

VERSUCH NUMMER 70

Vakuumphysik

Patrick Schmidt
patrick7.schmidt@udo.edu

Karl Schiller
karl.schiller@udo.edu

Durchführung: 30.05.2018

Abgabe: 13.06.2018

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	1
2	Theorie	1
2.1	Grundbegriffe	1
2.2	Vakuumtechnik:	3
3	Durchführung	7
3.1	Versuchsaufbau	7
3.2	Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe	8
3.3	Leckratenmessung der Drehschieberpumpe	8
3.4	Evakuierungsmessung der Turbomolekularpumpe	9
3.5	Leckratenmessung der Turbomolekularpumpe	9
3.6	Volumenbestimmung	9
4	Auswertung	10
4.1	Berechnung des Rezipientenvolumens	10
4.2	Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe	11
4.3	Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe	14
4.4	Leckratenmessung der Drehschieberpumpe	15
4.5	Leckratenmessung der Turbomolekularpumpe	18
5	Diskussion der Ergebnisse	21
	Literatur	23

1 Zielsetzung

Unter anderem in technischen Anwendungen und in der Freizeit (z.B. beim Tauchen oder Fallschirmspringen) werden Unterdruck- oder Vakuumbereiche verwendet. Dies motiviert eine genauere Betrachtung der Grundlagen der Vakuumtechnik in diesem Versuch. Genauer soll der Aufbau eines Pumpstandes zur Bestimmung von Evakuierungskurven und Leckratenmessungen bei einer Drehschieberpumpe und einer Turbomolekularpumpe (im weiteren als TMP bezeichnet) verwendet werden. Aus diesen Daten sollen dann das effektive Saugvermögen berechnet und gegen die Druckabhängigkeit dargestellt werden.

2 Theorie

2.1 Grundbegriffe

Im Folgenden werden zunächst die wichtigsten Begriffe der Vakuumphysik näher erläutert.

Vakuum: Die allgemeine Annahme, dass das Vakuum ein vollständig leerer Raum ist, ist nach Definition der deutschen Industrienorm nicht korrekt. Ein Vakuum ist dort definiert als „der Zustand eines Gases, wenn in einem Behälter der Druck des Gases und damit die Teilchenzahldichte niedriger ist als außerhalb oder wenn der Druck des Gases niedriger ist als 300 mbar, d. h. kleiner als der niedrigste auf der Erdoberfläche vorkommende Atmosphärendruck“ [1].

Das Vakuum wird in einzelne Druckbereiche unterteilt, die anhand der mittleren freien Weglänge der Teilchen charakterisiert werden. Eine solche Unterteilung ist in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1: Druckbereiche mit konventionellem Namen, Teilchenzahldichte n und mittlerer freier Weglänge λ .

	p in mbar	n in Teilchen/cm ³	λ
Umgebungsdruck	1013	$2,7 \cdot 10^{19}$	68 nm
Unterdruck	> 300	$> 10^{19}$	$< 0,1 \mu\text{m}$
Großvakuum	300 - 1	$10^{19} - 10^{16}$	0,1 - 100 μm
Feinvakuum	$1 - 10^{-3}$	$10^{16} - 10^{13}$	0,1 - 100 mm
Hochvakuum	$10^{-3} - 10^{-7}$	$10^{13} - 10^9$	10 cm - 1 km
Ultrahochvakuum	$10^{-7} - 10^{-12}$	$10^9 - 10^4$	1 km - 10^5 km

Druck und Partialdruck: „Der Druck ist definiert als der Betrag einer senkrecht und gleichmäßig auf eine Flächeneinheit wirkenden Kraft“ [9].

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

Da ein Gas wie z.B. Luft nicht nur aus einer Teilchensorte besteht und jede Sorte ihren eigenen Anteil zum Totaldruck darstellt, werden die einzelnen entstehenden Teildrücke als Partialdrücke bezeichnet. Eine graphische Darstellung der Druckarten ist in 1 zu finden. Dabei zeigt die linke Abbildung einen Gasbehälter mit einer einzelnen grün markierten Gasart, welche einen Totaldruck erzeugt. Die rechte Abbildung hingegen zeigt einen Gasbehälter mit unterschiedlichen Teilchensorten in verschiedenen Farben, die jeweils einen mit p_p gekennzeichneten Partialdruck erzeugen.



Abbildung 1: Graphische Darstellung von Druck und Partialdruck durch Impulse von Teilchen nach [9].

Mittlere freie Weglänge: Die mittlere freie Weglänge λ ist definiert als die durchschnittliche Weglänge, die ein Teilchen zurücklegt, bis es zu einem Stoß mit einem anderen Teilchen kommt. Es gilt

$$\lambda = \frac{1}{n \cdot \sigma} \quad (2)$$

mit der Teilchenzahldichte n und dem Wirkungsquerschnitt σ . Unter Verwendung eines idealen Gases, bei dem sich die Teilchen nach der Maxwellschen Geschwindigkeitsverteilung bewegen, gilt

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} p d^2} \quad (3)$$

mit der Boltzmann-Konstanten k_B , der Temperatur T , dem Durchmesser des Moldeküls d und dem Druck p .

Ideales Gas: Das ideale Gas ist ein Modell aus der Thermodynamik, um Gas möglichst einfach beschreiben zu können. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Gasteilchen nur untereinander oder mit den Wänden (innerhalb derer sich das entsprechende Gas befindet) elastisch stoßen. Daraus lässt sich die ideale Gasgleichung

$$p \cdot V = N k_B T \quad (4)$$

mit der Teilchenzahl N und dem Volumen des Gefäßes V folgern. Für konstante Temperaturen ergibt sich das Gesetz von Boyle-Mariotte

$$p \sim V^{-1}. \quad (5)$$

Stömungsarten: Bei der Unterscheidung von verschiedenen Strömungsarten ist die Knudson-Zahl

$$K_N = \frac{\lambda}{l} \quad (6)$$

von Bedeutung. Diese ist definiert als die mittlere freie Weglänge λ pro charakteristischer Länge des durchströmten Mediums l . Dabei ist die charakteristische Länge die räumliche Breite des Mediums senkrecht zur Strömungsrichtung. Für eine Knudsen-Zahl zwischen 0,01 und 0,5 wird der Begriff Knudsenströmung verwendet. Diese Knudsen-Strömung taucht besonders im Bereich des Feinvakuums auf, welches oft in technischen Anwendungen verwendet wird. Bei einer Knudsenzahl von $K_N < 0,01$ wird von einer Kontinuumsströmung gesprochen, die vor allem im Grobvakuum auftritt. Im weiteren Verlauf werden die laminare und die turbulente Strömung betrachtet. Gilt $K_N > 0,5$, so ist die mittlere freie Weglänge wesentlich größer als die Abmessung des Strömungskanals und es lassen sich kaum noch Wechselwirkungen mit anderen Gasteilchen feststellen. Es kommt zur molekularen Strömung, die vor allem im Bereich des Hoch- und Ultrahochvakuums aufzufinden ist.

2.2 Vakuumtechnik:

Bei der Unterscheidung von verschiedenen Typen von Vakuumpumpen kommt es auf die verschiedenen Arten der Wechselwirkung zwischen Gasteilchen und Wänden an (vergleiche [9]).

Sorption: Als Sorption bezeichnet man die Aufnahme eines Teilchens durch Ab- oder Adsorption in einen Körper oder Stoff.

Absorption: Ein Atom, Molekül oder Ion wird vollständig im Körper oder Stoff aufgenommen.

Adsorption: Anders als bei der Absorption, wird das Atom, Molekül oder Ion hier nur auf der Oberfläche des Körpers festgehalten und nicht komplett aufgenommen.

Desorption: Dies ist die Umkehrung der Sorption, also die Abgabe eines Atoms, Moleküls oder Ions.

Diffusion: Diffusion beschreibt den Ausgleich eines Konzentrationsgefälles zwischen zwei Bereichen. Dieser Ausgleich ermöglicht das Anlegen eines Vakuums im gesamten Rezipienten, obwohl sich die Pumpe an einer festen Position befindet.

Da es auf der Erde kein natürliches Vakuum gibt, ist es unverzichtbar auf Vakuumpumpen zurückzugreifen. Hier werden zwei Arten von Vakuumpumpen betrachtet:

Drehschieberpumpe (nach [9]): Die Drehschieberpumpe gehört zur Kategorie der Gastransferpumpen und besteht aus einem Gehäuse (auch Stator genannt), einem exzentrisch eingebautem Rotor und einem im Rotor eingebautem Schieber, welcher durch eine Feder an das Gehäuse gedrückt wird. Ein- und Ausgang des Gehäuses sind durch Ventile gesichert. Dieser Aufbau ist in Abbildung 2 zu finden. Der Schieber teilt den Arbeitsraum in Druck-

und Saugbereich ein. Führt der Schieber an dem Einlassventil vorbei, so liegt in diesem „neu“ entstandenen Volumen nach Boyle-Mariotte ein geringerer Druck als im Einlassventil vor und Gas strömt ein. Nachdem der Einlass wieder geschlossen ist, wird das Gas zwischen den zwei Scheiben komprimiert und nach Boyle-Mariotte steigt der Druck. Ist der Druck groß genug, so öffnet sich das Auslassventil (Federventil) und das Gas strömt heraus. Während dieses Vorganges befindet sich immer etwas Öl im Arbeitsraum, um den Schieber zu schmieren und den Raum abzudichten.

