

Versuche P2-41,42

Vakuum

Versuchsauswertung

Marco A. Harrendorf und Thomas Keck, Gruppe: Mo-3
Karlsruhe Institut für Technologie, Bachelor Physik

Versuchstag: 20.06.2011

1 Versuch 1: Überblick über die Apparatur verschaffen

In diesem Versuchsteil machten wir uns mit dem Versuchsaufbau und der Apparatur vertraut, indem wir die einzelnen Bauteile wie Pumpen, Ventile und Manometer identifizierten sowie das Rohrleitungssystem nachverfolgten.

Weiterhin gab uns der Betreuer Hinweise zur Handhabung der Ventile, Manometer und Pumpen.

2 Versuch 2: Bestimmung des Leitwerts eines Metallrohres

In diesem Versuch wurde der Leitwert L eines dünnen Metallrohres bestimmt.

Der Versuch wurde wie in der Vorbereitung beschrieben aufgebaut und durchgeführt. Abweichend von den Angaben in der Vorbereitung betrug die Länge des Metallrohres l_R allerdings ungefähr $l_R \approx 505 \text{ mm}$.

Die während des Versuchs aufgenommenen Messwerte für den zeitlichen Verlauf des Drucks p an der Messstelle T1 bzw. T2 sind im Versuchsprotokoll aufgeführt und werden daher hier nicht nochmals aufgeführt.

Durch Auftragung des logarithmischen Drucks $\ln(p)$ über der Messzeit t konnte mittels einer linearen Regression die Steigung m entsprechend der Gleichung (2) aus der Versuchsvorbereitung bestimmt werden.

$$\ln p = - \underbrace{\frac{S}{V}}_{\text{Steigung } m} \cdot t + \underbrace{\frac{S}{V} \cdot t_0 + \ln p_0}_{y\text{-Achsenabschnitt } y_0} \quad (2)$$

Aus der Steigung m ergibt sich dann entsprechend Gleichung (3) aus der Versuchsvorbereitung die Saugleistung S für die jeweilige Messstelle (T1 oder T2):

$$S = -m \cdot V \quad (3)$$

Hierbei wurde als Volumen $V = 10.341 \text{ l}$ angesetzt, da das Ventil V3 geschlossen war und somit das Referenzvolumen $V_{ref} = 0.043 \text{ l}$ vom Gesamtvolumen $V_g = 10.384 \text{ l}$ abgezogen werden musste.

Bestimmung der Saugleistung $S(T1)$ für die Messstelle T1 Die Abbildung 1 zeigt die Messwerte des logarithmischen Drucks $\ln(p)$ über der Messzeit t sowie die zur Bestimmung der Saugleistung $S(T1)$ verwendete Regressionsgerade.

Zur Bestimmung der Steigung m wurde mit Hilfe des Datenanalyse-Pakets ROOT eine lineare Regression durchgeführt, wobei für den Fit nur der Bereich von $t = 30 \text{ s}$ bis $t = 350 \text{ s}$ verwendet wurde, da aus der Abbildung 1 deutlich wird, dass die ersten drei Messwerte noch nicht im linearen Bereich liegen.

Für die Steigung m und die Saugleistung $S(T1)$ ergaben sich folgende Werte:

$$m = (-1.540 \pm 0.174) \cdot 10^{-2} \frac{1}{s}$$

$$S = (1.593 \pm 0.180) \cdot 10^{-1} \frac{\text{l}}{s}$$

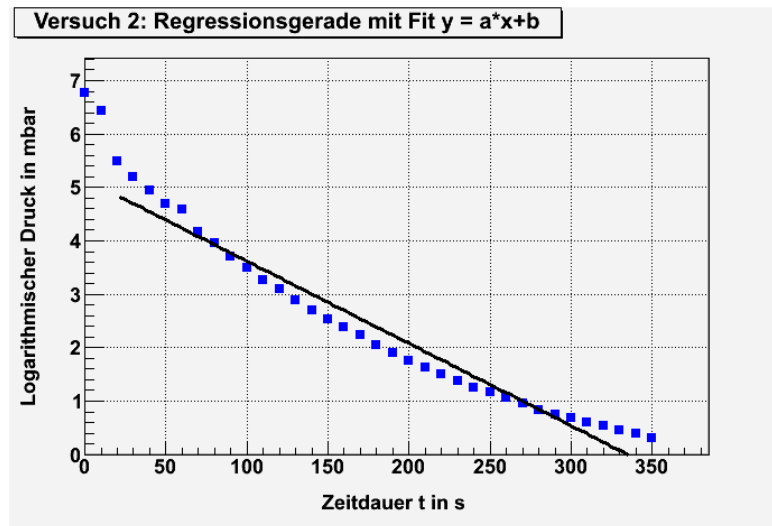


Abbildung 1: Darstellung der Messwerte und der Regressionsgeraden für die Bestimmung der Saugleistung $S(T1)$ an der Messstelle T1

Bestimmung der Saugleistung $S(T2)$ für die Messstelle T2 Die Abbildung 2 zeigt die Messwerte des logarithmischen Drucks $\ln(p)$ über der Messzeit t sowie die zur Bestimmung der Saugleistung $S(T1)$ verwendete Regressionsgerade.

Zur Bestimmung der Steigung m wurde mit Hilfe des Datenanalyse-Pakets ROOT eine lineare Regression durchgeführt, wobei für den Fit nur der Bereich von $t = 50 \text{ s}$ bis $t = 350 \text{ s}$ verwendet wurde, da aus der Abbildung 2 deutlich wird, dass die ersten fünf Messwerte noch nicht im linearen Bereich liegen.

Für die Steigung m und die Saugleistung $S(T2)$ ergaben sich folgende Werte:

$$m = (-1.059 \pm 0.191) \cdot 10^{-2} \frac{1}{s}$$

$$S = (1.095 \pm 0.198) \cdot 10^{-1} \frac{l}{s}$$

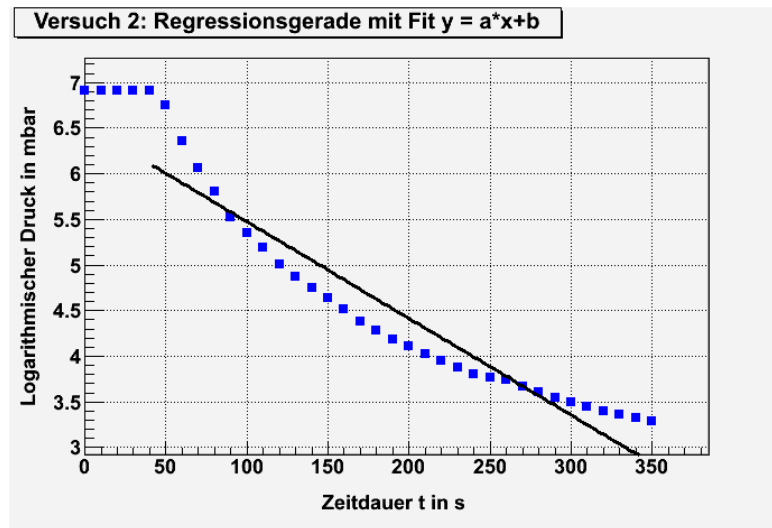


Abbildung 2: Darstellung der Messwerte und der Regressionsgeraden für die Bestimmung der Saugleistung $S(T_2)$ an der Messstelle T_2

Bestimmung des Leitwertes des dünnen Metallrohres Aus den beiden Saugleistungen $S(T_1)$ und $S(T_2)$ wurde dann mit Hilfe der Gleichung (1) aus der Versuchsvorbereitung der Leitwert des dünnen Metallrohres bestimmt:

$$\begin{aligned} 1) L &= \frac{S(T_1) \cdot S(T_2)}{S(T_1) - S(T_2)} \\ &= 0.350 \frac{l}{s} \end{aligned} \quad (1)$$

