

Durchführung: 18.04.2018

1. Abgabe: 27.04.2018

2. Abgabe: 11.06.2018

3. Abgabe: 28.06.2018

PRAKTIKUMSPROTOKOLL V70

VAKUUMPHYSIK

Anneke Reinold¹,
Paul-Simon Blumenkamp²

¹anneke.reinold@tu-dortmund.de

²paul-simon.blumenkamp@tu-dortmund.de

1 Einleitung

Die Vakuumtechnik und ihre Verfahren zur Vakuumherstellung haben große Bedeutung für Mensch und Technik. Bestimmt der Druck im Alltäglichen beim Tauchen und in der Luftfahrt die Technik, so ist auch das Verständnis der Vakuum- und Druckbereiche für die Halbleitertechnologie von großer Bedeutung. Druckunterschiede und kleinste Verunreinigungen haben Auswirkungen auf das hergestellte Produkt. Je höher sich von der Erde entfernt wird, desto größer werden die Druckunterschiede, die bei der Wahl des Werkstoffs und seiner Verarbeitung, zum Beispiel für das Bauen von Satelliten, ausschlaggebend sind. In diesem Versuch werden zwei Arten von Pumpen zur Vakuumerzeugung an einem experimentellen Pumpstand untersucht.

2 Theorie

2.1 Vakuum

(Nach Quelle [6]) Hingegen der allgemeinen Auffassung, dass Vakuum ein Volumen gänzlich ohne Materie beschreibt, wird in der Physik und Technik der Vakuumbegriff in Bereiche eingeteilt. Abhängig vom Druck, der mittleren freien Weglänge und des Strömungsverhaltens lassen sich, wie Tabelle 1 zeigt, vier Bereiche unterscheiden.

Bereich	Druck / <i>mbar</i>	freie Weglänge / <i>m</i>	Strömungsmechanismus
Großvakuum	300 - 1	10^{-7} - 10^{-4}	viskos
Feinvakuum	1 - 10^{-5}	10^{-4} - 10^{-1}	Knudsen
Hochvakuum	10^{-3} - 10^{-7}	10^{-1} - 10^3	molekular
Ultrahochvakuum	$< 10^{-7}$	$> 10^3$	molekular

Tabelle 1: Bereichseinteilung des Vakuums

Die mittlere freie Weglänge beschreibt die durchschnittliche Wegstrecke, die ein Teilchen zurücklegt, ohne mit anderen Teilchen in Wechselwirkung zu treten. Für Gase und der Annahme, dass eine Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung vorliegt, gilt die Gasgleichung

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi d^2 p}. \quad (1)$$

Hierbei ist k_B die Boltzmann-Konstante, T die Temperatur, d der Durchmesser des Moleküls und p der Druck.

2.2 Strömungsarten

Für die Charakterisierung einer vorliegenden Strömung und für die Wahl der richtigen Pumpe wird die Knudsen-Zahl K_n als einheitenlose Größe verstanden. Sie ist definiert durch den Quotienten der mittleren freien Weglänge λ und der charakteristischen Länge

der Strömung l_c

$$K_n = \frac{\lambda}{l_c}. \quad (2)$$

Bei einer Knudsen-Zahl $K_N < 0,01$ wird von einer Kontinuumsströmung gesprochen und bei dieser wird sich im Grobvakuum befunden. Hierbei kommt es vermehrt zum Zusammenstoßen der Teilchen im Gas untereinander. Die mittlere freie Weglänge ist kleiner als die Abmessung des Strömungskanals. Es wird außerdem in laminarer und turbolenter Strömung unterschieden. Die laminare Strömung beschreibt Strömungen in Schichten. Die Gasteilchen bleiben immer parallel zueinander. Nimmt die Strömungsgeschwindigkeit aber zu, so lösen sich die Schichten auf und die Strömung wird turbulent. Beschrieben wird der Grenzübergang durch die Reynoldszahl

$$R = \frac{\rho v l_c}{\eta}. \quad (3)$$

ρ ist die Dichte, v ist die Strömungsgeschwindigkeit und η die dynamische Viskosität. Turbulente Strömungen kommen zum Beispiel beim Abpumpen von Atmosphärendruck auf. In der Pumpentechnik wird versucht, diese Strömungsart zu verhindern, da durch auftretende Strömungswiderstände, Pumpen mit erhöhter Saugkraft benötigt werden. Für $0,01 \leq K_n \leq 0,5$ wird der Begriff der Knudsen-Strömung gebraucht. Charakteristisch ist diese für den Feinvakuumbereich, der in technischen Anwendungen häufig eine Rolle spielt.

Liegt die Knudsen-Zahl oberhalb von 0,5 so lassen sich kaum noch Wechselwirkungen der Gasteilchen untereinander feststellen. Es kommt zur molekularen Strömung, bei der die mittlere freie Weglänge sehr viel größer als die Abmessung des Strömungskanals ist.

2.3 Ideales Gas

(Nach Quelle [7]) In der Thermodynamik wird das Modell des idealen Gases als idealisierte Vereinfachung für die Beschreibung von Gasprozessen verwendet. Wechselwirkungen treten ausschließlich durch elastische Stöße der Teilchen untereinander und durch Stöße mit der Wand auf. Das ideale Gas ist vom Druck p , dem Volumen V , der Teilchenzahl N und der Temperatur T abhängig und die Zustandsgleichung folgt zu

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

Nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte ist der Druck unter $T = \text{const}$ antiproportional zum Volumen. Diese Aussage der Zustandsgleichung des idealen Gases ist von Bedeutung für den später beschriebenen Versuch.

2.4 Saugvermögen

(Nach Quelle [1]) Das Saugvermögen S einer Pumpe gibt den geförderten Volumenstrom an. Ausdrückbar ist dieser über den gemessenen Druck über die Zeit $p(t)$.

Getroffen werden müssen folgende Annahmen:

- Bei der Messung gilt $V = \text{const.}$
- Das beförderte Gas kann als ideales Gas angesehen werden.
- Bei der Messung gilt außerdem $T_{\text{Gas}} = \text{const.}$
- Das Gas befindet sich zu jedem Zeitpunkt im thermodynamischen Gleichgewicht.
- Es tritt keine Desorption auf.
- Das Saugvermögen ist konstant und unabhängig vom Druck.

Um einen Zusammenhang zwischen dem Druck p und dem Saugvermögen S zu erhalten, wird die Kolbenpumpe als einfachste Pumpenart verwendet, um durch konstante Kolbengeschwindigkeit auf $\dot{V} = S$ zu kommen. Durch Ableiten der Zustandsgleichung des idealen Gases 4 erhält man die Differentialgleichung

$$\dot{p}V = -pS, \quad (5)$$

wodurch man nach Lösen

$$p(t) = p_0 e^{\frac{-tS}{V}} \quad (6)$$

erhält.

Berücksichtigt werden muss ebenso, dass es einen endlichen Enddruck gibt. Er muss aufgrund von allseits auftretenden Leckagen und des Ausgasens durch die Innenwände, den sogenannten virtuellen Lecks, existieren. Unter der Berücksichtigung folgt

$$p(t) = (p_0 - p_E) e^{\frac{-tS}{V}} + p_E. \quad (7)$$

2.5 Leckrate

Für die spätere Auswertung ist ebenso die Definition der Leckrate Q wichtig. Es gilt

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

wodurch

$$Q = V \frac{dp}{dt} \quad (9)$$

folgt. Der Gleichgewichtsdruck wird durch p_G dargestellt.

2.6 Leitwerte

Das vom Hersteller angegebene Saugvermögen einer Pumpe kann nie ganz erreicht werden. Grund dafür ist, dass die Leitungen und Verbindungsstücke zwischen ihnen einen Strömungswiderstand besitzen. Erwartet wird somit ein effektives Saugvermögen S_{eff} für das gilt

$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{S_0} + \frac{1}{L}. \quad (10)$$

S_0 ist der Theoriewert des Saugvermögens und L der Leitwert der Strömung.

Der Leitwert ist der reziproke Strömungswiderstand der Schläuche und Verbindungen.

2.7 Vakuumtechnik

In der Technik sind Vakuumpumpen unabdingbar. Je nach Einsatzbereich und Vakuumbereich werden unterschiedliche Pumparten genutzt. Im vorliegenden Versuch werden zwei Pumparten verwendet.

2.7.1 Drehschieberpumpe

Eine schematische Darstellung der Drehschieberpumpe ist in Abbildung 1 dargestellt. Im Betrieb erzeugt der Rotor zusammen mit den Schiebern einen expandierenden Raum. Durch den so entstehenden Unterdruck wird das Gas in den Arbeitsraum diffundiert, bis der zweite Schieber das Einlassventil verschließt. Wie das Gesetz von Boyle-Mariotte beschreibt, sinkt Druck aufgrund des wachsenden Volumens. Nun wird durch die Rotation der Raum wieder verkleinert und das Gas muss durch das Auslassventil entweichen.

