

Auswertung: Vakuum

Christine Dörflinger (*christinedoerflinger@gmail.com*)

Frederik Mayer (*fmayer163@gmail.com*)

Gruppe Do-9

17. November 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Gasentladung in Abhängigkeit vom Druck	3
2	Leitwert eines Metallrohrs	3
2.1	Vorbemerkung: Volumina	3
2.2	Leitwert berechnen	3
2.3	Tabellarische Übersicht	4
3	Saugvermögen der Drehschieberpumpe	6
4	Bestimmung des Saugvermögens der Turbomolekularpumpe	6
5	Statisches Kalibrierungsverfahren	8
6	Bestimmung der elektrischen Durchschlagfestigkeit im Vakuum	10
7	Aufdampfen einer Indium-Schicht auf eine Plexiglasscheibe durch eine Kreisblende	12
8	Vorbereiten der Apparatur für die Nachfolger	12

Bem: Versuche wurden an Apparatur Nummer 41 durchgeführt

1 Gasentladung in Abhängigkeit vom Druck

In diesem Versuch sollte eine Gasentladung in Abhängigkeit vom Druck beobachtet werden. Dazu wurde die Gasentladungsröhre mit der Drehschieberpumpe evakuiert. Es lag eine konstante Hochspannung an der Gasentladungsröhre an.

Bei hohen Drücken war zunächst keine Entladung zu sehen. Dies liegt daran, dass die mittlere freie Weglänge bei hohen Drücken sehr klein ist. Damit können Elektronen nur sehr kurze Strecken zurücklegen, ohne mit anderen Teilchen zu stoßen und damit Energie abzugeben. Die zur Ionisation von anderen Teilchen erforderliche kinetische Energie wird in diesem Fall nicht erreicht und es kommt zu keiner Entladung. Senkten wir den Druck ab, so sahen wir zunächst ein kontinuierliches Leuchten. Bei weiterer Absenkung des Drucks sah man nun einen leuchtenden 'Strahl', der aber ungleichmäßig hell war: In bestimmten Abständen war er deutlich heller (und erschien damit auch dicker). Die Abstände der hellen Stellen entsprechen in diesem Fall genau der mittleren freien Weglänge. In diesen Bereichen stoßen im Mittel am meisten Elektronen mit anderen Teilchen und ionisieren sie. Das zunächst auftretende kontinuierliche Leuchten lässt sich also dadurch erklären, dass die mittlere freie Weglänge bei hohen Drücken sehr klein ist, damit sind die hellen Stellen nicht voneinander unterscheidbar.

Erhöhte man den Druck weiter, so war kein Leuchten mehr zu sehen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass in diesem Fall die mittlere freie Weglänge so groß ist, dass es nur noch sehr unwahrscheinlich ist (sehr geringe Teilchendichte), dass Elektronen überhaupt mit anderen Teilchen wechselwirken, bevor sie die Anode erreichen.

2 Leitwert eines Metallrohrs

Hier wurde der zeitliche Druckverlauf an den Messstellen T1 (p_1) und T2 (p_2) aufgenommen.

2.1 Vorbemerkung: Volumina

Bevor wir den Leitwert bestimmen können, muss erst das verwendete Volumen berechnet werden.

Für die Volumina gilt laut Aufgabenblatt für Apparatur 41:

- Referenzvolumen: $V_{\text{ref}} = 0.034 \text{ l}$
- Volumen des Rezipienten: $V_{\text{rez}} = 10.1 \text{ l}$
- Gesamtvolumen: $V_{\text{ges}} = 10.6 \text{ l}$

Das Volumen des Schlauchs und des Metallrohrs verwenden wir:

$$V_i = \pi \cdot \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 \cdot l_i \quad (1)$$

