3,9 \pm 1,2$	$4,0 \pm 0,7$
40	$4,3 \pm 1,3$	$4,4 \pm 1,3$	$4,2 \pm 1,3$	$4,3 \pm 0,7$
50	$4,5 \pm 1,4$	$4,6 \pm 1,4$	$4,5 \pm 1,4$	$4,5 \pm 0,8$
60	$4,8 \pm 1,4$	$5,0 \pm 1,5$	$4,8 \pm 1,4$	$4,9 \pm 0,8$
70	$5,2 \pm 1,6$	$5,4 \pm 1,6$	$5,2 \pm 1,6$	$5,3 \pm 0,9$
80	$5,5 \pm 1,7$	$5,7 \pm 1,7$	$5,5 \pm 1,7$	$5,6 \pm 1,0$
90	$5,8 \pm 1,7$	$6,0 \pm 1,8$	$5,8 \pm 1,7$	$5,9 \pm 1,0$
100	$6,1 \pm 1,8$	$6,2 \pm 1,9$	$6,1 \pm 1,8$	$6,1 \pm 1,1$
110	$6,4 \pm 1,9$	$6,5 \pm 2,0$	$6,4 \pm 1,9$	$6,4 \pm 1,1$
120	$6,6 \pm 2,0$	$6,7 \pm 2,0$	$6,6 \pm 2,0$	$6,6 \pm 1,2$
130	$6,9 \pm 2,1$	$7,0 \pm 2,1$	$6,9 \pm 2,1$	$6,9 \pm 1,2$
140	$7,2 \pm 2,2$	$7,3 \pm 2,2$	$7,2 \pm 2,2$	$7,2 \pm 1,3$
150	$7,4 \pm 2,2$	$7,6 \pm 2,3$	$7,5 \pm 2,3$	$7,5 \pm 1,3$
160	$7,7 \pm 2,3$	$7,8 \pm 2,3$	$7,7 \pm 2,3$	$7,7 \pm 1,3$
170	$7,9 \pm 2,4$	$8,0 \pm 2,4$	$8,0 \pm 2,4$	$8,0 \pm 1,4$
180	$8,1 \pm 2,4$	$8,3 \pm 2,5$	$8,1 \pm 2,4$	$8,2 \pm 1,4$
190	$8,4 \pm 2,5$	$8,5 \pm 2,6$	$8,4 \pm 2,5$	$8,4 \pm 1,5$
200	$8,5 \pm 2,6$	$8,7 \pm 2,6$	$8,6 \pm 2,6$	$8,6 \pm 1,5$



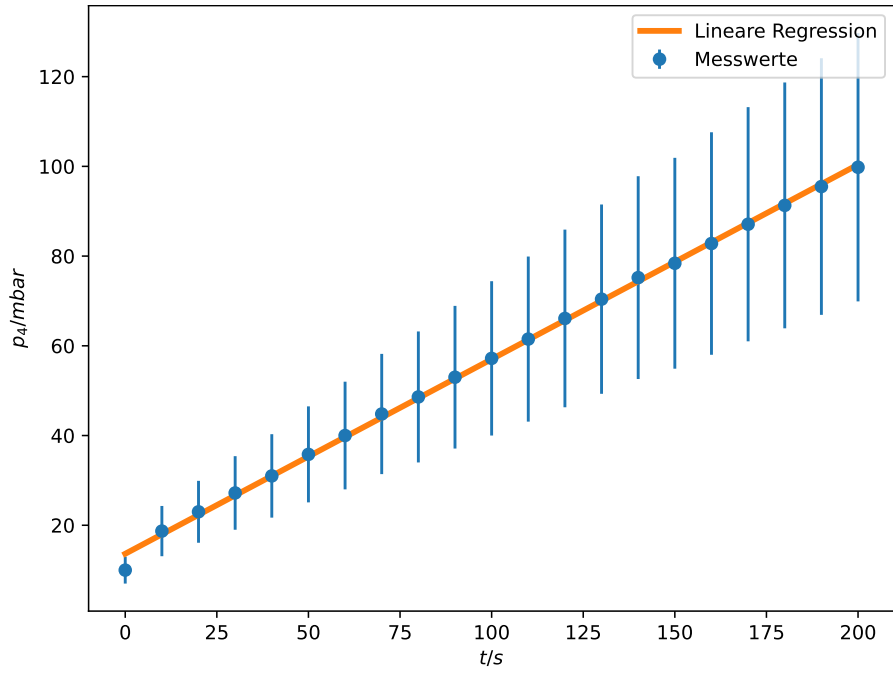
**Abbildung 7:** Grafische Darstellung der Messwerte für die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe.