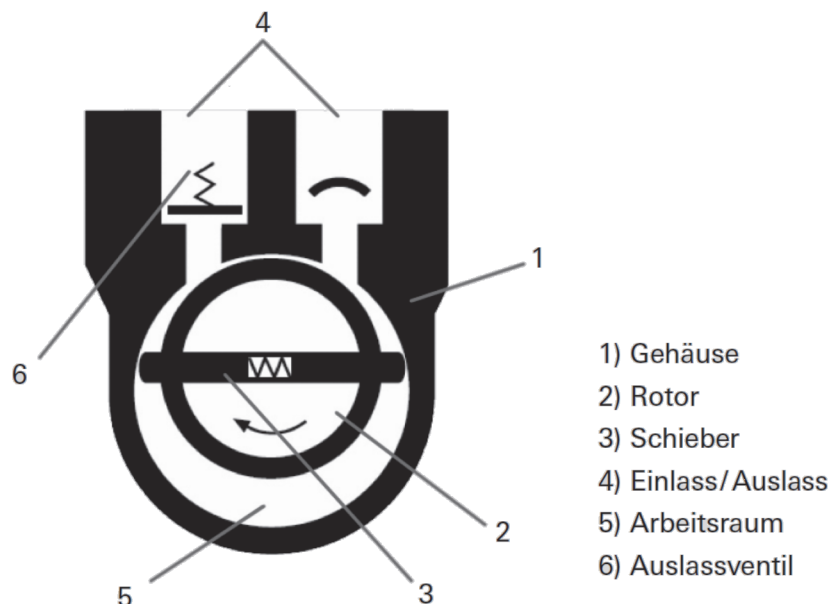


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Drehschieberpumpe.[8]

2.7.2 Turbomolekularpumpe

Die Turbomolekularpumpe besteht aus vielen beschauften Rotoren in einem zylinderförmigen Gehäuse. Die Gasmoleküle treffen auf die rotierenden Flächen und werden so kinetisch in Pumprichtung beschleunigt. Aufgrund der hohen Rotationsfrequenz wird für den Betrieb einer Turbomolekularpumpe ein Vorvakuum benötigt, da anderenfalls die zufälligen Kollisionen der Gasmoleküle das Pumpen verhindern würden. Des Weiteren könnte die Reibung der Gasmoleküle den Rotor beschädigen.

Zur Messung des erzeugten Vakuums werden im Verlauf des Versuchs drei unterschiedliche Messgeräte genutzt, welche hier beschrieben werden.

2.7.3 Pirani-Messgerät

Das Pirani-Messgerät wird für die höheren Druckbereiche ab 1000 mbar genutzt. Die Funktionsweise dieser Messapparatur beruht auf der Tatsache, dass die Wärmeleitfähigkeit eines Gases von dessen Druck abhängt. Zur Messung wird ein stromführender Glühdraht dem Vakuum ausgesetzt. Sinkt nun der Gasdruck, so steigt durch die verminderte Wärmeleitung des Gases die Temperatur des Drahtes. Diese gesteigerte Temperatur verursacht eine Veränderung des Drahtwiderstandes, welcher über eine Brückenschaltung bestimmt werden kann. Es ist zu beachten, dass ein Pirani-Messgerät nur in einem bestimmten Druckbereich anwendbar ist, da bei zu hohem Druck, die Konvektion die Wärmeleitfähigkeit des Gases überdeckt. Auf ähnliche Weise dominiert bei zu niedrigem Druck die Wärmestrahlung.

2.7.4 Glüh- und Kaltkathoden Vakuummeter

Das Glühkathoden Vakuummeter beruht auf der Ionisation der Gasmoleküle. Hierzu wird ein Glühdraht erhitzt, sodass durch thermische Elektronenemission Elektronen austreten, welche zu einer Anode beschleunigt werden. Treffen die Elektronen auf ein Gasmolekül, so wird dieses durch das Herausschlagen eines Elektrons ionisiert. Das nun positiv geladene Gasteilchen lässt sich dann als Ionisationsstrom messen. Zur Erhöhung der Trefferwahrscheinlichkeit der Elektronen, werden diese über ein Magnetfeld auf eine kreisförmige Bahn gebracht. Die Funktionsweise des Kaltkathoden-Vakuummeters ist analog, jedoch werden hierbei die Elektronen durch ein starkes elektrisches Feld ausgelöst.

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

Der Aufbau des Versuchs kann anhand des Fotos in Abbildung 2 nachvollzogen werden.

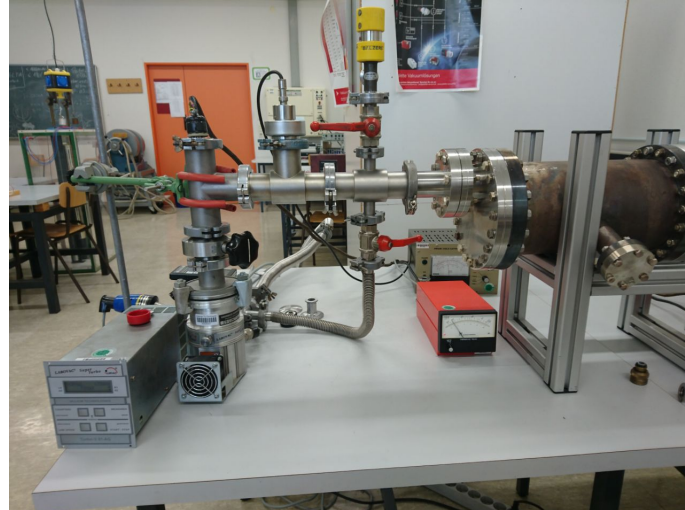


Abbildung 2: Frontansicht des Versuchsaufbaus.

Zur besseren Übersicht befindet sich des Weiteren ein schematischer Aufbau des Versuchs in Abbildung 3.

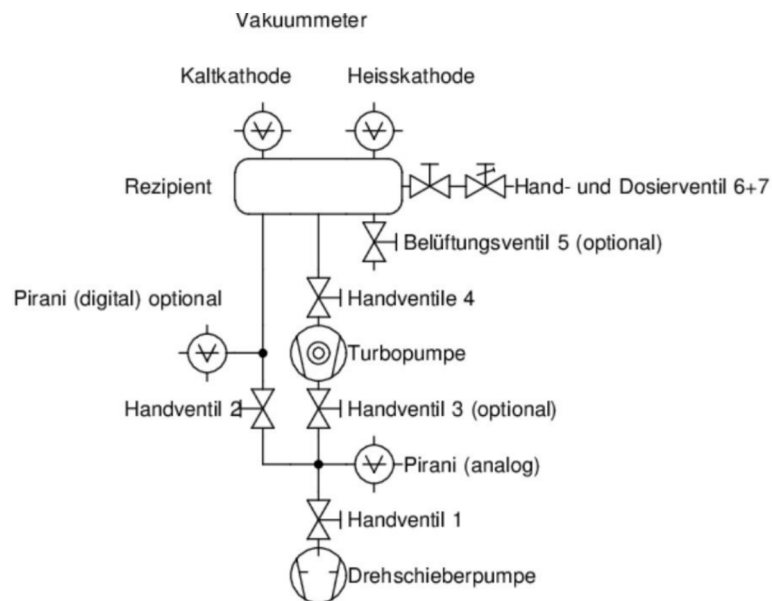


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.[1]

3.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuchs wird die Dichtigkeit des Aufbaus getestet. Hierzu wird zunächst mit der Drehschieberpumpe ein Vorvakuum von höchstens 0,05 mbar erzeugt. Wenn der nötige Druck erreicht ist, wird die Turbomolekularpumpe hinzugeschaltet und der Gasdruck auf höchstens $8 \cdot 10^{-5}$ mbar gesenkt. Ist dies möglich, so gilt der Aufbau als dicht.

Vor Beginn der Messung ist es außerdem notwendig, den Aufbau mit einem Heißluftfön zu erhitzen um Wasser aus dem Tank zu entfernen und Desorptionseffekte während den Messungen zu vermindern.

3.2.1 Untersuchung der Turbomolekularpumpe

Als erste Messung wird die Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe bestimmt. Hierzu wird die Drehschieberpumpe abgeschiebert (Ventil 2 geschlossen) und über das Nadelventil ein Gleichgewichtsdruck von $8 \cdot 10^{-3}$ mbar eingestellt. Das Glühkathoden-Vakuummeter wird eingeschaltet. Nadel- und Kugelventil werden geschlossen und der Druck mit der Zeit aufgenommen. Es werden 5 solcher Messungen durchgeführt.