Diese Art von Vakuumpumpen wird bis zu einem Feinvakuum als Hauptpumpe verwendet. Für geringere Drücke wird ein solches Gerät als Vorpumpe verwendet, z.B. vor einer TMP.

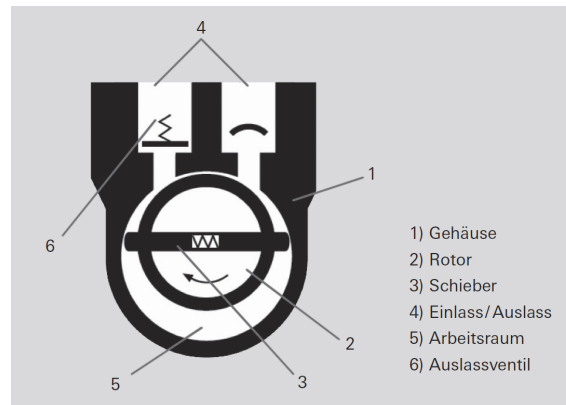


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Drehschieberpumpe [2].

Turbomolekularpumpe (nach [9]): Diese Art der Molekularpumpe besteht aus einer mehrstufigen Anordnung von Statoren und Rotoren und benötigt ein Vorvakuum von ungefähr 10^{-3} mbar, sodass eine molekulare Strömung vorliegt. In Abbildung 3 ist der Aufbau schematisch dargestellt. Die Rotoren drehen sich mit bis zu 1500 Hz und geben einfallenden Teilchen einen zusätzlichen Impuls. In der schematischen Darstellung fallen Teilchen von oben ein und erhalten aufgrund einer Schräge der Rotoren einen Impuls nach unten. Im Anschluss treffen sie auf die Statoren, welche eine spiegelverkehrte Schräge aufweisen und eine Bewegung des Teilchens nach unten verstärken. Somit werden auf die Rotoren treffende Teilchen in die Richtung der Vorvakuumpumpe beschleunigt. Ein Vorvakuum ist bei dieser Pumpenart notwendig, da die mittlere freie Weglänge größer sein muss als der Abstand der Rotorblätter. Ansonsten käme es zwischen den Statoren und Rotoren zu Stößen der Teilchen untereinander, sodass im Mittel keine Beschleunigung in Richtung der Vorvakuumpumpe erzeugt wird.

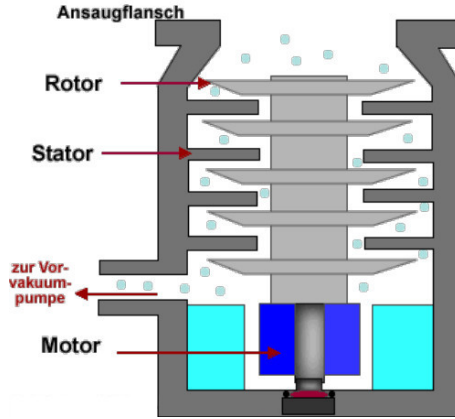


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Turbomolekularpumpe [3].

Saugvermögen: Zur Bestimmung des Saugvermögens S (geförderter Volumenstrom) müssen folgende theoretische Annahmen getroffen werden [4]:

1. Es gilt während der gesamten Messung $\dot{V} = \text{const.}$
2. Das verwendete Gas kann als ideales Gas angenommen werden.
3. Die Messungen werden bei $T = \text{const}$ getätigt.
4. Das Gas ist zu jedem Zeitpunkt im thermischen Gleichgewicht.
5. Lecks und Effekte der Desorption sind zu vernachlässigen.
6. Das Saugvermögen S ist konstant und unabhängig vom Druck.

Wird die ideale Gasgleichung nach der Zeit abgeleitet und die Relation $\dot{V} = S = \text{const}$ eingesetzt, so folgt die Gleichung

$$\dot{p}V = -pS. \quad (7)$$

Die so entstandene Differentialgleichung lässt sich durch den Exponentialansatz

$$p(t) = p_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

lösen. Dabei ist p_0 ein gegebener Anfangsdruck. Durch Einsetzen ergibt sich

$$\tau = \frac{V}{S} \quad (9)$$

Wird nun ein endlicher Enddruck p_E berücksichtigt, so folgt die Gleichung

$$p(t) = (p_0 - p_E) e^{-\frac{tS}{V}} + p_E. \quad (10)$$

Der Einsatz eines Enddrucks folgt aus Effekten wie der Desorption, sowie realer und virtueller Lecks. Virtuelle Lecks stehen dabei für die Diffusion von Teilchen durch die Rezipientenwand in das Vakuum. Durch die Funktionsweise einer Pumpe kann nur ein endlicher Enddruck erreicht werden, da Effekte wie ein vorhandenes Totvolumen sowie ein endliches Kompressionsvermögen vorliegen können.

Leckrate: Um zu ermitteln, wieviel Gas pro Zeit aus dem Aufbau geleck ist, wird die Leckrate Q durch

$$S = \frac{Q}{P_G} \text{ mit } Q = V \frac{dp}{dt} \quad (11)$$

definiert. Daraus folgt das Saugvermögen

$$S = \frac{V}{p_G} \frac{dp}{dt}. \quad (12)$$

Leitwerte: Durch verschiedene Phänomene wie Strömungswiderstände der Verbindungsstücke lässt sich das vom Hersteller angegebene Saugvermögen S_0 nicht erreichen. Daher wird ein effektives Saugvermögen S_{eff} oder „Nennsaugvermögen“ von

$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{S_0} + \frac{1}{L} \quad (13)$$

erwartet. Dabei ist L der Leitwert, welcher den reziproken Strömungswiderstand darstellt. Die Größe des Leitwerts ist abhängig von der Strömungsart und der Geometrie des Rohres. Für runde Rohre ist L zum Beispiel bei molekularer Strömung proportional zu d^3/l , mit dem Durchmesser des Rohres d und der Rohrlänge l . Bei laminarer Strömung in einem runden Rohr ergibt eine Proportionalität von $L \sim d^4/l$.

Leck: Als ein Leck wird eine undichte Stelle innerhalb eines Rezipienten bezeichnet, durch welches Teilchen aus dem System entweichen oder eindringen. In der Vakuumphysik wird zwischen realen und virtuellen Lecks unterschieden. Reale Lecks sind physische Löcher im Aufbau, wohingegen virtuelle Lecks Desorptions- oder Diffusionsprozesse von Teilchen an der Rezipientenwand beschreiben. Trotzdem verfälschen diese Effekte die Messwerte, daher werden durch Erhitzen des Rezipienten (Ausheizen) oder kurzzeitiges Befüllen mit Stickstoff (Fluten) die Desorptionsraten so weit es geht gesenkt.

Zur Messung des Drucks während der Messreihen werden zwei verschiedene Vakuummeter verwendet, dabei hat jedes seinen eigenen Anwendungsbereich:

Pirani-Messgerät: Für hohe Druckbereiche ($p > 10 \cdot 10^{-4}$ mbar) wird ein Pirani-Messgerät verwendet. Dieses bestimmt den Druck des Gases über dessen Wärmeleitfähigkeit. Diese sinkt bei kleinerem Gasdruck und die Temperatur des im Messgerät befestigten Glühdrahts steigt. Wird der Glühdraht auf einer konstanten Temperatur gehalten, so ändert sich mit der Wärmeleitfähigkeit des Gases auch die benötigte messbare Heizleistung. Wird dieses Messgerät in einem zu hohen Druckbereich verwendet, so wird die Wärmeleitung von der Konvektion überdeckt. Bei zu niedrigen Drücken dominiert die Wärmestrahlung und der eigentlich zu messende Effekt (Wärmeleitung) tritt in den Hintergrund. Zudem tritt Wärmeleitung über die Aufhängung des Drahtes auf.