Zum Vergleich dieses Zahlenwertes wurde der Leitwert L_{Knud} für das Metallrohr mit Rohrdurchmesser $d_R = 2 \text{ mm}$ und Länge $l_R \approx 505 \text{ mm}$ noch mit der Knudsen-Gleichung (siehe [Umrath]) berechnet:

$$\begin{aligned} L &= 135 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \frac{p_1 + p_2}{2} + 12.1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \frac{1 + 192 \cdot d \cdot \frac{p_1 + p_2}{2}}{1 + 237 \cdot d \cdot \frac{p_1 + p_2}{2}} \left[\frac{l}{s} \right] \\ &= 0.529 \frac{l}{s} \end{aligned}$$

Der gemessene Wert für den Leitwert des Rohres L weicht also um 66.2 % vom berechneten Leitwert L_{Knud} ab.

Allerdings ist fraglich, ob die Knudsen-Gleichung in diesem Fall angewandt werden darf: Die Knudsen-Gleichung setzt nämlich lineare Strömung im Rohr voraus, währenddessen ist auf Grund des geringen Rohrdurchmesser $d_R = 2 \text{ mm}$ eigentlich davon auszugehen, dass turbulente Strömung im Rohr vorliegt und dadurch der Leitwert deutlich verringert wird.

3 Versuch 3: Bestimmung des druckabhängigen Saugvermögens einer Drehschieberpumpe

In diesem Versuch wurde das druckabhängige Saugvermögen S der Drehschieberpumpe bestimmt.

Der Versuch wurde wie in der Vorbereitung beschrieben aufgebaut und durchgeführt, wobei die Bestimmung der Saugleistung S analog zur in Kapitel 2 beschriebenen Vorgehensweise erfolgte.

Aus der Abbildung 3, in der der gemessene logarithmische Druck $\ln(p)$ über der Messzeit t aufgetragen ist, ist ersichtlich, dass das Saugvermögen der Drehschieberpumpe nicht durchgehend konstant ist. Vielmehr weist die Abbildung 3 zwei Bereiche mit unterschiedlicher Steigung m auf, weswegen zwei Fits verwendet wurden, um die Saugleistung S für den jeweiligen Bereich zu bestimmen.

Saugleistung S(I) für den Bereich I Für den Bereich $t = 0 \text{ s}$ bis $t = 100 \text{ s}$ ergab sich aus dem Fit folgender Wert für die Steigung $m(I)$ und die Saugleistung $S(I)$:

$$\begin{aligned} m(I) &= (-7.602 \pm 0.182) \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{s}} \\ S(I) &= (7.861 \pm 0.188) \cdot 10^{-1} \frac{\text{l}}{\text{s}} \\ &\hat{=} (2.830 \pm 0.068) \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \end{aligned}$$

Die in diesem Bereich gemessene Saugleistung $S(I)$ ist also circa 13.2 % größer als die vom Hersteller angegebene Nennsaugleistung ($S_{\text{Nenn}} = 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$).

Es ist davon auszugehen, dass der Hersteller die Drehschieberpumpe so ausgelegt hat, dass sie im Rahmen der Fertigungstoleranzen immer mindestens die Nennsaugleistung S_{Nenn} erreicht und aus diesem Grund die gemessene Saugleistung $S(I)$ über der Nennsaugleistung S_{Nenn} liegt, aber dem wahren Wert sehr nahekommt.

Saugleistung S(II) für den Bereich II Für den Bereich $t = 150 \text{ s}$ bis $t = 290 \text{ s}$ ergab sich aus dem Fit folgender Wert für die Steigung $m(II)$ und die Saugleistung $S(II)$:

$$\begin{aligned} m(II) &= (-7.014 \pm 0.591) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \\ S(II) &= (7.253 \pm 0.611) \cdot 10^{-2} \frac{\text{l}}{\text{s}} \\ &\hat{=} (2.611 \pm 0.220) \cdot 10^{-1} \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \end{aligned}$$

Die in diesem Bereich gemessene Saugleistung $S(II)$ weicht deutlich von der vom Hersteller angegebenen Nennsaugleistung ($S_{\text{Nenn}} = 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$) ab.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Bereich II der Druck p in der Apparatur bereits deutlich kleiner als der Atmosphärendruck p_0 war und die Drehschieberpumpe deshalb nicht mehr im Bereich ihrer Nennsaugleistung S_{Nenn} arbeitete.

