

VERSUCH 70

Vakuumphysik: 1. Korrektur

Gordon Scholz

gordon.scholz@tu-dortmund.de

Tom Rosenstein

tom.rosenstein@tu-dortmund.de

Durchführung: 24.10.18

Erstabgabe: 05.11.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Herleitung der p(t)-Kurve	4
2.2 Leckratenmessung	5
2.3 Druckbereiche	5
2.4 Strömungsarten und Leitwert	6
2.5 Sorption	7
2.6 Vakuumerzeugung	8
2.6.1 Drehschieberpumpe	8
2.6.2 Turbomolekularpumpe	9
2.7 Vakummessung	10
3 Fehlerrechnung	11
4 Durchführung	11
4.1 Messungen zur Drehschieberpumpe	14
4.2 Messungen zur Turbomolekularpumpe	14
4.3 Volumenbestimmung	14
5 Auswertung	15
5.1 Volumenbestimmung	15
5.2 Drehschieberpumpe	16
5.2.1 Evakuierungsmessung	16
5.2.2 Leckratenmessung	19
5.3 Turbopumpe	23
5.3.1 Evakuierungsmessung	23
5.3.2 Leckratenmessung	24
5.4 Vergleich der bestimmten Saugvermögen	29
6 Diskussion	30
Literatur	31

1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen die Grundlagen der Vakuumphysik und der Umgang mit den Komponenten der Vakuumtechnik erlernt werden. Dazu wird ein Vakuumpumpstand mit verschiedenen Messgeräten und Ventilen aufgebaut. An diesem wird dann das Saugvermögen zweier verschiedener Vakuumpumpen anhand der Evakuierungskurven und der Leckratenmessung bestimmt.

Ein einfaches Beispiel für die Nutzung von Vakua ist die Konservierung von verderblichen Produkten, da bei geringer Luftsauerstoffmenge Verwesungsprozesse nur stark eingeschränkt statt finden. Des Weiteren werden Vakua zur Wärmebehandlung von Metallen verwendet, da so das Oxidieren durch Sauerstoff verhindert werden kann. Ein Grobvakuum wird in der Industrie auch als Sauggreifer verwendet um flächige Werkstücke zu greifen und zu transportieren[5]. Eine weitere Anwendung von Vakua sind zum Beispiel Teilchenbeschleuniger wie der Large Hadron Collider am CERN, in welchem ein Ultrahochvakuum erzeugt wird, um Stoßprozesse der beschleunigten Teilchen mit Restgasteilchen in der Vakuumkammer zu verhindern[6].

2 Theorie

Als Vakuum wird der Zustand eines Gases bezeichnet, dessen Druck in einem Behälter kleiner ist als der Umgebungsdruck[11]. Dies bedeutet auf der Erde, dass der Druck in einem Behälter kleiner als der Atmosphärendruck $p_0 = 1013 \text{ mbar}$ sein muss. Die sich im Behälter befindene Luft wurde in diesem Versuch als ideales Gas angenommen. Es wird daher davon ausgegangen, dass die Teilchen nur elastische Stöße untereinander und mit den Wänden des Behälters ausführen. Jegliche andere Wechselwirkung wie z.B. zwischen den einzelnen Teilchen werden als vernachlässigbar betrachtet. Die Gasteilchen werden außerdem als ausdehnungslose Massepunkte betrachtet. Die allgemeine Gasgleichung für ideale Gase lautet

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

wobei n für die Stoffmenge, N für die Anzahl der Teilchen und R für die allgemeine Gaskonstante steht. Für eine konstante Temperatur T und eine konstante Stoffmenge n folgt, dass der Druck p proportional zum Volumen V ist. Dieser Zusammenhang wird durch das Boyle'sche Gesetz beschrieben:

$$p \propto \frac{1}{V}. \quad (2)$$

Der Druck ist dabei die Kraft pro Fläche $p = \frac{F}{A}$ und hat die SI-Einheit Pascal. In der Vakuumtechnik ist die Einheit bar üblich, wobei $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ entspricht. Im folgenden werden daher alle Drücke immer in bar angegeben.

Die Partialdrücke, das heißt die Teildrücke der unterschiedlichen Gaskomponenten, werden ebenfalls vernachlässigt, da angenommen wird, dass die Luft im Behälter nur aus einer Gaskomponente besteht.

2.1 Herleitung der $p(t)$ -Kurve

Unter weiteren Annahmen lässt sich der Druckverlauf aus der idealen Gasgleichung herleiten. Zum einem, dass das Volumen beim Messen des Druckes konstant bleibt und das der Druck $p(t)$ zu einem Zeitpunkt immer im gesamten Volumen herrscht, sowie es keine Lecks und Ausgasungen von den Oberflächen gibt. Des Weiteren wird das Saugvermögen S als konstant und unabhängig vom Druck angenommen[1, S. 12].

Unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen folgt aus der zeitlichen Ableitung der Gleichung (1)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}pV &= \frac{d}{dt}nRT \\ \Rightarrow \dot{p}V + p\dot{V} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

da die Stoffmenge, Temperatur und Gaskonstante konstant sind. Da das Saugvermögen S konstant sein soll, ist es gleich der Zunahme des Volumens pro Zeit:

$$\dot{V} = S.$$

Damit folgt aus Gleichung (3):

$$\dot{p}V = -pS. \quad (4)$$

Der Lösungsansatz dieser bekannten Differentialgleichung lautet[1, S. 12]:

$$\begin{aligned} p(t) &= p_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \\ \dot{p}(t) &= -\frac{p_0}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = -\frac{p(t)}{\tau}, \end{aligned}$$

dabei ist p_0 der Anfangsdruck und τ eine zu bestimmenden Zeitkonstante. Durch Einsetzen in die Gleichung (4) ergibt sich

$$\tau = \frac{V}{S}.$$

Unter Berücksichtigung eines endlichen Enddrucks p_E ergibt sich durch das Einsetzen in den Lösungsansatz die Funktion $p(t)$ in Abhängigkeit vom Saugvermögen S :

$$p(t) = (p_0 - p_E) \exp\left(-t \frac{S}{V}\right) + p_E. \quad (5)$$

Der Enddruck p_E ergibt sich aus nicht vermeidbaren Leckagen und Ausgasungen[1, S. 13]. Der schematische Kurvenverlauf ist in Abbildung 1 zu sehen.

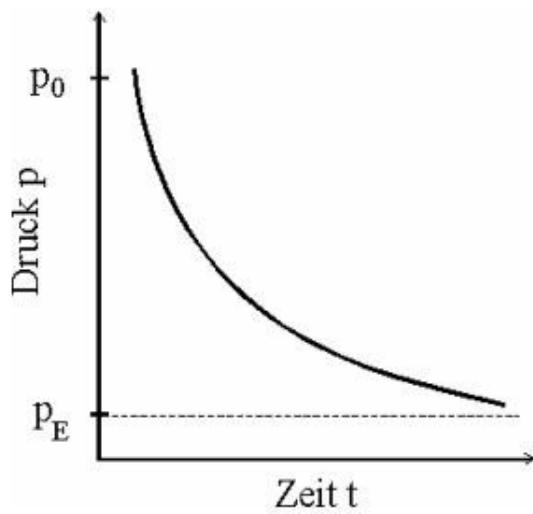


Abbildung 1: Schematischer Kurvenverlauf der $p(t)$ -Kurve[1, S. 13].

2.2 Leckratenmessung

Mit der als $Q = V \cdot \frac{dp}{dt}$ definierten Leckrate lässt sich das Saugvermögen, nach Einstellung eines Gleichgewichtsdruckes p_g , als

$$S = \frac{Q}{p_g} = \frac{V}{p_g} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (6)$$

ausdrücken[1].

2.3 Druckbereiche

Ein Vakuum lässt sich, in Abhängigkeit von der Moleküldichte, in unterschiedliche Druckbereiche einteilen(siehe Tabelle 1). Je niedriger der Druck ist, desto größer ist die Qualität des Vakuums.

Druckbereich	Druck in mbar	Moleküle pro cm ³	mittlere freie Weglänge eines Gasmoleküls
Umgebungsdruck	1013,25	$2,7 \cdot 10^{19}$	68 nm
Grobvakuum	300 ... 1	$10^{19} \dots 10^{16}$	0,01 ... 100 µm
Feinvakuum	$1 \dots 10^{-3}$	$10^{16} \dots 10^{13}$	0,1 ... 100 mm
Hochvakuum (HV)	$10^{-3} \dots 10^{-7}$	$10^{13} \dots 10^9$	100 mm ... 1 km
Ultrahochvakuum (UHV)	$10^{-7} \dots 10^{-12}$	$10^9 \dots 10^4$	$1 \dots 10^5$ km
extrem hohes Vakuum (XHV)	$< 10^{-12}$	$< 10^4$	$> 10^5$ km

Tabelle 1: Druckbereiche in der Vakuumtechnik[4].

Die Anzahl an Teilchen im Volumen geht mit der mittleren freien Weglänge der Teilchen einher. Diese steht für die gemittelte Distanz die ein Teilchen zurücklegen muss, um mit einem anderen Teilchen zu stoßen. Sie wird mit abnehmener Teilchenzahl im Volumen größer, da weniger Teilchen zum Kollidieren vorhanden sind.

2.4 Strömungsarten und Leitwert

Aus dem Verhältnis der mittleren freien Weglänge und dem Durchmesser eines Strömungskanals lassen sich unterschiedliche Strömungsarten beschreiben. Das Verhältnis wird durch die Knudsenzahl

$$Kn = \frac{\lambda}{d}$$

beschrieben, wobei λ für die mittlere freie Weglänge und d für den Durchmesser steht. Je nachdem welchen Wert die Knudsenzahl hat, liegt eine andere Art von Strömung in unterschiedlichen Druckbereichen vor. Bei kleinen Knudsenzahlen ist der Durchmesser des Strömungskanals deutlich größer als die freie mittlere Weglänge. Daher stoßen in diesem Bereich die Gasteilchen sehr oft untereinander und nur selten mit den Wänden. Diese Strömungsart wird viskose Strömung genannt und lässt sich in laminare und turbulente Strömungen unterteilen. Bei der laminaren Strömung bleiben die Teilchen in parallelen Schichten zueinander und es gibt daher keine Wirbel. Wenn die kritische Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta},$$

wobei ρ die Dichte, v die Geschwindigkeit, l die charakteristische Länge und η die Viskosität ist, überschritten wird, wird der Bereich der turbulenten Strömung erreicht. Hier strömen die Teilchen völlig ungeordnet durcheinander. Dies wird in der Vakuumtechnik versucht zu vermeiden, da aufgrund der großen Strömungswiderstände sonst ein höheres Saugvermögen voneinander wäre[10].

Wenn die mittlere freie Weglänge viel größer ist als der Durchmesser liegt die molekulare Strömung vor. Dabei kommt es kaum noch zu Stößen unter den Gasteilchen, sondern fast nur noch mit den Wänden des Behälters.

Durch Reibung der Gasteilchen mit den Wänden oder untereinander kommt es zu Strömungswiderständen W in den Rohrleitungen mit denen eine Vakuumpumpe und der Rezipient verbunden sind. Die Widerstände drücken sich in Druckunterschieden und Saugvermögenverlust aus. Der Leitwert ist dabei der Kehrwert der Strömungswiderstände und wird allgemein in der Vakuumtechnik verwendet. Die Formel des Leitwerts C lautet

$$C = \frac{l}{W} = \frac{q_p v}{\Delta p}, \quad (7)$$

wobei l die Länge der verwendeten Rohrleitungen, $q_p v$ die pro Zeiteinheit durchströmende Gasmenge und Δp der anliegende Druckgradient ist. Bei molekularen Strömungen gilt

$$q_p v = A \cdot \frac{\bar{c}}{4} \cdot (p_1 - p_2) \quad (8)$$

mit dem Querschnitt A und der mittleren thermischen Geschwindigkeit \bar{c} [9]. Da der Leitwert, vor allem bei molekularen Strömungen, einen großen Einfluss auf das Saugvermögen hat, wird das effektive Saugvermögen folgendermaßen definiert [1]:

$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{S_0} + \frac{1}{C}, \quad (9)$$

wobei S_0 das theoretische Saugvermögen ist(Herstellerangabe).

