

Versuch Nr.V70

Vakuumversuch

Niklas Düser
niklas.dueser@tu-dortmund.de

Benedikt Sander
benedikt.sander@tu-dortmund.de

Durchführung: 11.04.2022

Abgabe: 27.04.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung

Die Vakuumtechnik befasst sich mit der Erzeugung, Aufrechterhaltung und Messung eines Vakuums. Diese Technik ist wichtig für die Industrie und Forschung um reine Produkte herzustellen und ungestörte Messungen durchzuführen. Moderne Versuche erreichen Drücke, bis zu etwas unter $10 \cdot 10^{-11}$ mbar. In diesem Versuch werden allgemeine theoretische Begriffe in Verbindung mit Vakua erläutert. Experimentiell wird das Saugvermögen einer Drehschieberpumpe und einer Turbomolekularpumpe bestimmt. Dazu werden jeweils einige Evakuierungskurven aufgenommen und Leckratenmessungen durchgeführt.

2 Theorie

2.1 Vakuum

Allgemein wird von einem Vakuum gesprochen, sobald der Druck innerhalb eines Gefäßes niedriger als sein Umgebungsdruck ist. Da der niedrigste auf der Erde vorkommende Atmosphärendruck in großer Höhe bei $p = 300$ mbar liegt, wird ab dann von einem Vakuum gesprochen. Es ist in diesem Versuch eine gute Näherung wenn wir bei dem vorliegenden Gas von idealem Gas sprechen. Dies bedeutet, dass jegliche Wechselwirkungen zwischen Teilchen nur durch vollkommen elastische Stöße passieren und die Gasteilchen keine Ausdehnung besitzen. Wenn dies angenommen wird, kann das Gas auch mit der Idealen Gasgleichung

$$p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T \quad (1)$$

beschrieben werden. Hier ist p der Druck, V das Volumen, N die Teilchenzahl, k_B die Boltzmann Konstante und T die Temperatur. Ein Spezialfall dieser Gleichung ist das Gesetz von Boyle-Mariotte. Dieses besagt, dass bei konstanter Temperatur

$$p \propto V^{-1} \quad (2)$$

ist. Der Druck ist als Kraft pro Fläche definiert, es gilt:

$$1 \text{ Pa} = 0,01 \text{ mbar} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}. \quad (3)$$

2.2 Fachbegriffe

- Die mittlere freie Weglänge beschreibt die durchschnittliche Fluglänge eines Gasteilchens zwischen zwei Kollisionen mit anderen Gasteilchen. Diese ist relevant für das Verhalten unterschiedliche Verhalten und die Funktionsweise unterschiedlicher Vakuumpumpen. (Quelle: [wiki:mfg])
- Die Sorption bezeichnet den Vorgang einer Anreicherung eines Stoffes. Hier beschreibt die Absorption, wenn der Stoff innerhalb einer Phase aufgenommen wird. Ein Beispiel ist die Aufnahme von Neutronen in den Atomkernen eines Festkörpers. Adsorption ist im Gegensatz zur Absorption die Anlagerung auf der Oberfläche oder Grenzfläche eines Stoffes.

Die Desorption beschreibt gegensätzlich einen Prozess bei dem Atome oder Moleküle die Oberfläche eines Festkörpers verlassen und in die Gasphase übergehen.

(Quelle: [wiki:sorp])

- Lecks beschreiben Prozesse die das Vakuum reduzieren. Es wird dabei zwischen realen und virtuellen Lecks unterschieden.

Reale Lecks sind Prozesse die von außerhalb der Vakuumanlage messbar sind. Eine nicht korrekt verschlossene Verbindung ist zum Beispiel ein reales Leck.

Virtuelle Lecks entstehen zum Beispiel durch Einschlüsse in der Vakuumanlage, welche sich mit zunehmendem Druck freisetzen. Diese Art von Lecks sind von außen nicht zu messen und müssen beim Aufbau oder in der Produktion der Vakuumteile verhindert werden. Die einzelnen Gaseinschlüsse können zum Beispiel bei der Produktion durch Ultraschall zu größeren Gasblasen diffundiert werden, welche dann an die Oberfläche steigen und austreten.

In diesem Versuch sind Lecks und Desorption mitunter dafür verantwortlich, dass nur gewisse Vakuumbereiche erreicht werden können. (Quelle: [pfeiffer:grund])

2.3 Vakuumbereiche

Physikalisch sind mehrere Vakuumbereiche definiert, da mit abnehmendem Druck die Teilchendichte in einem Volumen reduziert wird. Durch die unterschiedlichen Dichte, finden zum Beispiel Stöße unter den Gasteilchen unterschiedlich häufig statt. Dies bestimmt zum Beispiel wie ein Gas durch einen Leiter strömt.

- Im ersten relevanten Druckbereich wird von einem Grobvakuum gesprochen. Dieses ist zwischen 300 mbar und 1 mbar definiert. In diesem Bereich findet allgemein viskose Strömung statt, in der der Großteil der Stöße zwischen den Gasteilchen untereinander und nicht mit der Gefäßwand stattfinden. Es wird abhängig von der Teilchengeschwindigkeit, der Teilchendichte und der Gefäßgröße zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden.
- Das Feinvakuum ist zwischen 1 mbar und $1 \cdot 10^{-3}$ mbar definiert. Hier findet Knudsen-Strömung statt. Knudsenströmung beschreibt Strömung bei der der Leitungsdurchmesser vergleichbar mit der mittleren freien Weglänge ist. Hier wechselwirken die Gasteilchen hauptsächlich mit den Wänden des Gefäßes.
- Es wird ab einem Druck von $1 \cdot 10^{-3}$ mbar bis $1 \cdot 10^{-8}$ mbar von Hochvakuum gesprochen. Von Ultrahochvakuum ist ab $1 \cdot 10^{-8}$ mbar die Rede.
In diesen beiden Druckbereichen findet nur noch Molekulare-Strömung statt.
Dies bedeutet, dass die Teilchen untereinander fast nicht mehr Wechselwirken. Hier ist die mittlere freie Weglänge größer als die Weite des Strömungskanals.

Diese unterschiedlichen Strömungsarten haben hohe Relevanz bei praktischen Anwendungen, da zum Beispiel das effektive Saugvermögen von Vakuumpumpen beeinträchtigt werden kann.

Im Grobvakuum ist es wichtig einen großen Leitungsdurchmesser einzubauen, damit laminare Stömung sicher gestellt ist. Im Ultrahochvakuum reichen relativ kleine Leitungsdurchmesser jedoch wieder aus.

(Quelle: [pfeiffer:grund])

2.4 Arten der Vakuumerzeugung

Vakuumpumpen können sich stark in ihrer Funktionsweise abhängig vom Arbeitsbereich unterscheiden.

Der größte Unterschied liegt zwischen gasbindenden und gasfördernden Vakuumpumpen, wobei sich gasfördernde Pumpen noch einmal in verdrängende und kinetische Pumpen unterteilen.

Gasbindende Vakuumpumpen funktionieren durch Sorption, indem Gasteilchen von der Pumpe aufgenommen werden. Dieses Prinzip ergibt erst bei bereits sehr gutem Vakuum Sinn.

Gasfördernde Vakuum fördern Gas durch abgeschlossene Volumina, welche komprimiert werden oder sich ausdehnen.

Kinetische Pumpen erhöhen das Vakuum, indem Gasteilchen in Richtung der Pumprichtung beschleunigt werden. Auch dieses Vakuumerzeugungsprinzip hat bei Atmosphärendruck einige Probleme und benötigt ein Vorvakuum.

2.4.1 Drehschiebervakuumpumpe

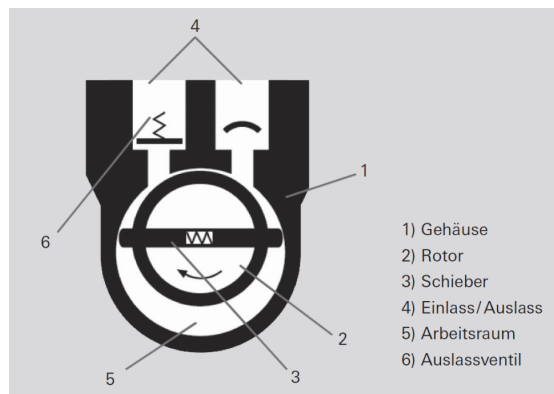


Abbildung 1: Der schematische Aufbau einer Drehschiebervakuumpumpe. Quelle: [pfeiffer:pump]

Die Drehschieberpumpe ist eine Rotationsverdrängerpumpe. besteht aus dem Gehäuse (1), dem eingebauten Rotor(2), den mit Flieh- und Federkraft radial bewegten Schiebern(3) und dem Ein- bzw. Auslass(4).

Das Innere des Arbeitsraumes(5) wird durch den Stator, den Rotor und die Schieber in mehrere Bereiche eingeteilt. Diese saugen beim Drehen neues Gas aus dem Rezipienten und erhöhen dessen Vakuum, wenn sie expandieren. Sobald das Volumen dann wieder

vom Rezipienten getrennt ist, wird es komprimiert, um dann Gas durch den Auslass zu drücken.

Eine zweistufige Drehschieberpumpe kann Drücke bis zu $5 \cdot 10^{-4}$ mbar erreichen.

In diesem Versuch wird jedoch nur eine einstufige Pumpe mit einem Enddruck von $p = 2,1 \cdot 10^{-2}$ mbar genutzt.

Ein Nachteil der Drehschieberpumpe ist, dass unter anderem zum Abschließen der Kammern, Öl verwendet wird. Mittels Desorption können daher Moleküle aus dem Öl in das Gas übergehen und dieses verunreinigen.

2.4.2 Turbomolekularpumpe

Turbomolekularpumpen sind turbinenähnliche kinetische Vakuumpumpen.

In ihrem Gehäuse ist ein mehrstufiger Rotor mit Schaufeln. Zwischen den Rotorscheiben sind beschauelte Statorscheiben mit spiegelverkehrter Symmetrie zu den Rotorscheiben. Die Rotorscheiben drehen sich nun mit bis zu 1500 Hz, damit die Schaufeln eine Rotationsgeschwindigkeit ähnlich der mittleren Teilchengeschwindigkeit haben.

Durch Wechselwirkung mit den Rotor und Statorschaufeln werden die Gasteilchen in Pumprichtung beschleunigt. Eine Voraussetzung für diese Funktionsweise ist, dass in der Pumpe Molekulare-Strömung vorliegt.

Die mittlere freie Weglänge muss größer sein, als die Abstände zwischen Rotor und Statorscheiben, damit die Teilchen ihre Bewegungsrichtung beibehalten.

(Quelle: [pfeiffer:pump])

2.5 Saugvermögen

Im Allgemeinen beschreibt das Saugvermögen S einer Vakuumpumpe, wie viel Gas sie aus dem Rezipienten ziehen kann.

$$S = \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

Um dieses zu bestimmen werden in diesem Versuch Evakuierungskurven, also der Druck innerhalb des Rezipienten aufgenommen, und Leckratenmessungen durchgeführt.

2.5.1 Messung der $p(t)$ -Kurve

Wird die Gleichung:

$$p \cdot V = \text{const} \quad (5)$$

nach der Zeit abgeleitet, entstehen auf der linken Seite zwei Summanden.