- Für den Schlauch ($l_{\text{Schl}} = 0.51 \text{ m}$, $d_{\text{Schl}} = 0.028 \text{ m}$): $V_{\text{Schl}} = 0.314 \text{ l}$
- Für das Rohr ($l_{\text{Rohr}} = 0.51 \text{ m}$, $d_{\text{Rohr}} = 0.002 \text{ m}$): $V_{\text{Rohr}} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ l}$

Daraus erhalten wir das verwendete Volumen:

$$V = V_{\text{ges}} + V_{\text{Rohr}} - V_{\text{Schl}} \approx 10.3 \text{ l} \quad (2)$$

2.2 Leitwert berechnen

Aus der Vorbereitung (siehe Aufgabe 3) wird verwendet:

$$\ln(p) = -\frac{S}{V}t + \frac{S}{V}(t_0) + \ln(p_0) \quad (3)$$

Mit linearer Regression über die logarithmisch aufgetragenen Messwerte p_i konnten die Steigungen dieser Geradengleichung ermittelt werden. Damit lässt sich berechnen:

$$S = -m_1 \cdot V \quad (4)$$

$$S_{\text{eff}} = -m_2 \cdot V \quad (5)$$

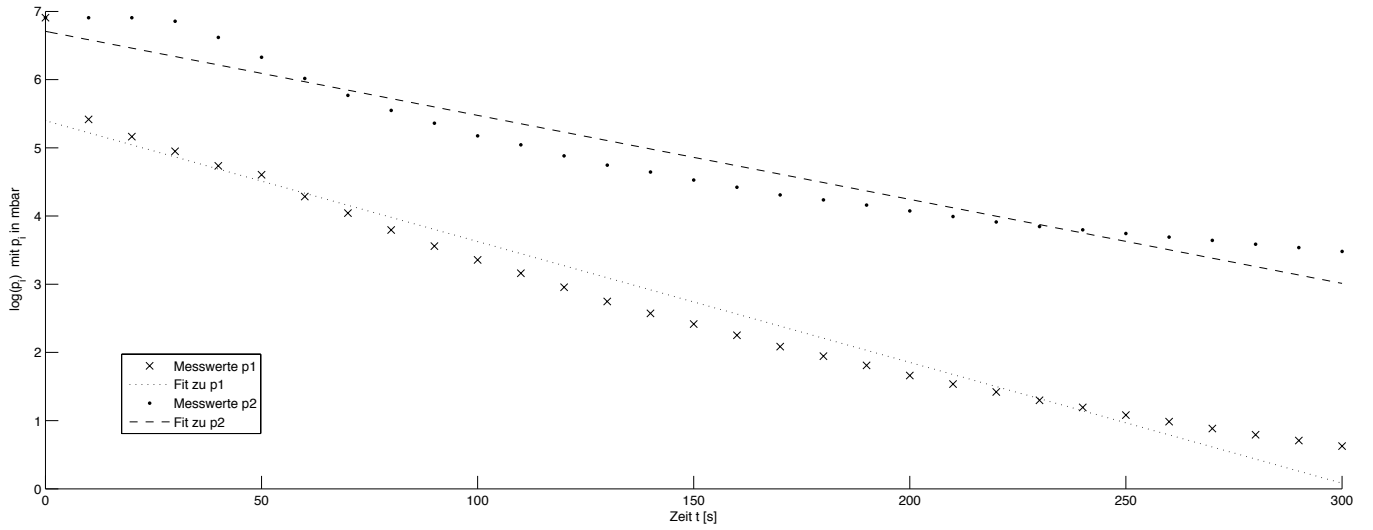


Abbildung 1: Messwerte und Regression zu Aufgabe 2

- $m_1 = -0.01772 \frac{1}{s} \rightarrow S = 0.183 \frac{1}{s}$
- $m_2 = -0.01232 \frac{1}{s} \rightarrow S_{\text{eff}} = 0.127 \frac{1}{s}$

Daraus bestimmen wir den Leitwert mit:

$$\frac{S_{\text{eff}} \cdot S}{S - S_{\text{eff}}} = 0.415 \frac{1}{s} \quad (6)$$