2.5 Sorption

Sorption ist ein Überbegriff für das Anreichern eines Stoffes innerhalb einer Phase oder an der Grenzfläche zwischen zwei Phasen. Bei der Absorption absorbiert eine Phase z.B. ein Feststoff Teilchen aus einer anderen Phase z.B. ein Gas. Die Gasteilchen werden dabei in das freie Volumen des Feststoffes absorbiert. Bei der Adsorption lagern sich die Teilchen bei diesem Beispiel dahingegen an der Grenzfläche des Feststoffes ein und dringen nicht in das Volumen des Feststoffes ein. Der Umkehrprozess zu den beiden Vorgängen ist Desorption. Dieser Effekt ist der Grund für die Existenz von "virtuellen" Lecks. Diese sind nicht detektierbar und können daher auch nicht wie normale Lecks verhindert werden. Da Desorption durch das Material beeinflusst wird, ist es nötig dies schon bei der Auslegung eines Vakuumpumpstandes zu berücksichtigen.

2.6 Vakuumerzeugung

Um ein Vakuum zu erzeugen müssen aus einem zuvor gasgefüllten Volumen Gasteilchen entfernt werden. Dies wird durch Vakuumpumpen realisiert. Diese werden durch ihr Wirkungsprinzip in Gastransfer- und gasbindene Vakuumpumpen unterschieden. Gastransferpumpen sind entweder Verdrängerpumpen, welche die Teilchen in einem geschlossenen Arbeitsraum, oder durch Impulsübertragung transportieren. Bei Verdrängerpumpen wird durch das sich änderne Volumen im Arbeitsraum das Gesamtvolume verändert. Nach dem Boyle'schen Gesetz (2) wird daher der Druck, bei konstanter Temperatur, im Rezipienten kleiner. Der Arbeitsraum wird daraufhin abgeschlossen und das Gas nach eventueller Verdichtung ausgestoßen. Ein Beispiel für diese Pumpenart ist die in 2.6.1 beschriebene Drehschieberpumpe.

Gasbindende Vakuumpumpen arbeiten indem sie die Gasteilchen an Festkörperoberflächen mittels Absorption und Adsorption binden und dadurch den Druck im Rezipienten verringern. Beispiele für diese Pumpenart sind Kryopumpen oder auch Adsorptionspumpen.

2.6.1 Drehschieberpumpe

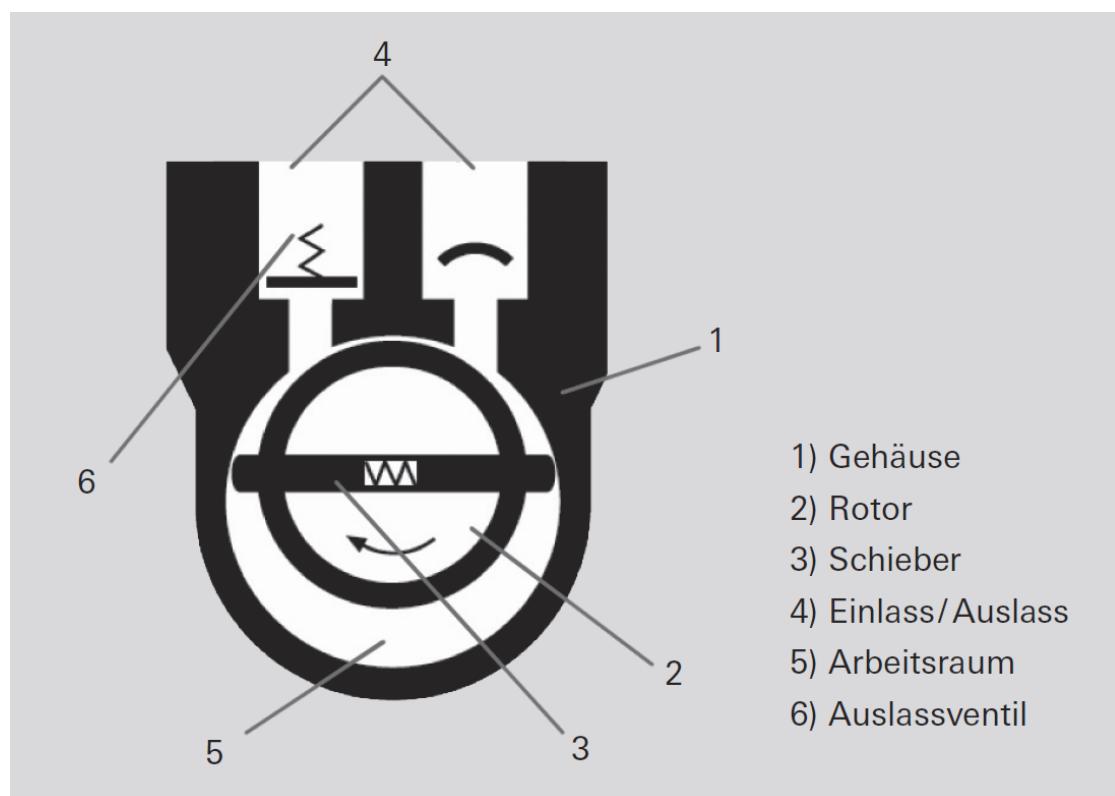


Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Drehschieberpumpe[7].

In Abbildung 2 ist der schematische Aufbau einer Drehschieberpumpe dargestellt. Der exzentrisch eingebaute Rotor trennt den Einlass vom Auslass. Das Gehäuse (Stator), der Rotor und die Schieber begrenzen den Arbeitsraum. Die Schieber sind beweglich und werden beim Drehen des Rotors aus diesem rausgeschoben um den Arbeitsraum in zwei Teile zu trennen. Wenn der Rotor sich dreht vergrößert sich das Volumen im Arbeitsraum bis der zweite Schieber den Arbeitsraum abtrennt. Wie bereits erwähnt wird durch diese Volumenvergrößerung der Druck im Rezipienten kleiner. Das eingeschlossene Gas wird noch komprimiert bis der Druck groß genug ist um das Auslassventil gegen den Atmosphärendruck zu öffnen. Dadurch gelangt Öl vom ölüberlagerten Auslassventil in den Stator, wodurch die Schieber geölt werden und gegen den Stator abgedichtet werden. Der Arbeitsbereich einer Drehschieberpumpe liegt im Grob- und Feinvakuum, weshalb sie auch gerne als Vorpumpe verwendet wird[7].

2.6.2 Turbomolekularpumpe

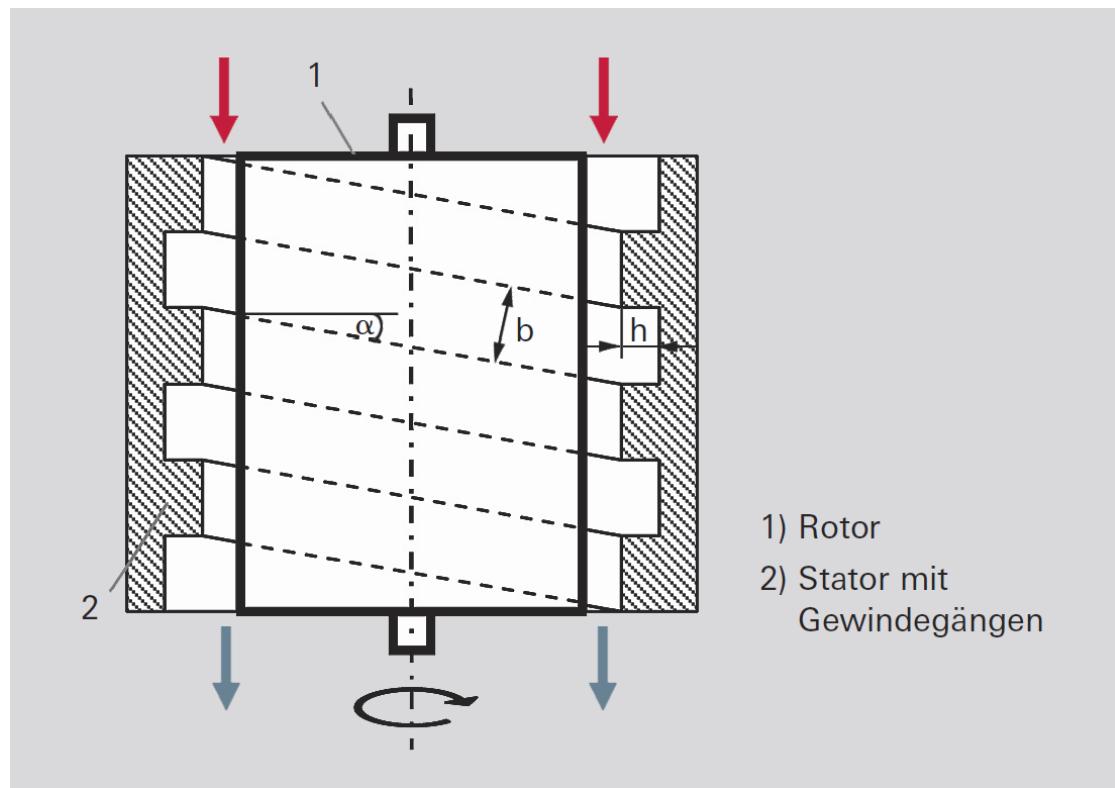


Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Turbomolekularpumpe[8].

Eine Turbomolekularpumpe oder auch einfach Turbopumpe ist wie in Abbildung 3 aufgebaut. Diese Pumpenart basiert auf der Impulsübertragung von den rotierenden Rotorblättern auf die Gasteilchen. Wenn die Rotorblätter ein Gasteilchen treffen bindet sich dieses durch Adsorption für eine gewisse Zeit an das Rotorblatt. Bevor das

Teilchen wieder desorbiert, addiert sich die Rotorgeschwindigkeit und es übernimmt die Impulsrichtung. Deswegen sind die Rotorblätter auch um den Winkel α zur horizontalen gedreht. Damit die Teilchen nicht die von den Rotorblättern übertragene Geschwindigkeitkomponente durch Stöße mit anderen Teilchen verlieren, ist eine molekulare Strömung vornötigen. Deswegen funktioniert eine Turbopumpe auch nur mit einer Vorpumpe, welche in diesem Versuch durch eine Drehschieberpumpe realisiert wird. Der Arbeitsbereich einer Turbopumpe reicht vom Feinvakuum bis hin zum Ultrahochvakuum[8].

2.7 Vakuummessung

Zur Druckmessung im Hoch- und Ultrahochvakumbereich werden Ionisations-Vakuummeter verwendet, welche auf den Prinzip der indirekten Druckmessung mittels elektrischer Größen basiert. Dazu muss das Restgas ionisiert werden. Die in diesem Versuch verwendeten Kaltkathoden- und Glühkathoden-Ionisationskammern sind zwei verschiedene Varianten des Ionisations-Vakuummeters. Bei der Kaltkathode werden durch elektrische Feldemission vorhandene Elektronen zwischen einer Kathode und Anode, an denen eine Gleichspannung von ca. 2 kV anliegt, beschleunigt und können so die restlichen Gasteilchen ionisieren. Dieser Entladungsstrom ist messbar und proportional zum Druck. Das Glühkathoden-Vakuummeter beschleunigt keine vorhandene Elektronen, sondern erzeugt diese selber mit einer Glühkathode. Diese werden dann anschließend beschleunigt und ionisieren die Gasteilchen, wodurch ein Strom messbar ist, welcher von der Teilchenzahldichte im Restgas abhängt. In den Druckbereichen unter dem Hochvakumbereich wurde in diesem Versuch das Wärmeleitungs-Vakuummeter nach Pirani verwendet. Dieses nutzt das in gewissen Grenzen die Wärmeleitfähigkeit von Gasen druckabhängig ist. In Abbildung 4 ist der lineare Druckbereich, in welchem das Vakuummeter eingesetzt wird dargestellt($10^{-4} - 1$ mbar).