Wird nun mit dem Druck p multipliziert kann die Ableitung des Volumens als das Saugvermögen S identifiziert werden.

Durch Verschieben der Terme entsteht folgende Gleichung:

$$\frac{dV}{dt} = S = -\frac{V}{p} \frac{dp}{dt} \quad (6)$$

Diese Differentialgleichung wird mittels einer Exponentialfunktion mit dem Saugvermögen S dem Volumen V und der Zeit t im Exponenten gelöst:

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

Jedoch muss noch beachtet werden, dass alle Vakuumpumpen einen gewissen Enddruck p_E haben. Sobald dieser Druck erreicht ist kann die Pumpe den Druck nicht weiter erhöhen und es entsteht ein Gleichgewicht zwischen Saugvermögen und vakuumreduzierenden Prozessen wie Desorption oder Lecks.

Der Gleichgewichtsdruck wird in der Evakuierungskurve durch Verschieben und skalieren der Exponentialfunktion eingerechnet:

$$p(t) = (p_0 - p_E) \exp\left(-\frac{S}{V_0}t\right) + p_E \quad (8)$$

Mit dieser Formel lässt sich aus der Evakuierungskurve eine Schätzung für das Saugvermögen einer Vakuumpumpe berechnen. Jedoch muss beim Auswerten darauf geachtet werden, dass Vakuumpumpen zum Beispiel in unterschiedlichen Strömungsarten, auch verschiedene Saugvermögen haben.

2.5.2 Leckratenmessung

Zur Berechnung des Saugvermögens mittels Leckratenmessung muss zunächst die Leckrate Q mittels des Gleichgewichtsdruck p_g definiert werden:

$$S = \frac{Q}{p_g}, \quad (9)$$

und

$$Q = V_0 \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (10)$$

Hieraus folgt nun wieder ein Ausdruck für das Saugvermögen der Vakuumpumpe:

$$S = \frac{V_0}{p_g} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (11)$$

2.5.3 Leitwert

Bei all diesen Berechnungen ist zu bedenken, dass das theoretische Saugvermögen S_0 immer durch die Vakuumanlage reduziert wird. Dieser Effekt wird durch den Leitwert des Rezipienten beschrieben. Er gibt den reziproken Strömungswiderstand der Schläuche und Verbindungen an.

Das effektive Saugvermögen S_{eff} , dass tatsächlich am Rezipienten ankommt, berechnet sich damit zu:

$$S_{\text{eff}} = \frac{S_0 \cdot L}{S_0 + L}. \quad (12)$$

2.6 Arten der Vakuummessung

2.6.1 Pirani-Vakuummeter

Das Pirani-Vakuummeter arbeitet optimal im Bereich des Feinvakuums.

Es nutzt aus, dass in diesem Druckbereich die Wärmeleitfähigkeit proportional zum Druck ist. Der Wärmetransport geschieht hier primär durch direkte Stöße von Gasteilchen untereinander.

Die Messung erfolgt über einen Draht in dem Rezipienten, durch den ein konstanter Strom fließt. Nun kann mittels einer Wheatstone-Brücke der Widerstand dieses Leiters und somit die Temperatur des Drahtes bestimmt werden.

Da der Draht sich abhängig von dem Druck im Rezipienten unterschiedlich schnell abkühlt, kann mit dieser Methode auch der Druck in dem Rezipienten bestimmt werden.

2.6.2 Penning-Vakuummeter

Das Penning-Vakuummeter ist ein Kalt-Ionisations-Vakuummeter.

Es arbeitet im Hoch- und Ultrahochvakuum. Es beruht darauf, dass durch ein elektrisches Feld Atome ionisiert werden. Die frei werdenden Elektronen werden beschleunigt und ionisieren auf ihrem Beschleunigungsweg weitere Atome.

Diese Ionen werden dann zu der Kathode beschleunigt und erzeugen dort einen Strom, welcher ein Maß für das Vakuum ist.

2.6.3 Bayard-Alpert-Vakuummeter

Das Bayard-Alpert-Vakuummeter ist eine Heiß-Ionisations-Vakuummeter.

Es arbeitet sehr Analog zu dem Penning-Vakuummeter. Der einzige Unterschied ist, dass die Elektronen durch einen Glühdraht frei werden.

2.6.4 Piezo-Vakuummeter

Ein Piezo-Vakuummeter vermisst das Vakuum direkt, indem es die Kraft des Gases auf eine Oberfläche misst.

Da mit immer besser werdendem Vakuum auch die Kraft abnimmt, eignet sich dieses Vakuummeter am besten bis zum Grobvakuum (1000 mbar bis 1 mbar).

Die konkrete Messung erfolgt mittels Piezo-Kristallen, welche bei Kompression eine elektrische Spannung erzeugen, die dann abgelesen wird.

Aufgrund der ähnlichen Arbeitsbereiche werden, wie auch in diesem Versuch, Piezo- und Pirani-Vakuummeter oft in einem Messgerät kombiniert.

3 Aufbau

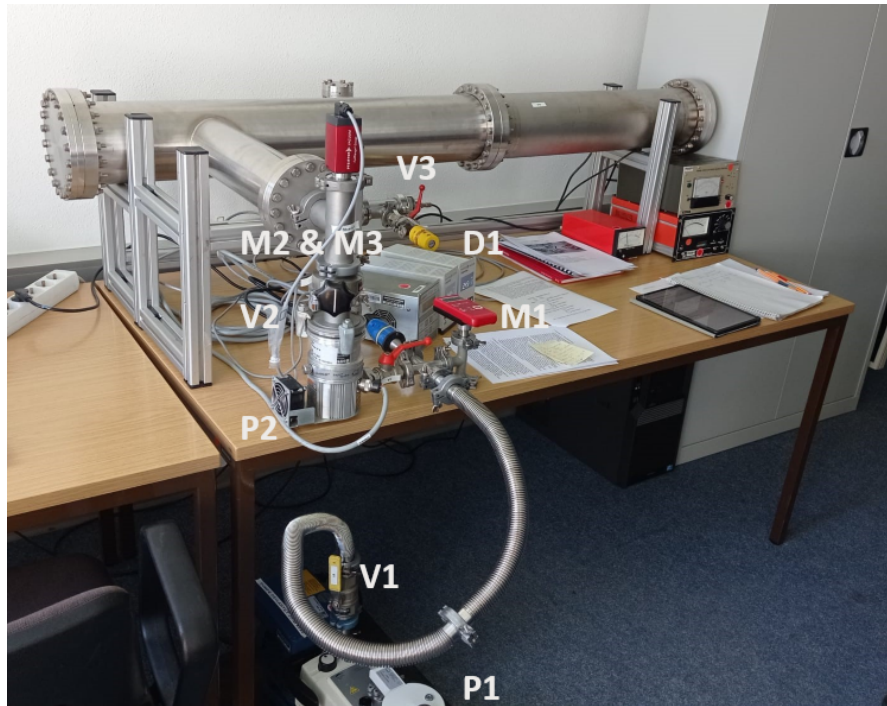


Abbildung 2: Ein Bild des verwendeten Versuchsaufbaus.

Beide in diesem Versuch verwendeten Vakuumpumpen sind in Abbildung ?? zu sehen. Bei (P1) ist am unteren Ende des Bildes die Drehschiebervakuumpumpe zu sehen. Die Turbomolekularpumpe ist direkt darüber auf dem Tisch bei (P2). Die Drehschiebervpumpe kann mittels des Ventil (V1) und die Turbopumpe mittels des Ventil (V2) abgeschoben werden. Zwei weitere Ventile zum Einstellen des Gleichgewichtsdrucks sind das Ventil (V3) und das Dosierventil (D1) unter dem Vakuumkörper. Das erste relevante Messgerät ist bei (M1), welches ein kombiniertes Piezo und Pirani Vakuummeter ist. Bei (M2 & M3) sind die Anzeigegeräte zu den Kaltkathoden-Vakuummetern, welche über der Turbopumpe (P2) und hinter dem Dosierventil (D1) angebracht sind.

4 Durchführung

Zunächst wird die Funktionsfähigkeit der Anlage überprüft und vorbereitet. Dazu wird getestet, ob die Drehschiebervpumpe (P1) innerhalb von maximal 10 Minuten in der Lage ist einen Enddruck P_E von 0,03 mbar bis 0,05 mbar zu erzeugen. Ist dem nicht so muss die Anlage auf undichte Stellen überprüft werden. Anschließend wird dann mit dem bereits vorhandenen Vorvakuum die Turbopumpe (P2) eingeschaltet. Um Wasseranlagerungen zu entfernen und Desorption vorzubeugen wird die Anlage auch

einmal mit einem Heißluftföhn erhitzt.

Die Turbopumpe sollte dann in der Lage sein, einen Druck von $8 \cdot 10^{-5}$ mbar bis $2 \cdot 10^{-5}$ mbar zu erzeugen. Weiterhin ist es sehr wichtig für die Auswertung einmal den Enddruck der Drehschieber- und Vakuumpumpe zu messen und zu dokumentieren.

4.1 Messungen zur Drehschieberpumpe

Sobald bestätigt wurde, dass der Aufbau ausreichend dicht ist, können Evakuierungskurven aufgenommen und Leckratenmessungen durchgeführt werden.

4.1.1 Evakuierungskurve

Zunächst wird die Anlage wieder auf den Arbeitsbereich der Drehschieberpumpe belüftet. Um Schäden an der Pumpe zu vermeiden, muss die Turbopumpe abgeschaltet werden. Dann wird die Drehschieberpumpe abgeschoben (V1) und der Rezipient belüftet, indem für ca. 5 Sekunden das Dosierventil (D1) und Ventil (V3) geöffnet wird, bis wieder Normaldruck in dem Rezipienten herrscht.

Sobald der Rezipient wieder dicht ist, wird der Zugang zu der Drehschieberpumpe geöffnet (V1) und der Druckabfall als Funktion der Zeit vermessen. Dazu werden für eine gesamte Messzeit von 600 s alle 10 s der Druck an dem digitalen Vakuummeter (M1) abgelesen. Bei dieser Messung sollte ein Enddruck von P_E zwischen 0,1 mbar und 0,08 mbar erreicht werden.

Diese Messung wird dann 3-mal wiederholt.

4.1.2 Leckratenmessung

Die Leckratenmessung wird durchgeführt, indem mittels des Nadelventils (D1) ein Gleichgewichtsdruck p_g eingestellt und dann bei weiterhin offenem Dosierventil die Pumpe vom System abgeschoben wird (V1).

Der darauf folgende Druckanstieg wird dann als Funktion der Zeit über 200 s in 10 s Abständen gemessen.

Diese Messung wird mit 4 Gleichgewichtsdrücken $p_g = 0, 4; 10; 40; 80$ mbar und jeweils 3 Messreihen durchgeführt.

4.2 Messung zur Turbopumpe

Die Messungen zu der Turbopumpe (P2) laufen analog zu denen der Drehschieberpumpe ab. Es ist hier wichtig darauf zu achten, dass bevor die Turbopumpe eingeschaltet wird, bereits ein Vorvakuum von mindestens $10 \cdot 10^{-1}$ mbar mit der Drehschieberpumpe erzeugt wurde.

4.3 Evakuierungskurve

Dieses Mal wird der Rezipient nicht komplett belüftet, damit die Turbopumpe direkt starten kann.