Es wird außerdem eine Leckratenmessung vorgenommen. Hierzu wird mit dem Nadelventil ein Gleichgewichtsdruck eingestellt und daraufhin das Ventil zur Pumpe geschlossen. Es wird der Druckanstieg mit der Zeit vermessen. Insgesamt sollen drei solcher Messreihen für vier verschiedene Werte durchgeführt werden.

3.2.2 Untersuchung der Drehschieberpumpe

Für die Drehschieberpumpe werden ebenfalls Evakuierungskurve und Leckrate untersucht. Für die Evakuierungskurve wird die Turbomolekularpumpe abgeschiebert (Ventil 3 und 4 schließen) und Ventil 2 geöffnet. Das Handventil zur Drehschieberpumpe wird geschlossen und der Rezipient über Ventil 6 auf Normaldruck (1000 ± 100) mbar belüftet. Die Messung beginnt, indem Ventil 6 geschlossen und das Handventil möglichst zeitgleich geöffnet wird. Es wird der Druckabfall mit der Zeit aufgezeichnet.

Die Leckratenmessung verläuft hier analog zu der der Turbomolekularpumpe. Als Gleichgewichtsdruck werden $p_G = 0, 1; 0, 4; 0, 8$ und 1 mbar eingestellt. Es werden jeweils drei Messungen pro Gleichgewichtsdruck durchgeführt.

Wegen des höheren Druckes wird bei der Drehschieberpumpe das Pirani-Messgerät anstatt des Glühkathoden-Vakuummeters genutzt.

4 Auswertung

Die Auswertung, genauer die Fehlerrechnung, die Plots und Ausgleichsrechnung erfolgt mit den Paketen Numpy [5], Uncertainties [4], Matplotlib [2] und Scipy [3] in der Programmiersprache python.

4.1 Fehlerrechnung

Zu Beginn der Auswertung sei gesagt, dass eine Ungenauigkeit von 30 % des analogen zum digitalen Wärmeleitungsmessgeräts (Pirani) bei der Messung festgestellt und im Folgenden berücksichtigt wurde. Für die lineare Skala des Glühkathodenvakuummessgeräts ist eine Ungenauigkeit von 10 % angegeben[1]. Das Pirani-Messgerät ist das Modell Thermovac TR205 von Leybold-Heraeus; die Heißkathode Ionivac IM210 ebenso von Leybold-Heraeus. Auch muss erwähnt werden, dass die Zeitmessung mit einer Handstoppuhr erfolgte und eine durch menschliche Reaktion verursachte Verzögerung von 180 ms beachtet wird[9]. In den nachfolgenden Messwerttabellen ist diese Reaktionszeit auf alle Zeitmesswerte aufaddiert. Hierbei wurde angenommen, dass unsere Reaktionszeit dieser Durchschnittszeit entspricht.

Die Messungen

Die Mittelwerte werden nach

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i^N x_i \quad (11)$$

und deren Standardabweichung mit

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_i^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

berechnet. Für die Fehlerfortpflanzung einer Variablen x_i gilt

$$\sigma = \sqrt{\sum_i^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2}. \quad (13)$$

Für die Berechnung des Logarithmus für die Evakuierungsmessung muss der Fehler dessen aus bereits fehlerbehafteten Größen nach

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sigma_p^2}{(p - p_E)^2} + \frac{\sigma_{p_0}^2}{(p_0 - p_E)^2} + \sigma_{p_E}^2 \left(\frac{1}{p_0 - p_E} - \frac{1}{p - p_E} \right)^2} \quad (14)$$

berechnet werden.

4.2 Bestimmung des Volumens

Für die folgende Auswertung ist es unumgänglich, das Volumen des Messaufbaus zu bestimmen. Tabelle 2 zeigt, aufgelistet nach Pumpen- und Messart die verwendeten Bauteile und ihre Volumina. Es wird zwischen der Evakuierungsmessung mit der Turbopumpe TE, derselben Messart mit der Drehschieberpumpe DE und der Leckratenmessung mit der Drehschieberpumpe DL und mit der Turbopumpe TL unterschieden.

Bauteil Nr.	Bauteilbezeichnung	Volumen / l	TE	TL	DE	DL
1	Tank	$9,5 \pm 0,8$	1	1	1	1
2	langer Schlauch	$0,8 \pm 0,1$			1	1
3	kurzer Schlauch	$0,087 \pm 0,011$			1	1
4a	T-Stück, klein	$0,013 \pm 0,002$			1	1
4b	T-Stück, groß	$0,25 \pm 0,01$	1	1	1	1
5a	Kreuzstück, klein	$0,016 \pm 0,002$			1	1
5b	Kreuzstück, groß	$0,177 \pm 0,09$	1	1	1	1
6a	Handventil 1, offen	$0,015 \pm 0,002$		1	1	2
6b	Handventil 1, geschlossen	$0,005 \pm 0,001$	2	1	2	1
7a	Handventil 2, offen	$0,025 \pm 0,005$			1	
7b	Handventil 2, geschlossen	$0,0125 \pm 0,0025$				1
8a	Klappenventil, offen	$0,044 \pm 0,004$	1			
8b	Klappenventil, geschlossen	$0,022 \pm 0,002$		1	1	1
9	Querschnittsverengung	$0,067 \pm 0,004$	1			

Tabelle 2: Auflistung der Bauteile.[1]

Die Teilvolumina der jeweiligen Aufbauten werden addiert und im Folgenden angegeben. Die Fehlerberechnung erfolgt mit Formel 13. Es ergeben sich

$$V_{TE} = (10,0 \pm 0,8) \text{ l}$$

$$V_{TL} = (10,0 \pm 0,8) \text{ l}$$

$$V_{DE} = (10,9 \pm 0,8) \text{ l}$$

$$V_{DL} = (10,9 \pm 0,8) \text{ l.}$$

4.3 Turbomolekularpumpe

Für die Turbomolekularpumpe werden im Folgenden beide Messverfahren ausgewertet. Zum anschließenden Vergleich sind folgende Herstellerangaben[1] gegeben: Turbo SST81 der Firma ILMAC mit einem Saugvermögen von 771/s

4.3.1 Evakuierungsmessung

p / 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	t_6 / s	t_7 / s	t_8 / s	\bar{t} / s
$(8,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$	$0 \pm 0,15$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-3}$	$-(0,29 \pm 0,15)$	0,44	0,87	0,78	0,70	0,79	0,87	0,78	0,83	$0,76 \pm 0,05$
$(3,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$	$-(0,98 \pm 0,15)$	0,74	1,40	1,21	1,09	1,35	1,43	1,41	1,62	$1,28 \pm 0,10$
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$	$-(2,62 \pm 0,15)$	2,82	3,13	2,82	3,00	3,10	3,20	3,09	2,79	$3,00 \pm 0,06$
$(3,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$	$-(3,34 \pm 0,16)$	4,01	4,04	3,99	3,87	3,93	4,02	3,93	4,03	$3,94 \pm 0,13$
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-5}$	$-(5,20 \pm 0,19)$	6,52	6,86	6,61	7,04	6,44	6,72	6,71	6,70	$6,70 \pm 0,07$
$(3,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$	$-(6,35 \pm 0,27)$	10,14	10,03	10,00	9,44	10,29	9,42	9,06	8,94	$9,67 \pm 0,21$
$(1,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3: Messwerte für die Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe.

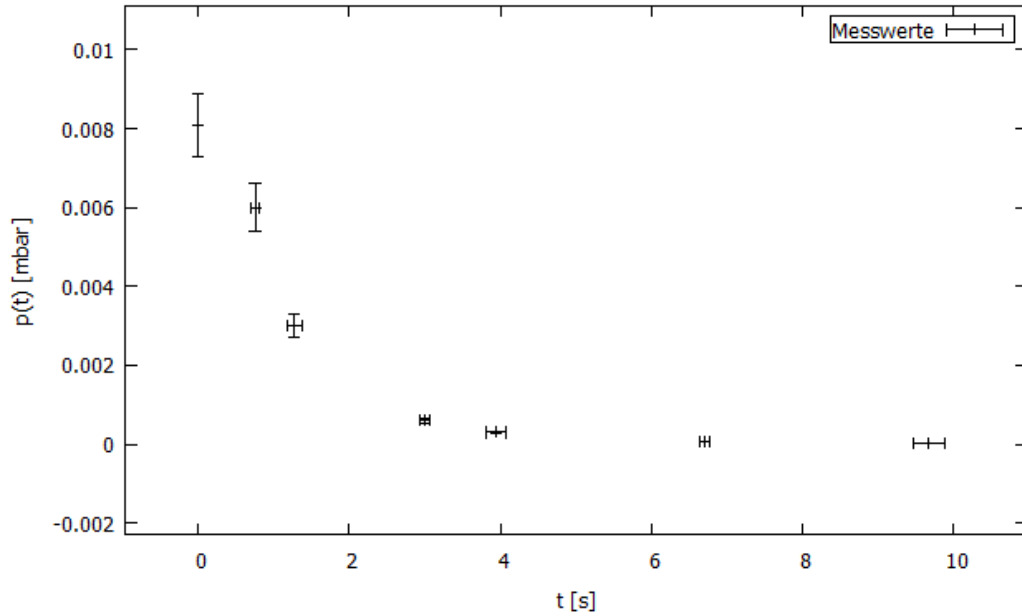


Abbildung 4: Exponentielle Darstellung der Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe.