Um einen Vergleichswert L_K zu erhalten verwenden wir die Knudsen-Formel (Vorbereitungsmappe), die den Leitwert mit Durchmesser d und Länge l bei kreisförmigem Querschnitt berechnet. Dabei sei anzumerken, dass die Werte für d und l in [cm] eingesetzt werden:

$$L_K = 145 \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p} + 12.1 \frac{d^3}{l} \frac{1 + 192 \cdot d \cdot \bar{p}}{1 + 237 \cdot d \cdot \bar{p}} \frac{1}{s} \quad (7)$$

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (8)$$

Um auf den Vergleichswert zu kommen wurde ein Mittelwert aus allen Leitwerten für die Messpaare (p_{1i}, p_{2i}) gebildet:

$$\bar{L}_K = 0,695 \frac{1}{s} \quad (9)$$

Unsere beiden Werte liegen zwar in der gleichen Größenordnung, weichen aber um ca. 40% ab. Wie man am Plot sieht sind unsere logarithmisch aufgetragenen Werte nicht linear, was man auf 'undichte' Stellen zurückführen kann. Da diese Linearität nicht gegeben ist, sind sowohl die lineare Regression als auch die Mittelwertbildung für L_K fragwürdig.

2.3 Tabellarische Übersicht

Tabelle 1: Messwerte, Leitwert

t [s]	p_2 [mbar]	p_1 [mbar]	$\bar{p}$ [mbar]	$L_K \left[\frac{1}{s} \right]$
0	1.000,00	1.000,00	1000,000	4,237
10	1.000,00	225,00	612,500	2,596
20	1.000,00	175,00	587,500	2,490
30	950,00	141,00	545,500	2,312
40	750,00	114,00	432,000	1,831
50	560,00	100,00	330,000	1,399
60	410,00	72,70	241,350	1,024
70	320,00	57,00	188,500	0,800
80	257,00	44,50	150,750	0,640
90	213,00	35,10	124,050	0,527
100	177,00	28,70	102,850	0,437
110	155,00	23,60	89,300	0,380
120	132,00	19,20	75,600	0,322
130	115,00	15,60	65,300	0,278
140	104,00	13,10	58,550	0,250
150	92,40	11,20	51,800	0,221
160	83,30	9,50	46,400	0,198
170	74,50	8,05	41,275	0,176
180	69,20	7,00	38,100	0,163
190	64,10	6,11	35,105	0,150
200	58,80	5,27	32,035	0,137
210	54,20	4,65	29,425	0,126
220	50,00	4,14	27,070	0,116
230	46,80	3,66	25,230	0,108
240	44,60	3,30	23,950	0,103
250	42,20	2,95	22,575	0,097
260	40,10	2,68	21,390	0,092
270	38,20	2,42	20,310	0,088
280	36,10	2,21	19,155	0,083
290	34,40	2,03	18,215	0,079
300	32,50	1,87	17,185	0,074
$\bar{L}_K:$				0,695

3 Saugvermögen der Drehschieberpumpe

Hier sollte das Saugvermögen der Drehschieberpumpe bestimmt werden. Dazu wurde der Druck in Abhängigkeit von der Zeit notiert.

Da wir hier wieder den Schlauch verwendet haben, betrachten wir hier $V_{\text{ges}} = 10.6 \text{ l}$

Aus der in der Vorbereitungshilfe hergeleiteten Formel berechnen wir $S(p)$:

$$S(p) = -V \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \cdot \frac{1}{t} \quad (10)$$

Wobei wir aus dem ersten Messwertepaar erhalten: $p_0 = p(t = 0) = 1000 \text{ mbar}$.

Um die mittlere Saugleistung $\bar{S}$ zu bestimmen wurde im linearen Bereich des Plots (p logarithmisch aufgetragen) eine Gerade angepasst.