Glüh- und Kaltkathoden Vakuummeter: Bei einem Glühkathoden Vakuummeter werden die Elektronen durch thermische Elektronenemission von der Kathode gelöst und die

Gasteilchen durch Stöße ionisiert. Die Anode ist zylindrisch und gitterförmig angeordnet, in ihrer Mitte befindet sich ein als Auffänger dienender Draht, welcher die Ionen aufammelt. Dieser resultierende Ionisationsstrom zwischen Anode und dem Aufhänger ist ein Maß für den Druck. Die Funktionsweise des Kaltkathoden Vakuummeters ist nahezu analog zu der des Glühkathoden Vakuummeters, nur werden die Elektronen nicht durch die thermische Elektronenemission, sondern durch ein starkes äußeres elektrisches Feld aus der Kathode herausgelöst (elektrische Feldemission).

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

Der Pumpstand ist wie in Abbildung 4 gezeigt aufgebaut. Hier ist es wichtig, möglichst sorgfältig zu arbeiten, da sonst Fehler durch Lecks an Gummidichtungen und Flanschen entstehen.

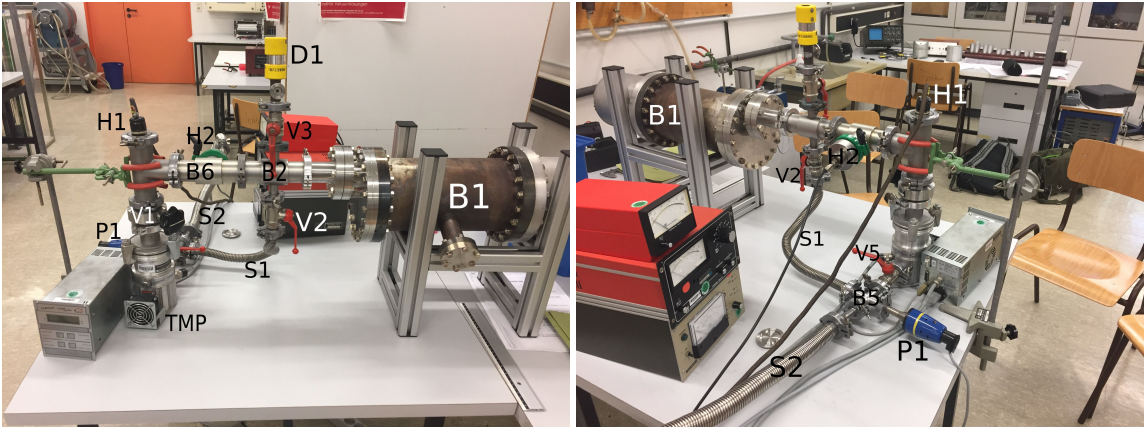


Abbildung 4: Aufbau des Pumpstandes und Beschriftung der Einzelteile.

Dabei wurden diejenigen Teile verwendet, die aus Tabelle 2 bzw. Abbildung 5 zu entnehmen sind.

Tabelle 2: Verwendete Bauteile zum Aufbau des zur Messung verwendeten Pumpstandes [4].

Abkürzung	Bezeichnung/Name	Abkürzung	Bezeichnung/Name
S1	Schlauch 1	D1	Nadel-/ Dosierventil 1
S2	Schlauch 2	P1	analoges Pirani Druckmessgerät
B1	großer Rezipient	B2	Bauteil
B3	Bauteil	B4	Bauteil
B5	Bauteil	B6	Bauteil
V1	Klappenventil	V2	Kugelventil 2
V3	Kugelventil 3	V4	Kugelventil 4

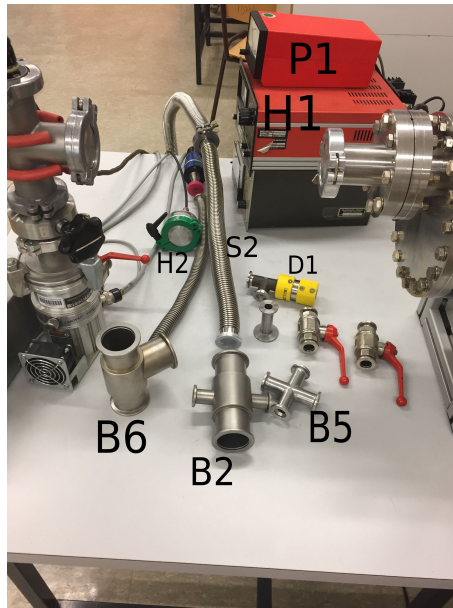


Abbildung 5: Verwendete Teile zum Aufbau des Pumpstandes.

Zuerst wird der Pumpstand mit der Drehschieberpumpe evakuiert. Nach ungefähr 10 min stellt sich ein Druck von $5 \cdot 10^{-3}$ mbar am Pirani-Messgerät ein und die TMP kann durch Öffnen von V1 und Schließen von V2 hinzugeschaltet werden. Jetzt wird das Glühkathoden Vakuummeter eingeschaltet. Im Anschluss wird der Rezipient ca. 10 min mit dem Heißluftföhn erhitzt. Das führt dazu, dass Wasserablagerungen im Rezipienten verdampfen und so die Desorptionsrate nach der Abkühlung geringer ist. Wird am Glühkathodenvakuummeter ein Enddruck zwischen $2 \cdot 10^{-5}$ mbar bis $8 \cdot 10^{-5}$ mbar erreicht, so gilt der Aufbau als dicht und es kann mit den Messungen begonnen werden.

3.2 Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe

Zuerst wird die TMP durch das Schließen von V1 und V5 abgeschiebert und V2 geöffnet. Bei laufender Drehschieberpumpe werden nun die Belüftungsventile D1 und V3 geöffnet, um den Rezipienten auf Atmosphärendruck zu bringen. Daraufhin werden die Belüftungsventile wieder geschlossen und der Druckabfall gegen die Zeit am Pirani-Messgerät aufgenommen. Diese Messung wird 5-mal durchgeführt.

3.3 Leckratenmessung der Drehschieberpumpe

Bei laufender Drehschieberpumpe wird mit dem Dosierventil D1 ein Gleichgewichtsdruck p_G im Rezipienten erzeugt und nach Abschiebern von V4 der Druckanstieg mit der Zeit durch das Pirani-Messgerät aufgenommen. Diese Messung wird für die Gleichgewichtsdrücke $p_G = \{0,1 \text{ mbar}, 0,4 \text{ mbar}, 0,8 \text{ mbar}, 1,0 \text{ mbar}\}$ jeweils 3-mal durchgeführt. Bevor nun die Messungen an der TMP durchgeführt werden können, muss diese wieder hinzugeschaltet werden. Dazu wird V1 und V5 geöffnet und V2 geschlossen. Wenn der Druck durch die

Drehschieberpumpe unter $5 \cdot 10^{-3}$ mbar gefallen ist, kann die TMP eingeschaltet werden.

3.4 Evakuierungsmessung der Turbomolukularpumpe

Bei laufender TMP wird mit dem Dosierventil D1 ein Druck von $5 \cdot 10^{-3}$ mbar eingestellt und anschließend D1 und V3 möglichst zeitgleich geschlossen. Der auftretende Druckabfall wird mit der Zeit durch ein Glühkathoden-Vakuummeter aufgenommen. Diese Messung wird analog zu der bei der Drehschieberpumpe 5-mal wiederholt.

3.5 Leckratenmessung der Turbomolukularpumpe

Analog zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe wird auch hier mit Hilfe des Nadelventils D1 ein Gleichgewichtsdruck p_G eingestellt und dann V1 geschlossen. Daraufhin kann der Druckanstieg über das Glühkathoden-Vakuummeter und die Zeit aufgenommen werden. Diese Messung wird bei $p_G = \{5 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}, 10 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}, 150 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}, 20 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}\}$ jeweils 3-mal durchgeführt und der Druckanstieg mit einem Glühkathoden-Vakuummeter aufgenommen.

3.6 Volumenbestimmung

Da sich das Volumen des Rezipienten aufgrund von geschlossenen Ventilen und Verbindungsstücken bei jeder Messreihe ändert, muss für jede Messung das Gesamtvolumen bestimmt werden. Dazu werden die verwendeten Teile nach dem Abbau des Pumpstandes mit Lineal und Schieblehre ausgemessen und bei der Volumenberechnung mit einbezogen.

4 Auswertung

Im Folgenden werden die Regressionen, Abbildungen und Fehlerrechnungen mit den Paketen Numpy [8], Uncertainties [7], Matplotlib [5] und Scipy [6] in der Programmierumgebung Python 3.6.5 erstellt beziehungsweise durchgeführt.

4.1 Berechnung des Rezipientenvolumens

Für die Bestimmung des Saugvermögens der Pumpe ist das Volumen des Rezipienten erforderlich. Dazu sind in den Tabellen 3 und 4 die in dem Kapitel zum Versuchsaufbau erläuterten Bauteile samt ihres Volumens aufgeführt. Die Abkürzung „D“ steht dabei für die Verwendung des jeweiligen Bauteils bei der Vermessung der Drehschieberpumpe und die Abkürzung „T“ für die Turbomolekularpumpe.