Als Startdruck wird mit dem Dosierventil bei laufender Pumpe ein Druck von $1,6 \cdot 10^{-3}$ mbar eingestellt. Dann wird das Ventil (V3) geschlossen und das zunehmende Vakuum in einer $p(t)$ -Kurve über 200 s alle 10 s aufgenommen. Auch diese Messung wird 3-mal wiederholt.

4.4 Leckratenmessung

Die Leckratenmessungen der Turbopumpe läuft auch sehr analog zu denen der Drehschieberpumpe.

Es werden lediglich nur über einen Zeitraum von 120 s Werte aufgenommen.

Die Gleichgewichtsdrücke hier, von denen die Leckratenmessung startet, sind: (1 & 2) $\cdot 10^{-4}$ mbar und (5 & 7) $\cdot 10^{-5}$ mbar.

Zum Abschiebern der Turbopumpe wird nun aber das Ventil (V2) verwendet.

5 Auswertung

5.1 Fehlerrechnung

Die Fortpflanzung von Messungenauigkeiten für mehrere unabhängige Fehler wird durch die Gaußsche Fehlerfortpflanzung

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}$$

beschrieben. Dabei gibt Δx die Unsicherheit des arithmetischen Mittelwerts \bar{x} einer Observablen x an:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}.$$

Die Zahl n gibt die Anzahl der unabhängigen Messungen an.

Die Messwerte, die bei Messungen mit der Turbomolekularpumpe aufgenommen wurden, besitzen im Bereich $1 \cdot 10^{-8}$ mbar bis 100 mbar eine Ungenauigkeit von 30% [V70]. Im Bereich von 100 mbar bis 1000 mbar sind es 50 %.

Für die Messungen mit der Drehschieberpumpe sind es für Werte kleiner als $2 \cdot 10^{-3}$ mbar ein Faktor 2 vom Messwert [V70]. Zusätzlich sind es von $2 \cdot 10^{-3}$ mbar bis 10 mbar ± 120 mbar und von 10 mbar bis 1200 mbar $\pm 3,6$ mbar.

Für die Fehlerfortpflanzung des logarithmischen Fits wird die aus der Formel ?? hergeleitete Formel

$$\sigma_{\log} = \sqrt{\frac{\sigma_p^2}{(p - p_E)^2} + \frac{\sigma_{p0}^2}{(p_0 - p_E)^2} + \sigma_{p_E}^2 \left(\frac{1}{p_0 - p_E} - \frac{1}{p - p_E} \right)^2}$$

genutzt. Die Fehlerfortpflanzung der Saugleistung bestimmt sich zu

$$\sigma_S = \sqrt{\left(\frac{m^2}{p_g^2} \right) \cdot \sigma_V^2 + \left(\frac{V^2}{p_g^2} \right) \cdot \sigma_m^2 + \left(\frac{m^2 V^2}{p_g^4} \right) \cdot \sigma_p^2}.$$

Des Weiteren wird für die relative Abweichung berechneter Werte vom Theoriewert die Formel

$$\Delta x = \frac{x - x_{theo}}{x_{theo}}$$

genutzt.

5.2 Volumen

Um das Saugvermögen der beiden Pumpen zu bestimmen wird das Volumen des Versuchsaufbaus benötigt.

Für die Messungen, die für die Turbomolekularpumpe durchgeführt werden, wird ein kleineres Volumen benötigt. Dort wird nämlich nur das Volumen bis zur Turbomolekularpumpe evakuiert.

Dieses Volumen beträgt $V_1 = (33,0 \pm 3,3) \text{ L}$.

Für die Messungen mit der Drehschieberpumpe wird zusätzlich noch das Volumen des Schlauchs genutzt. Dieses beträgt $(1,0 \pm 0,1) \text{ L}$, wodurch sich das Volumen $V_2 = (34,0 \pm 3,4) \text{ L}$ ergibt.

5.3 Drehschieberpumpe

Für die Drehschieberpumpe werden im Folgenden beide Messverfahren ausgewertet. Einmal dass der Evakuierungsmessung und das der Leckratenmessung.

Die Herstellerangabe des Saugvermögens der Drehschieberpumpe beträgt $S_{theo} = 1,1 \text{ L/s}$ [V70].

5.3.1 Evakuierungsmessung

Für diese Messung wurden über einen Zeitraum von $T = 600 \text{ s}$ alle $\Delta t = 10 \text{ s}$ der Druck im Versuchsaufbau hinter der deaktivierten Turbomolekularpumpe abgelesen. Dies wurde dreimal wiederholt.

Die Messdaten sind in der Tabelle ?? im Anhang, inklusive der gemittelten Messwerte mit Fehler des Mittelwerts, zu finden. Als Enddruck wurde $0,021 \text{ mbar}$ aufgenommen.

Für die Auswertung wurde ein linearer Fit der Form

$$y = m \cdot x + n \quad (13)$$

auf die logarithmierten Messdaten, die der Form

$$\ln \left(\frac{p(t) - p_{end}}{p_0 - p_{end}} \right)$$

folgen, angewandt. Diese Gleichung ist dabei aus Gleichung ?? hergeleitet.

Allerdings ist das Saugvermögen der Pumpe nicht über alle Druckbereiche konstant, was zum Beispiel an unterschiedlichen Strömungsarten bei unterschiedlichen Drücken liegt. Aus diesem Grund wurde der Fit für drei unterschiedliche Bereiche durchgeführt. Die Bereiche wurden aus der grafischen Darstellung abgeschätzt.

Die Ergebnisse der Fits, die grafische Darstellung der Messdaten, inklusive Fehler, finden sich in Abbildung ?. Dabei sind auch die unterschiedlichen betrachteten Intervalle farblich hervorgehoben.

Der erste Bereich geht vom Startdruck bis $1,8 \text{ mbar}$. Der zweite bis $0,44 \text{ mbar}$ und der dritte bis zum Ende. Aus den Fitparametern lässt sich über $S = -mV$ das Saugvermögen bestimmen. Damit ergibt sich dann

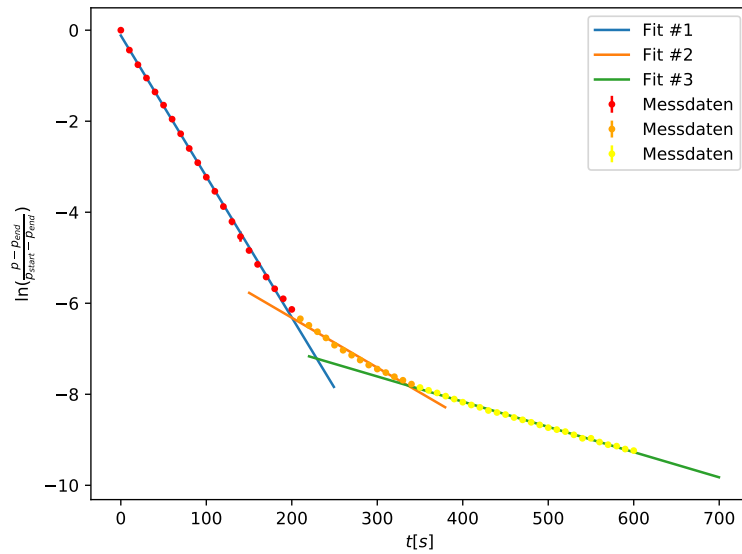


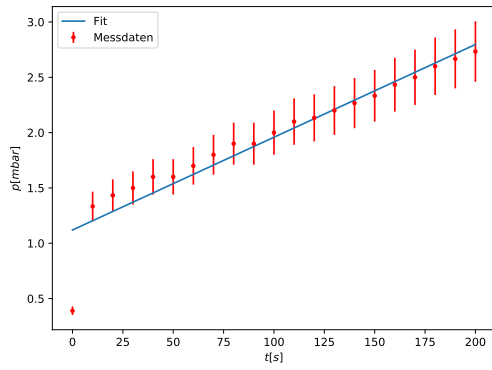
Abbildung 3: Logarithmische Darstellung der Evakuierungsmesswerte von der Drehschieberpumpe. Dabei sind die unterschiedlichen genutzten Intervalle farblich hervorgehoben und alle dazugehörigen Ausgleichsgeraden eingezeichnet.

Bereich	$m / 1/s$	n	$S / L/s$
1 bar bis 1,8 mbar	-0.0310 ± 0.00024	-0.1173 ± 0.00024	1.0532 ± 0.10562
1,8 mbar bis 0,44 mbar	-0.0110 ± 0.00036	-4.1260 ± 0.0036	0.3727 ± 0.03923
0,44 mbar bis 0 mbar	-0.0055 ± 0.00005	-5.9464 ± 0.00005	0.1884 ± 0.01891

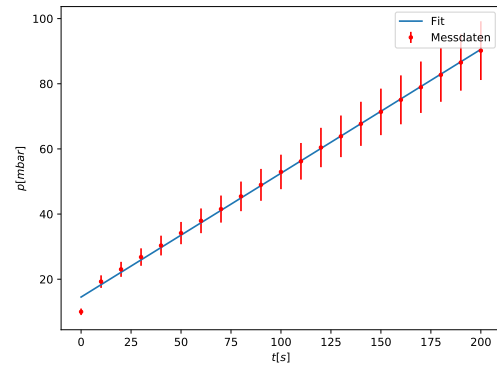
Tabelle 1: Parameter der Ausgleichsrechnungen und die Ergebnisse für das Saugvermögen.

5.3.2 Leckratenmessung

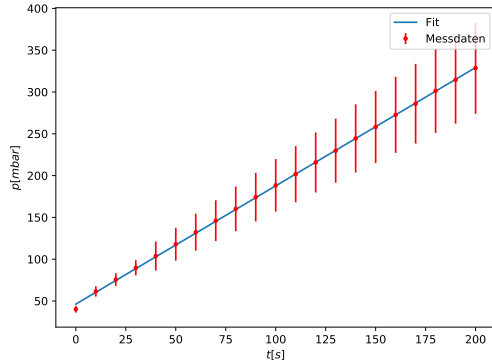
Für die Leckratenmessung wurden über ein Ventil vier unterschiedliche Gleichgewichtsdrücke eingestellt und nach dem Verschließen des Ventils wieder Druckwerte aufgenommen. Die Messwerte für die Messung mit dem Gleichgewichtsdruck $p_G = 0,4 \text{ mbar}$ sind in Tabelle ?? zu finden. Die für $p_G = 10 \text{ mbar}$ in Tabelle ??, $p_G = 20 \text{ mbar}$ in Tabelle ?? und $p_G = 80 \text{ mbar}$ in Tabelle ?. Sie wurden über einen Zeitraum von $T = 200 \text{ s}$ alle $\Delta t = 10 \text{ s}$, hinter der deaktivierten Turbomolekularpumpe, aufgenommen. Grafisch aufbereitet, inklusive Ausgleichsgeraden und Abweichung, ist dies in den Abbildungen ???? bis ???? zu finden.