Die Messwerte der anderen drei Gleichgewichtsdrücke sind in Tabelle 5 dargestellt. Die entsprechenden Plots sind in Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10 zu finden. Die weiteren Gleichgewichtsdrücke sind  $p_4 \approx 10 \cdot \text{mbar}$ ,  $p_5 \approx 50 \cdot \text{mbar}$  und  $p_6 \approx 100 \cdot \text{mbar}$ .

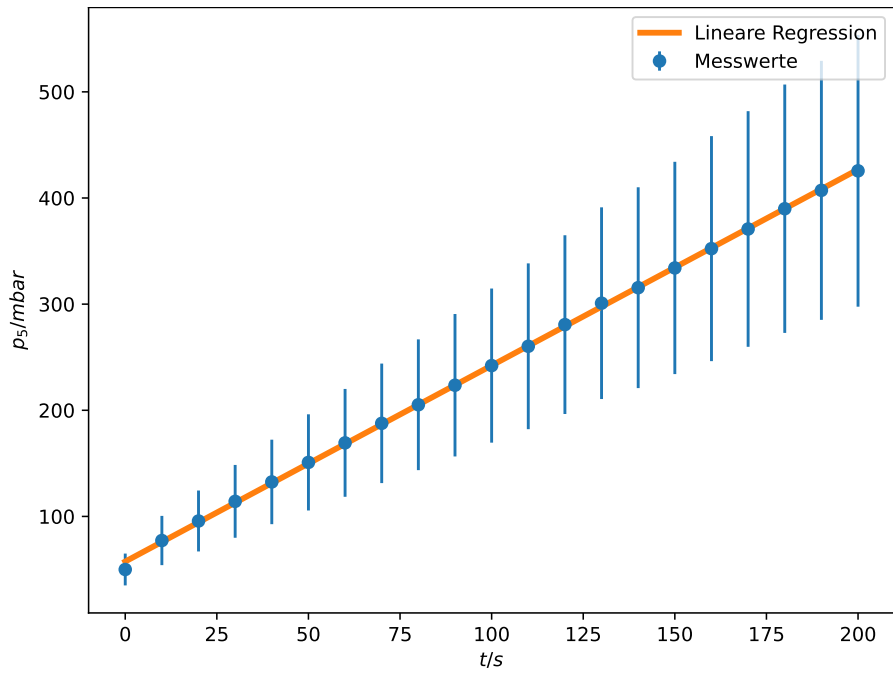
**Tabelle 5:** Messwerte für die drei anderen Gleichgewichtsdrücke.