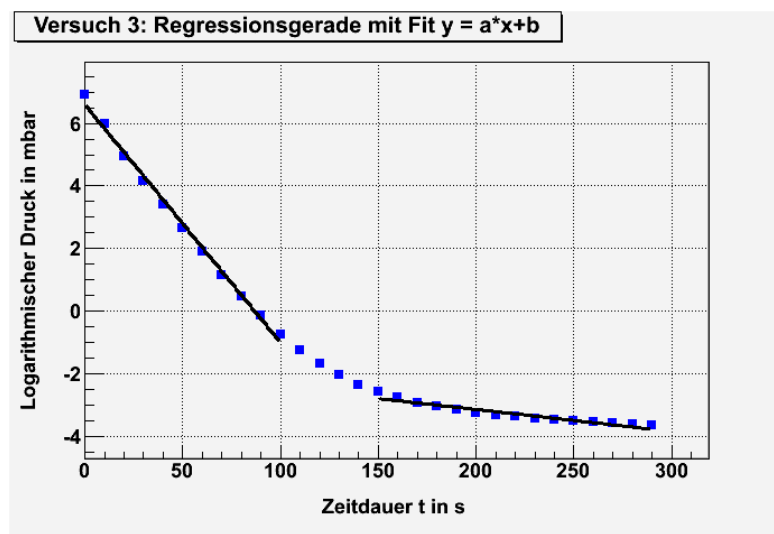


Abbildung 3: Darstellung der Messwerte und der Regressionsgeraden für die Bestimmung der Saugleistung S der Drehschieberpumpe

4 Versuch 4: Bestimmung des Saugvermögens der Turbomolekularpumpe

In diesem Versuch wurde das Saugvermögen S der Turbomolekularpumpe bestimmt. Der Versuch wurde wie in der Vorbereitung beschrieben aufgebaut und durchgeführt, wobei die Bestimmung der Saugleistung S analog zur in Kapitel 2 beschriebenen Vorgehensweise erfolgte.

Aus der Abbildung 4, in der der gemessene logarithmische Druck $\ln(p)$ über der Messzeit t aufgetragen ist, ist ersichtlich, dass das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe nicht durchgehend konstant ist. Vielmehr weist die Abbildung 4 zwei Bereiche mit unterschiedlicher Steigung m auf, weswegen zwei Fits verwendet wurden, um die Saugleistung S für den jeweiligen Bereich zu bestimmen.

Saugleistung $S(I)$ für den Bereich I Für den Bereich $t = 0 \text{ s}$ bis $t = 30 \text{ s}$ ergab sich aus dem Fit folgender Wert für die Steigung $m(I)$ und die Saugleistung $S(I)$:

$$\begin{aligned} m(I) &= (-1.173 \pm 0.215) \cdot 10^{-1} \frac{1}{s} \\ S(I) &= (1.213 \pm 0.222) \frac{l}{s} \\ &\hat{=} (4.3670 \pm 0.799) \frac{m^3}{h} \end{aligned}$$

Die in diesem Bereich gemessene Saugleistung $S(I)$ entspricht nicht der vom Hersteller angegebenen Nennsaugleistung ($S_{Nenn} \geq 30 \frac{l}{s}$).