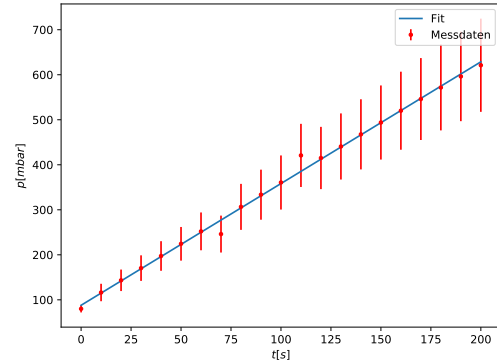
(a) Gleichgewichtsdruck $p_G = 0,4$ mbar.



(b) Gleichgewichtsdruck $p_G = 10$ mbar.



(c) Gleichgewichtsdruck $p_G = 20$ mbar.



(d) Gleichgewichtsdruck $p_G = 80$ mbar.

Abbildung 4: Die Messwerte der Leckratenmessung an der Drehschieberpumpe inklusive der dazugehörigen Ausgleichsgeraden.

Auf diese Messdaten wurden anschließend wieder lineare Ausgleichsgeraden, wie in Formel ??, erstellt. Es wurden keine Datenpunkte exkludiert.

Daraus lässt sich dann über den Zusammenhang $S = \frac{-V}{p_g} \cdot m$ das Saugvermögen bestimmen.

Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in der folgenden Tabelle ?? aufgeführt.

p_G / mbar	m / mbar/s	n / mbar	S / L/s
0.4	0.0084 ± 0.0007	1.1197 ± 0.0007	0.7310 ± 0.0936
10	0.3802 ± 0.0042	14.5260 ± 0.0042	1.2926 ± 0.1300
40	1.4150 ± 0.0057	46.2518 ± 0.0057	1.1988 ± 0.1200
80	2.7039 ± 0.0407	87.8873 ± 0.0407	1.1492 ± 0.1162

Tabelle 2: Die Parameter der Regressionsgeraden und die daraus bestimmten Saugvermögen für die Drehschieberpumpe.

5.4 Turbomolekularpumpe

Für die Turbomolekularpumpe wurden ebenfalls die Evakuierungsmessung und die Leckratenmessung durchgeführt. Die Auswertungen und Durchführungen der einzelnen Messungen sind weitestgehend identisch. Die Herstellerangabe des Saugvermögens der Turbomolekularpumpe beträgt $S_{theo} = 77 \text{ L/s}$ [V70].

Außerdem ist bei den Auswertungen das veränderte Volumen zu beachten.

5.4.1 Evakuierungsmessung

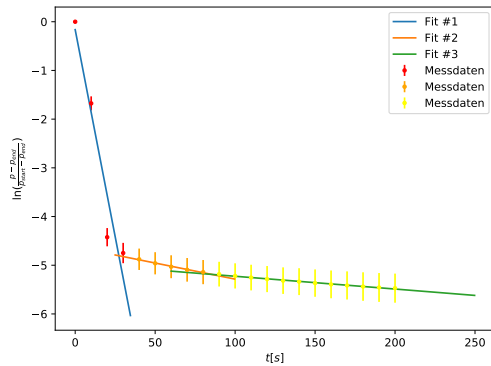
Für die Evakuierungsmessung weicht die Auswertung leicht von der Drehschieberpumpe ab. Hier wurden einmal Messwerte direkt an der Pumpe genommen und einmal am Vakuumkörper. Die Messwerte, die an der Pumpe genommen wurden finden sich, inklusive gemittelter Werte, in Tabelle ?? im Anhang. Für die Messwerte am Vakuumkörper ist es Tabelle ??.

Die Werte wurden über einen Zeitraum von $T = 200 \text{ s}$ alle $\Delta t = 10 \text{ s}$ aufgenommen.

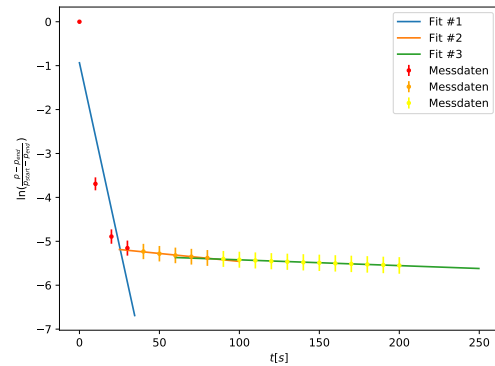
Für beide Messungen wurde dafür als Endwert $p_{end} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$ abgeschätzt.

Die zu den Messwerten dazugehörigen Abbildungen sind Abbildung ????, für die Messungen an der Pumpe, und in Abbildung ????, für den anderen Datensatz, zu finden.

Der Unterschied zur Auswertung der Drehschieberpumpe ist, dass hier der Leitwert zusätzlich betrachtet wird, weswegen ein zusätzlicher Datensatz an einer anderen Messstelle benötigt wird. Abgesehen davon ist die Auswertung analog zur Drehschieberpumpe.



(a) Die Daten die direkt oberhalb der Pumpe gemessen wurden.



(b) Die Daten die am Vakuumkörper gemessen wurden.

Abbildung 5: Die Messwerte der Evakuierungsmessungen mit der Turbomolekularpumpe inklusive dazugehöriger Fits abgebildet.

Auch hier wird das Saugvermögen wieder gesondert für drei Druckbereiche errechnet. Der erste Bereich geht von 167 mbar bis 2,44 mbar.

Der Zweite reicht dann bis 1,93 mbar und der Dritte dann bis zum Ende der Messdaten.

Für die Messungen am Vakuumkörper sind die Ergebnisse in Tabelle ?? aufgelistet und für die an der Pumpe in Tabelle ??.

Bereich	m / 1/s	n	S / L/s
167 mbar bis 2,44 mbar	-0.1667 ±0.05531	-0.9348 ±0.05531	5.4995 ±1.90637
2,44 mbar bis 1,93 mbar	-0.0036 ±0.00027	-5.0957 ±0.00027	0.1196 ±0.01482
1,93 mbar bis 0 mbar	-0.0013 ±0.00003	-5.2904 ±0.00003	0.0434 ±0.00447

Tabelle 3: Parameter der Ausgleichsrechnungen für die Messungen am Vakuumkörper und die Ergebnisse für das Saugvermögen.

Bereich	m / 1/s	n	S / L/s
167 mbar bis 2,44 mbar	-0.1700 ±0.03266	-0.1631 ±0.03266	5.6086 ±1.21505
2,44 mbar bis 1,93 mbar	-0.0066 ±0.00039 1/s	-4.6240 ±0.00039	0.2182 ±0.02525
1,93 mbar bis 0 mbar	-0.0026 ±0.00009	-4.9640 ±0.00009	0.0866 ±0.00913

Tabelle 4: Parameter der Ausgleichsrechnungen für die Messungen an der Pumpe und die Ergebnisse für das Saugvermögen.

Um den Leitwert zu bestimmen wird der Zusammenhang

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

$$\Leftrightarrow L = \frac{-S_{eff} \cdot S_0}{S_{eff} - S_0}$$

genutzt.

Wenn dabei angenommen wird, dass das Saugvermögen am Vakuumkörper dem Idealwert entspricht und die Leistung an der Pumpe S_{eff} entspricht, lässt sich damit für die einzelnen Messbereiche der Leitwert bestimmen.

Das Ergebnis dieser Rechnung ist in der folgenden Tabelle ?? zu finden.

Bereich	L / L/s
167 mbar bis 2,44 mbar	-282.782 ±5911.4814
2,44 mbar bis 1,93 mbar	-0.265 ±0.0815
1,93 mbar bis 0 mbar	-0.087 ±0.0203

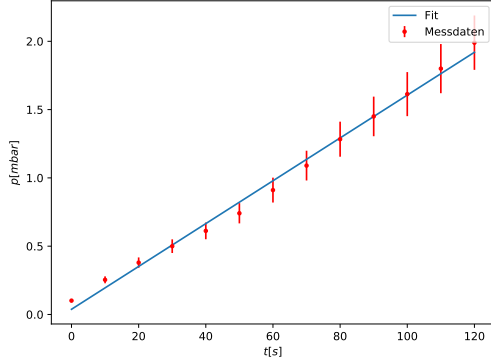
5.4.2 Leckratenmessung

Hier werden die Rechnungen analog zur Drehschieberpumpe durchgeführt.

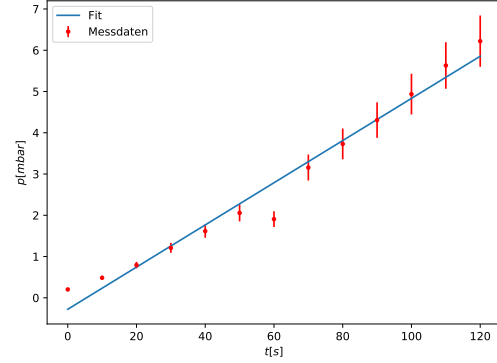
Die Messdaten für die Messreihe mit Gleichgewichtsdruck $1 \cdot 10^{-4}$ mbar sind in Tabelle ??, im Anhang, zu finden. Für den Gleichgewichtsdruck $2 \cdot 10^{-4}$ mbar ist es Tabelle ??,

für $7 \cdot 10^{-5}$ mbar Tabelle ?? und für $5 \cdot 10^{-5}$ mbar Tabelle ??.

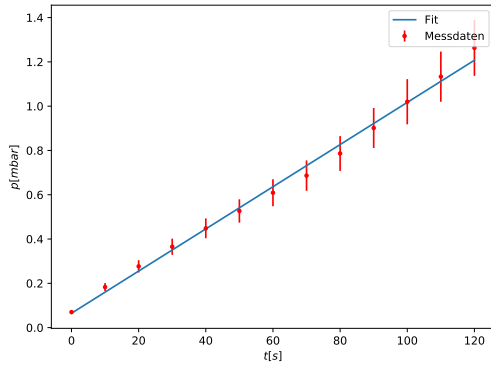
Der Zeitraum für diese Messung beträgt $T = 120$ s. Das Messintervall ist wieder $\Delta t = 10$ s. Visualisiert sind die Messwerte, inklusive berechneter Fits, in den Abbildungen ???? bis ????.



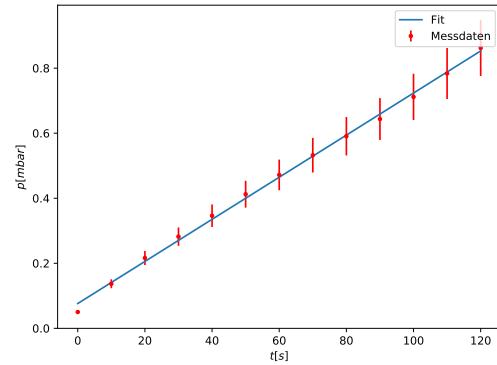
(a) Gleichgewichtsdruck $p_G = 1 \cdot 10^{-4}$ mbar.



(b) Gleichgewichtsdruck $p_G = 2 \cdot 10^{-4}$ mbar.



(c) Gleichgewichtsdruck $p_G = 7 \cdot 10^{-5}$ mbar.



(d) Gleichgewichtsdruck $p_G = 5 \cdot 10^{-5}$ mbar.

Abbildung 6: Die Messwerte der Leckratenmessung an der Turbomolekularpumpe inklusive der dazugehörigen Fits.

