

Durchführung: 18.04.2018
Abgabe: XX.XX.XXXX

PRAKTIKUMSPROTOKOLL V70

VAKUUMPHYSIK

Anneke Reinold¹,
Paul-Simon Blumenkamp²

¹anneke.reinold@tu-dortmund.de

²paul-simon.blumenkamp@tu-dortmund.de

1 Einleitung

2 Einleitung

3 Theorie

3.1 Vakuum

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 / mbar	freie Weglänge [m]	Strömungsmechanismus
Großvakuum	1000 - 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. Eben 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.

3.2 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 und Großvakuum gesprochen. Hierbei kommt es vermehrt zum Zusammenstoßen der Teilchen im Gas untereinander. Die mittlere freie Weglänge ist kleiner als die Abmessung der 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. 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.

3.3 Ideales Gas

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.

3.4 Vakuumtechnik

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

3.4.1 Drehschieberpumpe

Eine schematische Darstellung der Drehschieberpumpe ist in Abb.1 dargestellt. Im Betrieb erzeugt der Rotor zusammen mit den Schiebern einen expandierenden Raum. Durch den so entstehenden Unterdruck wird das Gas in Arbeitsraum gesogen, bis der zweite Schieber das Einlassventil verschließt. Nun wird durch die Rotation der Raum wieder verkleinert und das Gas muss durch das Auslassventil entweichen.

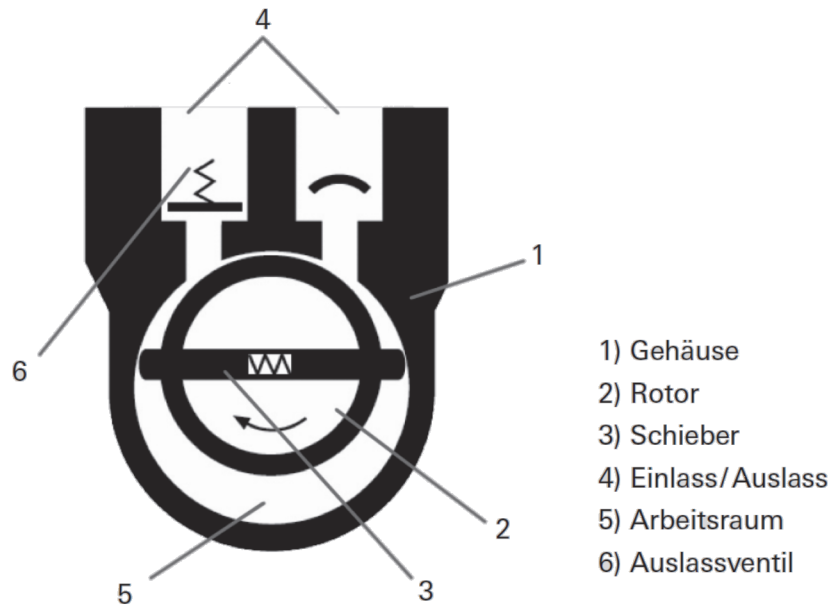


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Drehschieberpumpe.[6]

3.4.2 Turbomolekularpumpe

Die Turbomolekularpumpe besteht aus vielen beschauften Rotoren in einem zylinderförmigen Gehäuse. Die Gasmoleküle treffen auf die rotierenden Fläche 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 Vakuum werden im Verlauf des Versuchs drei unterschiedliche Messgeräte genutzt welche hier beschrieben werden.

3.4.3 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.

3.4.4 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.