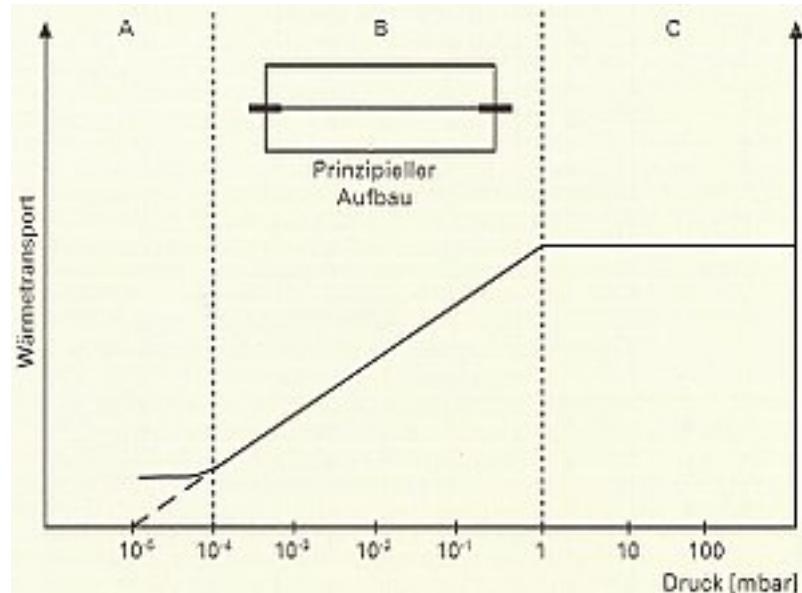


Abbildung 4: Schematische druckabhängige Wärmeabgabe[3].

3 Fehlerrechnung

Im Folgenden werden alle Mittelwerte mit folgender Formel bestimmt:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (10)$$

Der zugehörige Fehler des Mittelwertes berechnet sich nach

$$\Delta\bar{x} = \sqrt{\frac{1}{1-N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (11)$$

Werden fehlerbehaftete Größen in einer späteren Formel benutzt, so wird der neue Fehler mit Hilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung angegeben:

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot (\Delta x_i)^2}. \quad (12)$$

Die Regression sowohl von Ausgleichsgeraden als auch von anderen Polynomen, sowie die Bestimmung der zugehörigen Fehler nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, wird mit SciPy 1.1.0[2] durchgeführt.

4 Durchführung

Zuerst wird der Pumpstand wie in den Abbildungen 5 bis 7 aufgebaut. Die Zahlen sind dabei die einzelnen verwendeten Bauteile. 1 ist der Rezipient in dem das Vakuum erzeugt

werden soll, welcher mit 2 und 3 als Rohrleitungen verbunden wird. An dem T-Stück 2 wird eine Kaltkathoden-Ionisationskammer angeschlossen. An dem großen Kreuzstück 3 wird an einer Seite ein Kugelventil 4 und ein Dosierventil 11 angeschlossen und auf der gegenüberliegende Ende ein Kugelventil, welches mit einem kurzen Schlauch 5 mit dem kleinen Kreuzstück 8 verbunden ist. Das letzte Ende des Kreuzstücks 3 wird mit einem T-Stück verbunden, an dessen einem Ende eine Glühkathoden-Ionisationskammer angeschlossen wird und an der anderen Seite ein Klappenventil 6, welches mit der Turbomolekularpumpe 7 verbunden ist. Diese ist über ein Kugelventil ebenfalls mit dem Kreuzstück 8 verbunden. Am dritten Verbindungsstück des Kreuzstückes ist ein Vakuummeter nach Pirani angebaut und am letzten Ende ein Schlauch 9, welcher mit der Drehschieberpumpe 10 verbunden ist.

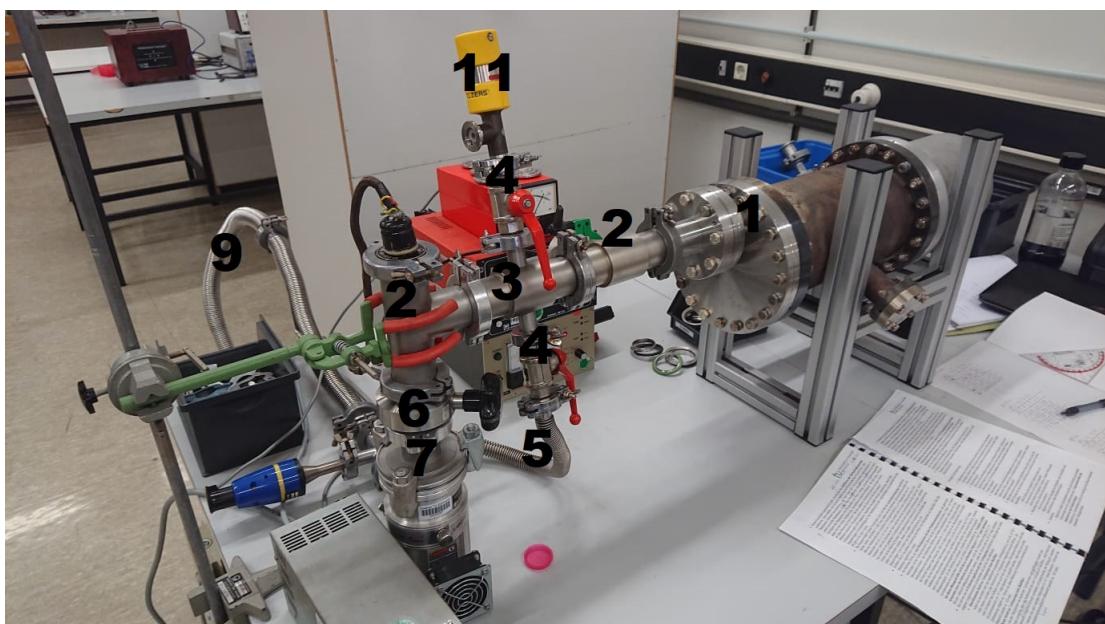


Abbildung 5: Der verwendete Pumpstand mit nummerierten Bauteilen.



Abbildung 6: Der verwendete Pumpstand mit nummerierten Bauteilen.

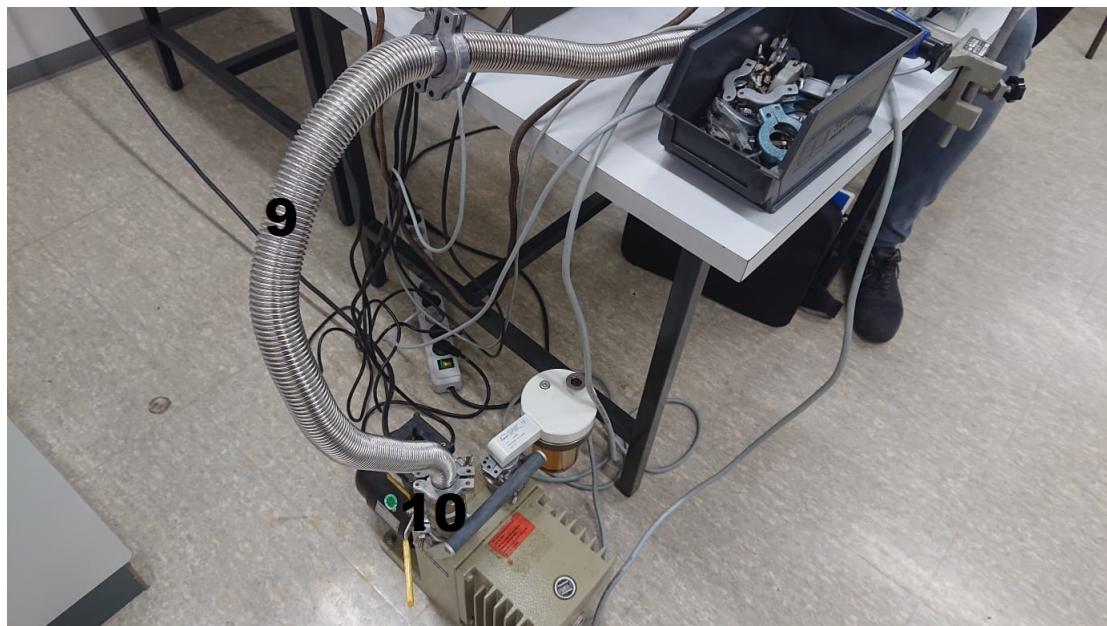


Abbildung 7: Der verwendete Pumpstand mit nummerierten Bauteilen.

Anschließend wird durch das Einschalten der Drehschieberpumpe der Aufbau auf seine Dichtigkeit überprüft. Es sollte sich ein Enddruck im Bereich von 0,03 mbar bis 0,05 mbar einstellen. Als Messgerät wird das Pirani-Vakuummeter verwendet. Wenn dies nicht erreicht wird, sollten die Ventile und Abdichtungen zwischen zwei Bauteilen überprüft werden. Des Weiteren wird der Rezipient einige Minuten mit der Turbopumpe evakuiert, um mögliche Wasseranlagerungen von der Innenoberfläche zu entfernen und damit die Desorptionsrate zu vermindern.

4.1 Messungen zur Drehschieberpumpe

Zur Aufnahme der Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe wird zuerst die Turbopumpe abgeklemmt. Dazu wird das Kugelventil am Fuße der Turbopumpe und das Klappenventil 6 geschlossen. Dann wird mit der Drehschieberpumpe der Rezipient evakuiert bis ein Enddruck p_E erreicht ist, welcher notiert wird. Mittels des Dosierventsils 11 wird der Rezipient belüftet, bis der Normaldruck erreicht ist. Der Rezipient wird nun 5 mal evakuiert und dazwischen wieder belüftet. Es werden bei vorher festgelegten Drücken die benötigten Zeiten mittels der Stoppuhr eines Handys gemessen.

Für die Leckratennmessung zur Bestimmung des Saugvermögens werden bei laufender Pumpe mittels des Dosierventsils Gleichgewichtsdrücke p_g eingestellt. Diese betragen 0,1 mbar, 0,4 mbar, 0,8 mbar und 1,0 mbar. Wenn diese eingestellt sind, wird die Pumpe abgeklemmt und über ca. eine Größenordnung der zunehmende Druck gemessen. Es wird wieder für vorher festgelegte Drücke die Zeit gemessen und notiert. Für jeden Gleichgewichtsdruck wird die Messung drei mal wiederholt.

4.2 Messungen zur Turbomolekularpumpe

Für die Messung mit der Turbopumpe werden die beiden Ventile an der Pumpe wieder geöffnet und das Ventil am Schlauch 5 wird geschlossen. Die Turopumpe wird erst eingeschaltet, wenn das Vorrakuum durch die Drehschieberpumpe besser als 0,1 mbar ist. Nach einiger Zeit stellt sich wieder ein Enddruck p_E ein, welcher wieder notiert wird. Die Messung der Evakuierungskurve wird wie zuvor durchgeführt, nur das der Rezipient mit dem Dosierventil in diesen Teil auf einen Druck von $5 \cdot 10^{-3}$ mbar eingestellt wird, bevor der Rezipient wieder evakuiert wird. Des Weiteren wird als Messgerät diesmal die Glühkathoden-Ionisationskammer benutzt. Damit diese nicht durchbrennt, sollte sie nur benutzt werden wenn der Druck geringer als 10^{-2} mbar ist.

Die Leckratennmessung läuft ebenfalls analog ab wie zuvor. Die einzustellenden Gleichgewichtsdrücke betragen $5 \cdot 10^{-5}$ mbar, $10 \cdot 10^{-5}$ mbar, $15 \cdot 10^{-5}$ mbar und $20 \cdot 10^{-5}$ mbar und die Messung wird wieder für jeden eingestellten Druck drei mal durchgeführt.

4.3 Volumenbestimmung

Zuletzt werden von dem großen T-Stück 2 und dem kleinen Kreuzstück 8 die Volumina mittels Lineal und Schieblehre bestimmt. Die Fehler für die einzelnen Längen werden abgeschätzt. Die Volumina der restlichen Bauteile werden aus dem Leitfaden[1] entnommen.