$t/s$	$p_4/\text{mbar}$	$p_5/\text{mbar}$	$p_6/\text{mbar}$
0	$10,0 \pm 3,0$	$50,0 \pm 15,0$	$100,0 \pm 30,0$
10	$18,7 \pm 5,6$	$77,3 \pm 23,2$	$144,4 \pm 43,3$
20	$23,0 \pm 6,9$	$95,7 \pm 28,7$	$187,8 \pm 56,3$
30	$27,2 \pm 8,2$	$114,2 \pm 34,3$	$211,7 \pm 63,5$
40	$31,0 \pm 9,3$	$132,5 \pm 39,8$	$245,9 \pm 73,8$
50	$35,8 \pm 10,7$	$150,9 \pm 45,3$	$280,1 \pm 84,0$
60	$40,0 \pm 12,0$	$169,3 \pm 50,8$	$314,4 \pm 94,3$
70	$44,8 \pm 13,4$	$187,7 \pm 56,3$	$348,5 \pm 105,0$
80	$48,6 \pm 14,6$	$205,2 \pm 61,6$	$382,6 \pm 115,0$
90	$53,0 \pm 15,9$	$223,6 \pm 67,1$	$416,9 \pm 125,0$
100	$57,2 \pm 17,2$	$242,1 \pm 72,6$	$450,0 \pm 135,0$
110	$61,5 \pm 18,4$	$260,3 \pm 78,1$	$483,6 \pm 145,0$
120	$66,1 \pm 19,8$	$280,7 \pm 84,2$	$516,4 \pm 155,0$
130	$70,4 \pm 21,1$	$300,9 \pm 90,3$	$549,9 \pm 165,0$
140	$75,2 \pm 22,6$	$315,5 \pm 94,6$	$581,2 \pm 174,0$
150	$78,4 \pm 23,5$	$334,1 \pm 100,0$	$612,7 \pm 184,0$
160	$82,8 \pm 24,8$	$352,3 \pm 106,0$	$643,4 \pm 193,0$
170	$87,1 \pm 26,1$	$370,8 \pm 111,0$	$673,1 \pm 202,0$
180	$91,3 \pm 27,4$	$389,9 \pm 117,0$	$702,0 \pm 211,0$
190	$95,5 \pm 28,6$	$407,2 \pm 122,0$	$729,9 \pm 219,0$
200	$99,8 \pm 29,9$	$425,6 \pm 128,0$	$756,5 \pm 227,0$

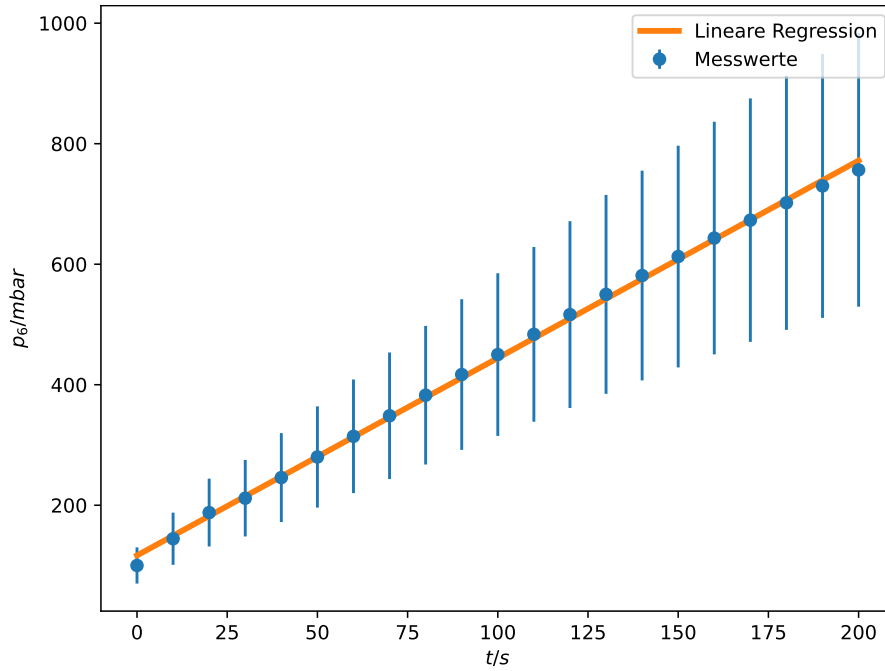




**Abbildung 8:** Grafische Darstellung der Messwerte für die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit dem Gleichgewichtsdruck  $p_4 \approx 10 \cdot \text{mbar}$ .