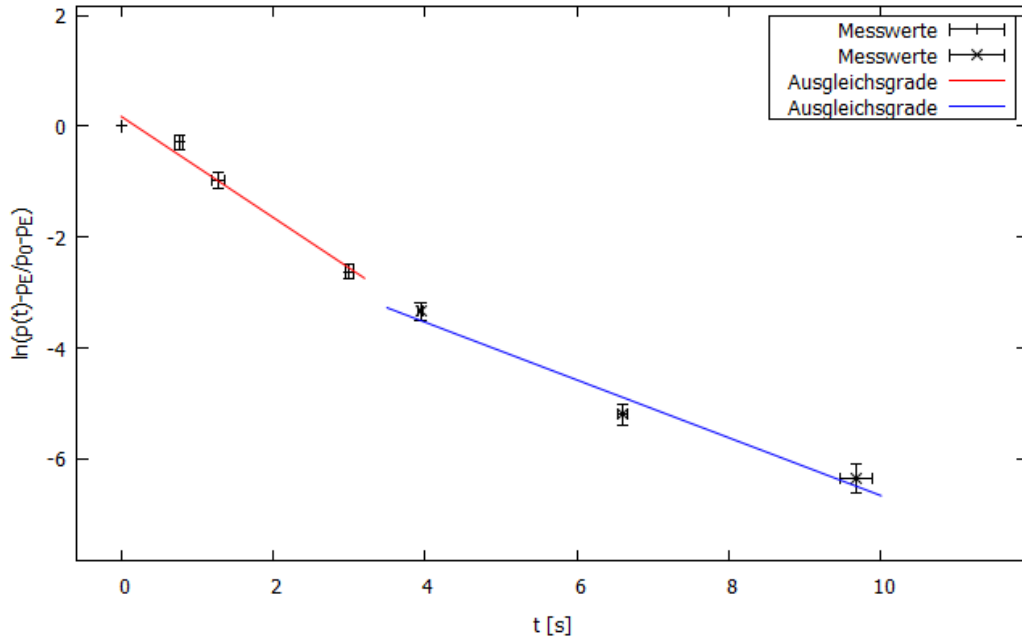


Abbildung 5: Logarithmische Darstellung der Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe.

Abbildung 4 zeigt die Messwerte aus Tabelle 3 aufgetragen. Es zeigt sich ein exponentieller Zusammenhang. In der logarithmischen Darstellung (Abbildung 5) wurden die Messwerte unterteilt und zwei lineare Ausgleichsrechnungen durchgeführt, da für die unterschiedlichen Druckbereiche das Saugvermögen nicht konstant ist. Die Ausgleichsgeraden haben die Form

$$h(x) = mx + b. \quad (15)$$

Aus den Regressionsparametern wird das Saugvermögen durch $S = -mV$ bestimmt.

Bereich 1: $8 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \geq p \geq 6 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$

$$m_1 = -(0,91 \pm 0,10) \text{ 1/s}$$

$$b_1 = 0,18 \pm 0,16$$

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

Bereich 2: $6 \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \geq p \geq 3 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$

$$m_2 = -(0,53 \pm 0,09) \text{ 1/s}$$

$$b_2 = -1,45 \pm 0,66$$

$$S_2 = (5,3 \pm 1,0) \text{ l/s}$$

4.3.2 Leckratenmessung

Die folgenden Tabellen 4, 5, 6 und 7 zeigen die Messwerte zur Leckratenmessung der Turbomolekularpumpe.

p / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$(5,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0
$(8,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-5}$	0,32	0,66	0,39	$0,46 \pm 0,11$
$(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$	1,71	1,83	1,65	$1,73 \pm 0,06$
$(4,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-4}$	5,91	6,02	6,40	$6,11 \pm 0,15$
$(8,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-4}$	13,05	13,14	14,02	$13,40 \pm 0,31$
$(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	34,01	34,50	36,37	$34,96 \pm 0,77$
$(4,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	61,18	62,18	66,18	$63,18 \pm 1,53$

Tabelle 4: Gleichgewichtsdruck bei $p_G = (5,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$.

p / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$(10 \pm 1) \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0
$(3,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$	1,22	0,96	0,70	$0,96 \pm 0,16$
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$	3,00	2,77	2,69	$2,82 \pm 0,10$
$(9,0 \pm 0,9) \cdot 10^{-4}$	4,85	4,56	4,47	$4,63 \pm 0,12$
$(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	10,88	10,78	11,30	$11,00 \pm 0,14$
$(4,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	20,09	20,00	19,61	$19,90 \pm 0,15$
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-3}$	28,26	27,78	27,36	$27,80 \pm 0,26$

Tabelle 5: Gleichgewichtsdruck bei $p_G = (1,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$.

p / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$(1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0
$(3,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$	0,57	0,40	0,40	$0,46 \pm 0,06$
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$	1,27	1,36	1,40	$1,34 \pm 0,04$
$(9,0 \pm 0,9) \cdot 10^{-4}$	2,71	2,55	2,48	$2,58 \pm 0,07$
$(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	6,70	6,31	6,22	$6,41 \pm 0,15$
$(4,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	12,30	11,94	11,89	$12,04 \pm 0,13$
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-3}$	17,37	17,31	17,10	$17,26 \pm 0,08$

Tabelle 6: Gleichgewichtsdruck bei $p_G = (1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$.

p / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0
$(5,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-4}$	0,64	0,82	0,74	$0,73 \pm 0,06$
$(8,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-4}$	1,57	1,83	1,65	$1,68 \pm 0,08$
$(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	4,76	4,69	5,04	$4,83 \pm 0,11$
$(4,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	9,57	9,77	9,71	$9,68 \pm 0,06$
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-3}$	13,67	13,94	13,78	$13,80 \pm 0,08$
$(8,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$	17,50	17,87	17,59	$17,65 \pm 0,12$

Tabelle 7: Gleichgewichtsdruck bei $p_G = (2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$.

Die Daten aus den vorherigen Tabellen sind in den Abbildungen 6, 7, 8 und 9 graphisch dargestellt.

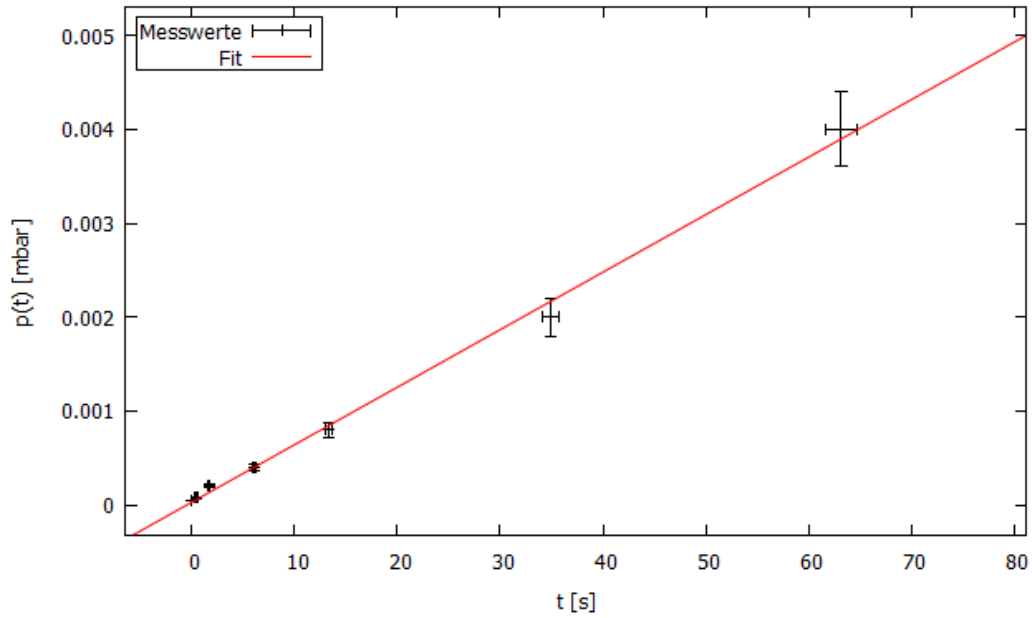


Abbildung 6: Graphische Darstellung der Leckratenmessung der Turbomolekularpumpe für $p_G = (5,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$.