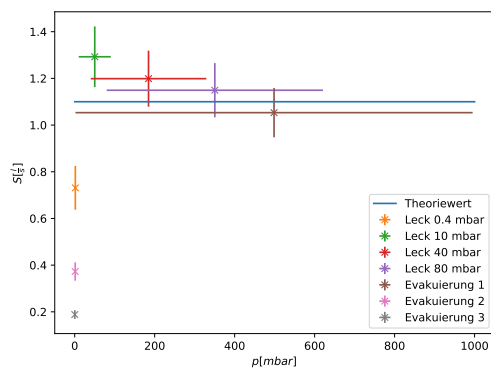
Auch hier wurde wieder eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt, aus deren Ergebnis dann mittels $S = \frac{-V}{p_g} \cdot m$ das Saugvermögen bestimmt wird.

Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in der folgenden Tabelle ?? aufgeführt.

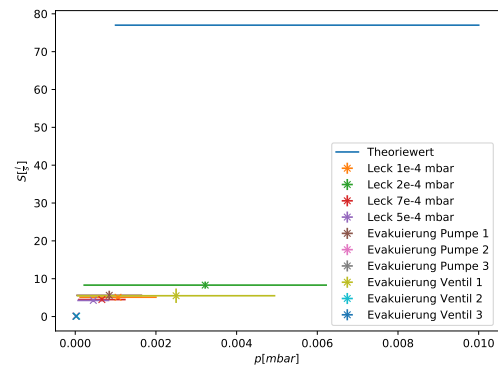
$p_G / \mu\text{bar}$	$m / \mu\text{bar/s}$	$n / \mu\text{bar}$	$S / \text{L/s}$
0.1	0.01568 ± 0.000393	0.03797 ± 0.000393	5.1067 ± 0.52772
0.2	0.05111 ± 0.002646	-0.27799 ± 0.002646	8.3083 ± 0.93574
0.07	0.00952 ± 0.000221	0.06485 ± 0.000221	4.4886 ± 0.46088
0.05	0.00647 ± 0.000094	0.07621 ± 0.000094	4.2640 ± 0.43101

Tabelle 5: Die Parameter der Regressionsgeraden und die daraus bestimmten Saugvermögen für die Turbomolekularpumpe.

6 Diskussion



(a) Die Saugvermögen aller Messungen für die Drehschieberpumpe als Funktion des Drucks.



(b) Die Saugvermögen aller Messungen für die Turbomolekularpumpe als Funktion des Drucks. Der Theoriewert ist hier nicht eingezeichnet. Er liegt bei 77 L/s.

Abbildung 7

Die Aufnahme der Messwerte lief alles in allem unproblematisch. Es gab keine Probleme mit dem Aufbau und die Werte passten auf den ersten Blick zu unseren Erwartungen. Allerdings haben wir vergessen die Enddrücke für die Evakuierungsmessungen abzulesen, weswegen diese abgeschätzt werden mussten. Das heißt, dass mithilfe der Erfahrung der betreuenden Person und des Trendes der sich bei einer kürzeren Evakuierungszeit ergab, Enddrücke abgeschätzt wurden.

Des Weiteren hat die Turbomolekularpumpe bei der Evakuierungsmessung jedes Mal im selben Messzeitraum ein besseres Vakuum erzeugt. Das heißt, dass von Messreihe zu Messreihe das Volumen schneller evakuiert wurde und der Enddruck auch kleiner war als bei den vorhergegangenen Messungen. Dies lag vermutlich daran, dass bei jedem Pumpen mehr Verunreinigungen entfernt wurde, welche sonst ein virtuelles Leck darstellen würden. Allerdings hat dies dann zu einem größeren Fehler des Mittelwerts geführt.

Ein zusätzliches Problem war, dass auf Grund des exponentiellen Wachstums und der

exponentiellen Abnahme, bei Start einer Messreihe sehr schnell reagiert werden musste, da sich die Werte sehr schnell geändert haben. Dies führte ebenfalls zu Ungenauigkeiten in den Messungen. Da wir aber trotzdem, auch in diesem Bereich, wenig Streuung in unseren Werten haben, wurde dies vernachlässigt.

Die Ergebnisse der Drehschieberpumpe stimmen, wie in Abbildung ???? zu sehen, im Rahmen der Messfehler mit dem Theoriewert von 1,1 L/s überein. Die genauen relativen Abweichungen und die dazugehörigen Messwerte sind in Tabelle ?? aufgetragen. Dabei werden die Ergebnisse für die letzten beiden Bereiche der Evakuierungsmessung, $S_2 = (0,37 \pm 0,04) \text{ L/s}$ und $S_3 = (0,19 \pm 0,02) \text{ L/s}$, nicht weiter betrachtet, da der Theoriewert nur für den optimalen Wirkungsbereich der Pumpe gilt. Außerdem wurde der Theoriewert unter Idealbedingungen mit Stickstoff erreicht. Die Bereiche für die ausgeschlossenen Werte berechnet wurden, sind davon schon so weit entfernt, sodass dort andere Saugvermögen gelten.

Messverfahren	S / L/s	relative Abweichung / %
Evakuierung	1.05 ± 0.11	4.26 ± 9.60
Leck 0,4 mbar	0.73 ± 0.09	33.54 ± 8.51
Leck 10 mbar	1.29 ± 0.13	-17.51 ± 11.82
Leck 40 mbar	1.15 ± 0.12	-8.98 ± 10.91
Leck 80 mbar	1.20 ± 0.12	-4.47 ± 10.56

Tabelle 6: Relative Abweichungen von dem Theoriewert für die Drehschieberpumpe.

An Tabelle ?? lässt sich erkennen, dass die Drehschieberpumpenmessungen, im Rahmen des Messfehlers, gut mit dem Theoriewert übereinstimmen.

Anders ist es hingegen bei der Turbomolekularpumpe. Es lässt sich schon in Abbildung ???? erkennen, dass kein gemessenes Saugvermögen nah an den Theoriewert von $S_{theo} = 77 \text{ L/s}$ kommt. Und das, obwohl es bei der Messung keine erkennbaren Probleme gab.

Es gab keine besonders große Varianz unter den einzelnen Messreihen. Die errechneten Saugvermögen weichen stark vom Theoriewert ab, schwanken aber trotzdem alle um ca. 5 L/s.

Dies zeigt auf jeden Fall, dass der Rechenvorgang an sich nicht falsch ist. Des Weiteren wurde die Auswertung der Turbomolekularpumpe mit denselben selbstgeschriebenen Python-Skripten durchgeführt. Es könnte natürlich ein Größenordnungsfehler im Code sein. So etwas konnten wir aber nicht finden.

Was den Aufbau angeht muss hier auch der Leitwert berücksichtigt werden. Dadurch, dass die Messwerte weit entfernt von der Turbomolekularpumpe aufgenommen wurden, verringert der Leitwert die Saugleistung. Dieser Effekt spielt im Hochvakuum eine größere Rolle. Außerdem wurden hier auch keine, bei der Herstellerangabe genutzten Idealbedin-

gungen, erreicht.

Die Ergebnisse und ihre relative Abweichung vom Theoriewert sind in Tabelle ?? zusammengefasst. Auch hier wird wieder nur der Bereich betrachtet, bei dem die Turbomolekularpumpe, bei der Evakuierungsmessung, am besten evakuiert.

Verfahren	S / L/s	relative Abweichung / %
Evakuierung Ventil	5.50 ± 1.91	92.86 ± 2.48
Evakuierung Pumpe	5.61 ± 1.22	92.72 ± 1.58
Leck $1 \cdot 10^{-4}$ mbar	5.11 ± 0.53	93.37 ± 0.69
Leck $2 \cdot 10^{-4}$ mbar	8.31 ± 0.94	89.21 ± 1.22
Leck $7 \cdot 10^{-5}$ mbar	4.49 ± 0.46	94.17 ± 0.60
Leck $5 \cdot 10^{-5}$ mbar	4.26 ± 0.43	94.46 ± 0.56

Tabelle 7: Relative Abweichungen von dem Theoriewert für die Turbomolekularpumpe.

Es bleiben noch die zwei Messreihen der Evakuierungsmessung mit der Turbomolekularpumpe, welche zur Bestimmung des Leitwerts genutzt wurden. Die Ergebnisse dieser Rechnung sind in Tabelle ?? aufgetragen. Da wir keine Theoriewerte besitzen fällt es schwer zu vergleichen. Allerdings ist an den Messwerten direkt ersichtlich, dass es einen Unterschied zwischen den beiden Messstellen gibt.

Die errechneten Leitwerte zeigen dies auch. Außerdem sticht heraus, dass einer der bestimmten Leitwerte zu $-282.78 \pm 5911.48 \text{ L/s}$ berechnet wurde. Die große Abweichung lässt sich dadurch erklären, dass für die Berechnung dieses Leitwerts die beiden Saugleistungen $S_{eff} = 5.50 \pm 1.91 \text{ L/s}$ und $S_0 = 5.61 \pm 1.22 \text{ L/s}$ im Nenner voneinander abgezogen werden. Dadurch dass sie fast gleich groß sind, wird durch eine sehr kleine Zahl geteilt, während die Zahlen im Zähler multipliziert werden. Dies führt zu einem großen Fehlerwert.

Alles in allem lässt sich zusammenfassen, dass die Ergebnisse der Drehschieberpumpenmessungen sehr gut und die der Turbomolekularpumpenmessungen schlechter zu den Herstellerangaben passen.

7 Anhang

7.1 Tabellen

7.1.1 Messdaten Drehschieberpumpe

t in s	Druck Messreihe 1 in mbar	Druck Messreihe 2 in mbar	Druck Messreihe 3 in mbar	Druck gemittelt in mbar
0	9951	9954	9897	993.4 ±1.5
10	644	640	640	641.3 ±1.1
20	479	439	477	465 ±11
30	358	327	357	347 ±8
40	265	236	266	256 ±8
50	201	177	196	191 ±6
60	147	131	144	141 ±4
70	103	95	108	102.0 ±3.1
80	75	69,8	76,9	73.9 ±1.7
90	55	51	56,2	54.1 ±1.3
100	40,2	36,7	41,1	39.3 ±1.1
110	29,9	26,4	30,3	28.9 ±1.0
120	21,5	19,1	21,4	20.7 ±0.6
130	15,1	14	15,5	14.9 ±0.4
140	10,8	10	11,3	10.70 ±0.31
150	7,9	7,3	8,5	7.90 ±0.28
160	5,9	5,5	6,1	5.83 ±0.14
170	4,5	4,2	4,6	4.43 ±0.10
180	3,5	3,2	3,6	3.43 ±0.10
190	2,8	2,6	2,9	2.77 ±0.07
200	2,2	2,1	2,3	2.20 ±0.05
210	1,9	1,6	1,9	1.80 ±0.08
220	1,6	1,5	1,6	1.567 ±0.027
230	1,4	1,3	1,4	1.367 ±0.027
240	1,2	1,2	1,2	1.2 ±0
250	1	0,99	1,1	1.030 ±0.029
260	0,93	0,91	0,94	0.927 ±0.007
270	0,83	0,82	0,86	0.837 ±0.010
280	0,76	0,74	0,77	0.757 ±0.007
290	0,68	0,67	0,7	0.683 ±0.007
300	0,63	0,62	0,64	0.630 ±0.005
310	0,59	0,57	0,6	0.587 ±0.007
320	0,54	0,53	0,55	0.540 ±0.005
330	0,5	0,5	0,51	0.503 ±0.0027
340	0,47	0,46	0,47	0.4667 ±0.0027
350	0,44	0,43	0,44	0.4367 ±0.0027
360	0,41	0,41	0,42	0.4133 ±0.0027
370	0,39	0,39	0,4	0.3933 ±0.0027
380	0,37	0,36	0,38	0.370 ±0.005
390	0,35	0,35	0,35	0.350 ±0
400	0,33	0,33	0,33	0.33 ±0
410	0,31	0,31	0,32	0.3133 ±0.0027
420	0,3	0,3	0,3	0.3 ±0
430	0,28	0,28	0,29	0.2833 ±0.0027
440	0,27	0,27	0,28	0.2733 ±0.0027
450	0,26	0,26	0,27	0.2633 ±0.0027
460	0,25	0,25	0,25	0.25 ±0
470	0,24	0,24	0,24	0.24 ±0
480	0,23	0,23	0,23	0.23 ±0
490	0,21	0,22	0,23	0.220 ±0.005
500	0,21	0,21	0,21	0.21 ±0
510	0,2	0,2	0,21	0.2033 ±0.0027
520	0,19	0,2	0,2	0.1967 ±0.0027
530	0,18	0,19	0,19	0.1867 ±0.0027
540	0,17	0,18	0,18	0.1767 ±0.0027
550	0,17	0,18	0,18	0.1767 ±0.0027
560	0,16	0,17	0,17	0.1667 ±0.0027
570	0,16	0,16	0,16	0.16 ±0
580	0,15	0,16	0,16	0.1567 ±0.0027
590	0,15	0,15	0,15	0.15 ±0
600	0,14	0,15	0,15	0.1467 ±0.0027
	0,05	0,05	0,05	0.05 ±0