4 Durchführung

4.1 Versuchsaufbau

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

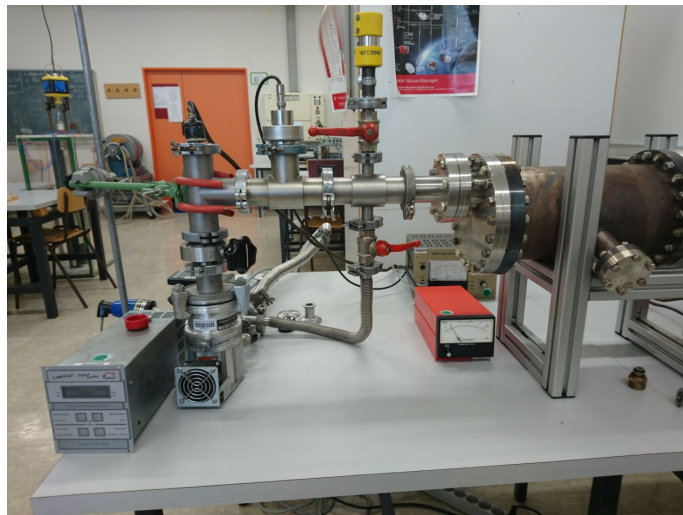


Abbildung 2: Frontansicht des Versuchsaufbaus.

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

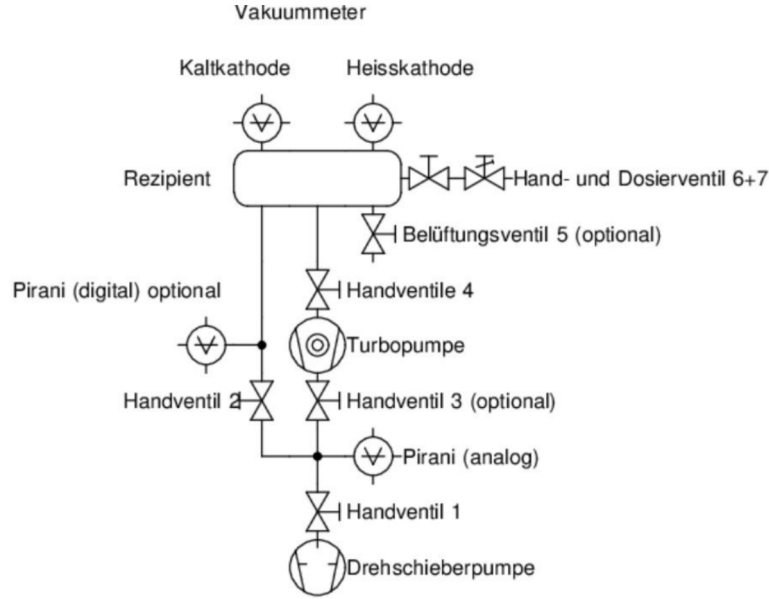


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.[1]

5 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.

5.1 Fehlerrechnung

Zu Beginn der Auswertung sei gesagt, dass eine Ungenauigkeit von 30 % des analogen zum digitalen Glühkathodenvakuummessgeräts bei der Messung festgestellt wurde und im Folgenden berücksichtigt wurde. Auch muss erwähnt werden, dass die Zeitmessung mit einer Handstoppuhr erfolgte und eine durch menschliche Reaktion verursachte Verzögerung von 180 ms beachtet wird.[7] In den nachfolgenden Messwerttabellen sind die Abweichungen schon miteingerechnet.

Die Mittelwerte werden nach

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i^N x_i \quad (5)$$

und deren Standardabweichung mit

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_i^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

berechnet.

5.2 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 ALLGEMEIN!!!. Es ergeben sich