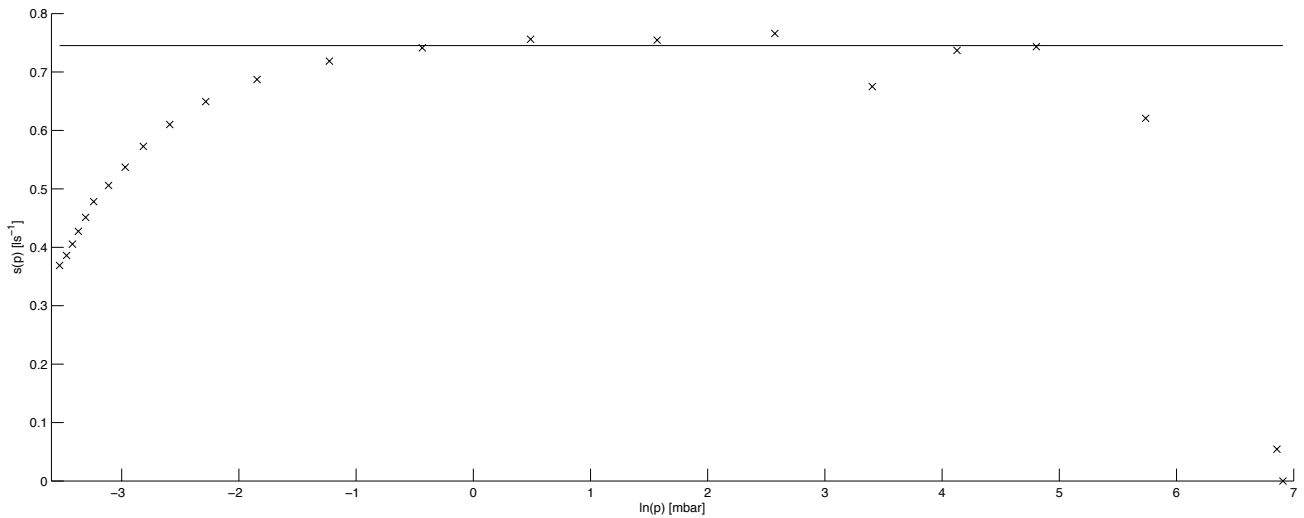


Abbildung 2: Messwerte und Regression zu Aufgabe 3

Die mittlere Saugleistung ergibt sich dann zu:

$$\bar{S}_{\text{mess}} = 0.7452 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0.7452 \cdot 3.6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \approx 2.68 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (11)$$

Für die verwendete Drehschieberpumpe ist ein Nennsaugvermögen von $S_{\text{theo}} = 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ angegeben. Somit liegt unser Messwert um ca. 6.7% darüber. Auffallend ist, dass unser Messwert nicht unter dem Nennwert liegt. Wir hätten eigentlich vermutet, dass die messbare Saugleistung niedriger ist, da die Apparatur sicherlich 'undichte Stellen' aufweist. Möglicherweise wurde die Pumpe ausgetauscht und der Nennwert in der Versuchsbeschreibung ist nicht aktuell.

4 Bestimmung des Saugvermögens der Turbomolekularpumpe

Nun wurde die Turbomolekularpumpe bei laufender Drehschieberpumpe zugeschaltet. Wieder wurde der Druck in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. Es ergaben sich folgende Werte:

Das Saugvermögen kann mit der Formel

$$S(p) = -V \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \cdot \frac{1}{t} \quad (12)$$

berechnet werden. Stellt man die Formel um, erhält man

$$\ln(p) = -\frac{S(p)}{V}t + \ln(p_0). \quad (13)$$

Nun erstellten wir ein $\ln(p)$ -t-Schaubild.