Tabelle 8: Messwerte der Drehschieberpumpenmessreihen für die Druckkurve.

t in s	Druck Messreihe 1 in mbar	Druck Messreihe 2 in mbar	Druck Messreihe 3 in mbar	Druck gemittelt in mbar
0	0,39	0,39	0,39	0.39 ± 0
10	1,3	1,4	1,3	1.333 ± 0.027
20	1,4	1,5	1,4	1.433 ± 0.027
30	1,5	1,5	1,5	1.5 ± 0
40	1,6	1,6	1,6	1.6 ± 0
50	1,6	1,6	1,6	1.6 ± 0
60	1,7	1,7	1,7	1.7 ± 0
70	1,8	1,8	1,8	1.8 ± 0
80	1,9	1,9	1,9	1.9 ± 0
90	1,9	1,9	1,9	1.9 ± 0
100	2	2	2	2.0 ± 0
110	2,1	2,1	2,1	2.1 ± 0
120	2,1	2,2	2,1	2.133 ± 0.027
130	2,2	2,2	2,2	2.2 ± 0
140	2,3	2,3	2,2	2.267 ± 0.027
150	2,3	2,4	2,3	2.333 ± 0.027
160	2,4	2,5	2,4	2.433 ± 0.027
170	2,5	2,5	2,5	2.5 ± 0
180	2,6	2,6	2,6	2.6 ± 0
190	2,7	2,7	2,6	2.667 ± 0.027
200	2,7	2,8	2,7	2.733 ± 0.027

Tabelle 9: Messwerte der Leckratenmessung für den Gleichgewichtsdruck 0,4 mbar mit der Drehschieberpumpe.

t in s	Druck Messreihe 1 in mbar	Druck Messreihe 2 in mbar	Druck Messreihe 3 in mbar	Druck gemittelt in mbar
0	10	10	10	10.0 \pm 0
10	19,3	19,3	19,2	19.267 \pm 0.027
20	23,1	23,1	22,9	23.03 \pm 0.05
30	26,8	26,8	26,8	26.8 \pm 0
40	30,3	30,3	30,4	30.333 \pm 0.027
50	34,2	34,2	34,1	34.167 \pm 0.027
60	38	38	37,8	37.93 \pm 0.05
70	41,5	41,5	41,6	41.533 \pm 0.027
80	45,5	45,5	45,3	45.43 \pm 0.05
90	48,9	48,9	49,1	48.97 \pm 0.05
100	53	53	52,8	52.93 \pm 0.05
110	56	56	56,6	56.20 \pm 0.16
120	60,5	60,5	60,3	60.43 \pm 0.05
130	63,8	63,8	64	63.87 \pm 0.05
140	67,5	67,5	68,1	67.70 \pm 0.16
150	71,5	71,5	71,1	71.37 \pm 0.11
160	75	75	75,2	75.07 \pm 0.05
170	78,8	78,8	79,2	78.93 \pm 0.11
180	82,8	82,8	82,6	82.73 \pm 0.05
190	86,8	86,6	86,2	86.53 \pm 0.14
200	90,2	90,2	90,1	90.167 \pm 0.027

Tabelle 10: Messwerte der Leckratenmessung für den Gleichgewichtsdruck 10 mbar mit der Drehschieberpumpe.

t in s	Druck Messreihe 1 in mbar	Druck Messreihe 2 in mbar	Druck Messreihe 3 in mbar	Druck gemittelt in mbar
0	40,1	40,2	40,1	40.133 \pm 0.027
10	61,7	61,4	61,4	61.50 \pm 0.08
20	75,8	75,5	75,5	75.60 \pm 0.08
30	90	89,5	89,6	89.70 \pm 0.12
40	104	103,7	103,7	103.80 \pm 0.08
50	118,2	117,8	117,8	117.93 \pm 0.11
60	133,2	131,9	131,8	132.3 \pm 0.4
70	146,4	145,9	145,9	146.07 \pm 0.14
80	160,5	160,1	159,9	160.17 \pm 0.14
90	174,5	174,1	174	174.20 \pm 0.12
100	188,7	188,2	188,1	188.33 \pm 0.15
110	202,1	201,5	201,4	201.67 \pm 0.18
120	216,1	215,6	215,5	215.73 \pm 0.15
130	230,2	229,8	229,5	229.83 \pm 0.17
140	244,3	245,3	243,7	244.4 \pm 0.4
150	258,6	258,2	257,8	258.20 \pm 0.19
160	274,1	272,2	271,9	272.7 \pm 0.6
170	286,7	285,3	285,9	285.97 \pm 0.33
180	300,8	303,2	300,1	301.4 \pm 0.8
190	315	314,4	314,2	314.53 \pm 0.20
200	329,1	328,5	328,3	328.63 \pm 0.20

Tabelle 11: Messwerte der Leckratenmessung für den Gleichgewichtsdruck 40 mbar mit der Drehschieberpumpe.

t in s	Druck Messreihe 1 in mbar	Druck Messreihe 2 in mbar	Druck Messreihe 3 in mbar	Druck gemittelt in mbar
0	80	80	80	80.0 \pm 0
10	110	116	113	116.27 \pm 0.26
20	143	143	143	143.37 \pm 0.22
30	171	170	170	170.43 \pm 0.24
40	198	197	198	197.37 \pm 0.28
50	224	223	223	224.4 \pm 0.6
60	251	252	253	252.1 \pm 0.4
70	178	280	280	246 \pm 28
80	305	307	307	306.5 \pm 0.5
90	332	332	332	333.6 \pm 0.5
100	359	363	362	360.6 \pm 0.5
110	380	388	488	421 \pm 27
120	413	415	417	415.1 \pm 1.0
130	439	443	447	440.7 \pm 0.7
140	466	468	468	467.6 \pm 0.5
150	492	494	492	493.9 \pm 0.5
160	518	520	520	520.1 \pm 0.5
170	544	546	547	546.0 \pm 0.5
180	570	572	572	571.6 \pm 0.5
190	595	596	593	596.2 \pm 0.5
200	620	620	625	621.1 \pm 0.6

Tabelle 12: Messwerte der Leckratenmessung für den Gleichgewichtsdruck 80 mbar mit der Drehschieberpumpe.

7.1.2 Messdaten Turbomolekularpumpe

t in s	Druck Messreihe 1 in mPa	Druck Messreihe 2 in mPa	Druck Messreihe 3 in mPa	Druck gemittelt in mPa
0	166	169	167	167.3 \pm 0.7
10	7.8	8.73	79.8	32 \pm 19
20	3.3	2.98	2.7	2.99 \pm 0.14
30	2.72	2.4	2.2	2.44 \pm 0.12
40	2.54	2.22	2.04	2.27 \pm 0.12
50	2.42	2.13	1.95	2.17 \pm 0.11
60	2.33	2.05	1.88	2.09 \pm 0.11
70	2.25	1.99	1.82	2.02 \pm 0.10
80	2.2	1.94	1.78	1.97 \pm 0.10
90	2.16	1.9	1.74	1.93 \pm 0.10
100	2.12	1.87	1.71	1.90 \pm 0.10
110	2.09	1.84	1.68	1.87 \pm 0.10
120	2.06	1.81	1.66	1.84 \pm 0.10
130	2.03	1.79	1.63	1.82 \pm 0.09
140	2.01	1.77	1.62	1.80 \pm 0.09
150	1.98	1.75	1.6	1.78 \pm 0.09
160	1.96	1.73	1.58	1.76 \pm 0.09
170	1.94	1.71	1.57	1.74 \pm 0.09
180	1.92	1.7	1.55	1.72 \pm 0.09
190	1.91	1.68	1.54	1.71 \pm 0.09
200	1.9	1.67	1.53	1.70 \pm 0.09
	1	1	1	1.0 \pm 0

Tabelle 13: Messwerte der Turbomolekularpumpenmessreihen für die Druckkurve.
Dabei wurden diese Messwerte direkt an der Pumpe gemessen.

t in s	Druck Messreihe 1 in mPa	Druck Messreihe 2 in mPa	Druck Messreihe 3 in mPa	Druck gemittelt in mPa
0	496	504	495	498.3 ±2.3
10	14,2	13,2	12,8	13.40 ±0.34
20	5,12	4,72	4,36	4.73 ±0.18
30	4,22	3,81	3,58	3.87 ±0.15
40	3,96	3,61	3,4	3.66 ±0.13
50	3,83	3,49	3,26	3.53 ±0.14
60	3,73	3,4	3,16	3.43 ±0.13
70	3,66	3,33	3,09	3.36 ±0.13
80	3,6	3,26	3,02	3.29 ±0.14
90	3,56	3,2	2,97	3.24 ±0.14
100	3,52	3,16	2,93	3.20 ±0.14
110	3,49	3,12	2,89	3.17 ±0.14
120	3,46	3,08	2,85	3.13 ±0.15
130	3,44	3,05	2,82	3.10 ±0.15
140	3,42	3,02	2,79	3.08 ±0.15
150	3,4	3	2,76	3.05 ±0.15
160	3,36	2,98	2,74	3.03 ±0.15
170	3,34	2,95	2,72	3.00 ±0.15
180	3,31	2,93	2,7	2.98 ±0.15
190	3,28	2,91	2,68	2.96 ±0.14
200	3,25	2,89	2,66	2.93 ±0.14
	1	1	1	1.0 ±0

Tabelle 14: Messwerte der Turbomolekularpumpenmessreihen für die Druckkurve.
Dabei wurden diese Messwerte direkt am Ablassventil gemessen.