**Abbildung 9:** Grafische Darstellung der Messwerte für die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit dem Gleichgewichtsdruck  $p_5 \approx 50 \cdot \text{mbar}$ .



**Abbildung 10:** Grafische Darstellung der Messwerte für die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit dem Gleichgewichtsdruck  $p_6 \approx 100 \cdot \text{mbar}$ .

Analog zur Turbomolekularpumpe wurden wieder lineare Ausgleichsrechnungen durchgeführt und das Saugvermögen bestimmt. Der einzige Unterschied besteht darin, dass das Volumen nun  $V = (34 \pm 0.1) \text{ L}$  beträgt. Für den gemittelten Druck ergibt sich

$$a = (0,03 \pm 0,002) \cdot \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$$

$$p_G = (1,00 \pm 0,2) \text{ mbar}$$

$$S = (1,02 \pm 0,22) \frac{\text{L}}{\text{s}}.$$

Für  $p_4$  ergibt sich

$$a = (0,43 \pm 0,003) \cdot \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$$

$$p_G = (10,0 \pm 3,0) \text{ mbar}$$

$$S = (1,5 \pm 0,4) \frac{\text{L}}{\text{s}}.$$

Für  $p_5$  ergibt sich

$$a = (1,85 \pm 0,008) \cdot \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$$

$$p_G = (50,0 \pm 15,0) \text{ mbar}$$

$$S = (1,3 \pm 0,4) \frac{\text{L}}{\text{s}}.$$

Für  $p_6$  ergibt sich

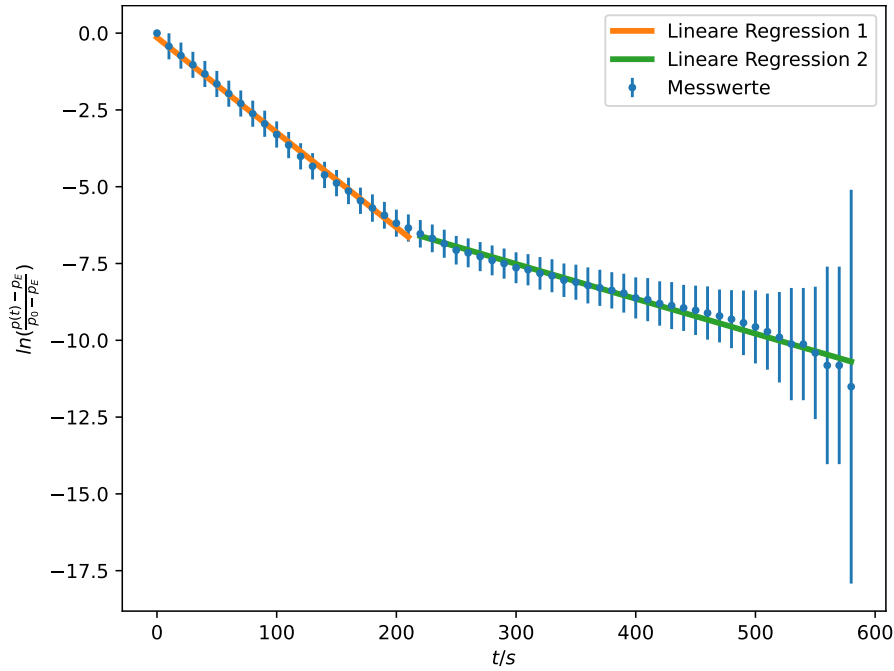
$$\begin{aligned}a &= (3,28 \pm 0,026) \frac{\text{mbar}}{\text{s}} \\p_G &= (100,0 \pm 30,0) \text{mbar} \\S &= (1,12 \pm 0,33) \frac{\text{L}}{\text{s}}.\end{aligned}$$

### 3.2.2 Evakuierungsmessung

Die Messwerte der Evakuierungsmessung der Drehschieberpumpe sind in Tabelle 6 dargestellt. In Abbildung 11 ist  $\ln(\frac{p(t)-p_0}{p_0-p_E})$  gegen die Zeit  $t$  in s aufgetragen.