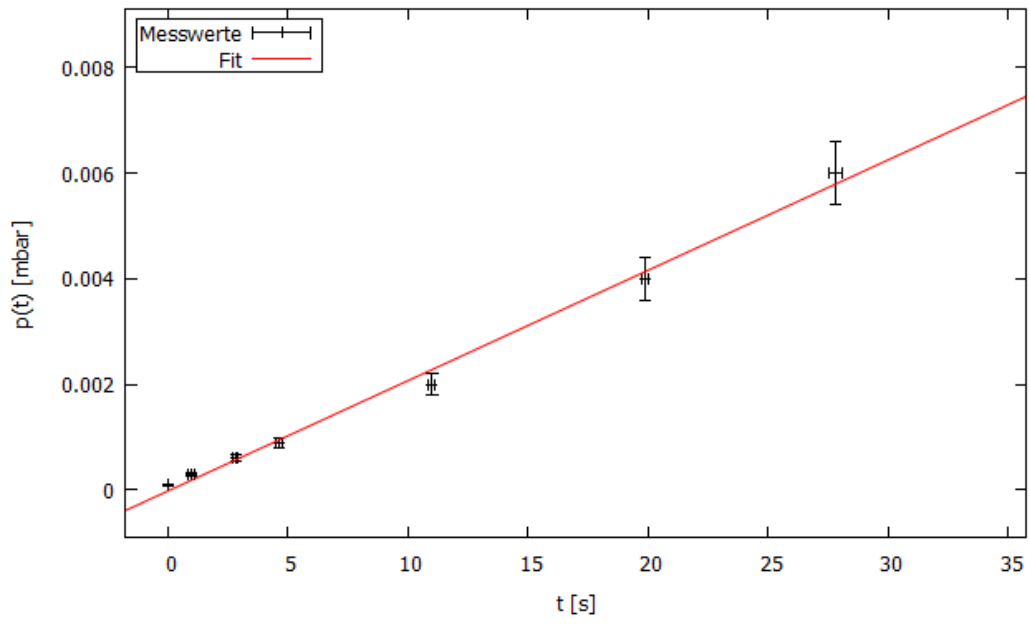


Abbildung 7: Graphische Darstellung der Leckratenmessung der Turbomolekularpumpe für $p_G = (1,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-4}$ mbar.

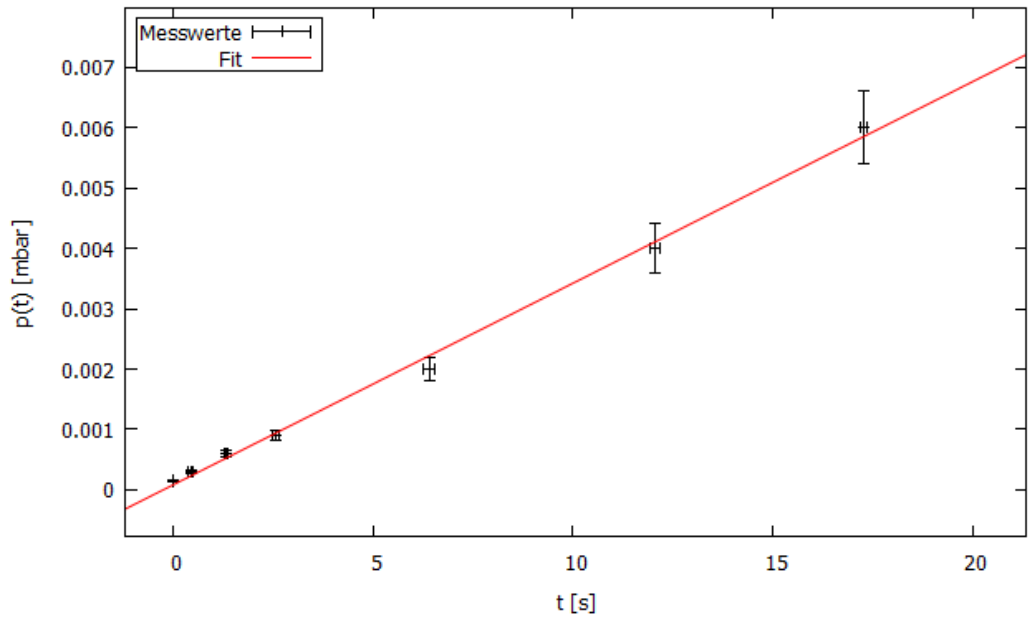


Abbildung 8: Graphische Darstellung der Leckratenmessung der Turbomolekularpumpe für $p_G = (1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$ mbar.

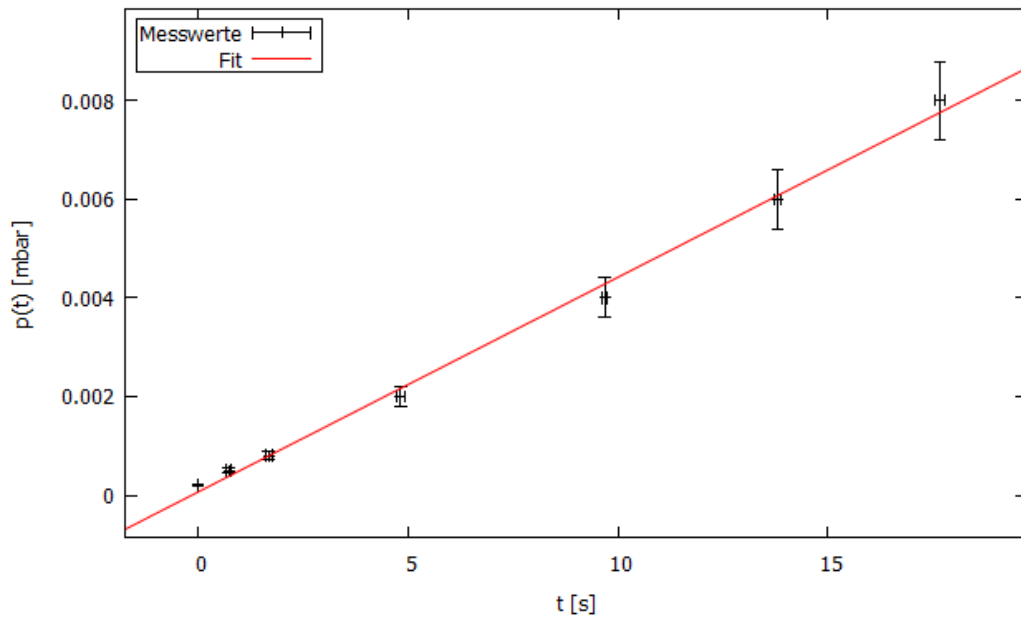


Abbildung 9: Graphische Darstellung der Leckratenmessung der Turbomolekularpumpe für $p_G = (2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$ mbar.

Auch hierfür wurde eine lineare Ausgleichsrechnung der Form

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

durchgeführt. Aus den Zusammenhängen 8 und 9 und dem Steigungsparameter m wird mit $S = \frac{V}{p_G} m$ das Saugvermögen S berechnet.

Abbildung 6:

$$\begin{aligned} p_G &= (5,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \\ m_1 &= (6,13 \pm 0,17) \cdot 10^{-5} \text{ mbar/s} \\ b_1 &= (3 \pm 5) \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \\ S_1 &= (11,0 \pm 1,5) \text{ l/s} \end{aligned}$$

Abbildung 7:

$$\begin{aligned} p_G &= (10 \pm 1) \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \\ m_2 &= (1,86 \pm 0,07) \cdot 10^{-4} \text{ mbar/s} \\ b_2 &= (9,9 \pm 0,8) \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \\ S_2 &= (18,6 \pm 2,5) \text{ l/s} \end{aligned}$$

Abbildung 8:

$$\begin{aligned}
 p_G &= (1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \\
 m_3 &= (3,34 \pm 0,09) \cdot 10^{-4} \text{ mbar/s} \\
 b_3 &= (7,87 \pm 7,30) \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \\
 S_3 &= (29,1 \pm 3,8) \text{ l/s}
 \end{aligned}$$

Abbildung 9:

$$\begin{aligned}
 p_G &= (2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \\
 m_4 &= (4,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-4} \text{ mbar/s} \\
 b_4 &= (0,6 \pm 1,1) \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \\
 S_4 &= (22 \pm 3) \text{ l/s}
 \end{aligned}$$

4.4 Drehschieberpumpe

Ebenso für die Drehschieberpumpe folgt die Auswertung mit anschließendem Vergleich mit der Herstellerangabe[1]:

Drehschieber Pfeiffer Duo 004A mit einem Saugvermögen von 1,1 l/s.