Die Hauptursache für die große Abweichung der gemessenen Saugleistung $S(I)$ von der Nennsaugleistung S_{Nenn} dürfte sein, dass erst zu Beginn der Messung ($t = 0 \text{ s}$) die Turbomolekularpumpe eingeschaltet wurde, also noch nicht ihre Höchstdrehzahl und damit ihre volle Saugleistung erreicht hatte. Zu einem späteren Zeitpunkt (siehe Bereich II) hatte die Turbomolekularpumpe zwar dann ihre Höchstdrehzahl erreicht, allerdings hatte der Druck in der Apparatur dann bereits soweit abgenommen, dass die Turbomolekularpumpe nicht mehr im Bereich ihrer Nennsaugleistung S_{Nenn} arbeitete. Um die Saugleistung S der Turbomolekularpumpe richtig bestimmen zu können, wäre es daher in einem erneuten Versuch empfehlenswert, zunächst bei geschlossenem Ventil V2 die Turbomolekularpumpe zu starten und das Ventil V2 erst zu öffnen, sobald die Turbomolekularpumpe ihre Höchstdrehzahl erreicht hat. Allerdings müsste das Öffnen des Ventils V2 sehr rasch erfolgen, was versuchsbedingt wahrscheinlich nur schwierig umzusetzen ist.

Als weitere Ursache für die Abweichungen kommt ein Verschleiß der Pumpe in Frage, weswegen die Saugleistung S der Turbomolekularpumpe herabgesetzt ist.

Saugleistung S(II) für den Bereich II Für den Bereich $t = 70 \text{ s}$ bis $t = 300 \text{ s}$ ergab sich aus dem Fit folgender Wert für die Steigung $m(II)$ und die Saugleistung $S(II)$:

$$m(II) = (-1.926 \pm 0.059) \cdot 10^{-3} \frac{1}{s}$$

$$S(II) = (1.992 \pm 0.061) \cdot 10^{-2} \frac{l}{s}$$

$$\hat{=} (7.171 \pm 0.220) \cdot 10^{-2} \frac{m^3}{h}$$

Die in diesem Bereich gemessene Saugleistung $S(II)$ ist im Vergleich zur Nennsaugleistung ($S_{Nenn} \geq 30 \frac{l}{s}$) sehr klein. Es ist davon auszugehen, dass bei den in diesem Bereich vorherrschenden kleinen Drücken p die Turbomolekularpumpe ihre Nennsaugleistung S_{Nenn} bei weitem nicht mehr erreicht.

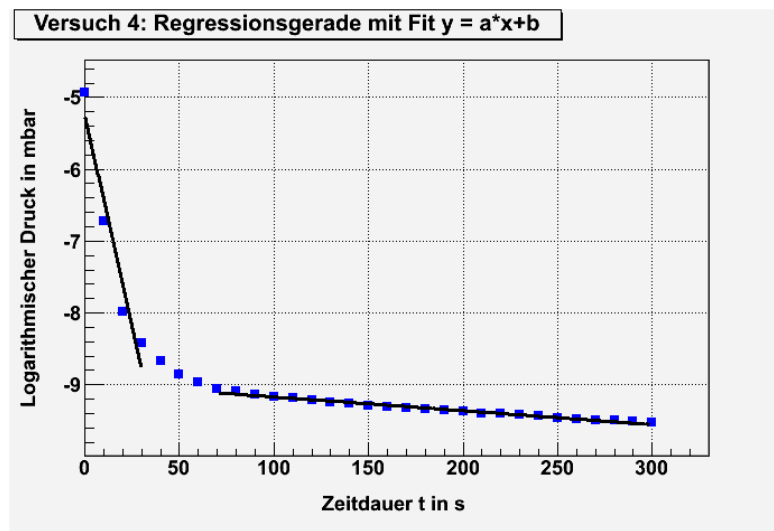


Abbildung 4: Darstellung der Messwerte und der Regressionsgeraden für die Bestimmung der Saugleistung S der Turbomolekularpumpe

5 Versuch 5: Durchführung eines einstufigen, statischen Kalibrierverfahrens

Der Versuch wurde wie in der Vorbereitung beschrieben durchgeführt. Abweichend von der Aufgabenstellung wurde, nach Absprache mit dem Betreuer, das Referenzvolumen (RV) anstatt des Expansionsverhältnisses bestimmt.

Insgesamt wurden 30 Iterationsschritte durchgeführt, angefangen bei einem Druck $p(0) < 10^{-4}$ bar bis $p(30) = 84.8$ mbar. Der Druck p wurde jeweils mit dem Wärmeleitungsvakuummeter T3 bestimmt.