**Tabelle 6:** Messwerte der Evakuierungsmessung der Drehschieberpumpe.

$t/s$	$p/\text{mbar}$	$t/s$	$p/\text{mbar}$
0	$997,1 \pm 299,1$	310	$0,60 \pm 0,18$
10	$649,1 \pm 194,7$	320	$0,55 \pm 0,17$
20	$479,6 \pm 143,9$	330	$0,52 \pm 0,16$
30	$355,2 \pm 106,6$	340	$0,47 \pm 0,14$
40	$263,7 \pm 79,1$	350	$0,45 \pm 0,14$
50	$190,6 \pm 57,2$	360	$0,42 \pm 0,13$
60	$139,0 \pm 41,7$	370	$0,40 \pm 0,12$
70	$100,9 \pm 30,3$	380	$0,38 \pm 0,11$
80	$72,5 \pm 21,8$	390	$0,36 \pm 0,11$
90	$52,3 \pm 15,7$	400	$0,33 \pm 0,10$
100	$36,9 \pm 11,1$	410	$0,32 \pm 0,10$
110	$26,2 \pm 7,9$	420	$0,30 \pm 0,09$
120	$18,2 \pm 5,5$	430	$0,29 \pm 0,09$
130	$13,2 \pm 4,0$	440	$0,28 \pm 0,08$
140	$10,0 \pm 3,0$	450	$0,27 \pm 0,08$
150	$7,7 \pm 2,3$	460	$0,26 \pm 0,08$
160	$6,0 \pm 1,8$	470	$0,25 \pm 0,07$
170	$4,4 \pm 1,3$	480	$0,24 \pm 0,07$
180	$3,5 \pm 1,1$	490	$0,23 \pm 0,07$
190	$2,8 \pm 0,8$	500	$0,22 \pm 0,07$
200	$2,2 \pm 0,6$	510	$0,21 \pm 0,06$
210	$1,9 \pm 0,5$	520	$0,20 \pm 0,06$
220	$1,6 \pm 0,4$	530	$0,19 \pm 0,06$
230	$1,4 \pm 0,4$	540	$0,19 \pm 0,06$
240	$1,2 \pm 0,3$	550	$0,18 \pm 0,05$
250	$1,0 \pm 0,3$	560	$0,17 \pm 0,05$
260	$0,3 \pm 0,2$	570	$0,17 \pm 0,05$
270	$0,4 \pm 0,2$	580	$0,16 \pm 0,05$
280	$0,6 \pm 0,2$	590	$0,15 \pm 0,04$
290	$0,0 \pm 0,2$	600	$0,15 \pm 0,04$
300	$0,3 \pm 0,2$		



**Abbildung 11:** Grafische Darstellung der Messwerte für die Evakuierungsmessung der Drehschieberpumpe.

Es wurden für zwei Bereiche jeweils lineare Ausgleichsrechnungen der Form  $f(x) = ax + b$  durchgeführt und deren Parameter bestimmt. Aus  $S = -aV$  lässt sich das Saugvermögen der Pumpe bestimmen. Für den ersten Bereich ergibt sich

$$a = (-0,031 \pm 0,0004) \frac{1}{s}$$

$$S = (1,254 \pm 0,014) \frac{L}{s}.$$

Und für den zweiten Bereich

$$a = (-0,011 \pm 0,0003) \frac{1}{s}$$

$$S = (0,363 \pm 0,010) \frac{L}{s}.$$

## 4 Diskussion

Abschließend lässt sich fest stellen, dass die Messung vollständig nach den theoretisch hergeleiteten Verhalten abliefen. Die bestimmten Saugvermögen und die relativen Abweichungen sind in Tabelle 7 für die Turbomolekularpumpe und in Tabelle 8 für die Drehschieberpumpe zu finden. Allgemein lässt sich feststellen, dass die Leckratenmessungen für die Turbomolekularpumpe wesentlich bessere Ergebnis liefert. Außerdem