Tabelle 3: Verwendete Bauteile mit nicht selbst vermessenen Volumina [4, p. 5].

Bauteil	V / L	Verwendung
B1	9,5 ± 0,8	D,T
B2	0,177 ± 0,09	D,T
B3	0,25 ± 0,01	D,T
B4	0,067 ± 0,004	T
B5	0,016 ± 0,002	D
V1 auf	0,044 ± 0,004	T
V1 zu	0,022 ± 0,002	D
V2 auf	0,015 ± 0,002	D
V2 zu	0,005 ± 0,001	T
V3 auf	0,015 ± 0,002	D,T
V3 zu	0,005 ± 0,001	D,T
V4	0,025 ± 0,005	D
V5 zu	0,005 ± 0,001	D

In Tabelle 4 sind neben den Volumina auch die gemessenen Durchmesser d und die Längen l der Bauteile aufgeführt, aus diesen wurde das jeweilige Volumen unter Annahme einer Zylindergeometrie nach

$$V = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 l$$

mit dem zugehörigen Fehler

$$\Delta V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial d} \Delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial l} \Delta l \right)^2} = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \sqrt{(l \Delta d)^2 + \left(\frac{d}{2} \Delta l \right)^2}$$

bestimmt.

Das Bauteil B6 ist ein T-Stück, hierfür wurde zum angegebenen Volumen des Zylinders in Tabelle 4 das Volumen des T-Teils addiert. Dieses hatte ebenfalls einen Durchmesser von $(40,5 \pm 0,1)$ mm und eine Länge von $(4,5 \pm 0,5)$ cm. Eine weitere Besonderheit ist

Tabelle 4: Verwendete Bauteile mit selbst vermessenen Volumina.

Bauteil	d / mm	l / mm	V / L	Verwendung
S1	16 ± 1	430 ± 10	$0,086 \pm 0,011$	D
S2	$24,8 \pm 0,1$	1210 ± 20	$0,584 \pm 0,011$	D
E1	$12,0 \pm 0,1$	$59,9 \pm 0,1$	$0,0067 \pm 0,0001$	D
B6	$40,5 \pm 0,1$	$130,0 \pm 0,1$	$0,225 \pm 0,007$	D,T

das Handventil V3, dieses wurde für die Messung der Evakuierungskurven geschlossen und für die Messung der Leckratenmessung geschlossen. Diese Volumenänderung ist beim Rezipientenvolumen jedoch kleiner als dessen Unsicherheit und wurde deshalb im Folgenden vernachlässigt.

Durch Aufsummierung der Teilvolumina ergibt sich für die beiden Pumpen ein Rezipientenvolumen von

$$V_{\text{Dreh}} = (10,9 \pm 0,8) \text{ L beziehungsweise}$$

$$V_{\text{Turbo}} = (10,3 \pm 0,8) \text{ L.}$$

Dabei berechnet sich die Abweichung der Volumina aus den Einzelabweichungen ΔV_i nach

$$\Delta V = \sqrt{\sum_i (V_i)}.$$

4.2 Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe

Die gemessenen Zeiten $t_{1..6}$, an denen die Druckwerte p erreicht wurden, sind in Tabelle 5 aufgeführt. Dabei wurden die Drücke mit einem analogen Pirani Messgerät mit einer Unsicherheit von 20 % aufgenommen. Ausschließlich für den Umgebungsdruck von 1013 mbar wurde eine Unsicherheit von 5 mbar aufgrund von wetter- und höhenbedingten Abweichungen angenommen. Für die gemessenen Zeiten lässt sich nur sehr schwer eine experimentelle Unsicherheit angeben, zumal diese stark zwischen Stützstellen variieren müsste. Für die weitere Auswertung wurden die Zeiten gemittelt, dieser Mittelwert $\overline{t_{1..6}}$ ist ebenfalls in Tabelle 5 aufgeführt. Dabei wurden Mittelwert und Fehler des Mittelwerts nach

$$\overline{t_{1..6}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 t_i$$

$$\Delta t_{1..6} = \sqrt{\frac{1}{30} \sum_{i=1}^6 (t_i - \overline{t_{1..6}})^2}$$

berechnet.

Des Weiteren lässt sich Gleichung (10) zu

$$f(p) = \ln \left(\frac{p(t) - p_e}{p_0 - p_e} \right) = -\frac{S}{V} t$$

Tabelle 5: Drücke und gemessene Zeiten der $p(t)$ -Evakuierungsmessung der Drehschieberpumpe.

p / mbar	$\ln \left(\frac{p(t)-p_e}{p_0-p_e} \right)$	$t_{1..6}$ / s	$\overline{t_{1..6}}$ / s
1013,0 ± 5,0	0,01 ± 0,2	0,0	0,0
100,0 ± 20,0	-2,3 ± 0,28	15,28	14,6 ± 0,4
60,0 ± 12,0	-2,81 ± 0,28	26,21	25,9 ± 0,1
40,0 ± 8,0	-3,22 ± 0,28	32,45	32,6 ± 0,2
20,0 ± 4,0	-3,91 ± 0,28	40,45	40,8 ± 0,1
10,0 ± 2,0	-4,61 ± 0,28	48,04	48,4 ± 0,1
8,0 ± 1,6	-4,83 ± 0,28	50,28	50,7 ± 0,1
6,0 ± 1,2	-5,12 ± 0,28	53,18	53,8 ± 0,2
4,0 ± 0,8	-5,53 ± 0,28	56,71	57,5 ± 0,2
2,0 ± 0,4	-6,23 ± 0,29	63,57	64,1 ± 0,2
1,0 ± 0,2	-6,94 ± 0,29	70,89	71,7 ± 0,3
0,8 ± 0,16	-7,17 ± 0,29	73,60	74,3 ± 0,3
0,6 ± 0,12	-7,47 ± 0,29	77,63	78,7 ± 0,3
0,4 ± 0,08	-7,9 ± 0,29	84,65	85,8 ± 0,4
0,2 ± 0,04	-8,68 ± 0,31	99,95	100,8 ± 0,5
0,1 ± 0,02	-9,57 ± 0,36	115,90	116,3 ± 0,8
0,08 ± 0,02	-9,9 ± 0,4	123,62	124,5 ± 1,0
0,06 ± 0,01	-10,41 ± 0,49	141,80	142,4 ± 1,7

umformen. Dieser Zusammenhang motiviert die in Abbildung 6 dargestellten linearen Regressionen an die Messwerte. Die verwendeten Messwerte sind ebenfalls in Tabelle 5 aufgeführt, dabei ergaben sich die Unsicherheiten nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung zu

$$\begin{aligned} \Delta f &= \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial p} \Delta p \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial p_e} \Delta p_e \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial p_0} \Delta p_0 \right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\Delta p}{p - p_e} \right)^2 + \left(\frac{\Delta p_0}{p_0 - p_e} \right)^2 + \left(\frac{\Delta p_e}{p_0 - p_e} - \frac{\Delta p_e}{p - p_e} \right)^2}. \end{aligned}$$

Der Startdruck p_0 betrug 1000 mbar und der Enddruck p_e betrug 0,03 mbar.

Die in Abbildung 6 dargestellte linearen Regressionen wurden mit der Funktion `curve_fit` des Pakets `scipy.optimize` [6] erstellt. Aus den erhaltenen Steigungen m lassen sich die Saugvermögen der Pumpe nach

$$\begin{aligned} S &= -m V_{\text{Dreh}} \\ \Delta S &= \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial m} \Delta m \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial V_{\text{Dreh}}} \Delta V_{\text{Dreh}} \right)^2} \\ &= \sqrt{(\Delta m V_{\text{Dreh}})^2 + (m \Delta V_{\text{Dreh}})^2} \end{aligned}$$

berechnen. Sie sind in Tabelle 6 dargestellt.

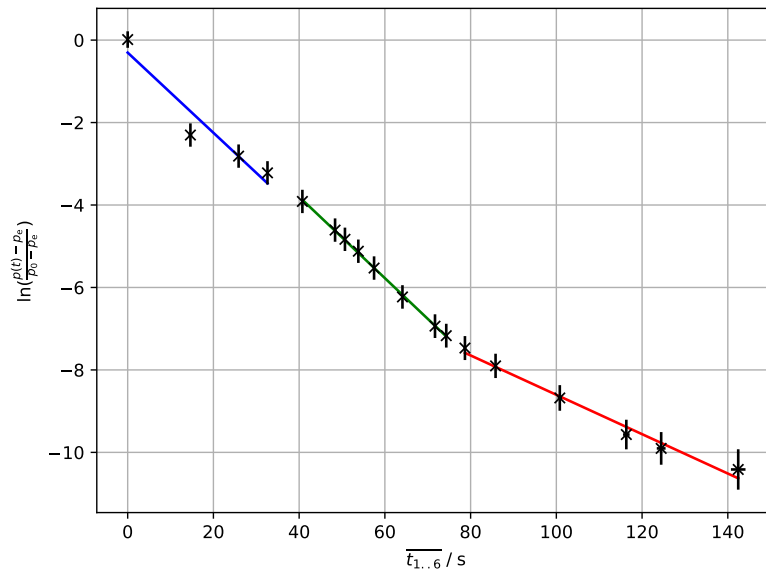


Abbildung 6: Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe samt linearer Regression.