Unter Vernachlässigung der Stoffmenge im Referenzvolumen ergibt sich die gesamte Stoffmenge n_{ges} in jedem Teilschritt nach Formel (4) in der Vorbereitung. Über das ideale Gasgesetz kann weiterhin die Teilchenzahl im Volumen über den gemessenen Druck berechnet werden. In Abbildung 5 ist diese Teilchenzahl über den Teilschritten aufgetragen. Die Steigung der Regressionsgeraden erhält man aus Formel (4):

$$m = \frac{p_0}{R \cdot T} \cdot V_{ref} \quad (1)$$

$$R = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$T = 295 \text{ K}$$

$$p_0 = 101325 \text{ Pa}$$

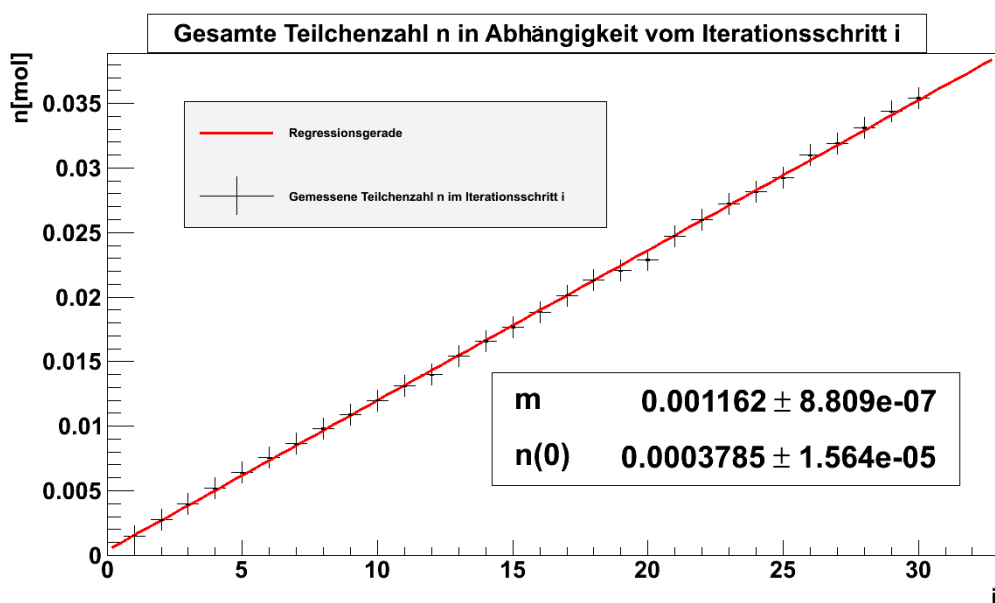


Abbildung 5: Teilchenzahl n in jedem Iterationsschritt i

Referenzvolumen Hieraus ergibt sich aus 1 ein Referenzvolumen von:

$$\begin{aligned} V_{ref} &= 0.028\text{l} \\ V_{Hersteller} &= 0.043\text{l} \end{aligned} \tag{2}$$

Die Messung besitzt demnach einen hohen Fehler, hierzu tragen verschiedene Fehlerquellen bei:

1. Die Näherung in der Herleitung der theoretischen Formel.
2. Die nicht vorgenommene Temperatur- und Druckmessung im Labor. Hierfür wurden Normalbedingungen angenommen.
3. Ungenauigkeiten der Messgeräte

Auch eine Veränderung des Referenzvolumens selbst gegenüber der Herstellerangaben wäre denkbar, verursacht etwa durch Verunreinigungen oder Beulen im Rohrsystem des Referenzvolumens.

Weiterhin ist das Volumen des gesamten Rezipienten V_{RP} bekannt, es beträgt $V_{RP} = 10.243\text{l}$. Die Annahme $V_{ref} \ll V_{RP}$ bei der Herleitung von Formel (4) in der Vorbereitung ist also gerechtfertigt.