t in s	Druck Messreihe 1 in mPa	Druck Messreihe 2 in mPa	Druck Messreihe 3 in mPa	Druck gemittelt in mPa
0	10,1	10,3	10	10.13 ±0.07
10	25,1	25,8	25,2	25.37 ±0.18
20	37,8	38,6	37,5	37.97 ±0.27
30	49,9	50,4	49,7	50.00 ±0.17
40	61,5	61,8	60,3	61.2 ±0.4
50	74,4	75,4	72,5	74.1 ±0.7
60	91,6	92,8	88,8	91.1 ±1.0
70	110	110	107	109.0 ±0.8
80	130	131	124	128.3 ±1.8
90	147	147	141	145.0 ±1.6
100	163	164	157	161.3 ±1.8
110	182	183	175	180.0 ±2.1
120	202	202	193	199.0 ±2.4

Tabelle 15: Messwerte der Leckratenmessung für den Gleichgewichtsdruck $1 \cdot 10^{-4}$ mbar
mit der Drehschieberpumpe.

t in s	Druck Messreihe 1 in mPa	Druck Messreihe 2 in mPa	Druck Messreihe 3 in mPa	Druck gemittelt in mPa
0	20,2	20,4	20,3	20.30 ±0.05
10	48,6	48,6	48,4	48.53 ±0.05
20	80	79,6	78,2	79.3 ±0.4
30	121	122	120	121.0 ±0.5
40	162	163	160	161.7 ±0.7
50	206	206	205	205.67 ±0.27
60	156	160	256	191 ±27
70	315	318	314	315.7 ±1.0
80	376	374	369	373.0 ±1.7
90	432	432	428	3.0 ±1.1
100	495	494	492	493.7 ±0.7
110	563	564	562	563.0 ±0.5
120	624	622	620	622.0 ±0.9

Tabelle 16: Messwerte der Leckratenmessung für den Gleichgewichtsdruck $2 \cdot 10^{-4}$ mbar mit der Drehschieberpumpe.

t in s	Druck Messreihe 1 in mPa	Druck Messreihe 2 in mPa	Druck Messreihe 3 in mPa	Druck gemittelt in mPa
0	7	7,02	6,98	7.000 ±0.009
10	18,4	18,3	18,2	18.30 ±0.05
20	27,5	27,9	27,6	27.67 ±0.10
30	36,2	37,2	36,2	36.53 ±0.27
40	44,6	45,3	44,6	44.83 ±0.19
50	51,8	53,2	53	52.7 ±0.4
60	60,1	61,6	61	60.9 ±0.4
70	67,9	69,4	68,6	68.63 ±0.35
80	78	79,3	78,6	78.63 ±0.31
90	89	91,4	90	90.1 ±0.6
100	101	103	102	102.0 ±0.5
110	112	115	113	113.3 ±0.7
120	125	128	126	126.3 ±0.7

Tabelle 17: Messwerte der Leckratenmessung für den Gleichgewichtsdruck $7 \cdot 10^{-5}$ mbar mit der Drehschieberpumpe.

t in s	Druck Messreihe 1 in mPa	Druck Messreihe 2 in mPa	Druck Messreihe 3 in mPa	Druck gemittelt in mPa
0	5	4,99	5,04	5.010 ±0.012
10	13,4	14,1	13,6	13.70 ±0.17
20	21,5	22	21,4	21.63 ±0.15
30	27,6	28,4	28,6	28.20 ±0.25
40	33,7	35	35,2	34.6 ±0.4
50	40,6	41,7	41,4	41.23 ±0.27
60	46,3	47,6	47,6	47.17 ±0.35
70	52,4	53,6	53,7	53.23 ±0.34
80	58,2	59,2	59,8	59.1 ±0.4
90	64,1	65	64	64.37 ±0.26
100	70	71,6	71,9	71.2 ±0.5
110	76,9	78,6	79,6	78.4 ±0.6
120	84,5	87,2	87	86.2 ±0.7

Tabelle 18: Messwerte der Leckratenmessung für den Gleichgewichtsdruck $5 \cdot 10^{-5}$ mbar mit der Drehschieberpumpe.

7.2 Messwertfotos

V70

11.04 DOR

PCT-Kurve / Drehvieker / Messung alle 10s für 600s

Messung 1: Pfort. TPG 202

Messung 1	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
994,1	29,4	1,7	5,9 -1	3,1 -1	2,0 -1	
644	21,5	1,6	5,4 -1	3,0 -1	1,9 -1	
474	15,1	1,4	5,0 -1	2,8 -1	1,8 -1	
358	10,8	1,2	4,7 -1	2,7 -1	1,7 -1	
265	7,9	1	4,4 -1	2,6 -1	1,7 -1	
201	5,9	0,3 -1	4,1 -1	2,5 -1	1,6 -1	
147	4,5	0,3 -1	3,9 -1	2,4 -1	1,6 -1	
103	3,5	0,6 -1	3,7 -1	2,3 -1	1,5 -1	
75	2,8	0,8 -1	3,5 -1	2,1 -1	1,5 -1	
55	2,2	0,3 -1	3,3 -1	2,1 -1	1,4 -1	
40,2						

Messung 2: Druck in mbar

Messung 2	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
995,4	20,4	1,6	5,7 -1	3,1 -1	2,0 -1	
640	19,1	1,5	5,3 -1	3,0 -1	2,0 -1	
434	14,0	1,3	5,0 -1	2,8 -1	1,9 -1	
327	10,0	1,2	4,6 -1	2,7 -1	1,8 -1	
236	7,3	0,9 -1	4,3 -1	2,6 -1	1,8 -1	
177	5,5	0,1 -1	4,1 -1	2,5 -1	1,7 -1	
131	4,2	0,2 -1	3,9 -1	2,4 -1	1,6 -1	
95	3,2	0,4 -1	3,6 -1	2,3 -1	1,6 -1	
69,8	2,6	0,7 -1	3,5 -1	2,2 -1	1,5 -1	
51,0	2,1	0,2 -1	3,3 -1	2,1 -1	1,5 -1	
36,7						

Abbildung 8: Die Messwerte des Vakuumversuchs

Messung 3		Druck in mbar		Druck	
989,7	30,3	1,6	5,7 -1	2,8 -1	1,8 -1
640	21,4	1,4	4,7 -1	2,7 -1	1,7 -1
472	15,5	1,2	4,4 -1	2,5 -1	1,6 -1
357	11,3	1,1	4,2 -1	2,4 -1	1,6 -1
266	8,5	1,4 -1	4,0 -1	2,3 -1	1,5 -1
196	6,1	1,6 -1	3,8 -1	2,3 -1	1,5 -1
144	4,6	1,7 -1	3,5 -1	2,1 -1	
108	3,6	1,0 -1	3,3 -1	2,1 -1	
76,4	2,9	1,4 -1	3,2 -1	2,0 -1	
56,2	2,3	1,0 -1	3,0 -1	1,9 -1	
41,1	1,9	1,5 -1	2,9 -1	1,8 -1	
Endwert 2,1-2					
Leckrate		Drehzieher		(mit Schlauch)	
Messung 1	0,4 mbar Gleichgewicht	Messung 2	in mbar	Messung 3	
3,9 -1	2,1	3,9 -1	2,1	3,9 -1	2,1
1,3	2,1	1,4	2,2	1,3	2,1
1,4	2,2	1,5	2,2	1,4	2,2
1,5	2,3	1,5	2,3	1,5	2,2
1,6	2,3	1,6	2,4	1,6	2,3
1,6	2,4	1,7	2,5	1,6	2,4
1,7	2,5	1,8	2,5	1,7	2,5
1,8	2,6	1,8	2,6	1,8	2,6
1,9	2,7	1,9	2,7	1,9	2,6
1,9	2,7	2,0	2,8	1,9	2,7
2,0		2,0		2,0	

Abbildung 9: Die Messwerte des Vakuumversuchs

10 MHz Gleichgewicht

DR

Messung	1		Messung 2		Messung 3		
10	56	/	10	56,7	/	10	52,8
19,3	60,5	/	19,3	60,4	/	19,2	56,6
23,7	63,8	/	23,1	64,2	/	23,9	60,3
26,9	67,5	/	26,9	67,9	/	26,8	64
30,3	71,5	/	30,5	71,6	/	30,4	68,1
34,2	75,0	/	34,3	75,3	/	34,1	71,1
38	78,8	/	37,9	79	/	37,9	75,2
41,5	82,8	/	41,7	82,8	/	41,6	79,2
45,5	86,6	/	45,4	86,4	/	45,3	82,6
48,9	90,2	/	47,2	90,2	/	47,1	86,2
53,0		/	52,8		/	49,1	90,1

40 MHz Gleichgewicht

Messung 1			Messung 2		Messung 3		
40,1	202,1	/	40,2	201,5	/	40,1	201,4
61,7	216,1	/	61,4	215,6	/	61,4	215,5
75,8	230,2	/	75,5	229,8	/	75,5	229,5
90	244,3	/	89,5	245,3	/	89,6	243,7
104,0	258,6	/	103,7	258,2	/	103,7	257,8
118,2	274,1	/	117,8	272,2	/	117,8	271,9
133,2	286,7	/	137,9	285,3	/	137,8	285,9
146,4	300,8	/	145,9	303,2	/	145,9	300,1
160,5	315,0	/	160,1	314,4	/	159,7	314,2
174,5	329,1	/	174,1	328,5	/	174,0	328,3
188,7		/	188,2		/	188,1	

Abbildung 10: Die Messwerte des Vakuumversuchs

80 mbar Gleichgewicht

Messung 1

80,0	386,2
116,9	413,0
143,9	439,0
171,0	466,3
198,0	492,8
224,0	518,8
251,1	544,8
278,2	570,4
305,2	595,0
332,3	620,8
359,4	

Messung 2

80,0	385,1
116,0	415,1
143,1	441,3
170,3	468,3
197,3	494,7
223,4	520,7
253,1	546,6
280,0	572,3
307,1	596,4
334,2	620,0
361,3	

Messung 3

80,0	388,1
115,0	417,1
143,1	441,7
170,0	468,2
196,8	494,2
225,9	520,8
253,0	546,7
280,0	572,2
307,2	597,3
334,2	622,5
361,2	

$P(t)$ -Kurve / Turbo molekular

Messung 1

an der Pumpe	an Vorionkammer
1,66 -3	2,09 -5
2,48 -5	2,06 -5
3,3 -5	2,03 -5
2,72 -5	2,01 -5
2,54 -5	1,98 -5
2,42 -5	1,96 -5
2,33 -5	1,94 -5
2,25 -5	1,92 -5
2,20 -5	1,91 -5
2,16 -5	1,90 -5
2,12 -5	

Messung 2

an Vorionkammer	an der Pumpe
4,40 -3	3,60 -5
1,42 -4	3,56 -5
5,12 -5	3,52 -5
4,22 -5	3,49 -5
3,96 -5	3,46 -5
3,83 -5	3,44 -5
3,73 -5	3,42 -5
3,66 -5	3,40 -5
	3,36 -5
	3,34 -5
	3,31 -5
	3,28 -5
	3,25 -5

Messung 3

an Vorionkammer	an der Pumpe
4,40 -3	3,60 -5
1,42 -4	3,56 -5
5,12 -5	3,52 -5
4,22 -5	3,49 -5
3,96 -5	3,46 -5
3,83 -5	3,44 -5
3,73 -5	3,42 -5
3,66 -5	3,40 -5
	3,36 -5
	3,34 -5
	3,31 -5
	3,28 -5
	3,25 -5