5 Auswertung

5.1 Volumenbestimmung

Die im folgenden verwendeten Zahlen für die Volumina sind in den Abbildungen 5 bis 7 zu sehen. Die Volumina der benutzten Bauteile sind in Tabelle 2 aufgelistet. Die Volumina der Ventile 4 und 6 sind im offenen Zustand angegeben. Im geschlossenen Zustand besitzen sie folgende Volumina:

$$V_{4,\text{geschlossen}} = (0,005 \pm 0,001) \text{l}$$

$$V_{6,\text{geschlossen}} = (0,022 \pm 0,002) \text{l}.$$

Die Volumina des Ventils 11 sowie der Messgeräte werden vernachlässigt. Die Volumina 2 und 8 wurden dabei selber gemessen, die restlichen Werte wurden aus [1] entnommen. Zur Bestimmung des Volumens von Bauteil 2 wurden folgende Werte gemessen:

$$d_{\text{innen}} = (40,0 \pm 0,5) \text{ mm}$$

$$l_1 = (128,2 \pm 0,5) \text{ mm}$$

$$l_2 = (45 \pm 2) \text{ mm}$$

Das Volumen berechnet sich dann mit der Formel

$$V_2 = \pi \left(\frac{d_{\text{innen}}}{2} \right)^2 \cdot (l_1 + l_2).$$

und der Fehler nach (12) mit

$$\Delta V_2 = \sqrt{\frac{\pi^2 d_{\text{innen}}^4}{16} (\Delta l_1)^2 + \frac{\pi^2 d_{\text{innen}}^4}{16} (\Delta l_2)^2 + \frac{\pi^2 d_{\text{innen}}^2}{4} (\Delta d_{\text{innen}})^2 (l_1 + l_2)^2}$$

zu dem in 2 angegebenen Wert. Bei Bauteil 8 wurden folgende Werte und, da es sich um ein Kreuzstück handelt, Formeln genutzt:

$$d_{\text{innen}} = (10,0 \pm 0,5) \text{ mm}$$

$$l_1 = (80,0 \pm 0,5) \text{ mm}$$

$$l_2 = (30 \pm 1) \text{ mm}$$

$$V_8 = \pi \left(\frac{d_{\text{innen}}}{2} \right)^2 \cdot (l_1 + 2l_2)$$

$$\Delta V_8 = \sqrt{\frac{\pi^2 d_{\text{innen}}^4}{16} (\Delta l_1)^2 + \frac{\pi^2 d_{\text{innen}}^4}{4} (\Delta l_2)^2 + \frac{\pi^2 d_{\text{innen}}^2}{4} (\Delta d_{\text{innen}})^2 (l_1 + 2l_2)^2}$$

Bei den Messungen mit der Drehschieberpumpe ist das Ventil 6, sowie das in Abbildung 6 zu sehende Ventil 4 verschlossen. Die Addition der verbleibenden Volumina ergibt ein Gesamtvolumen von $(11,1 \pm 0,8) \text{l}$. Bei den Messungen mit der Turbopumpe sind beide in Abbildung 5 zu sehenden Ventile 4 geschlossen. Das Ventil 6, sowie das in Abbildung 6

zu sehende Ventil 4 ist offen, jedoch befinden sich dieses Ventil und alle angeschlossenen Bauteile hinter dem Ansaugstutzen der Turbopumpe und gehören deswegen nicht zum Messvolumen. So ergibt sich für die Turbopumpe ein Gesamtvolumen von $(10,2 \pm 0,8)$ l. Der Fehler des Gesamtvolumens berechnet sich dabei wie folgt:

$$\Delta V_{\text{ges}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta V_i)^2}.$$

Dabei bezeichnet der Index i die verwendeten Teile.

Tabelle 2: Die Volumina der verwendeten Bauteile.

Bauteil	Volumen (offen) / l
1	$9,500 \pm 0,800$
2	$0,218 \pm 0,006$
3	$0,177 \pm 0,090$
4	$0,015 \pm 0,002$
5	$0,087 \pm 0,011$
6	$0,044 \pm 0,004$
7	$0,067 \pm 0,004$
8	$0,011 \pm 0,001$
9	$0,800 \pm 0,100$
10	$0,025 \pm 0,005$

5.2 Drehschieberpumpe

5.2.1 Evakuierungsmessung

Zur Bestimmung des Saugvermögens aus der Evakuierungsmessung wird Gleichung (5) umgestellt und logarithmiert, so dass sich folgende Gleichung ergibt:

$$\ln\left(\frac{p(t) - p_E}{p_0 - p_E}\right) = -t \cdot \frac{S}{V} \quad (13)$$

Die Messwerte, sowie die mit (10) und (11) bestimmten Zeiten befinden sich in Tabelle 3. Zur Berechnung von $\ln\left(\frac{p(t) - p_E}{p_0 - p_E}\right)$ wurden der Atmosphärendruck $p_0 = 1013$ mbar und der gemessene Enddruck $p_E = 4 \cdot 10^{-2}$ mbar verwendet. Die Fehler aller gemessenen Drücke betragen, gemäß der aus [1] entnommenen Messungenauigkeit des Pirani-Messgerätes, 20 %. Der Fehler des logarithmischen Ausdrucks wird nach (12) mit der folgenden Formel bestimmt:

$$\Delta \ln\left(\frac{p(t) - p_E}{p_0 - p_E}\right) = \sqrt{\left(\frac{\Delta p(t)}{(p(t) - p_E)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_0}{(p_0 - p_E)}\right)^2 + \left(\frac{(p(t) - p_0)\Delta p_E}{(p_0 - p_E)(p(t) - p_E)}\right)^2} \quad (14)$$

Die so bestimmten Werte befinden sich ebenfalls in Tabelle 3. Nun werden die logarithmierten Drücke gegen die gemittelten Zeiten aufgetragen und mit der Gleichung $y = ax + b$ in zwei Bereichen optimiert. Der Plot ist in Abbildung 8 zu sehen. Die Fitparameter wurden zu

$$\begin{aligned} a_1 &= (-0,094 \pm 0,002) \frac{1}{\text{s}} \\ a_2 &= (-0,051 \pm 0,004) \frac{1}{\text{s}} \\ b_1 &= -0,169 \pm 0,107 \\ b_2 &= -3,648 \pm 0,397 \end{aligned}$$

bestimmt. Durch Vergleich mit (13) lässt sich so das jeweilige Saugvermögen mit

$$S = -a \cdot V \quad (15)$$

und der zugehörige Fehler mit

$$\Delta S = \sqrt{V^2(\Delta a)^2 + a^2(\Delta V)^2} \quad (16)$$

berechnen. So wurden die Saugvermögen zu

$$\begin{aligned} S_1 &= (1,04 \pm 0,08) \frac{1}{\text{s}} \\ S_2 &= (0,57 \pm 0,06) \frac{1}{\text{s}} \end{aligned}$$

bestimmt.

Tabelle 3: Gemessene und berechnete Werte zur Evakuierungsmessung der Drehschieberpumpe.

$p(t) / \text{mbar}$	$\ln\left(\frac{p(t)-p_E}{p_0-p_E}\right)$	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	t_4 / s	t_5 / s	\bar{t} / s
$1013,00 \pm 202,60$	$0,00 \pm 0,28$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$100,00 \pm 20,00$	$-2,32 \pm 0,28$	19,59	17,97	20,08	18,27	17,57	$18,70 \pm 0,48$
$60,00 \pm 12,00$	$-2,83 \pm 0,28$	27,82	27,85	27,93	27,96	27,17	$27,75 \pm 0,15$
$40,00 \pm 8,00$	$-3,23 \pm 0,28$	33,25	33,37	33,74	33,29	33,04	$33,34 \pm 0,11$
$20,00 \pm 4,00$	$-3,93 \pm 0,28$	41,06	41,16	41,49	41,24	40,86	$41,16 \pm 0,10$
$10,00 \pm 2,00$	$-4,62 \pm 0,28$	48,22	48,51	48,75	48,52	48,60	$48,52 \pm 0,09$
$6,00 \pm 1,20$	$-5,14 \pm 0,28$	53,36	53,64	53,96	53,68	53,64	$53,66 \pm 0,10$
$4,00 \pm 0,80$	$-5,54 \pm 0,28$	56,93	57,33	57,72	57,53	57,47	$57,40 \pm 0,13$
$2,00 \pm 0,40$	$-6,25 \pm 0,29$	63,32	64,00	64,45	64,32	64,00	$64,02 \pm 0,20$
$1,00 \pm 0,20$	$-6,96 \pm 0,29$	70,85	71,35	71,71	71,84	71,37	$71,42 \pm 0,17$
$0,60 \pm 0,12$	$-7,50 \pm 0,29$	77,24	77,81	77,95	77,89	77,92	$77,76 \pm 0,13$
$0,40 \pm 0,08$	$-7,94 \pm 0,30$	84,07	85,17	85,35	85,37	85,42	$85,08 \pm 0,26$
$0,20 \pm 0,04$	$-8,75 \pm 0,32$	98,17	98,90	99,39	99,21	99,52	$99,04 \pm 0,24$
$0,10 \pm 0,02$	$-9,73 \pm 0,41$	112,73	113,82	115,51	113,98	114,12	$114,03 \pm 0,44$
$0,06 \pm 0,01$	$-10,83 \pm 0,75$	142,46	145,39	146,93	142,53	142,28	$143,92 \pm 0,95$

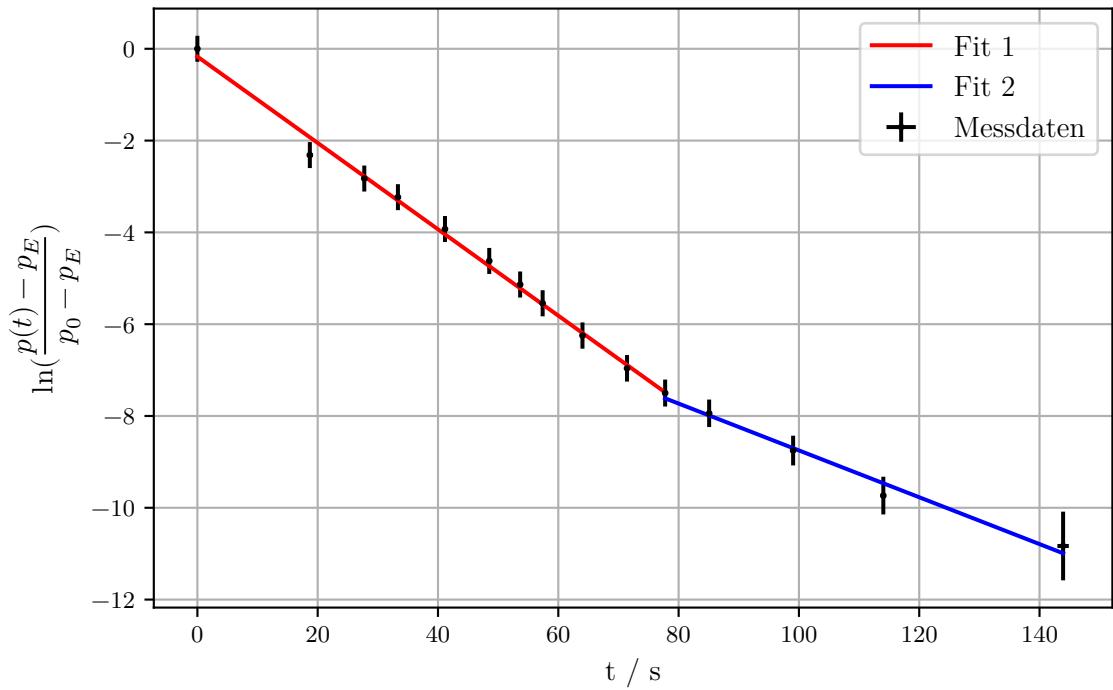


Abbildung 8: Plot zur Evakuierungsmessung der Drehschieberpumpe.