Tabelle 6: Steigungen und Saugvermögen der Regressionen an die Evakuierungsmessung der Drehschieberpumpe.

Regression	$m / 1/s$	$S / L/s$
blau	$-0,097 \pm 0,020$	$1,06 \pm 0,23$
grün	$-0,099 \pm 0,001$	$1,08 \pm 0,08$
rot	$-0,047 \pm 0,003$	$0,52 \pm 0,05$

4.3 Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe

Analog zur Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe wurde die Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe ausgewertet. In Tabelle 7 sind die Drücke p samt der gemessenen Zeiten $t_{1..6}$ dargestellt. Der Mittelwert $\overline{t_{1..6}}$ und die logarithmierten Druckwerte sind nach den selben Formeln wie die Werte der Drehschieberpumpe berechnet. Die Ungenauigkeit der Glühkathode beträgt 10 %, der Startdruck $5 \cdot 10^{-3}$ mbar und der Enddruck $1,7 \cdot 10^{-5}$ mbar.

Tabelle 7: Drücke und gemessene Zeiten der $p(t)$ -Evakuierungsmessung der Turbomolekularpumpe.

p / mbar	$\ln \left(\frac{p(t)-p_e}{p_0-p_e} \right)$	$t_{1..6}$ / s						$\overline{t_{1..6}}$ / s
$(5 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$	$0,0 \pm 0,14$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$0,0 \pm 0,0$
$(2 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$	$-0,92 \pm 0,14$	0,76	0,80	0,70	0,63	0,62	0,85	$0,73 \pm 0,04$
$(8 \pm 0.8) \cdot 10^{-4}$	$-1,85 \pm 0,14$	1,99	1,93	1,83	1,72	1,76	1,92	$1,86 \pm 0,04$
$(4 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$	$-2,57 \pm 0,14$	2,68	2,78	2,36	2,61	2,51	2,81	$2,62 \pm 0,07$
$(2 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$	$-3,30 \pm 0,15$	3,78	3,64	3,68	3,50	3,52	3,64	$3,63 \pm 0,04$
$(8 \pm 0.8) \cdot 10^{-5}$	$-4,37 \pm 0,16$	5,38	5,31	5,14	5,14	5,01	5,30	$5,21 \pm 0,06$
$(6 \pm 0.6) \cdot 10^{-5}$	$-4,75 \pm 0,18$	6,11	6,04	5,97	5,90	5,78	6,00	$5,97 \pm 0,05$
$(4 \pm 0.4) \cdot 10^{-5}$	$-5,38 \pm 0,21$	8,19	7,36	7,31	7,39	6,93	7,27	$7,41 \pm 0,17$
$(3 \pm 0.3) \cdot 10^{-5}$	$-5,95 \pm 0,28$	11,03	10,30	9,67	10,37	9,24	9,36	$10,0 \pm 0,28$

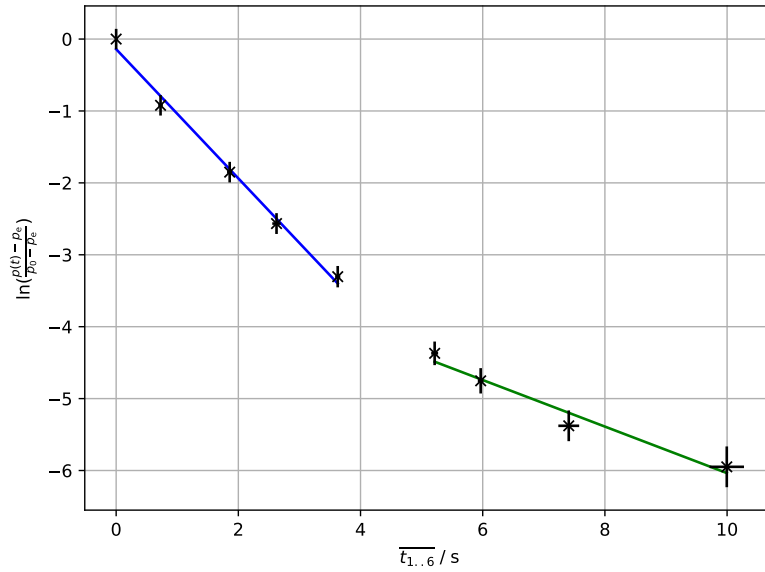


Abbildung 7: Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe samt linearer Regression.

Wiederum wurden an die logarithmierten Drücke und gemittelten Zeiten lineare Regressionen mit der Funktion `curve_fit` durchgeführt. Diese Regressionen sind in Abbildung 7 dargestellt. Die sich ergebenden Steigungen und daraus berechneten Saugvermögen sind in Tabelle 8 dargestellt. Dabei wurde an die Steigung das Volumen des Rezipienten beim Betreiben der Turbomolekularpumpe V_{Turbo} multipliziert.

Tabelle 8: Steigungen und Saugvermögen der Regressionen an die Evakuierungsmessung der Turbomolekularpumpe.

Regression	$m / 1/s$	$S / L/s$
blau	$-0,90 \pm 0,05$	$9,2 \pm 0,9$
grün	$-0,32 \pm 0,05$	$3,3 \pm 0,5$

4.4 Leckratenmessung der Drehschieberpumpe

Aus den vier Leckratenmessungen der Drehschieberpumpe bei den Drücken 0,1 mbar, 0,4 mbar, 0,8 mbar und 1 mbar kann jeweils das Saugvermögen bestimmt werden. Die an den Druckstützpunkten p aufgenommenen Zeiten $t_{1..3}$ sind zusammen mit deren Mittelwerten $\overline{t_{1..3}}$ in den Tabellen 9 bis 12 dargestellt. Dabei wurden der Mittelwert und der Fehler des Mittelwerts nach

$$\overline{t_{1..3}} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 t_i$$

$$\Delta t_{1..3} = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^3 (t_i - \overline{t_{1..3}})^2}$$

berechnet.

Tabelle 9: Drücke und gemessene Zeiten der Drehschieberpumpe-Leckratenmessung bei einem Gleichgewichtsdruck von 0,1 mbar.

p / mbar	$t_{1..3} / \text{s}$			$\overline{t_{1..3}} / \text{s}$
$0,1 \pm 0,02$	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$0,2 \pm 0,04$	10,69	11,05	11,02	$10,92 \pm 0,12$
$0,4 \pm 0,08$	51,08	51,77	51,90	$51,58 \pm 0,25$
$0,6 \pm 0,12$	102,80	104,09	106,02	$104,30 \pm 0,94$
$0,8 \pm 0,16$	156,45	156,94	158,07	$157,15 \pm 0,48$
$1,0 \pm 0,20$	201,64	200,18	201,86	$201,23 \pm 0,53$

Tabelle 10: Drücke und gemessene Zeiten der Drehschieberpumpe-Leckratenmessung bei einem Gleichgewichtsdruck von 0,4 mbar.

p / mbar	$t_{1..3} / \text{s}$			$\overline{t_{1..3}} / \text{s}$
$0,4 \pm 0,082$	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$0,6 \pm 0,12$	9,79	9,97	9,27	$9,68 \pm 0,21$
$0,8 \pm 0,16$	18,97	18,81	18,00	$18,59 \pm 0,30$
$1,0 \pm 0,2$	26,57	25,87	25,77	$26,07 \pm 0,25$
$2,0 \pm 0,4$	62,47	60,81	60,44	$61,24 \pm 0,62$
$4,0 \pm 0,8$	124,73	122,88	124,01	$123,87 \pm 0,54$

Tabelle 11: Drücke und gemessene Zeiten der Drehschieberpumpe-Leckratenmessung bei einem Gleichgewichtsdruck von 0,8 mbar.

p / mbar	$t_{1..3}$ / s			$\overline{t_{1..3}}$ / s
$0,8 \pm 0,16$	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$1,0 \pm 0,2$	3,26	3,50	3,31	$3,36 \pm 0,07$
$2,0 \pm 0,4$	14,76	14,53	14,58	$14,62 \pm 0,07$
$4,0 \pm 0,8$	36,58	37,18	36,48	$36,75 \pm 0,22$
$6,0 \pm 1,2$	57,55	57,15	56,56	$57,09 \pm 0,29$
$8,0 \pm 1,6$	79,18	78,65	79,00	$78,94 \pm 0,16$
$10,0 \pm 2,0$	101,40	100,29	100,20	$100,63 \pm 0,39$