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

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

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

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

5.3 Turbomolekularpumpe

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

5.3.1 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
$(8,05 \pm 0,81) \cdot 10^{-3}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-3}$	$-(0,29 \pm 0,14)$	0,44	0,87	0,78	0,70	0,79	0,87	0,78	0,83	$0,76 \pm 0,05$
$(3,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$	$-(0,98 \pm 0,14)$	0,74	1,40	1,21	1,09	1,35	1,43	1,41	1,62	$1,28 \pm 0,10$
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$	$-(2,62 \pm 0,14)$	2,82	3,13	2,82	3,00	3,10	3,20	3,09	2,79	$3,00 \pm 0,06$
$(3,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$	$-(3,34 \pm 0,15)$	4,01	4,04	3,99	3,87	3,93	4,02	3,93	4,03	$3,94 \pm 0,04$
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-5}$	$-(5,20 \pm 0,18)$	6,52	6,86	6,61	7,04	6,44	6,72	6,71	6,70	$6,60 \pm 0,10$
$(3,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$	$-(6,35 \pm 0,28)$	10,14	10,03	10,00	9,44	10,29	9,42	9,06	8,94	$9,67 \pm 0,20$
$(1,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3: Messwerte für die Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe.

5.3.2 Leckratenmessung

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	$0,46 \pm 0,08$
$(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$	1,71	1,83	1,65	$1,73 \pm 0,04$
$(4,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-4}$	5,91	6,02	6,40	$6,11 \pm 0,12$
$(8,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-4}$	13,05	13,14	14,02	$13,40 \pm 0,25$
$(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	34,01	34,50	36,37	$35,96 \pm 0,59$
$(4,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	61,18	62,18	66,18	$63,18 \pm 1,25$

Tabelle 4: Gleichgewichtsdruck $(5,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-5}$ bar

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	$0,96 \pm 0,06$
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$	3,00	2,77	2,69	$2,82 \pm 0,08$
$(9,0 \pm 0,9) \cdot 10^{-4}$	4,85	4,56	4,47	$4,63 \pm 0,10$
$(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	10,88	10,78	11,30	$11,00 \pm 0,13$
$(4,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	20,09	20,00	19,61	$19,90 \pm 0,12$
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-3}$	28,26	27,78	27,36	$27,80 \pm 0,21$

Tabelle 5: Gleichgewichtsdruck $(10 \pm 1) \cdot 10^{-5}$

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	$0,46 \pm 0,05$
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$	1,27	1,36	1,40	$1,34 \pm 0,03$
$(9,0 \pm 0,9) \cdot 10^{-4}$	2,71	2,55	2,48	$2,58 \pm 0,06$
$(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	6,70	6,31	6,22	$6,41 \pm 0,12$
$(4,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	12,30	11,94	11,89	$12,04 \pm 0,11$
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-3}$	17,37	17,31	17,10	$17,26 \pm 0,07$

Tabelle 6: Gleichgewichtsdruck $(1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$

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	$0,73 \pm 0,04$
$(8,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-4}$	1,57	1,83	1,65	$1,68 \pm 0,06$
$(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	4,76	4,69	5,04	$4,83 \pm 0,09$
$(4,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	9,57	9,77	9,71	$9,68 \pm 0,05$
$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-3}$	13,67	13,94	13,78	$13,80 \pm 0,06$
$(8,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$	17,50	17,87	17,59	$17,65 \pm 0,09$

Tabelle 7: Gleichgewichtsdruck $(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$

5.4 Drehschieberpumpe

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

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

5.4.1 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 \pm 300)	1	0	0	0	0	0	0
(100 \pm 30)	-(2,3 \pm 0,4)	18,62	11,59	16,47	15,02	16,43	15,63 \pm 1,04
(40 \pm 12)	-(3,2 \pm 0,4)	35,33	26,49	32,97	34,34	33,50	32,53 \pm 1,40
(10 \pm 3)	-(4,6 \pm 0,4)	49,85	42,19	49,28	48,84	49,01	47,83 \pm 1,27
(6 \pm 1,8)	-(5,1 \pm 0,4)	54,99	46,42	54,25	54,31	54,18	52,83 \pm 1,44
(4 \pm 1,2)	-(5,5 \pm 0,4)	59,42	50,29	57,74	57,65	58,36	56,69 \pm 1,46
(2 \pm 0,6)	-(6,2 \pm 0,4)	65,83	57,38	64,60	64,50	64,79	63,42 \pm 1,37
(1 \pm 0,3)	-(6,9 \pm 0,4)	73,00	64,02	71,62	69,82	71,97	70,09 \pm 1,43
(0,6 \pm 0,18)	-(7,5 \pm 0,4)	79,54	70,73	77,92	77,80	78,18	76,8 \pm 1,4
(0,4 \pm 0,12)	-(7,9 \pm 0,4)	86,35	77,33	85,30	85,24	85,19	83,9 \pm 1,5
(0,2 \pm 0,06)	-(8,7 \pm 0,5)	99,69	90,02	98,98	98,17	98,83	97,14 \pm 1,61
(0,1 \pm 0,03)	-(9,7 \pm 0,6)	111,79	101,65	110,30	111,17	111,87	109,36 \pm 1,74
(0,06 \pm 0,02)	-(10,8 \pm 1,2)	125,13	113,88	128,72	129,62	130,60	125,59 \pm 2,75
(0,04 \pm 0,01)	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 8: Messwerte für die Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe.