5.2.2 Leckratenmessung

Die Messdaten für die Gleichgewichtsdrücke $p_{g,1} = 0,1 \text{ mbar}$, $p_{g,2} = 0,4 \text{ mbar}$, $p_{g,3} = 0,8 \text{ mbar}$ und $p_{g,4} = 1 \text{ mbar}$ befinden sich in den Tabellen 4, 5, 6 und 7. Die Fehler der gemessenen Drücke berechnen sich wie in 5.2.1 und die gemessenen Zeiten werden wieder mit (10) und (11) gemittelt. Die Drücke werden gegen die Zeiten aufgetragen und linear gefittet. Die Plots sind in den Abbildungen 9, 10, 11 und 12 zu sehen. Die bestimmten Parameter sind

$$\begin{aligned} a_1 &= (4,804 \pm 0,242) \cdot 10^{-3} \frac{\text{mbar}}{\text{s}} \\ a_2 &= (3,299 \pm 0,059) \cdot 10^{-2} \frac{\text{mbar}}{\text{s}} \\ a_3 &= (9,478 \pm 0,148) \cdot 10^{-2} \frac{\text{mbar}}{\text{s}} \\ a_4 &= (1,235 \pm 0,011) \cdot 10^{-1} \frac{\text{mbar}}{\text{s}} \\ b_1 &= (0,144 \pm 0,023) \text{ mbar} \\ b_2 &= (0,345 \pm 0,030) \text{ mbar} \\ b_3 &= (0,735 \pm 0,061) \text{ mbar} \\ b_4 &= (0,958 \pm 0,048) \text{ mbar} \end{aligned}$$

Der Parameter a stellt hierbei die Steigung $\frac{dp}{dt}$ dar, damit lässt sich das Saugvermögen durch Vergleich mit (6) folgendermaßen bestimmen:

$$S = \frac{V}{p_g} \cdot a. \quad (17)$$

Der zugehörige Fehler wird nach (12) mit

$$\Delta S = \sqrt{\frac{V^2 a^2}{p_g^4} (\Delta p_g)^2 + \frac{V^2}{p_g^2} (\Delta a)^2 + \frac{a^2}{p_g^2} (\Delta V)^2}. \quad (18)$$

bestimmt. Damit wurden folgende Saugvermögen bestimmt:

$$\begin{aligned} S_1 &= (0,53 \pm 0,12) \frac{1}{\text{s}} \\ S_2 &= (0,92 \pm 0,20) \frac{1}{\text{s}} \\ S_3 &= (1,32 \pm 0,28) \frac{1}{\text{s}} \\ S_4 &= (1,37 \pm 0,29) \frac{1}{\text{s}} \end{aligned}$$

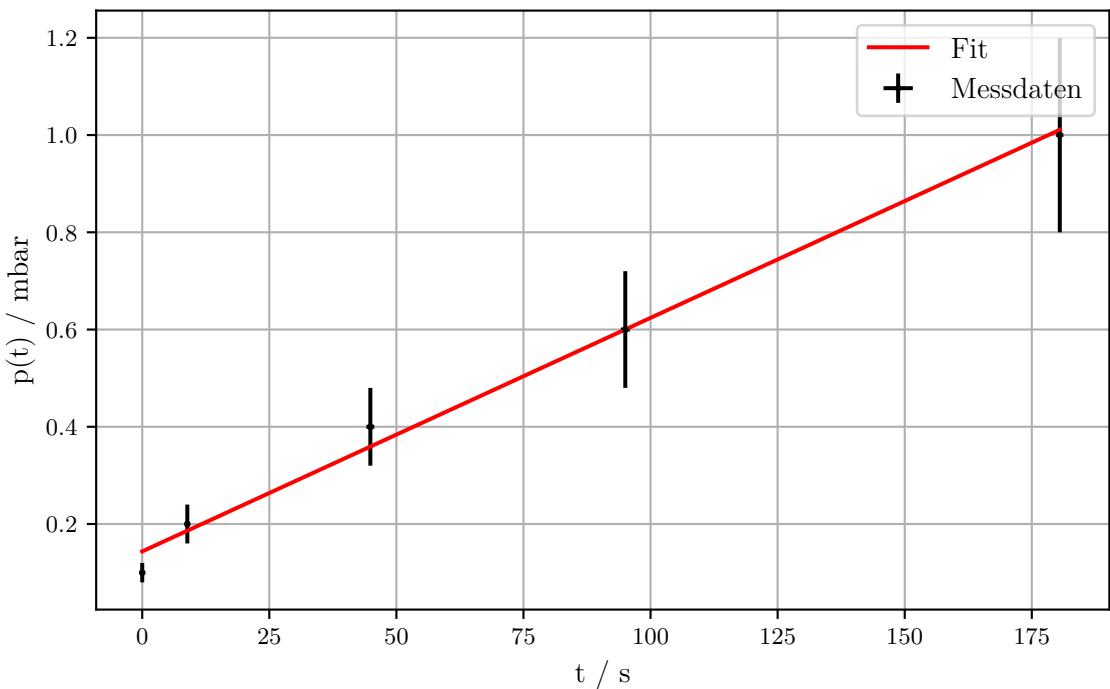


Abbildung 9: Plot zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe bei $p_g = 0,1$ mbar.

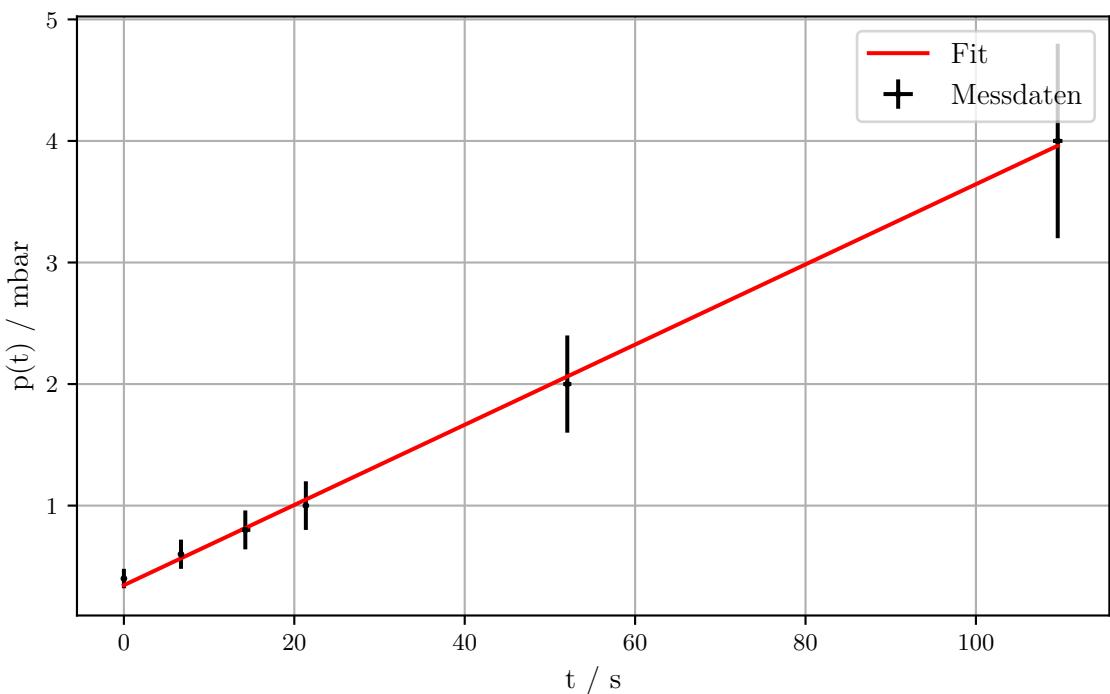


Abbildung 10: Plot zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe bei $p_g = 0,4$ mbar.

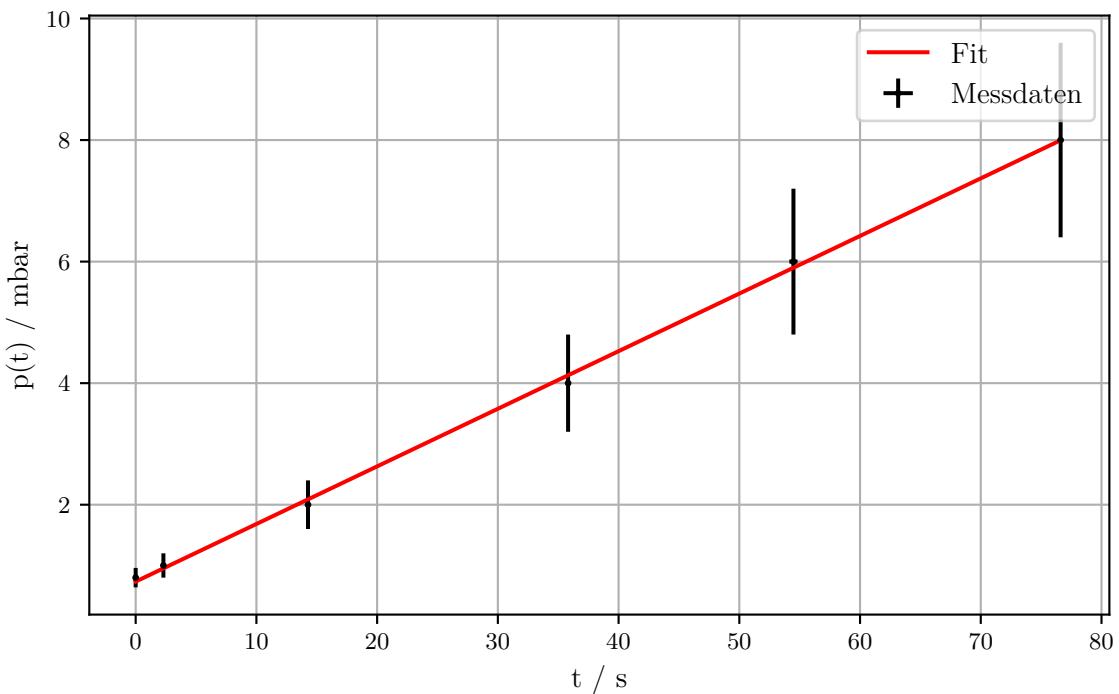


Abbildung 11: Plot zur Leckrattemessung der Drehschieberpumpe bei $p_g = 0,8 \text{ mbar}$.

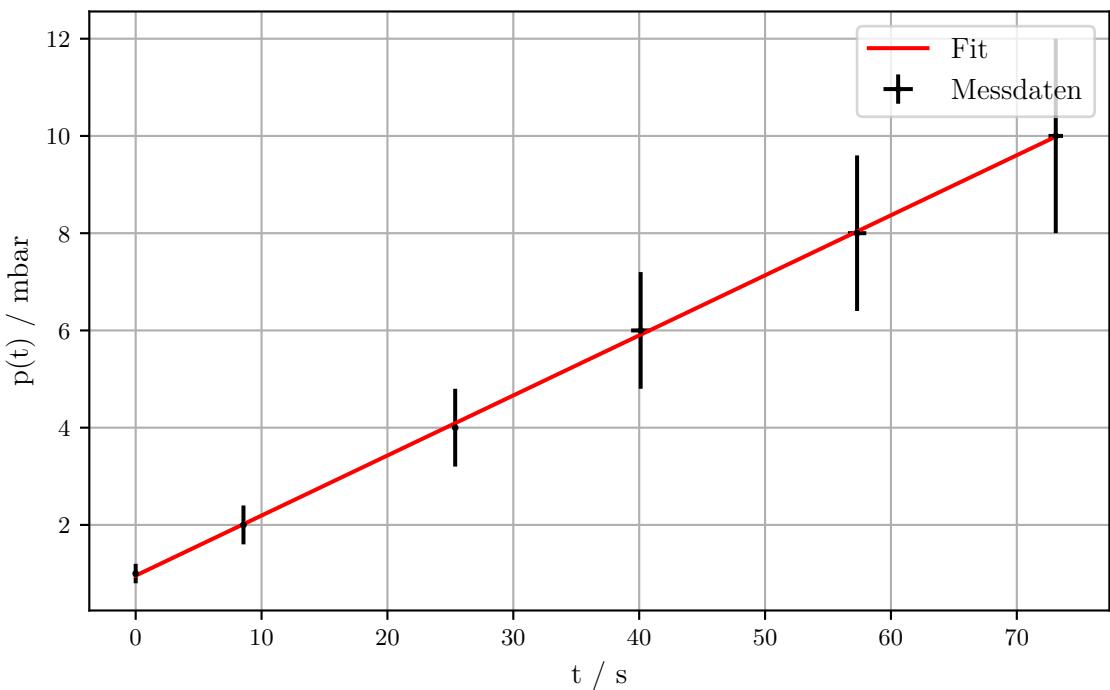


Abbildung 12: Plot zur Leckrattemessung der Drehschieberpumpe bei $p_g = 1 \text{ mbar}$.