fällt auf, dass der zweite Bereich der Evakuierungsmessung für beide Pumpen signifikant schlechtere Ergebnisse liefert. Insgesamt lässt sich sagen, dass die Ergebnisse der Turbomolekularpumpe hohe relative Abweichungen zu den Herstellerangaben haben, so dass die Messung nicht vollständig zufriedenstellend ist. Die Abweichungen lassen sich höchstwahrscheinlich auf den Einfluss des Leitwerts zurück führen. Im Gegensatz zu den bestimmten Saugvermögen der Turbomolekularpumpe haben die bestimmten Saugvermögen der Drehschieberpumpe geringe Abweichungen, so dass die Messung erfolgreich war. Auch hier sind die Ergebnisse der Leckratenmessungen meist besser und es fällt auf, dass bei höheren Gleichgewichtsdrücken tendenziell bessere Ergebnisse erzielt wurden.

**Tabelle 7:** Saugvermögen und deren relativen Abweichungen zu den Herstellerangaben der Turbomolekularpumpe. Das Saugvermögen wird mit  $S = 77 \text{ L/s}$  angegeben.

Messung	$S / \text{L/s}$	relative Abweichung in Prozent
Evakuierung für den ersten Bereich	$S = (10,3 \pm 1,5) \text{ L/s}$	86,6
Evakuierung für den zweiten Bereich	$S = (1,254 \pm 0,033) \text{ L/s}$	98,4
Leckrate mit $p_G \approx 6 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$	$S = (29 \pm 9) \text{ L/s}$	62,0

**Tabelle 8:** Saugvermögen und deren relativen Abweichungen zu den Herstellerangaben der Drehschieberpumpe. Das Saugvermögen wird mit  $S = 1,1 \text{ L/s}$  angegeben.

Messung	$S / \text{L/s}$	relative Abweichung in Prozent
Evakuierung für den ersten Bereich	$S = (1,254 \pm 0,014) \text{ L/s}$	14,00
Evakuierung für den zweiten Bereich	$S = (0,363 \pm 0,010) \text{ L/s}$	67,00
Leckrate mit $p_G \approx 1 \text{ mbar}$	$S = (1,02 \pm 0,22) \text{ L/s}$	7,72
Leckrate mit $p_G \approx 10 \text{ mbar}$	$S = (1,5 \pm 0,4) \text{ L/s}$	36,36
Leckrate mit $p_G \approx 50 \text{ mbar}$	$S = (1,3 \pm 0,4) \text{ L/s}$	18,18
Leckrate mit $p_G \approx 100 \text{ mbar}$	$S = (1,12 \pm 0,33) \text{ L/s}$	1,81

## Literatur

- [1] Universität Kiel. *Physikalisches Praktikum Vakuum*. URL: <https://etpwww.etp.kit.edu/~simonis/praktikum/musterprotokolle/P2/Vakuum/Vakuum-2012-Fleig+Krause.pdf> (besucht am 13.06.2023).
- [2] Pfeiffer-Vacuum. *Drehschiebervakuumpumpen*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/vakuumerzeugung/drehschiebervakuumpumpen/aufbau-funktionsprinzip/> (besucht am 13.06.2023).

- [3] pfeiffer-vacuum.com. *Einführung in die Vakuumtechnik*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/einfuehrung-in-die-vakuumtechnik/> (besucht am 13.06.2023).
- [4] pfeiffer-vacuum.com. *Grundlagen der Totaldruckmessung*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/vakuummessgeraete/grundlagen-der-totaldruckmessung/indirekte-gasartabhaengige-druckmessung/> (besucht am 13.06.2023).
- [5] pfeiffer-vacuum.com. *Turbomolekularpumpen*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/vakuumerzeugung/turbomolekularpumpen/aufbau-funktionsprinzip/> (besucht am 13.06.2023).
- [6] *V70-Vakuumversuch*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2018.