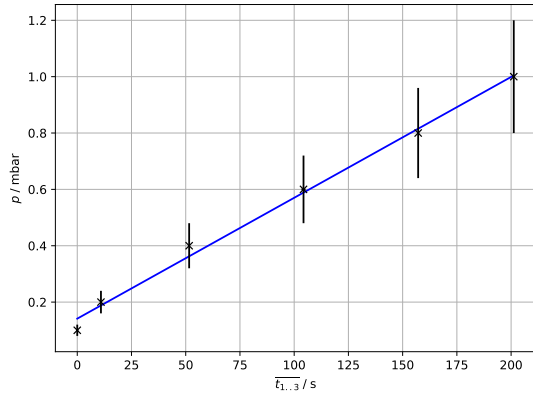
Tabelle 12: Drücke und gemessene Zeiten der Drehschieberpumpe-Leckratenmessung bei einem Gleichgewichtsdruck von 1 mbar.

p / mbar	$t_{1..3}$ / s			$\overline{t_{1..3}}$ / s
$1 \pm 0,2$	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$2 \pm 0,4$	8,76	11,55	10,52	$10,28 \pm 0,81$
$4 \pm 0,8$	24,52	28,69	28,74	$27,32 \pm 1,40$
$6 \pm 1,2$	38,89	44,63	44,86	$42,79 \pm 1,95$
$8 \pm 1,6$	54,09	62,79	63,02	$59,97 \pm 2,94$
$10 \pm 2,0$	70,47	80,84	81,26	$77,52 \pm 3,53$
$20 \pm 4,0$	147,76	171,1	159,73	$159,53 \pm 6,74$

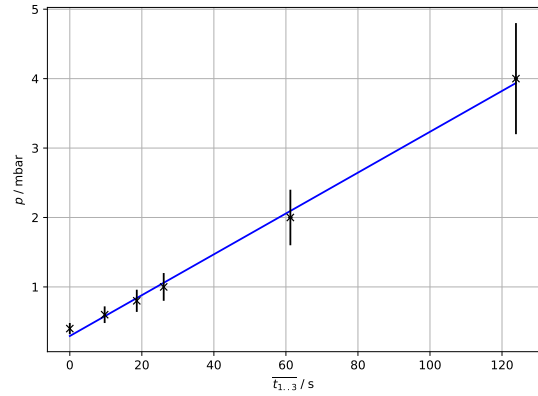
An die Drücke und Mittelwerte der Zeiten wurde eine lineare Regression mit der Funktion `curve_fit` des Moduls `scipy.optimize` durchgeführt und das jeweilige Saugvermögen aus der ermittelten Steigung nach Formel (12) berechnet. Die berechneten Steigungen und Saugvermögen sind für die vier verschiedenen Gleichgewichtsdrücke p_G in Tabelle 13 aufgeführt. In Abbildung 8 sind die gemittelten Zeiten gegen den Druck samt der linearen Regression aufgetragen.

Tabelle 13: Steigungen und Saugvermögen der Regressionen an die Leckratenmessungen der Drehschieberpumpe.

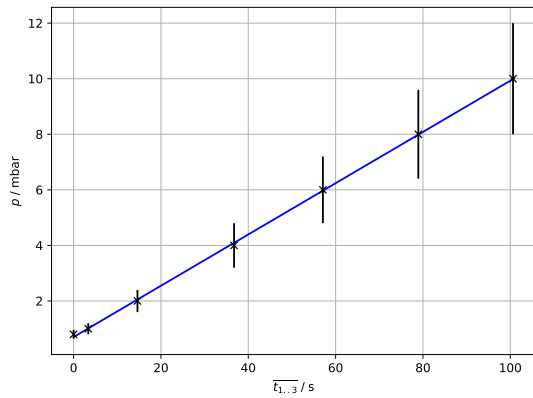
p_G / mbar	m / mbar/s	S / L/s
$0,1 \pm 0,02$	$0,0043 \pm 0,0002$	$0,47 \pm 0,10$
$0,4 \pm 0,08$	$0,0294 \pm 0,0008$	$0,80 \pm 0,17$
$0,8 \pm 0,16$	$0,0923 \pm 0,0007$	$1,26 \pm 0,27$
$1,0 \pm 0,20$	$0,1197 \pm 0,0008$	$1,31 \pm 0,28$



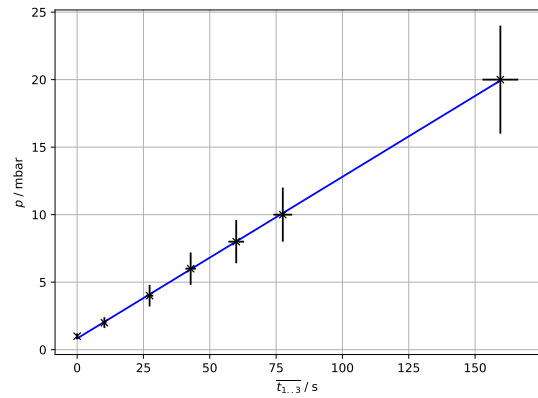
a) $p_G = 0,1 \text{ mbar}$



b) $p_G = 0,4 \text{ mbar}$



c) $p_G = 0,8 \text{ mbar}$



d) $p_G = 1 \text{ mbar}$

Abbildung 8: Leckratenmessungen der Drehschieberpumpe für verschiedene Gleichgewichtsdrücke samt linearer Regression.

4.5 Leckratenmessung der Turbomolekularpumpe

Analog zur Auswertung der Leckratenmessung der Drehschieberpumpe wurde die Turbomolekularpumpe ausgewertet. Die Gleichgewichtsdrücke wurden auf $5 \cdot 10^{-5}$ mbar, $10 \cdot 10^{-5}$ mbar, $15 \cdot 10^{-5}$ mbar und $20 \cdot 10^{-5}$ mbar eingestellt. Die gemessenen Zeiten sind mit den Druckstützpunkten und den gemittelten Zeiten in Tabelle 14 bis 17 dargestellt. Dabei wurden der im vorherigen Abschnitt 4.4 beschriebene Mittelwert und empirische Standardabweichung verwendet.

Tabelle 14: Drücke und gemessene Zeiten der Turbomolekularpumpe-Leckratenmessung bei einem Gleichgewichtsdruck von $5 \cdot 10^{-5}$ mbar.

$p / 10^{-4}$ mbar	$t_{1..3} / \text{s}$			$\overline{t_{1..3}} / \text{s}$
$0,5 \pm 0,05$	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$2 \pm 0,2$	1,96	2,26	2,02	$2,08 \pm 0,09$
$3 \pm 0,3$	3,72	4,11	3,95	$3,93 \pm 0,11$
$4 \pm 0,4$	5,48	5,82	5,59	$5,63 \pm 0,10$
$5 \pm 0,5$	6,94	7,61	7,42	$7,32 \pm 0,20$
$6 \pm 0,6$	8,69	9,38	9,12	$9,06 \pm 0,20$
$7 \pm 0,7$	10,25	11,24	10,82	$10,77 \pm 0,29$
$8 \pm 0,8$	11,96	12,77	12,41	$12,38 \pm 0,23$
10 ± 1	18,25	19,19	18,17	$18,54 \pm 0,33$
20 ± 2	29,38	32,16	32,04	$31,19 \pm 0,91$
30 ± 3	42,89	46,44	45,64	$44,99 \pm 1,08$
40 ± 4	55,78	59,94	58,77	$58,16 \pm 1,24$

Tabelle 15: Drücke und gemessene Zeiten der Turbomolekularpumpe-Leckratenmessung bei einem Gleichgewichtsdruck von $1,5 \cdot 10^{-4}$ mbar.

$p / 10^{-4}$ mbar	$t_{1..3} / \text{s}$			$\overline{t_{1..3}} / \text{s}$
$1,5 \pm 0,15$	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$4 \pm 0,4$	0,71	0,60	0,64	$0,65 \pm 0,03$
$6 \pm 0,6$	1,60	1,50	1,63	$1,58 \pm 0,04$
$8 \pm 0,8$	2,33	2,37	2,43	$2,38 \pm 0,03$
20 ± 2	7,03	7,00	6,62	$6,88 \pm 0,13$
30 ± 3	10,28	10,36	10,18	$10,27 \pm 0,05$
40 ± 4	13,38	13,19	13,28	$13,28 \pm 0,05$
50 ± 5	16,08	16,10	16,34	$16,17 \pm 0,08$
60 ± 6	18,88	19,09	19,04	$19,00 \pm 0,06$
70 ± 7	21,60	21,53	21,69	$21,61 \pm 0,05$
80 ± 8	24,10	24,12	24,45	$24,22 \pm 0,11$
90 ± 9	26,70	26,68	26,78	$26,72 \pm 0,03$

Tabelle 16: Drücke und gemessene Zeiten der Turbomolekularpumpe-Leckratenmessung bei einem Gleichgewichtsdruck von $1 \cdot 10^{-4}$ mbar.