Tabelle 2: Messwerte: Druck in Abhängigkeit von der Zeit

t in s	p(IM) in mbar	t in s	p(IM) in mbar
0	1,84E-04	160	8,32E-05
10	1,48E-04	170	8,15E-05
20	1,33E-04	180	7,96E-05
30	1,24E-04	190	7,80E-05
40	1,18E-04	200	7,64E-05
50	1,14E-04	210	7,52E-05
60	1,10E-04	220	7,39E-05
70	1,06E-04	230	7,26E-05
80	1,03E-04	240	7,15E-05
90	9,99E-05	250	7,04E-05
100	9,71E-05	260	6,95E-05
110	9,45E-05	270	9,83E-05
120	9,25E-05	280	6,74E-05
130	9,02E-05	290	6,64E-05
140	8,78E-05	300	6,55E-05
150	8,53E-05		

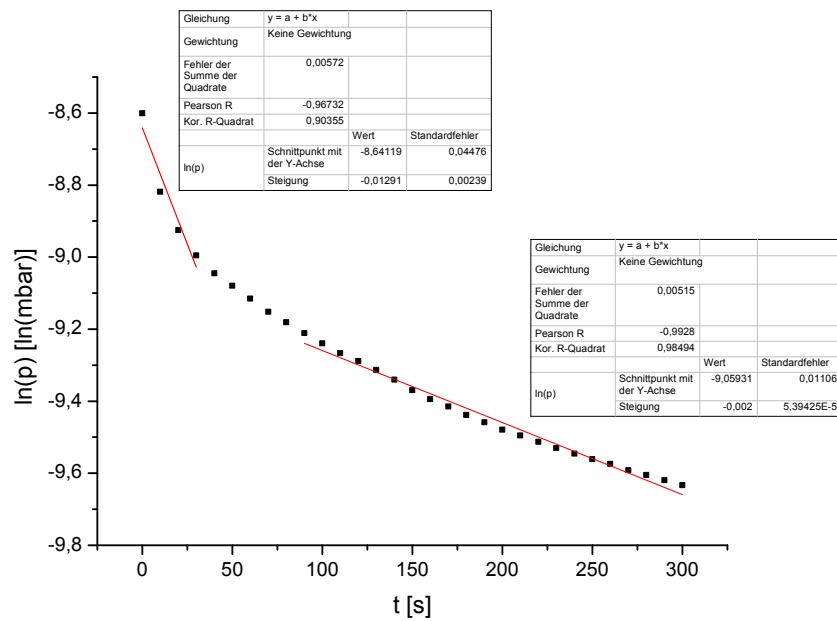


Abbildung 3: Auftragung von $\ln(p)$ über t , linearer Fit

Im Schaubild erkennt man schön, dass das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe bei höheren Drücken zunächst größer ist, mit sinkendem Druck jedoch abnimmt. Mit abnehmendem Druck verbleiben zunehmend leichte Teilchen im Rezipienten, da die mittlere thermische Geschwindigkeit leichter Teilchen deutlich höher ist als schwerer Teilchen (Damit die Pumpe funktioniert, muss die Geschwindigkeit der Rotorblätter höher sein als die der Teilchen). Zudem behindern bei niedrigen Drücken zunehmend Leckströme das Evakuieren.

Um das Saugvermögen der Pumpe bei höheren und bei niedrigeren Drücken zu bestimmen, legten wir zwei lineare Fits an die Kurve an (siehe Schaubild). Wir erhielten $m_1 = -0.01291 \frac{1}{s}$ und $m_2 = -0.002 \frac{1}{s}$. Das Volumen der verwendeten Apparatur (41) ist in der Versuchsbeschreibung mit $V = 10.6l$ angegeben. Damit ergibt sich:

- $S_1 = -V \cdot m = 10.6l \cdot 0.01291 \frac{1}{s} = 0.14 \frac{l}{s}$
- $S_2 = -V \cdot m = 10.6l \cdot 0.002 \frac{1}{s} = 0.02 \frac{l}{s}$

Diese Zahlen sind weit von dem in der Versuchsvorbereitung angegebenen Saugvermögen der Turbomolekularpumpe $S = 30 \frac{l}{s}$ entfernt. Es ist allerdings auch nicht klar, für welchen Druck dieses Saugvermögen angegeben wurde. Die Saugleistung, die die Turbomolekularpumpe offenbar theoretisch erbringen kann, sollte zudem in einem viel Größeren Rezipienten bestimmt werden.