Tabelle 4: Gemessene und berechnete Werte zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe bei $p_g = 0,1$ mbar.

$p(t)$ / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$0,10 \pm 0,02$	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$0,20 \pm 0,04$	9,04	9,12	8,45	$8,87 \pm 0,21$
$0,40 \pm 0,08$	45,04	46,14	43,45	$44,88 \pm 0,78$
$0,60 \pm 0,12$	93,25	95,87	95,97	$95,03 \pm 0,89$
$1,00 \pm 0,20$	181,27	181,13	179,12	$180,51 \pm 0,69$

Tabelle 5: Gemessene und berechnete Werte zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe bei $p_g = 0,4$ mbar.

$p(t)$ / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$0,40 \pm 0,08$	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$0,60 \pm 0,12$	6,75	6,70	6,65	$6,70 \pm 0,04$
$0,80 \pm 0,16$	14,53	13,43	14,79	$14,25 \pm 0,59$
$1,00 \pm 0,20$	21,64	21,25	21,18	$21,36 \pm 0,20$
$2,00 \pm 0,40$	52,21	51,39	52,52	$52,04 \pm 0,48$
$4,00 \pm 0,80$	110,15	109,81	108,84	$109,60 \pm 0,56$

Tabelle 6: Gemessene und berechnete Werte zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe bei $p_g = 0,8$ mbar.

$p(t)$ / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$0,80 \pm 0,16$	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$1,00 \pm 0,20$	2,22	2,43	2,24	$2,30 \pm 0,09$
$2,00 \pm 0,40$	14,33	14,20	14,29	$14,27 \pm 0,05$
$4,00 \pm 0,80$	35,86	35,64	35,95	$35,82 \pm 0,13$
$6,00 \pm 1,20$	54,63	54,81	54,01	$54,48 \pm 0,34$
$8,00 \pm 1,60$	76,66	76,83	76,35	$76,61 \pm 0,20$

Tabelle 7: Gemessene und berechnete Werte zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe bei $p_g = 1$ mbar.

$p(t)$ / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$1,00 \pm 0,20$	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$2,00 \pm 0,40$	8,72	8,46	8,51	$8,56 \pm 0,11$
$4,00 \pm 0,80$	25,55	25,26	25,34	$25,38 \pm 0,12$
$6,00 \pm 1,20$	40,50	40,79	39,06	$40,12 \pm 0,76$
$8,00 \pm 1,60$	56,32	58,06	57,55	$57,31 \pm 0,73$
$10,00 \pm 2,00$	72,59	73,90	72,79	$73,09 \pm 0,58$

5.3 Turbopumpe

5.3.1 Evakuierungsmessung

Die Auswertung der Daten für die Turbopumpe verläuft analog zu 5.2.1. Bei der Turbopumpe wurde jedoch ein Anfangsdruck von $p_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ mbar eingestellt, und ein Enddruck von $p_E = 1 \cdot 10^{-5}$ mbar gemessen. Zudem beträgt der Fehler des benutzten Heißkathoden-Messgerätes nur 10 %. Die verwendeten gemessenen und berechneten Daten befinden sich in Tabelle 8 und der Plot ist in Abbildung 13 zu sehen. Die Fitparameter wurden zu folgenden Werten bestimmt:

$$\begin{aligned} a_1 &= (-0,623 \pm 0,061) \frac{1}{\text{s}} \\ a_2 &= (-0,024 \pm 0,003) \frac{1}{\text{s}} \\ b_1 &= -0,614 \pm 0,310 \\ b_2 &= -5,545 \pm 0,161. \end{aligned}$$

Daraus werden erneut mittels (15) und (16) die Saugvermögen bestimmt:

$$\begin{aligned} S_1 &= (6,4 \pm 0,8) \frac{1}{\text{s}} \\ S_2 &= (0,245 \pm 0,040) \frac{1}{\text{s}} \end{aligned}$$

Tabelle 8: Gemessene und berechnete Werte zur Evakuierungsmessung der Turbopumpe.

$p(t) / 10^{-5}$ mbar	$\ln\left(\frac{p(t)-p_E}{p_0-p_E}\right)$	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	t_4 / s	t_5 / s	\bar{t} / s
$500,00 \pm 50,00$	$0,00 \pm 0,10$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$200,00 \pm 20,00$	$-0,92 \pm 0,10$	0,54	0,79	0,79	0,81	0,86	$0,76 \pm 0,06$
$40,00 \pm 4,00$	$-2,55 \pm 0,10$	2,60	2,82	2,66	2,84	2,65	$2,71 \pm 0,05$
$20,00 \pm 2,00$	$-3,27 \pm 0,10$	3,41	3,68	3,80	3,63	3,52	$3,61 \pm 0,07$
$10,00 \pm 1,00$	$-4,02 \pm 0,10$	4,48	4,74	4,93	4,61	4,39	$4,63 \pm 0,10$
$6,00 \pm 0,60$	$-4,60 \pm 0,10$	5,67	5,87	6,13	6,08	5,72	$5,89 \pm 0,09$
$4,00 \pm 0,40$	$-5,11 \pm 0,11$	6,92	7,14	7,52	7,47	6,98	$7,21 \pm 0,12$
$3,00 \pm 0,30$	$-5,52 \pm 0,11$	8,33	8,56	9,75	9,51	8,77	$8,98 \pm 0,28$
$2,00 \pm 0,20$	$-6,21 \pm 0,14$	21,72	21,57	24,23	23,81	21,53	$22,57 \pm 0,60$
$1,60 \pm 0,16$	$-6,72 \pm 0,19$	43,47	42,58	41,88	42,31	39,16	$41,88 \pm 0,73$
$1,40 \pm 0,14$	$-7,13 \pm 0,27$	68,90	65,94	61,94	59,25	59,49	$63,10 \pm 1,88$
$1,20 \pm 0,12$	$-7,82 \pm 0,51$	112,28	111,53	90,83	91,34	92,16	$99,63 \pm 5,02$

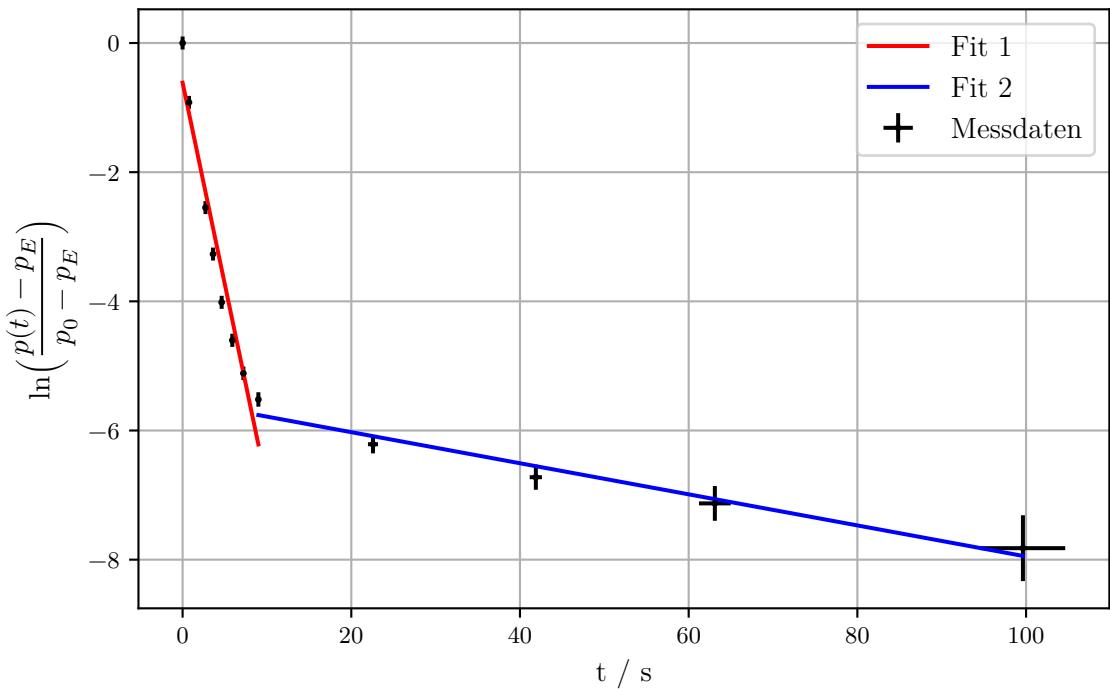


Abbildung 13: Plot zur Evakuierungsmessung der Turbopumpe.

5.3.2 Leckratenmessung

Die Auswertung verläuft analog zu 5.2.2. Die verwendeten Gleichgewichtsdrücke sind $p_{g,1} = 5 \cdot 10^{-5}$ mbar, $p_{g,2} = 1 \cdot 10^{-4}$ mbar, $p_{g,3} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ mbar und $p_{g,4} = 2 \cdot 10^{-4}$ mbar. Die Messdaten befinden sich in 9, 10, 11 und 12 und die Plots in den Abbildungen 14, 15, 16 und 17. Es wurden folgende Parameter optimiert:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= (4,468 \pm 0,049) \cdot 10^{-5} \frac{\text{mbar}}{\text{s}} \\
 a_2 &= (1,883 \pm 0,048) \cdot 10^{-4} \frac{\text{mbar}}{\text{s}} \\
 a_3 &= (3,009 \pm 0,068) \cdot 10^{-4} \frac{\text{mbar}}{\text{s}} \\
 a_4 &= (3,214 \pm 0,052) \cdot 10^{-4} \frac{\text{mbar}}{\text{s}} \\
 b_1 &= (7,081 \pm 0,579) \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \\
 b_2 &= (4,492 \pm 3,084) \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \\
 b_3 &= (9,222 \pm 3,439) \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \\
 b_4 &= (1,347 \pm 0,242) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}.
 \end{aligned}$$

Daraus wurden mittels (17) und (18) folgende Saugvermögen bestimmt:

$$S_1 = (9,1 \pm 1,2) \frac{1}{\text{s}}$$

$$S_2 = (19,2 \pm 2,5) \frac{1}{\text{s}}$$

$$S_3 = (20,5 \pm 2,6) \frac{1}{\text{s}}$$

$$S_4 = (16,4 \pm 2,1) \frac{1}{\text{s}}.$$

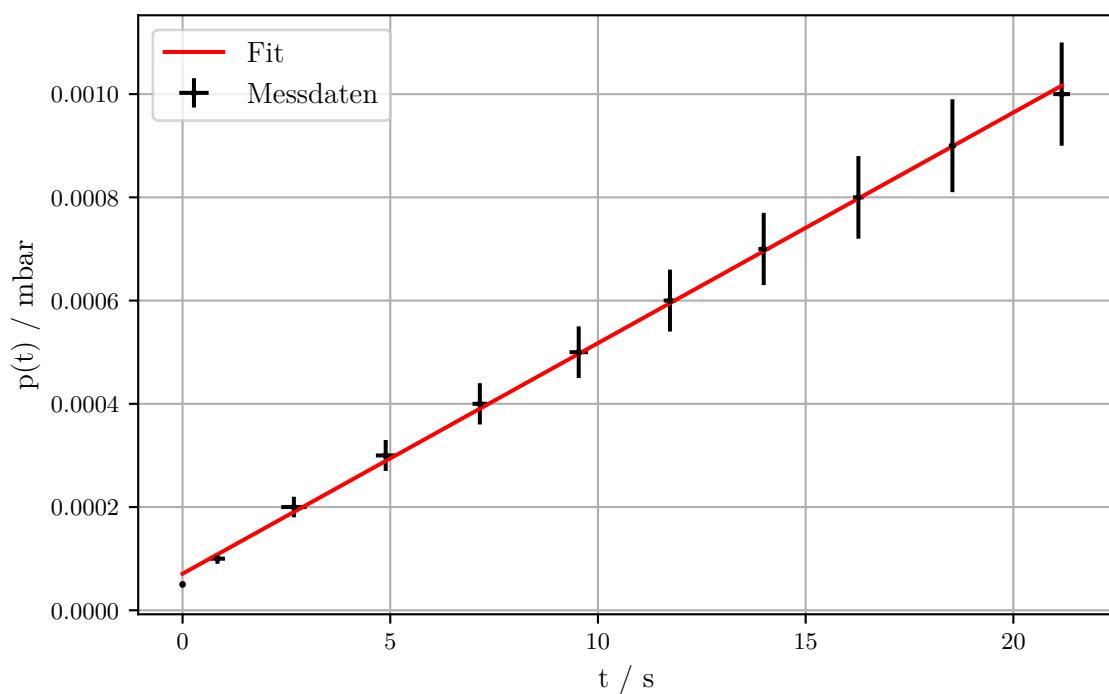


Abbildung 14: Plot zur Leckratenmessung der Turbopumpe bei $p_g = 5 \cdot 10^{-5}$ mbar.