$p / 10^{-4}\text{mbar}$		$t_{1..3} / \text{s}$			$\overline{t_{1..3}} / \text{s}$
1 \pm	0,1	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
4 \pm	0,4	1,53	1,31	1,79	$1,54 \pm 0,14$
6 \pm	0,6	2,87	2,50	3,00	$2,79 \pm 0,15$
8 \pm	0,8	4,12	3,61	4,35	$4,03 \pm 0,22$
20 \pm	2	10,92	9,64	11,58	$10,71 \pm 0,57$
30 \pm	3	15,92	14,37	16,92	$15,74 \pm 0,74$
40 \pm	4	20,66	18,60	22,04	$20,43 \pm 1,00$
50 \pm	5	25,05	22,72	26,9	$24,89 \pm 1,21$
60 \pm	6	29,31	26,43	31,07	$28,94 \pm 1,35$
70 \pm	7	33,25	30,46	35,67	$33,13 \pm 1,51$
80 \pm	8	37,40	33,72	39,56	$36,89 \pm 1,70$
90 \pm	9	40,86	36,88	43,47	$40,40 \pm 1,92$

Tabelle 17: Drücke und gemessene Zeiten der Turbomolekularpumpe-Leckratenmessung bei einem Gleichgewichtsdruck von $2 \cdot 10^{-4}$ mbar.

$p / 10^{-4}\text{mbar}$		$t_{1..3} / \text{s}$			$\overline{t_{1..3}} / \text{s}$
2 \pm	0,2	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
6 \pm	0,6	0,83	0,81	0,91	$0,85 \pm 0,03$
20 \pm	2	4,70	4,53	4,56	$4,60 \pm 0,05$
30 \pm	3	7,16	6,97	7,02	$7,05 \pm 0,06$
40 \pm	4	9,23	9,17	9,32	$9,24 \pm 0,04$
50 \pm	5	11,45	11,40	11,62	$11,49 \pm 0,07$
60 \pm	6	13,28	13,49	13,52	$13,43 \pm 0,08$
70 \pm	7	15,19	15,35	15,34	$15,29 \pm 0,05$
80 \pm	8	17,09	17,15	17,24	$17,16 \pm 0,04$
90 \pm	9	19,15	18,97	19,03	$19,05 \pm 0,05$

An die Druckstützpunkte und gemittelten Zeiten wurde wiederum eine lineare Regression mit `curve_fit` durchgeführt und aus der Steigung das Saugvermögen der Pumpe nach Formel (12) berechnet. Die Regression ist zusammen mit den Messwerten in Abbildung 9 dargestellt, die sich ergebenden Steigungen und Saugvermögen sind in Tabelle 18 aufgeführt.

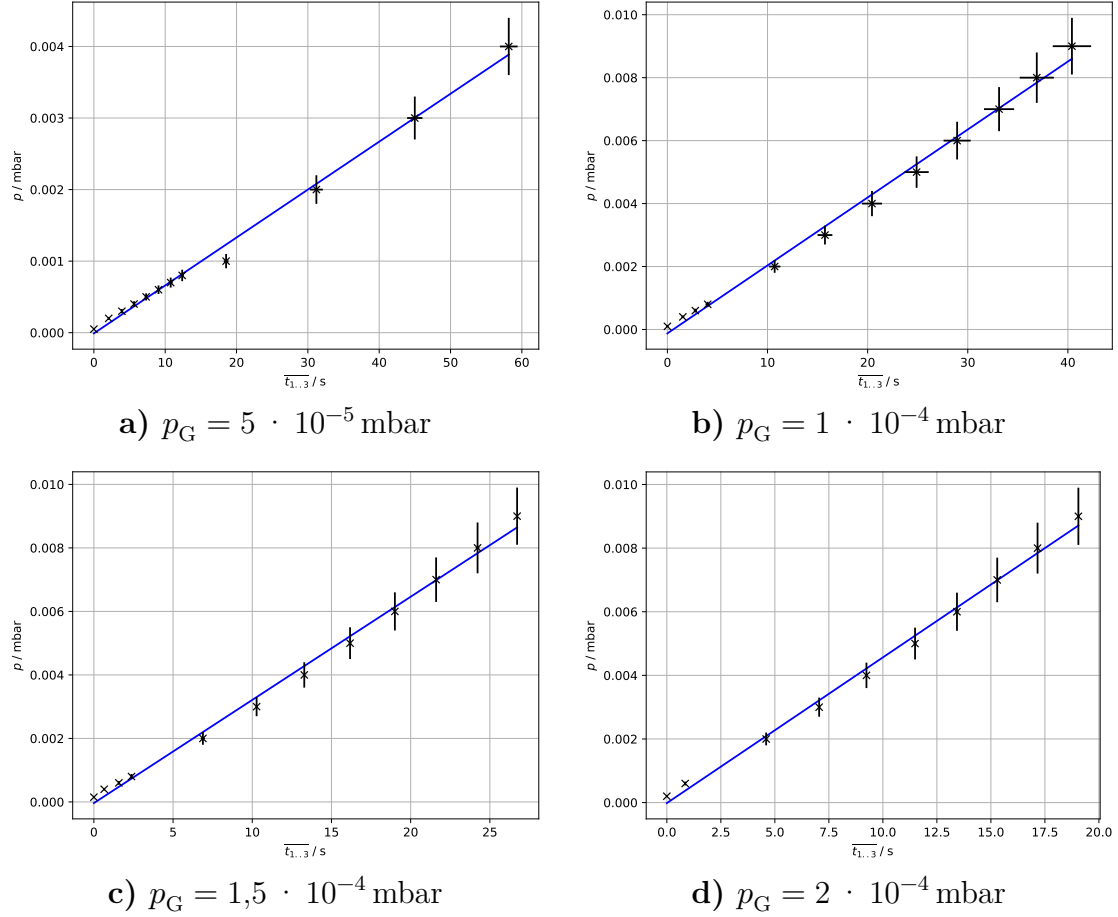


Abbildung 9: Leckratenmessungen der Turbomolekularpumpe für verschiedene Gleichgewichtsdrücke samt linearer Regression.

Tabelle 18: Steigungen und Saugvermögen der Regressionen an die Leckratenmessungen der Turbomolekularpumpe.

$p_G / 10^{-5} \text{ mbar}$		$m / 10^{-5} \text{ mbar/s}$		$S / \text{L/s}$
5 \pm	0,5	6,70 \pm	0,15	14,6 \pm 1,8
10 \pm	1	21,59 \pm	0,49	23,6 \pm 3,0
15 \pm	1,5	32,49 \pm	0,72	23,7 \pm 3,0
20 \pm	2	45,81 \pm	1,10	25,0 \pm 3,2

5 Diskussion der Ergebnisse

Die Messung des Druckes erfolgte bei der Drehschieberpumpe mit einem Pirani-Messgerät und bei der Turbomolekularpumpe mit einer Glühkathode mit der linearen Skala. Dabei variierten die Drücke über verschiedene Größenordnungen, sodass der Messbereich während der Messungen jeweils umgestellt werden musste.

Bei der Auswertung wurde keine Unsicherheit der gemessenen Zeiten verwendet. Dies liegt daran, dass sie sich nicht eindeutig bestimmen lässt. Aufgrund des oben beschriebenen Umschaltens des Messbereiches der Druckmesser konnten einige Zeiten genauer als andere aufgenommen werden. Da diese Zeiten jedoch per Hand mit einer digitalen Stoppuhr gemessen wurden, liegt sehr wahrscheinlich ein unbestimmter systematischer Fehler aufgrund einer nicht verschwindenden Reaktionszeit des Menschen vor. Deshalb sind die eigentlichen Unsicherheiten der Zeiten größer, als in der Auswertung angegeben. Die Unsicherheiten der Zeiten gehen in die Bestimmung der Saugvermögen mit ein, sodass auch die Unsicherheiten der Saugvermögen größer als angegeben sind.