Die folgende Tabelle zeigt die Messwerte zur Bestimmung der Evakuierungskurve.

4.4.1 Evakuierungsmessung

p / 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
(1000 ± 300)	$0 \pm 0,4$	0	0	0	0	0	0
(100 ± 30)	$-(2,3 \pm 0,4)$	18,62	11,59	16,47	15,02	16,43	$15,63 \pm 1,17$
(40 ± 12)	$-(3,2 \pm 0,4)$	35,33	26,49	32,97	34,34	33,50	$32,53 \pm 1,57$
(10 ± 3)	$-(4,6 \pm 0,4)$	49,85	42,19	49,28	48,84	49,01	$47,83 \pm 1,42$
$(6 \pm 1,8)$	$-(5,1 \pm 0,4)$	54,99	46,42	54,25	54,31	54,18	$52,83 \pm 1,61$
$(4 \pm 1,2)$	$-(5,5 \pm 0,4)$	59,42	50,29	57,74	57,65	58,36	$56,69 \pm 1,62$
$(2 \pm 0,6)$	$-(6,2 \pm 0,4)$	65,83	57,38	64,60	64,50	64,79	$63,42 \pm 1,53$
$(1 \pm 0,3)$	$-(6,9 \pm 0,4)$	73,00	64,02	71,62	69,82	71,97	$70,09 \pm 1,80$
$(0,6 \pm 0,18)$	$-(7,5 \pm 0,4)$	79,54	70,73	77,92	77,80	78,18	$76,8 \pm 1,56$
$(0,4 \pm 0,12)$	$-(7,9 \pm 0,4)$	86,35	77,33	85,30	85,24	85,19	$83,9 \pm 1,65$
$(0,2 \pm 0,06)$	$-(8,7 \pm 0,5)$	99,69	90,02	98,98	98,17	98,83	$97,14 \pm 1,80$
$(0,1 \pm 0,03)$	$-(9,7 \pm 0,6)$	111,79	101,65	110,30	111,17	111,87	$109,36 \pm 1,95$
$(0,06 \pm 0,02)$	$-(10,8 \pm 1,2)$	125,13	113,88	128,72	129,62	130,60	$125,59 \pm 3,07$
$(0,04 \pm 0,01)$	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 8: Messwerte für die Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe.

Je nach Druckbereich, wird der Graph unterteilt und gesonderte lineare Fits erstellt. Es folgt die graphische Darstellung der logarithmierten Werte aus Tabelle 8.

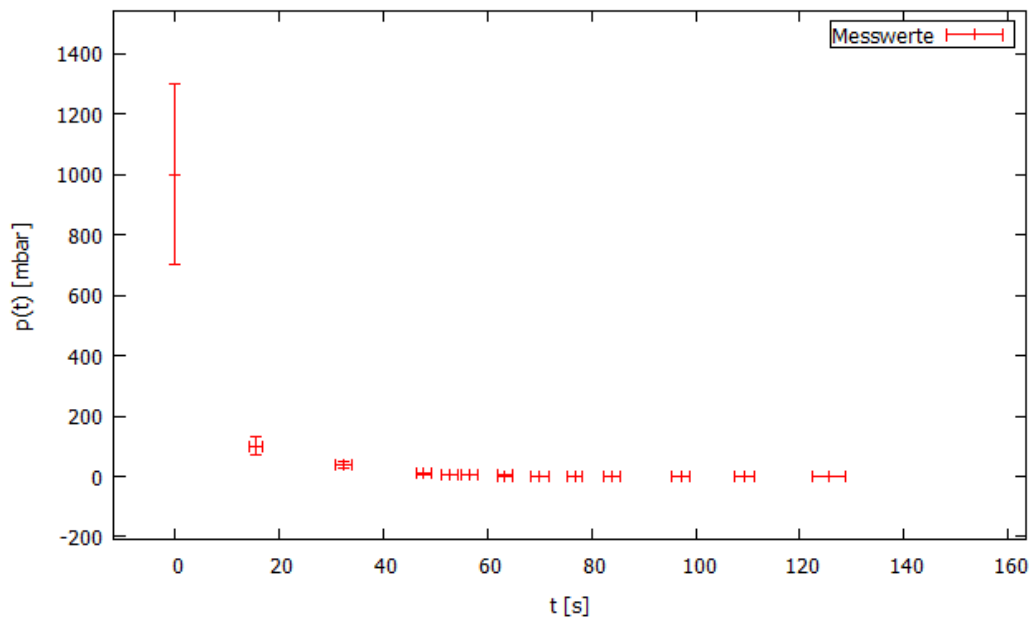


Abbildung 10: Exponentielle Darstellung der Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe.

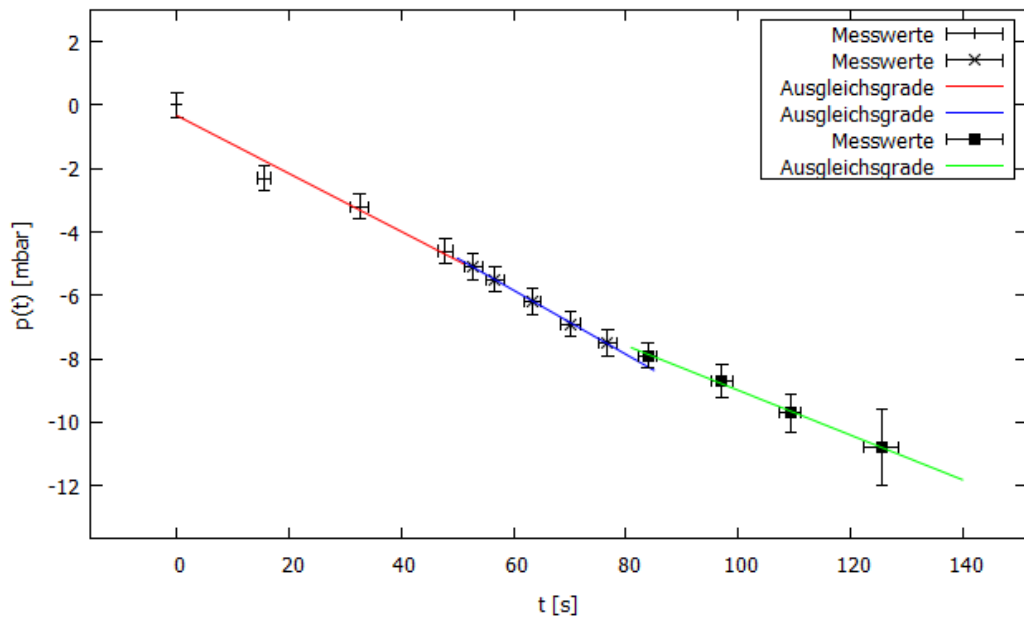


Abbildung 11: Logarithmische Darstellung der Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe.

Für die drei Bereiche wurden lineare Ausgleichsgeraden der Form

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

erstellt.