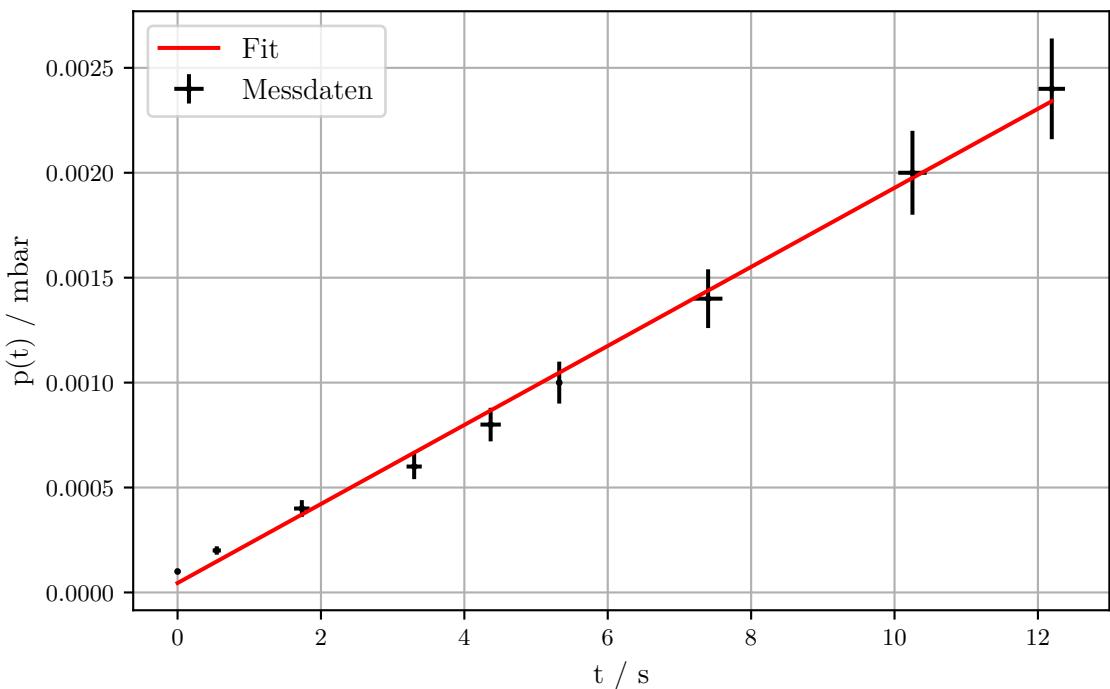


Abbildung 15: Plot zur Leckratenmessung der Turbopumpe bei $p_g = 1 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$.

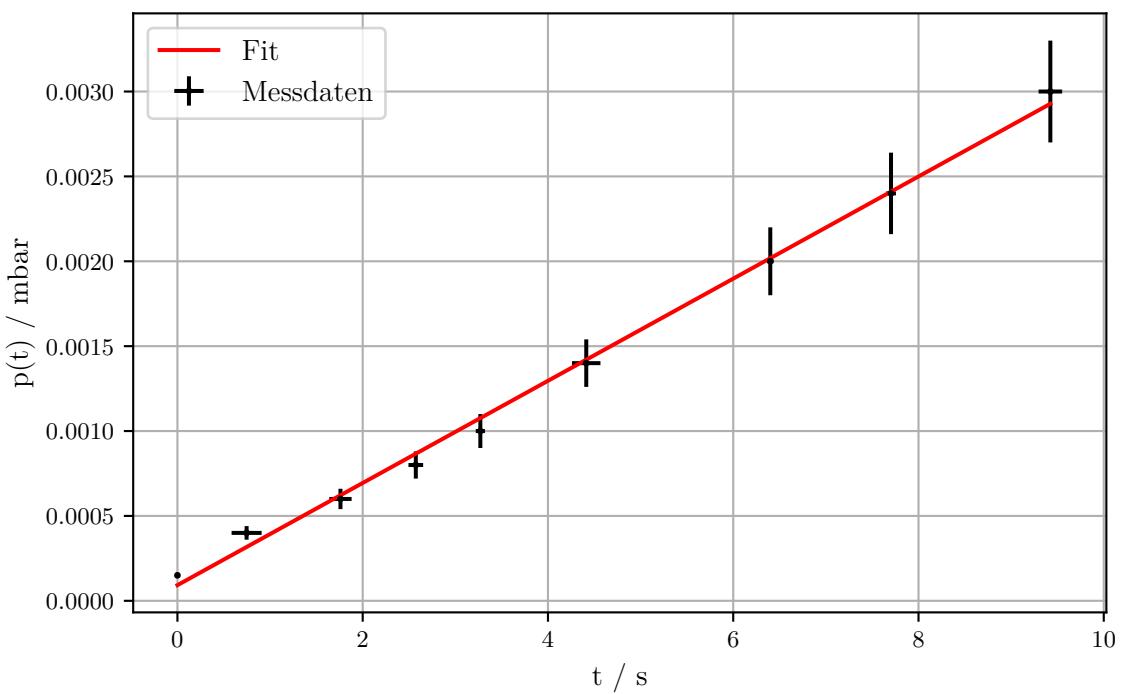


Abbildung 16: Plot zur Leckratenmessung der Turbopumpe bei $p_g = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$.

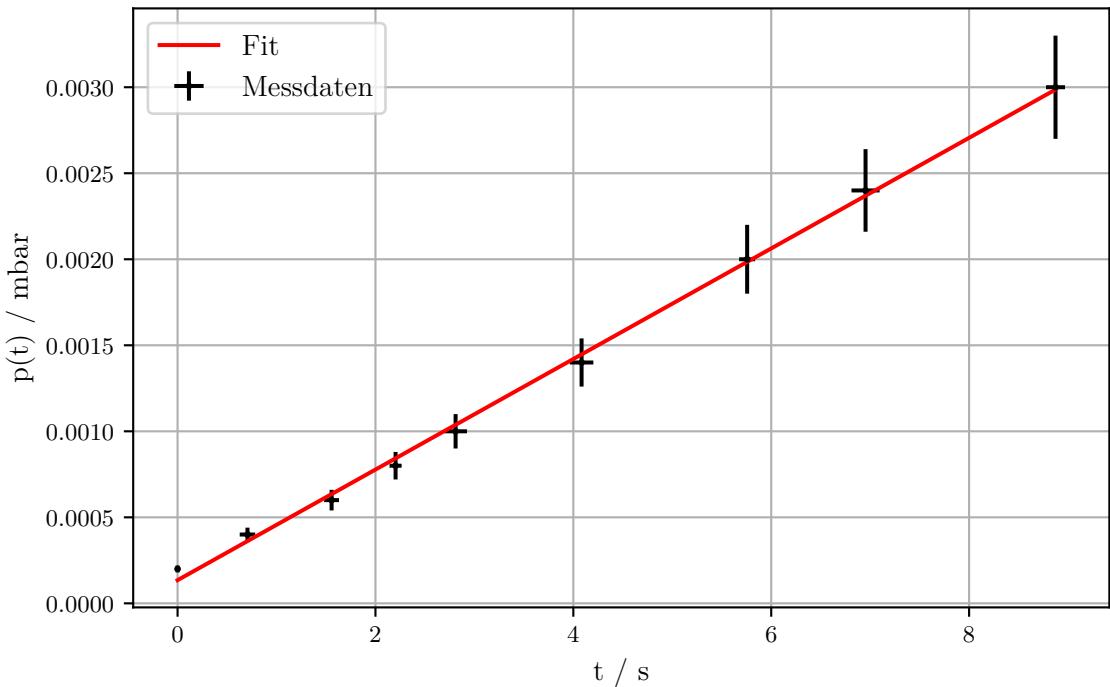


Abbildung 17: Plot zur Leckratenmessung der Turbopumpe bei $p_g = 2 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$.

Tabelle 9: Gemessene und berechnete Werte zur Leckratenmessung der Turbopumpe bei $p_g = 5 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$.

$p(t) / 10^{-5} \text{ mbar}$	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$5,00 \pm 0,50$	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$10,00 \pm 1,00$	1,05	0,61	0,86	$0,84 \pm 0,18$
$20,00 \pm 2,00$	2,92	2,87	2,25	$2,68 \pm 0,30$
$30,00 \pm 3,00$	4,97	5,13	4,57	$4,89 \pm 0,24$
$40,00 \pm 4,00$	7,18	7,36	6,93	$7,16 \pm 0,18$
$50,00 \pm 5,00$	9,60	9,77	9,24	$9,54 \pm 0,22$
$60,00 \pm 6,00$	11,83	11,85	11,52	$11,73 \pm 0,15$
$70,00 \pm 7,00$	13,91	14,17	13,89	$13,99 \pm 0,13$
$80,00 \pm 8,00$	16,19	16,45	16,17	$16,27 \pm 0,13$
$90,00 \pm 9,00$	18,41	18,59	18,60	$18,53 \pm 0,09$
$100,00 \pm 10,00$	20,88	21,32	21,29	$21,16 \pm 0,20$

Tabelle 10: Gemessene und berechnete Werte zur Leckratenmessung der Turbopumpe bei $p_g = 1 \cdot 10^{-4}$ mbar.

$p(t) / 10^{-4}$ mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$1,00 \pm 0,10$	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$2,00 \pm 0,20$	0,62	0,54	0,48	$0,55 \pm 0,06$
$4,00 \pm 0,40$	1,88	1,62	1,70	$1,73 \pm 0,11$
$6,00 \pm 0,60$	3,43	3,17	3,30	$3,30 \pm 0,11$
$8,00 \pm 0,80$	4,43	4,17	4,50	$4,37 \pm 0,14$
$10,00 \pm 1,00$	5,37	5,30	5,30	$5,32 \pm 0,03$
$14,00 \pm 1,40$	7,51	7,12	7,57	$7,40 \pm 0,20$
$20,00 \pm 2,00$	10,53	10,10	10,12	$10,25 \pm 0,20$
$24,00 \pm 2,40$	12,43	11,98	12,17	$12,19 \pm 0,18$

Tabelle 11: Gemessene und berechnete Werte zur Leckratenmessung der Turbopumpe bei $p_g = 1,5 \cdot 10^{-4}$ mbar.

$p(t) / 10^{-4}$ mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$1,50 \pm 0,15$	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$4,00 \pm 0,40$	0,79	0,92	0,53	$0,75 \pm 0,16$
$6,00 \pm 0,60$	1,67	1,93	1,68	$1,76 \pm 0,12$
$8,00 \pm 0,80$	2,55	2,49	2,68	$2,57 \pm 0,08$
$10,00 \pm 1,00$	3,23	3,24	3,34	$3,27 \pm 0,05$
$14,00 \pm 1,40$	4,31	4,30	4,63	$4,41 \pm 0,15$
$20,00 \pm 2,00$	6,45	6,38	6,37	$6,40 \pm 0,04$
$24,00 \pm 2,40$	7,64	7,70	7,77	$7,70 \pm 0,05$
$30,00 \pm 3,00$	9,26	9,44	9,57	$9,42 \pm 0,13$

Tabelle 12: Gemessene und berechnete Werte zur Leckratenmessung der Turbopumpe bei $p_g = 2 \cdot 10^{-4}$ mbar.