Zuletzt soll die Kraft, die auf die Gummidichtung wirkt, abgeschätzt werden. Da die Drücke, die mit der Turbomolekularpumpe erreicht werden, sehr klein sind ($p \ll p_{atm}$), gilt mit dem Durchmesser der Glasglocke $d=220\text{mm}$ und $p_{atm} = 1013 \text{ mbar}$:

$$F = \Delta p \cdot A = (p_{atm} - p) \cdot A \approx p_{atm} \cdot \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \approx 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot \pi \cdot \left(\frac{0.22m}{2}\right)^2 \approx 3.8kN. \quad (14)$$

5 Statisches Kalibrierungsverfahren

In diesem Versuch wurde ein statisches Kalibrierungsverfahren wie in der Vorbereitung beschrieben durchgeführt: Abwechselnd wurde immer wieder ein Druckausgleich zwischen einem Referenzvolumen und dem Rezipienten durchgeführt, anschließend das Ventil zwischen Rezipient und Referenzvolumen geschlossen und dann das Referenzvolumen belüftet, sodass im Referenzvolumen wieder Atmosphärendruck herrschte. Dann wurde wieder der Druckausgleich zwischen Rezipient und Referenzvolumen durchgeführt.

Jeweils nach diesem Druckausgleich wurde der sich einstellende Druck gemessen. Es ergaben sich folgende Werte:

Tabelle 3: Gemessene Drücke nach Druckausgleich, Druckdifferenz

k	p_{T3} in mbar	Δp in mbar
1	3,54	
2	8,01	4,47
3	12,3	4,29
4	17	4,7
5	21,3	4,3
6	26,6	5,3
7	31,6	5
8	37,8	6,2
9	43,6	5,8
10	49,3	5,7
11	56,4	7,1
12	63,9	7,5
13	71,4	7,5
14	78,5	7,1
15	88,2	9,7

Man sieht also, dass die Druckdifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen grob gleich bleibt:

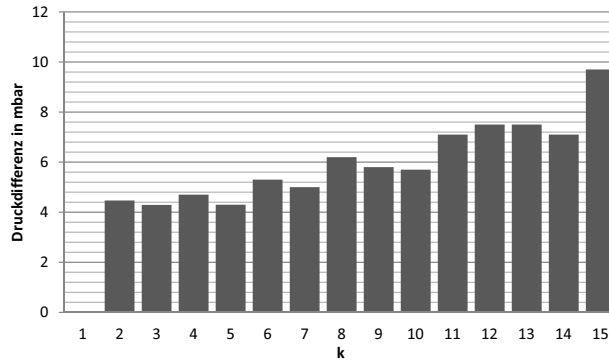


Abbildung 4: Auftragung von p_{T3} über k, linearer Fit

Sie nimmt gegen Ende der Messung zwar leicht zu, aber ungefähr bestätigen sich hier unsere Erwartungen: Nach k Messungen sollte danach der Gesamtdruck im Rezipienten

$$p_{ges}(k) = p_{rez}(0) + k \cdot p_{atm} \cdot \frac{V_{RV}}{V_{RE}} \quad (15)$$

betragen. Demnach sollte sich bei Auftragung von p_{T3} über k ein linearer Zusammenhang ergeben:

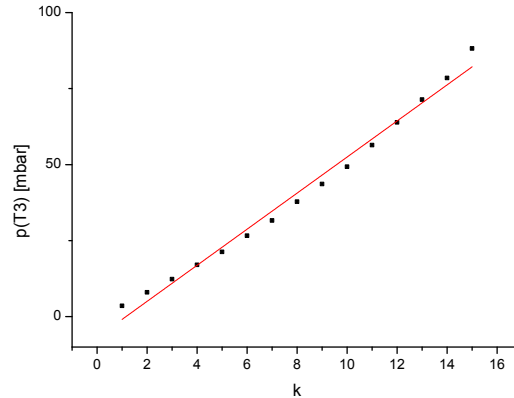


Abbildung 5: Auftragung von p_{T3} über k, linearer Fit

Der lineare Zusammenhang lässt sich hier also ungefähr bestätigen.