Durch die Regressionsberechnung ergeben sich folgende Parameter für die drei Bereiche und das daraus durch $S = -mV$ errechnete Saugvermögen:

Bereich 1: $1000 \text{ mbar} \geq p \geq 10 \text{ mbar}$

$$m_1 = -(0,09 \pm 0,02) \text{ l/s}$$

$$b_1 = -0,33 \pm 0,39$$

$$S_1 = (0,98 \pm 0,23) \text{ l/s}$$

Bereich 2: $10 \text{ mbar} \geq p \geq 0,6 \text{ mbar}$

$$m_2 = -(0,100 \pm 0,003) \text{ l/s}$$

$$b_2 = 0,22 \pm 0,11$$

$$S_2 = (1,09 \pm 0,09) \text{ l/s}$$

Bereich 3: $0,6 \text{ mbar} \geq p \geq 0,06 \text{ mbar}$

$$m_3 = -(0,071 \pm 0,003) \text{ l/s}$$

$$b_3 = -(1,93 \pm 0,27)$$

$$S_3 = (0,77 \pm 0,07) \text{ l/s}$$

4.4.2 Leckratenmessung

Ebenso wie für die Turbopumpe auch, folgen zunächst die Messwerttabellen für die Leckratenmessung unter den unterschiedlichen Gleichgewichtsdrücken 9, 10, 11 und 12.

p / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$1,0 \pm 0,3$	0	0	0	0
$2,0 \pm 0,6$	8,53	8,91	8,75	$8,73 \pm 0,12$
$4,0 \pm 1,2$	24,89	22,93	25,06	$24,29 \pm 0,69$
$6,0 \pm 1,8$	40,78	38,00	39,19	$39,32 \pm 0,81$
$10,0 \pm 3,0$	73,05	70,53	71,96	$71,85 \pm 0,73$
$20,0 \pm 6,0$	172,71	148,99	155,35	$159,02 \pm 7,10$

Tabelle 9: Gleichgewichtsdruck bei $p_G = (1,0 \pm 0,1) \text{ mbar}$.

p / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$0,80 \pm 0,24$	0	0	0	0
$1,0 \pm 0,3$	2,34	1,86	1,20	$1,80 \pm 0,34$
$2,0 \pm 0,6$	13,42	12,23	11,76	$12,47 \pm 0,50$
$4,0 \pm 1,2$	32,99	31,52	32,01	$32,17 \pm 0,44$
$6,0 \pm 1,8$	50,15	50,65	49,51	$50,10 \pm 0,33$
$10,0 \pm 3,0$	88,14	90,21	90,73	$89,69 \pm 0,80$

Tabelle 10: Gleichgewichtsdruck bei $p_G = (0,80 \pm 0,08) \text{ mbar}$.

p / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$0,40 \pm 0,12$	0	0	0	0
$0,60 \pm 0,18$	4,26	4,72	4,45	$4,48 \pm 0,14$
$1,0 \pm 0,3$	16,84	17,05	17,29	$17,06 \pm 0,13$
$2,0 \pm 0,6$	45,09	43,40	44,21	$44,23 \pm 0,49$
$4,0 \pm 1,2$	93,98	90,09	90,21	$91,43 \pm 1,28$
$6,0 \pm 1,8$	132,43	131,15	133,37	$132,32 \pm 0,65$

Tabelle 11: Gleichgewichtsdruck bei $p_G = (0,40 \pm 0,04) \text{ mbar}$.

p / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$0,10 \pm 0,03$	0	0	0	0
$0,15 \pm 0,05$	1,91	1,99	1,52	$(1,81 \pm 0,15)$
$0,20 \pm 0,06$	7,70	8,64	8,67	$(8,34 \pm 0,32)$
$0,30 \pm 0,09$	18,89	21,62	19,79	$(20,10 \pm 0,81)$
$0,40 \pm 0,12$	45,77	46,39	43,27	$(45,14 \pm 0,96)$
$0,60 \pm 0,18$	95,86	92,23	94,75	$(94,28 \pm 1,08)$

Tabelle 12: Gleichgewichtsdruck bei $p_G = (0,10 \pm 0,01) \text{ mbar}$.

Anschließend lassen sich die graphischen Darstellungen in den Abbildungen 12, 13, 14 und 15 finden.

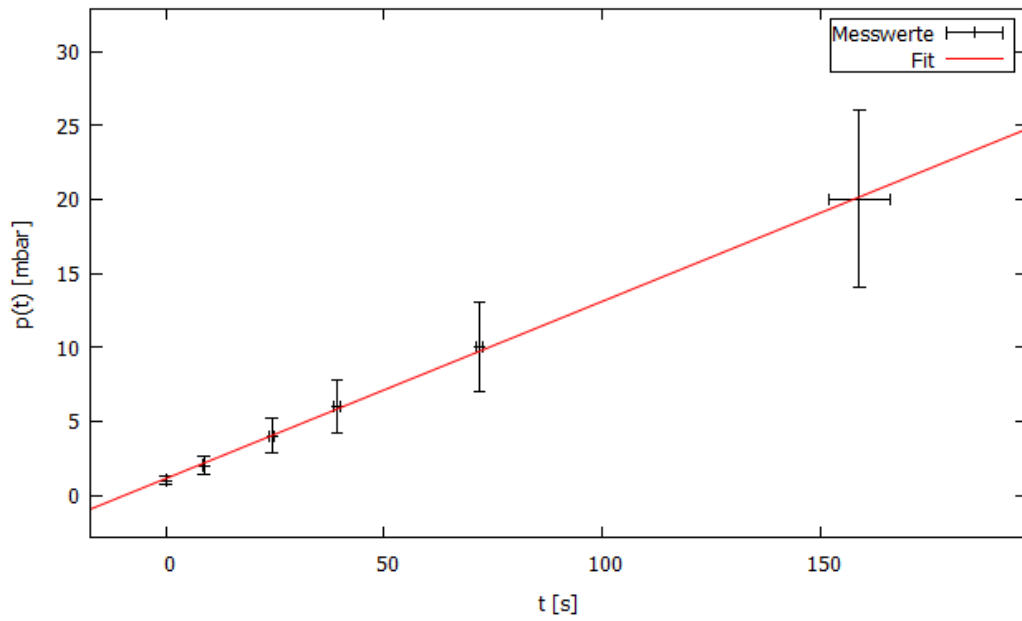


Abbildung 12: Graphische Darstellung der Leckratenmessung der Drehschieberpumpe für $p_G = (1,0 \pm 0,3)$ mbar.

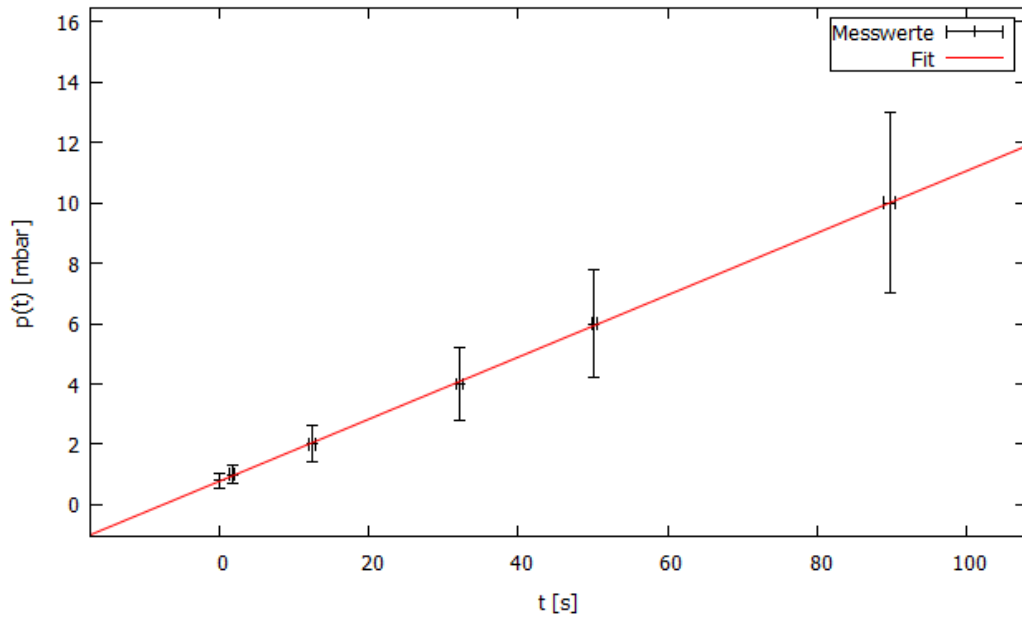


Abbildung 13: Graphische Darstellung der Leckratenmessung der Drehschieberpumpe für $p_G = (0,80 \pm 0,24)$ mbar.