$p(t) / 10^{-4}$ mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$2,00 \pm 0,20$	0,00	0,00	0,00	$0,00 \pm 0,00$
$4,00 \pm 0,40$	0,66	0,60	0,86	$0,71 \pm 0,08$
$6,00 \pm 0,60$	1,55	1,43	1,69	$1,56 \pm 0,08$
$8,00 \pm 0,80$	2,22	2,09	2,30	$2,20 \pm 0,06$
$10,00 \pm 1,00$	2,69	2,70	3,04	$2,81 \pm 0,12$
$14,00 \pm 1,40$	4,16	3,85	4,24	$4,08 \pm 0,12$
$20,00 \pm 2,00$	5,75	5,62	5,90	$5,76 \pm 0,08$
$24,00 \pm 2,40$	6,87	6,76	7,23	$6,95 \pm 0,14$
$30,00 \pm 3,00$	8,85	8,72	9,05	$8,87 \pm 0,10$

5.4 Vergleich der bestimmten Saugvermögen

Die verschiedenen bestimmten Saugvermögen sind in Abbildung 18 für die Drehschieberpumpe und in Abbildung 19 für die Turbopumpe dargestellt.

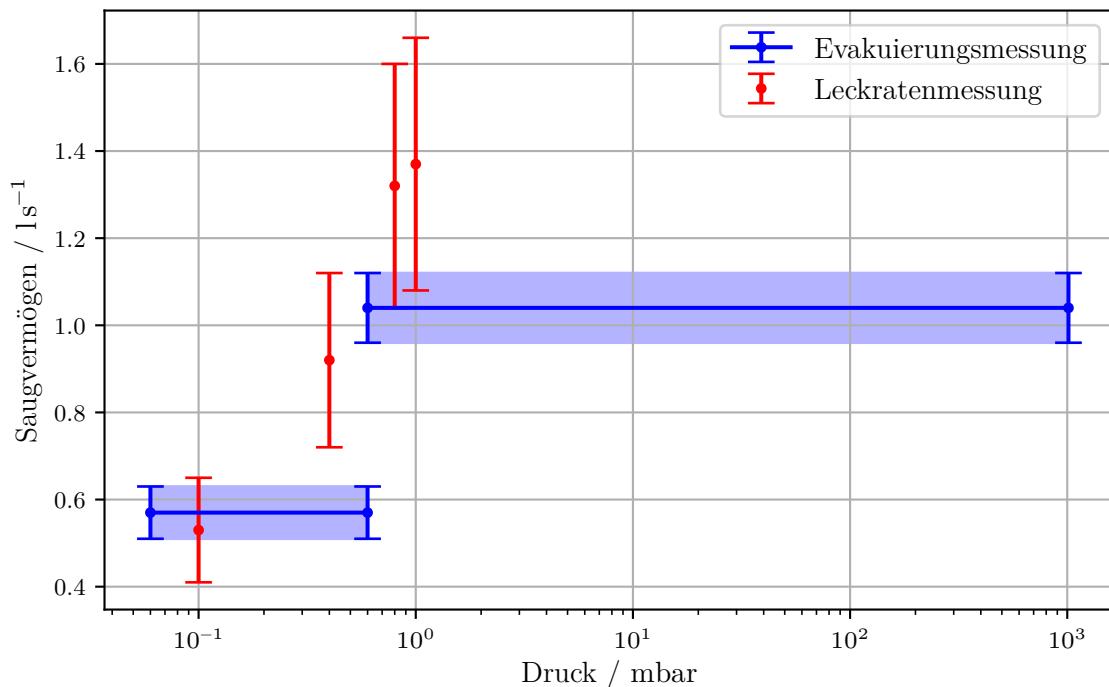


Abbildung 18: Vergleich der bestimmten Saugvermögen für die Drehschieberpumpe.

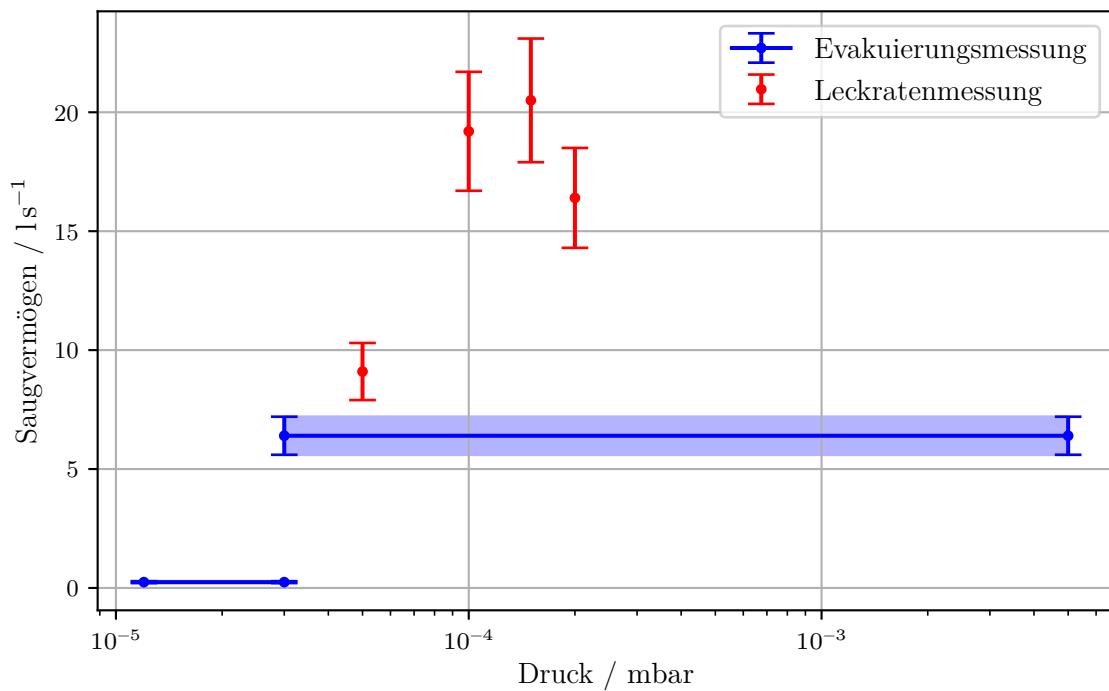


Abbildung 19: Vergleich der bestimmten Saugvermögen für die Turbopumpe.

6 Diskussion

Für die Drehschieberpumpe wurden die Saugvermögen

$$S_1 = (1,04 \pm 0,08) \frac{1}{\text{s}}$$

$$S_2 = (0,57 \pm 0,06) \frac{1}{\text{s}}$$

durch Evakuierungsmessung, und die Saugvermögen

$$S_3 = (0,53 \pm 0,12) \frac{1}{\text{s}}$$

$$S_4 = (0,92 \pm 0,20) \frac{1}{\text{s}}$$

$$S_5 = (1,32 \pm 0,28) \frac{1}{\text{s}}$$

$$S_6 = (1,37 \pm 0,29) \frac{1}{\text{s}}$$

durch Leckratenmessung bestimmt. Für die Turbopumpe wurden die Saugvermögen

$$S_1 = (6,4 \pm 0,8) \frac{1}{\text{s}}$$

$$S_2 = (0,245 \pm 0,040) \frac{1}{\text{s}}$$

durch Evakuierungsmessung, und die Saugvermögen

$$S_3 = (9,1 \pm 1,2) \frac{1}{\text{s}}$$

$$S_4 = (19,2 \pm 2,5) \frac{1}{\text{s}}$$

$$S_5 = (20,5 \pm 2,6) \frac{1}{\text{s}}$$

$$S_6 = (16,4 \pm 2,1) \frac{1}{\text{s}}$$

durch Leckratennmessung bestimmt. Die Herstellerangaben für die Saugvermögen betragen 1,11/s für die Drehschieberpumpe und 771/s für die Turbopumpe [1]. Bei der Drehschieberpumpe sind wie in Abbildung 18 zu sehen die Saugvermögen bei niedrigen Drücken deutlich geringer als bei höheren. Dies geht darauf zurück, dass das Saugvermögen der Pumpen auch vom Druck im Rezipienten abhängig ist. Bei den Saugvermögen S_1 , S_5 und S_6 liegt jedoch die Herstellerangabe innerhalb der Messgenauigkeit und kann somit für ausreichend hohe Drücke bestätigt werden.

Bei der Turbopumpe sind ebenfalls geringere Saugvermögen bei niedrigen Drücken gemessen worden, da auch hier eine Druckabhängigkeit besteht. Jedoch fällt der Unterschied deutlich größer aus als bei der Drehschieberpumpe. Es ist auch zu beobachten, dass die durch Leckratennmessungen bestimmten Werte deutlich größer sind als jene, welche durch die Evakuierungsmessung bestimmt wurden, und dass alle Werte deutlich unter der Herstellerangabe liegen. Die geht vermutlich auf den in Gleichung (9) dargestellten Zusammenhang zwischen dem effektiven Saugvermögen und dem Leitwert zurück. Das gemessene Saugvermögen ist das effektive Saugvermögen und folglich niedriger als die Herstellerangabe. Die Größe des Unterschiedes ist dabei abhängig vom Leitwert, welcher unter anderem wie in Gleichung (8) zu sehen vom Querschnitt des Rohres abhängt, welcher wie in Kapitel 4 zu sehen direkt vor dem Ansaugstutzen der Turbopumpe durch eine Querschnittsverengung halbiert wird. Eine weitere Fehlerquelle sind virtuelle Lecks, welche vom verwendeten Pumpstand abhängig sind und bei sinkenden Drücken an Relevanz dazu gewinnen. Außerdem wird das vom Hersteller angegebene Saugvermögen nur unter optimalen Bedingungen, welche zum Beispiel die Nutzung von purem Stickstoff und die Minimierung von realen und virtuellen Lecks darstellen, erreicht.

Abschließend lässt sich die Herstellerangabe bei der Drehschieberpumpe verifizieren, bei der Turbopumpe jedoch aufgrund von unbekannten Leitwerten und Bedingungen nicht.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Leitfaden zum Vakuumversuch V70*. 2017.
- [2] 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/>.

- [3] *Pirani-Vakuummeter*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Pirani-Vakuummeter> (besucht am 01.11.2018).
- [4] *Vakuum*. URL: <https://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/Encyclopedia/show/952/?L=64> (besucht am 29.10.2018).
- [5] *Vakuum - Anwendung*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Vakuum#Anwendungen> (besucht am 01.11.2018).
- [6] *Vakuum im LHC*. URL: <http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=vakuum> (besucht am 05.11.2018).
- [7] Pfeiffer Vakuum. *Drehschiebervakuumpumpe Aufbau/Funktionsprinzip*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/vakuumerzeugung/drehschiebervakuumpumpen/aufbau-funktionsprinzip/> (besucht am 31.10.2018).
- [8] Pfeiffer Vakuum. *Funktionsprinzip Turbomolekularpumpe*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/vakuumerzeugung/turbomolekularpumpen/aufbau-funktionsprinzip/funktionsprinzip-turbomolekularpumpe/> (besucht am 01.11.2018).
- [9] Pfeiffer Vakuum. *Leitwert*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/einfuehrung-in-die-vakuumtechnik/grundlagen/leitwert/> (besucht am 01.11.2018).
- [10] Pfeiffer Vakuum. *Strömungsarten*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/einfuehrung-in-die-vakuumtechnik/grundlagen/stroemungsarten/> (besucht am 29.10.2018).
- [11] Pfeiffer Vakuum. *Vakuum - Definition*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/einfuehrung-in-die-vakuumtechnik/allgemeines/> (besucht am 27.10.2018).