5.4.2 Leckratenmessung

p / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
1,0 \pm 0,1	0	0	0	0
2,0 \pm 0,2	8,53	8,91	8,75	8,73 \pm 0,09
4,0 \pm 0,4	24,89	22,93	25,06	24,29 \pm 0,56
6,0 \pm 0,6	40,78	38,00	39,19	39,32 \pm 0,66
10,0 \pm 0,1	73,05	70,53	71,96	71,85 \pm 0,60
20,0 \pm 0,2	172,71	148,99	155,35	159,02 \pm 5,79

Tabelle 9: Gleichgewichtsdruck 1,0 \pm 0,1

p / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
0,80 \pm 0,08	0	0	0	0
1,0 \pm 0,1	2,34	1,86	1,20	1,80 \pm 0,27
2,0 \pm 0,2	13,42	12,23	11,76	12,47 \pm 0,40
4,0 \pm 0,4	32,99	31,52	32,01	32,17 \pm 0,35
6,0 \pm 0,6	50,15	50,65	49,51	50,10 \pm 0,27
10,0 \pm 0,1	88,14	90,21	90,73	89,69 \pm 0,65

Tabelle 10: Gleichgewichtsdruck 0,80 \pm 0,08

p / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$0,40 \pm 0,04$	0	0	0	0
$0,60 \pm 0,06$	4,26	4,72	4,45	$4,48 \pm 0,11$
$1,0 \pm 0,1$	16,84	17,05	17,29	$17,06 \pm 0,11$
$2,0 \pm 0,2$	45,09	43,40	44,21	$44,23 \pm 0,40$
$4,0 \pm 0,4$	93,98	90,09	90,21	$91,43 \pm 1,04$
$6,0 \pm 0,6$	132,43	131,15	133,37	$132,32 \pm 0,53$

Tabelle 11: Gleichgewichtsdruck $0,40 \pm 0,04$

p / mbar	t_1 / s	t_2 / s	t_3 / s	\bar{t} / s
$0,10 \pm 0,01$	0	0	0	0
$0,15 \pm 0,02$	1,91	1,99	1,52	$(5,42 \pm 0,12)$
$0,20 \pm 0,02$	7,70	8,64	8,67	$(8,34 \pm 0,26)$
$0,30 \pm 0,03$	18,89	21,62	19,79	$(20,10 \pm 0,66)$
$0,40 \pm 0,04$	45,77	46,39	43,27	$(45,14 \pm 0,78)$
$0,60 \pm 0,06$	95,86	92,23	94,75	$(94,28 \pm 0,88)$

Tabelle 12: Gleichgewichtsdruck $0,10 \pm 0,01$

6 Diskussion

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. *Drehschiebervakuumpumpen*. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/vakuumerzeugung/drehschiebervakuumpumpen/> (besucht am 23.04.2018).
- [7] Spektrum. *Reaktionszeit*. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/psychologie/reaktionszeit/12540> (besucht am 21.04.2018).