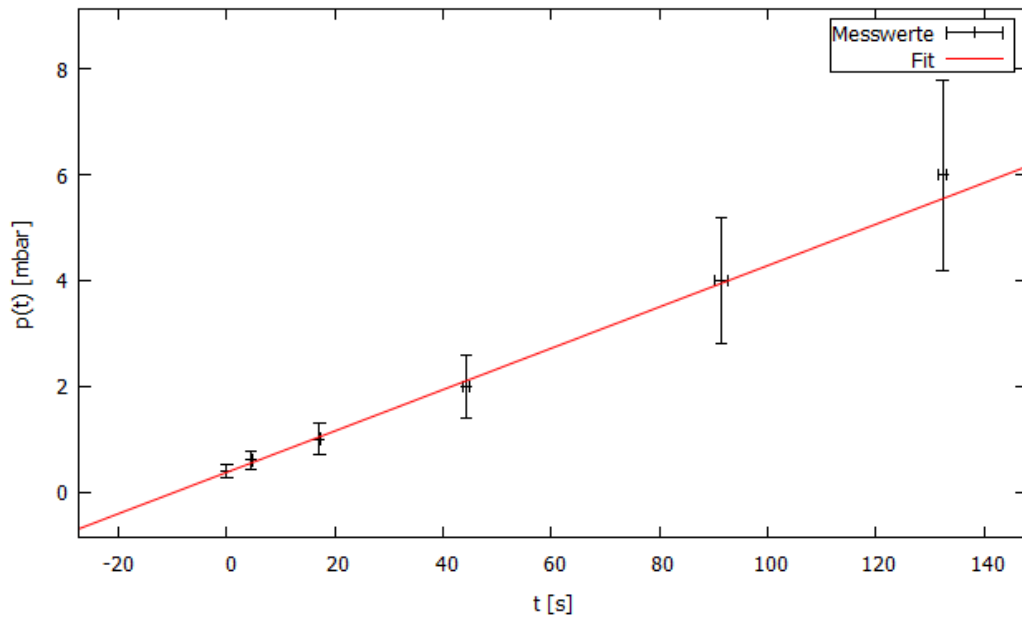


Abbildung 14: Graphische Darstellung der Leckratenmessung der Drehschieberpumpe für $p_G = (0, 40 \pm 0, 12)$ mbar.

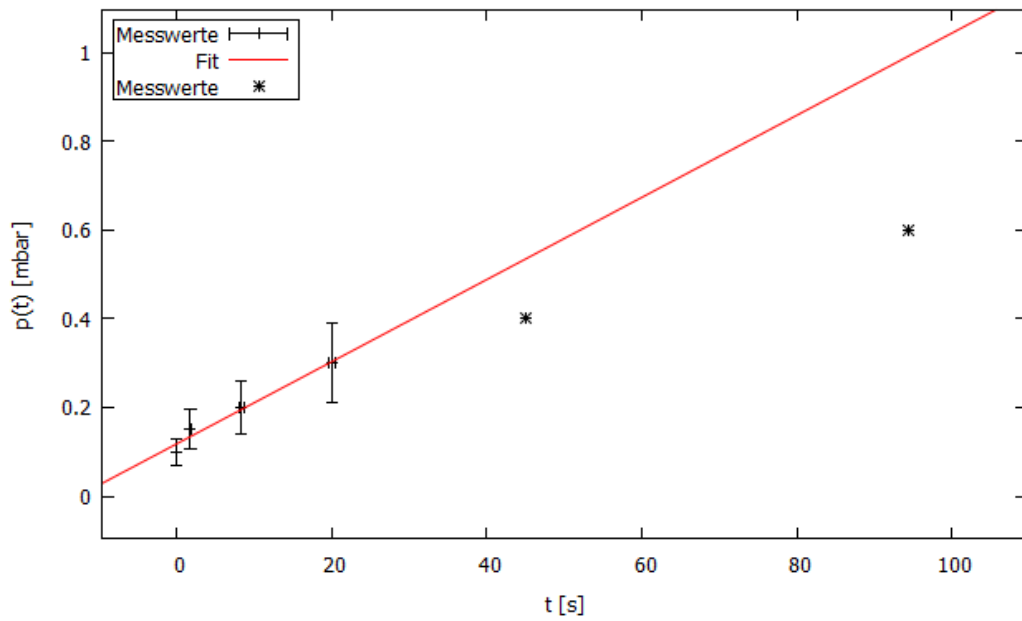


Abbildung 15: Graphische Darstellung der Leckratenmessung der Drehschieberpumpe für $p_G = (0, 10 \pm 0, 03)$ mbar.

Die Regressionsgeraden besitzen dieselbe lineare Form wie bei der Leckratenmessung der Turbopumpe auch und so lässt sich ebenso das Saugvermögen aus dem Steigungsparameter m und dem Volumen V mit $S = \frac{V}{p_G} m$ unter den verschiedenen Gleichgewichtsdrücken p_G berechnen.

Abbildung 12:

$$\begin{aligned} p_G &= (1,0 \pm 0,3) \text{ mbar} \\ m_1 &= (0,12 \pm 0,002) \text{ mbar/s} \\ b_1 &= (1,12 \pm 0,002) \text{ mbar} \\ S_1 &= (1,31 \pm 0,41) \text{ l/s} \end{aligned}$$

Abbildung 13:

$$\begin{aligned} p_G &= (0,80 \pm 0,24) \text{ mbar} \\ m_2 &= (0,103 \pm 0,001) \text{ mbar/s} \\ b_2 &= (0,77 \pm 0,04) \text{ mbar} \\ S_2 &= (1,36 \pm 0,44) \text{ l/s} \end{aligned}$$

Abbildung 14:

$$\begin{aligned} p_G &= (0,40 \pm 0,12) \text{ mbar} \\ m_3 &= (0,0418 \pm 0,0013) \text{ mbar/s} \\ b_3 &= (0,31 \pm 0,08) \text{ mbar} \\ S_3 &= (1,09 \pm 0,36) \text{ l/s} \end{aligned}$$

Für die Berechnung der Ausgleichsfunktion sind die Messwerte für den Druck bei 0,4 mbar und 0,6 mbar ausgelassen worden. Dies geschieht aufgrund dessen, dass wegen der hohen Abweichung zu der erwarteten Linearität vermutet wird, dass dies am Verhalten des virtuellen Pumpens liegt.

Abbildung 15:

$$\begin{aligned} p_G &= (0,10 \pm 0,03) \text{ mbar} \\ m_4 &= (0,009 \pm 0,002) \text{ mbar/s} \\ b_4 &= (0,12 \pm 0,02) \text{ mbar} \\ S_4 &= (0,98 \pm 0,33) \text{ l/s} \end{aligned}$$

5 Diskussion

Im Generellen zeigen die linearen Plots 5 und 11 und die aus den Regressionen ermittelten Saugvermögen, dass dieses druckabhängig ist. Im Vergleich zu den gegebenen Herstellerangaben von 77 l/s weist die Turbomolekularpumpe auf jedem Druckintervall eine deutliche Abweichung auf. Dies lässt sich unter anderem dadurch erklären, dass die Verbindung der Pumpe mit dem Rezipienten über ein Rohr erfolgt, welches einen kleineren Durchmesser hat, wodurch der Strömungswiderstand erhöht wird. Des Weiteren ist zu bedenken, dass der genutzte Rezipient ein zu geringes Volumen für die genutzte Pumpleistung besitzt. Dies verursacht eine starke Wechselwirkung der Gasmoleküle mit der Oberfläche des Rezipienten. Eine zusätzliche Fehlerquelle liegt darin, dass auch bei gründlicher Erhitzung des Rezipienten stets Desorptionseffekte eintreten. Auch beim händischen Schließen der Ventile kann nicht garantiert werden, dass dies zeitgleich passiert ist. Bei der Drehschieberpumpe hingegen stimmen die Messergebnisse innerhalb der Messungenauigkeit mit der Herstellerangabe von 1,1 l/s überein. Das Ablesen der Messgeräte und das Stoppen erfolgte fast zeitgleich, sodass schon während der Messung große Abweichungen aufgefallen sind. Eine Automatisierung der Zeitnahme und ein gesichertes genaues Ablesen der Skala, gerade auf der logarithmischen, würde die gesamten Messungen präzisieren. Ebenso wäre es förderlich, keine Verengung der Rohre einzubauen, da dies bereits in kleinem Maße große Auswirkungen auf das Saugvermögen hat.

Bei der Untersuchung der Drehschieberpumpe per Leckratenmessung fallen für $p_G = (0,10 \pm 0,03)$ mbar starke Abweichungen auf, welche durch virtuelles Pumpen entstanden sind. Diese Messwerte wurden für die Ausgleichsrechnung ausgelassen.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch 606*. URL: <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V606.pdf> (besucht am 21.04.2018).
- [2] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [3] 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/>.
- [4] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [5] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [6] Pfeiffer-Vacuum. *Drehschiebervakuumumpfen*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/einf-hrung-in-die-vakuumtechnik/grundlagen/str-mungsarten/> (besucht am 26.04.2018).

- [7] Pfeiffer-Vacuum. *Drehschiebervakuumpumpen*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/einf-hrung-in-die-vakuumtechnik/grundlagen/allgemeine-gasgleichung/> (besucht am 26.04.2018).
- [8] Pfeiffer-Vacuum. *Drehschiebervakuumpumpen*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/vakuumerzeugung/drehschiebervakuumpumpen/> (besucht am 23.04.2018).
- [9] Spektrum. *Reaktionszeit*. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/psychologie/reaktionszeit/12540> (besucht am 21.04.2018).