In den Abbildungen 10 und 11 sind die verschiedenen bestimmten Saugvermögen der Drehschieberpumpe beziehungsweise der Turbomolekularpumpe eingezeichnet. Dabei ist die mit „Hersteller“ gekennzeichnete Linie eine Herstellerangabe aus der Versuchsanleitung [4] von 1,1 L/s für die Drehschieberpumpe und 77 L/s für die Turbomolekularpumpe. Hier ist weder ein Druckbereich, noch eine Unsicherheit des Saugvermögens angegeben. Vier mit „Leck“ gekennzeichnete Punkte sind die aus den jeweiligen Leckratenmessungen bestimmten Saugvermögen. Dabei ist die Unsicherheit des Druckes die Unsicherheit des jeweilig verwendeten Druckmessgerätes. Schließlich sind die mit „Evak“ gekennzeichneten Punkte die aus der jeweiligen Evakuierungsmessung bestimmten Saugvermögen. Hier beschreibt die Unsicherheit auf der Druckachse den Druckbereich, auf welchem die Regression durchgeführt wurde. Sowohl bei der Evakuierungsmessung, als auch bei der Leckratenmessung wurden die Regressionen vom kleineren Druck (Gleichgewichtsdruck beziehungsweise Druckbereich) zum größeren Druck durchnummeriert.

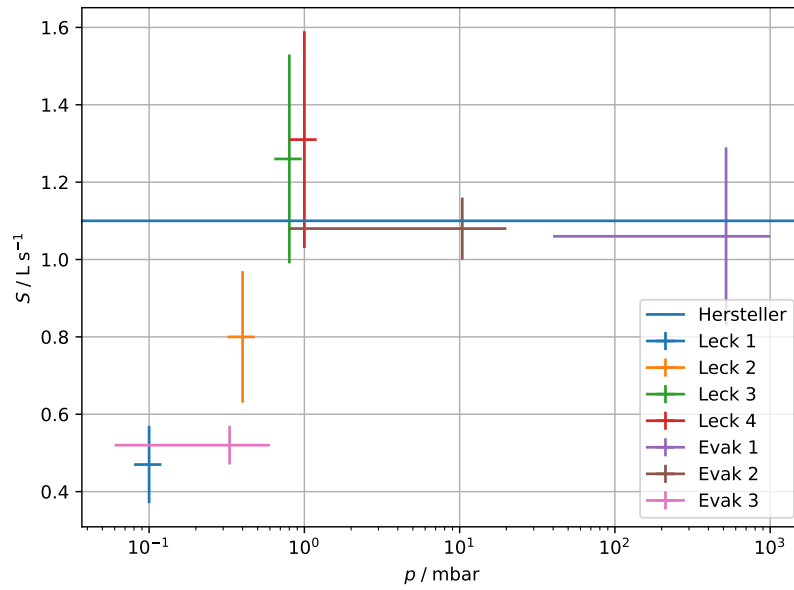


Abbildung 10: Saugvermögen der Drehschieberpumpe.

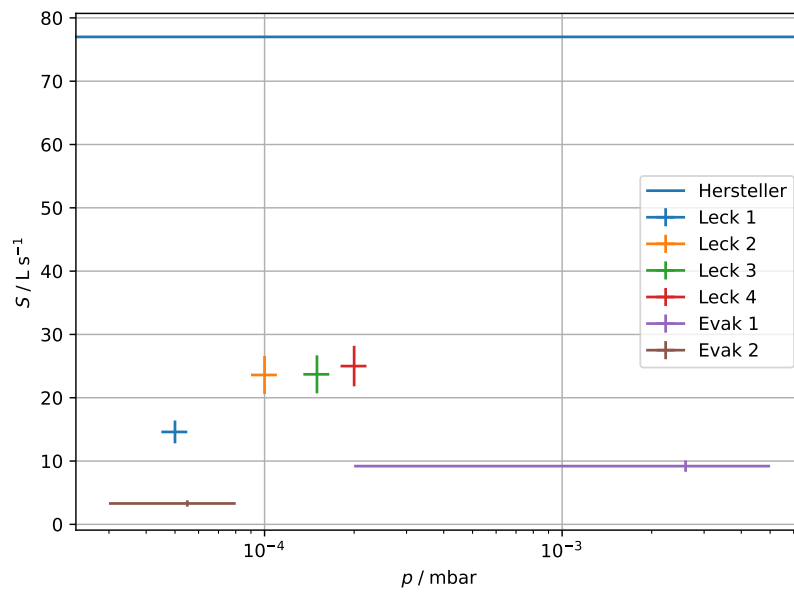


Abbildung 11: Saugvermögen der Turbomolekularpumpe.

Bei der Drehschieberpumpe (Abbildung 10) zeigt sich, dass die zwei Leckratenmessungen mit den höchsten beiden Gleichgewichtsdrücken sowie die Evakuierungsregression im mittleren Druckbereich unter Berücksichtigung ihres Fehlers mit der Herstellerangabe übereinstimmen. Die restlichen bestimmten Saugvermögen liegen unterhalb der Herstellerangabe, was systematische Fehler nahe legt. Anders sehen die Ergebnisse bei der Turbomolekularpumpe (Abbildung 11) aus. Hier ist eine deutliche Abweichung der Saugvermögen nach unten von mindestens 52 L/s feststellbar, sodass hier signifikante systematische Fehler vorliegen sollten. Diese beruhen zum Beispiel auf der Unsicherheit beim Umschalten des Druckbereichs, der manuellen Messung der Zeiten und weiter unten aufgeführten Punkten.

Ein Teil der Abweichungen können mit dem oben genannten Unsicherheiten in der Zeitmessung erklärt werden. Des Weiteren sind die Herstellerangaben unter idealen Bedingungen und ausschließlich mit Stickstoffgas gemessen worden. Weiterhin wurde bei den Messungen des Herstellers der größte Wert des Saugvermögens angegeben. Deshalb ist ein zu klein bestimmtes Saugvermögen im Vergleich zur Herstellerangabe realistisch. Bei der Durchführung wurde Luft abgepumpt, welches zwar zum größten Teil aus Stickstoff besteht, jedoch ein Stoffgemisch ist. Deshalb ist gerade bei den niedrigen Drücken der Turbomolekularpumpe eine Abweichung von der Herstellerangabe zu erwarten.

Des Weiteren wurde angenommen, dass alle Messungen bei einer konstanten Temperatur durchgeführt wurden. Dies konnte jedoch nicht sicher gestellt werden. In der Herleitung des Saugvermögens ist auch angenommen worden, dass das Saugvermögen unabhängig vom Druck ist. Dies kann nach den Abbildungen 10 und 11 ebenfalls nicht bestätigt werden.

Ein weiterer großer systematischer Fehler ist der nicht verschwindende Leitwert des Rezipienten, welche zum Beispiel durch Schläuche mit geringem Durchmesser in einem niedrigeren Saugvermögen resultiert (vergleiche Gleichung (13)). Vor allem bei Verwendung der Turbomolekularpumpe ist dieser Effekt aufgrund der vorliegenden molekularen Strömung wichtig, zum Beispiel führt eine Halbierung des Rohrquerschnitts zu einem acht mal größeren Leitwert.

Schließlich wurden die Ventile per Hand geschlossen, sodass nicht garantiert werden kann, dass diese absolut dicht und insbesondere bei der Messung der Evakuierungskurve beim Start der Messung bereits geschlossen waren. Sollte das Schließen zu lange gedauert haben, so sinkt der Druck aufgrund der einströmenden Luft langsamer und die bestimmte Steigung der Regression an die logarithmierten Drücke ist kleiner. Daraus resultiert dann ein kleineres Saugvermögen. Dies erklärt, warum die aus der Evakuierungsmessung bestimmten Saugvermögen tendenziell kleiner sind als die Saugvermögen der Leckratenmessungen.

Als Letztes sei erwähnt, dass trotz eines Ausheizens vor Beginn der Messungen Desorption statt gefunden haben kann, was wiederum zu kleineren Saugvermögen als die Herstellerangabe führt. Desorption tritt stärker auf, je kleiner der Druck ist, weshalb dieser Effekt vor allem bei der Turbomolekularpumpe einen systematischen Fehler ausmacht.

Literatur

- [1] DIN 28400-1. *Vakuumtechnik; Benennung und Definition; Allg. Benennung*. Bd. 1990-05.

- [2] *Darstellung der Funktionsweise einer Drehschieberpumpe*. URL: <https://static.pfeiffer-vacuum.com/img/technology/img/chap-4/img-4-2-DE.png> (besucht am 01.06.2018).
- [3] *Darstellung der Funktionsweise einer Turbomolekularpumpe*. URL: http://www.chemgapedia.de/vsengine/media/vsc/de/ch/3/anc/masse/2_massenspektrometer/2_2_vakuumsystem/2_2_2_turbop/turbo_ms5bi0202.gif (besucht am 01.06.2018).
- [4] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 70 Vakuumphysik*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/LeitfadenV70.pdf> (besucht am 23.05.2018).
- [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 Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [7] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [8] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [9] *Pfeiffer Vakuum Homepage*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/> (besucht am 01.06.2018).