Abbildung 11: Die Messwerte des Vakuumversuchs

Messung 2				PSK	
an der Pumpe		an Ventil			
1,67 -3	1,84 -5	5,04 -3	3,72 -5		
6,73 -5	1,81 -5	1,32 -4	3,08 -5		
2,48 -5	1,79 -5	4,72 -5	3,05 -5		
2,40 -5	1,77 -5	3,81 -5	3,02 -5		
2,22 -5	1,75 -5	3,61 -5	3,00 -5		
2,13 -5	1,73 -5	3,49 -5	2,98 -5		
2,05 -5	1,71 -5	3,40 -5	2,95 -5		
1,99 -5	1,70 -5	3,33 -5	2,93 -5		
1,94 -5	1,68 -5	3,26 -5	2,91 -5		
1,90 -5	1,67 -5	3,20 -5	2,89 -5		
1,87 -5		3,16 -5			

Messung 3				OSR	
an der Pumpe		an Ventil			
1,62 -3	1,68 -5	4,95 -3	2,84 -5		
7,94 -5	1,66 -5	1,28 -4	2,85 -5		
2,70 -5	1,63 -5	4,30 -5	2,82 -5		
2,20 -5	1,62 -5	3,58 -5	2,79 -5		
2,04 -5	1,60 -5	3,40 -5	2,76 -5		
1,95 -5	1,59 -5	3,26 -5	2,74 -5		
1,88 -5	1,57 -5	3,16 -5	2,72 -5		
1,82 -5	1,55 -5	3,09 -5	2,70 -5		
1,78 -5	1,54 -5	3,02 -5	2,68 -5		
1,74 -5	1,53 -5	2,97 -5	2,66 -5		
1,71 -5		2,93 -5			

Enddruck am Ventil $2 \cdot 10^{-5}$

Abbildung 12: Die Messwerte des Vakuumversuchs

DSR

Laborale Turbo

1.10-4 mbar

Pumpe	Ventil
5,14 -5	1,01 -4
1,74 -4	2,51 -4
2,75 -4	3,78 -4
3,04 -4	4,94 -4
4,58 -4	6,15 -4
5,13 -4	7,44 -4
6,04 -4	9,16 -4
7,36 -4	1,10 -3
9,02 -4	1,30 -3
1,07 -3	1,42 -3
1,25 -3	1,63 -3
1,44 -3	1,82 -3
1,63 -3	2,02 -3

Messung 2

Pumpe	Ventil
5,30 -5	1,03 -4
1,78 -4	2,58 -4
2,08 -4	3,86 -4
3,55 -4	5,04 -4
4,40 -4	6,18 -4
5,14 -4	7,54 -4
6,04 -4	9,28 -4
7,34 -4	1,10 -3
9,03 -4	1,31 -3
1,06 -3	1,47 -3
1,24 -3	1,64 -3
1,46 -3	1,83 -3
1,64 -3	2,02 -3

Messung 3

Pumpe	Ventil
5,15 -5	1,00 -4
1,70 -4	2,52 -4
2,73	3,75 -4
3,45	4,97 -4
4,38	6,03 -4
5,00	7,25 -4
5,78	8,88 -4
6,98	1,07 -4
8,37	1,24 -3
1,07 -3	1,41 -3
1,19	1,57 -3
1,35	1,75 -3
1,52	1,93 -3

2.10-4 mbar

Pumpe	Ventil
8,26 -5	2,02 -4
3,45 -4	4,86 -4
5,57 -4	8,00 -4
8,30 -4	1,21 -3
1,27 -3	1,62 -3
1,64 -3	2,06 -3
2,23 -3	2,56 -3
2,82 -3	3,15 -3
3,39 -3	3,76 -3
4,00 -3	4,32 -3
4,89 -3	4,95 -3
5,31 -3	5,63 -3
5,90 -3	6,24 -3

Messung 2

Pumpe	Ventil
8,00 -5	2,04 -4
3,68 -4	4,86 -4
5,68	7,96 -4
8,37	1,22 -3
1,24 -3	1,63 -3
1,68 -3	2,06 -3
2,22 -3	2,60 -3
2,80 -3	3,18 -3
3,46 -3	3,74 -3
4,16 -3	4,32 -3
4,86 -3	4,94 -3
5,32 -3	5,64 -3
5,93 -3	6,22 -3

Messung 3

Pumpe	Ventil
8,03 -5	2,03 -4
3,58 -4	4,84 -4
5,57	7,82 -4
8,27	1,20 -3
1,22 -3	1,60 -3
1,66	2,05 -3
2,17	2,56 -3
2,82	3,14 -3
3,44	3,69 -3
4,05	4,28 -3
4,86	4,92 -3
5,32	5,62 -3
5,91	6,20 -3

Abbildung 13: Die Messwerte des Vakuumversuchs

DSK

Pumpe		Vakuum	Messung 2		Messung 3	
3,62 -5	7,00 -5		3,62 -5	7,02 -5	3,66 -5	6,98 -5
1,44 -4	7,84 -4		1,32 -4	7,83 -4	1,37 -4	7,82 -4
2,09 -4	2,75 -4		2,08 -4	2,79 -4	2,03 -4	2,76 -4
2,65 -4	3,62 -4		2,68 -4	3,72 -4	2,63 -4	3,62 -4
4,27 -4	4,46 -4		3,27 -4	4,53 -4	3,17 -4	4,46 -4
3,25 -4	5,18 -4		3,84 -4	5,32 -4	3,80 -4	5,30 -4
3,88 -4	6,01 -4		4,40 -4	6,16 -4	4,37 -4	6,10 -4
4,44 -4	6,79 -4		4,88 -4	6,94 -4	4,92 -4	6,86 -4
4,99 -4	7,80 -4		5,40 -4	7,93 -4	5,44 -4	7,86 -4
5,48 -4	8,90 -4		6,00 -4	9,14 -4	6,05 -4	8,90 -4
6,00 -4	1,01 -3		6,82 -4	1,03 -3	6,87 -4	1,02 -3
6,85 -4	1,12 -3		7,63 -4	1,15 -3	7,78 -4	1,13 -3
7,71 -4	1,25 -3		8,62 -4	1,28 -3	8,76 -4	1,26 -3
8,78 -4						
5-10 ⁻⁵ mbar						
Pumpe	Vakuum		Pumpe	Vakuum	Pumpe	Vakuum
2,78 -5	5,00 -5		3,07 -5	4,99 -5	3,04 -5	5,04 -5
1,09 -4	1,34 -4		1,03 -4	1,41 -4	1,87 -5	1,36 -4
1,55 -4	2,15 -4		1,5 -4	2,20 -4	1,48 -4	2,14 -4
2,00	2,76 -4		1,97 -4	2,84 -4	1,91 -4	2,89 -4
2,40	3,37 -4		2,41 -4	3,50 -4	2,35 -4	3,52 -4
2,86	4,06 -4		2,89 -4	4,12 -4	2,78 -4	4,14 -4
3,24	4,63 -4		3,23 -4	4,76 -4	3,18 -4	4,76 -4
3,66	5,24 -4		3,73 -4	5,36 -4	3,66 -4	5,37 -4
4,05	5,82 -4		4,15 -4	5,92 -4	4,07 -4	5,98 -4
4,43	6,41 -4		4,58 -4	6,50 -4	4,48 -4	6,40 -4
4,80	7,00 -4		4,96 -4	7,16 -4	4,98 -4	7,19 -4
5,20	7,64 -4		5,29 -4	7,86 -4	5,28 -4	7,96 -4
5,60	8,45 -4		5,66 -4	8,72 -4	5,76 -4	8,70 -4

Abbildung 14: Die Messwerte des Vakuumversuchs

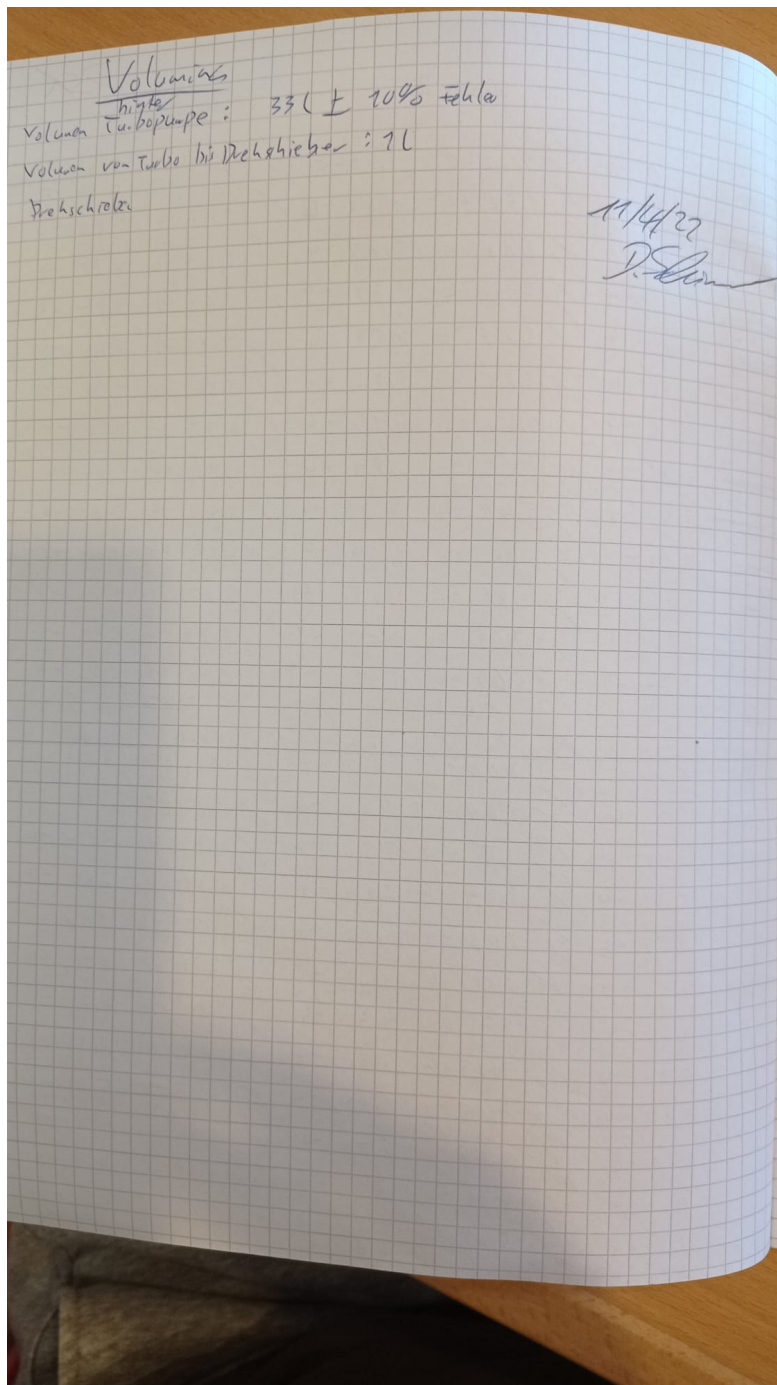


Abbildung 15: Die Messwerte des Vakuumversuchs