Da wir gegen Ende der Messungen immer schneller gemessen haben, wäre eigentlich eher zu erwarten gewesen, dass die Druckdifferenzen zwischen den einzelnen Messungen abnehmen, da Leckströme aufgrund kleinerer Zeitabstände dann auch einen geringeren Einfluss haben sollten.

Das Expansionsverhältnis des Systems lässt sich über

$$\epsilon_{exp} = \frac{p_{atm} \cdot k}{p_k} \quad (16)$$

berechnen. Mit $p_{atm} = 1013$ mbar ergibt sich:

Tabelle 4: Berechnung des Expansionsverhältnisses ϵ

k	p(T3) in mbar	ϵ (dimensionslos)
1	3,54	286,2
2	8,01	252,9
3	12,3	247,1
4	17	238,4
5	21,3	237,8
6	26,6	228,5
7	31,6	224,4
8	37,8	214,4
9	43,6	209,1
10	49,3	205,5
11	56,4	197,6
12	63,9	190,2
13	71,4	184,4
14	78,5	180,7
15	88,2	172,3

Eigentlich sollte das Expansionsverhältnis auch ungefähr konstant bleiben. Es ergibt sich ein Mittelwert von $\bar{\epsilon} = 218$. Das Expansionsverhältnis lässt sich auch aus Rezipienten- und Referenzvolumen berechnen:

$$\epsilon_{th} = \frac{V_{ges}}{V_{RV}} = \frac{V_{RE} + V_{RV}}{V_{RV}} = \frac{0,034l + 10,1l}{0,034l} \approx 298 \quad (17)$$

Unser Messwert weicht damit um -27% vom theoretischen Wert ab. Angesichts der stark schwankenden gemessenen Druckdifferenzen war hier auch ein relativ ungenauer Wert zu erwarten.

6 Bestimmung der elektrischen Durchschlagfestigkeit im Vakuum

In diesem Versuch sollte die Überschlagspannung zwischen zwei Metallkugeln, die im Rezipienten angebracht waren, in Abhängigkeit vom Druck gemessen werden. Dazu wurde jeweils ein konstanter Druck (zunächst mit der Drehschieberpumpe und dann mit der Turbomolekularpumpe) eingestellt, und dann die Spannung soweit erhöht, bis ein Überschlag stattfand und somit die angelegte Spannung wieder abfiel. Der Druck wurde zwischen den einzelnen Schritten immer ungefähr halbiert. Es ergaben sich folgende Messwerte:

Tabelle 5: Überschlagspannungen in Abhängigkeit vom Druck

p(T2) in mbar	U in V
1000	2200
460	1650
251	1350
125	860
63,1	470
30,1	360
14,9	340
7,75	337
4,01	347
2,03	356
1,05	367
0,548	402
0,295	414
0,198	458
0,133	503
0,047	563
0,0028	5600
0,00666	2940
0,01	1250

Trägt man nun U über p(T2) auf, erhält man folgendes Schaubild:

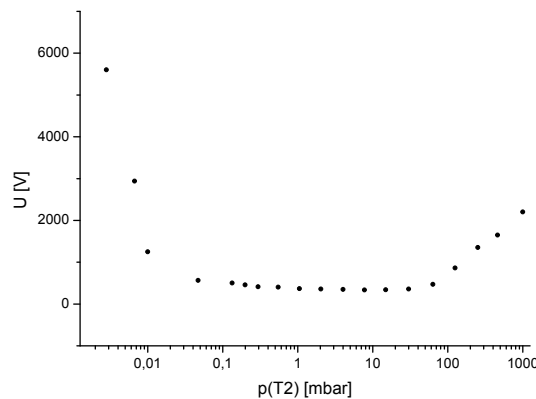


Abbildung 6: Auftragung der Überschlagspannung über dem Druck

Man sieht also, dass die Überschlagspannung zunächst mit sinkendem Druck auch abnimmt. In diesem Bereich waren Funkenentladungen zu beobachten. Mit abnehmendem Druck wird die mittlere freie Weglänge größer: Elektronen führen so auf dem Weg zwischen den Elektroden weniger Stöße aus und erreichen aufgrund des zwischen den Elektroden herrschenden Elektrischen Feldes leichter höhere Energien, womit sie mit einer höheren Wahrscheinlichkeit andere Teilchen ionisieren können. Die Anzahl der Ionisationen nimmt mit abnehmendem Druck also zunächst zu und die Durchschlagsspannung wird verringert. Ungefähr ab Erreichen des im Graphen zu sehenden 'Plateaus' waren keine Funkenentladungen, sondern Glimmentladungen zu beobachten: Zunächst war zwischen den Metallkugeln, bei sehr niedrigen Drücken jedoch auch fast im gesamten Rezipienten ein blaues Glimmen zu beobachten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die mittlere freie Weglänge dann deutlich größer war als der Abstand der Metallkugeln. Der 'begrenzende Faktor' ist in diesem Fall dann nicht mehr die kinetische Energie der Elektronen, sondern die Wahrscheinlichkeit, überhaupt ein anderes Teilchen zu treffen. Ionisation tritt dann auch in Bereichen auf, in denen Elektronen nicht die maximale kinetische Energie haben.

Der Bereich, wo die Überschlagspannung ein Minimum einnimmt, liegt ungefähr dort, wo die mittlere freie Weglänge annäherungsweise dem Abstand der Metallkugeln entspricht. In diesem Bereich können sehr viele Elektronen Teilchen ionisieren, ohne abgebremst zu werden, haben aber trotzdem noch eine hohe Wahrscheinlichkeit ein Atom zu treffen.

Der starke Anstieg der Überschlagspannung lässt sich ebenso dadurch erklären, dass bei niedrigen Drücken die Wahrscheinlichkeit ein anderes Teilchen zu treffen, sehr stark absinkt.

7 Aufdampfen einer Indium-Schicht auf eine Plexiglasscheibe durch eine Kreisblende

In diesem Versuch wurde im Vakuum auf eine Plexiglasscheibe etwas Indium durch eine Lochblende aufgedampft. Dies wurde bei drei unterschiedlichen Drücken durchgeführt: Bei $8 \cdot 10^{-3}$ mbar, 10^{-3} mbar und $5,5 \cdot 10^{-3}$ mbar.

Es war einerseits zu beobachten, dass zum Verdampfen des Indiums bei niedrigeren Drücken auch niedrigere Stromstärken benötigt wurden. Außerdem war zu beobachten, dass die entstehenden Flecken auf der Plexiglasscheibe bei hohen Drücken eher unscharf waren. Dies liegt daran, dass bei hohen Drücken die mittlere freie Weglänge relativ klein ist und Indiumatome vor dem Erreichen der Plexiglasscheibe somit viele Stöße mit Gasteilchen ausführen und dadurch abgelenkt werden. Bei niedrigen Drücken hingegen war der entstehende Fleck scharfkantig: In diesem Fall ist die mittlere freie Weglänge groß und die Indiumatome führen wenige Stöße aus, bevor sie die Plexiglasscheibe erreichen. Der Umriss der Lochblende, durch die aufgedampft wird, wird somit scharf auf die Scheibe abgebildet.

8 Vorbereiten der Apparatur für die Nachfolger

Das Indiumschiffchen wurde wieder mit Indium bestückt, Plexiglasscheibe und Glasglocke (auf der sich auch Indium abgesetzt hatte) gereinigt und die Apparatur wieder evakuiert.