6 Versuch 6: Bestimmung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit im Vakuum

Der Versuch wurde wie in der Vorbereitung beschrieben durchgeführt. Die Messung der an den Metallkugeln anliegenden Spannung U beim elektrischen Überschlag erwies sich als sehr ungenau. Die Messergebnisse haben deshalb höchstens eine qualitative Aussagekraft.

Beobachtung Wie bereits in der Vorbereitung beschrieben, wurden für hohe Drücke Funkenüberschläge und für geringe Drücke ($p < 10\text{mbar}$) Glimmentladungen an den Metallkugeln beobachtet.

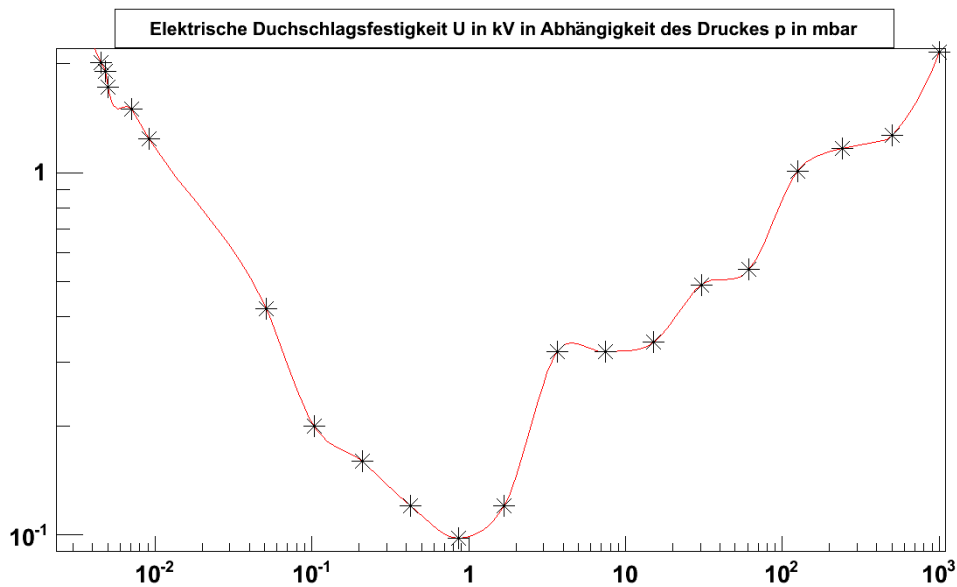


Abbildung 6: Elektrische Durchschlagsfestigkeit in kV über dem Druck p in mbar

In Abbildung 6 ist der qualitative Kurvenverlauf, der bereits in der Vorbereitung erläutert wurde, gut zu erkennen. Man beachte dabei die doppellogarithmische Skala. Die Durchschlagsfestigkeit nimmt mit sinkendem Druck erst ab, bis die mittlere freie Weglänge gerade dem Abstand der Elektroden entspricht. Danach steigt die Durchschlagsfestigkeit wieder. Das Minimum des Kurvenverlaufs ist etwa bei $p_{min} = 0,8\text{mbar}$ erreicht. Die Messung selbst ist jedoch, wie oben schon erwähnt, sehr ungenau, sodass den weiteren Merkmalen des Schaubildes, wie etwa dem scheinbar stufenförmigen Abfall, keine Signifikanz und damit Bedeutung zukommt.

Bedeutung Die Bedeutung für die Industrie wurde bereits in der Vorbereitung diskutiert. Zusammengefasst muss in der Vakuumtechnik auf eine gute Erdung und der Vermeidung von hohen Feldstärken durch Metallspitzen geachtet werden, da es sonst leicht zu Funkenüberschlägen und ungewollten Entladungen kommt.

7 Versuch 7: Aufdampfen einer Indium-Schicht auf eine Plexiglasscheibe

Wie in der Aufgabenstellung gefordert wurden bei 3 verschiedenen Drücken, jeweils eine Indium-Schicht auf die Plexiglasscheibe im Rezipient aufgedampft. Der dafür nötige Heizstrom I_H wurde in Absprache mit dem Betreuer dabei nicht exakt festgehalten. Der Heizstrom bewegte sich im Bereich zwischen 30A und 40A.

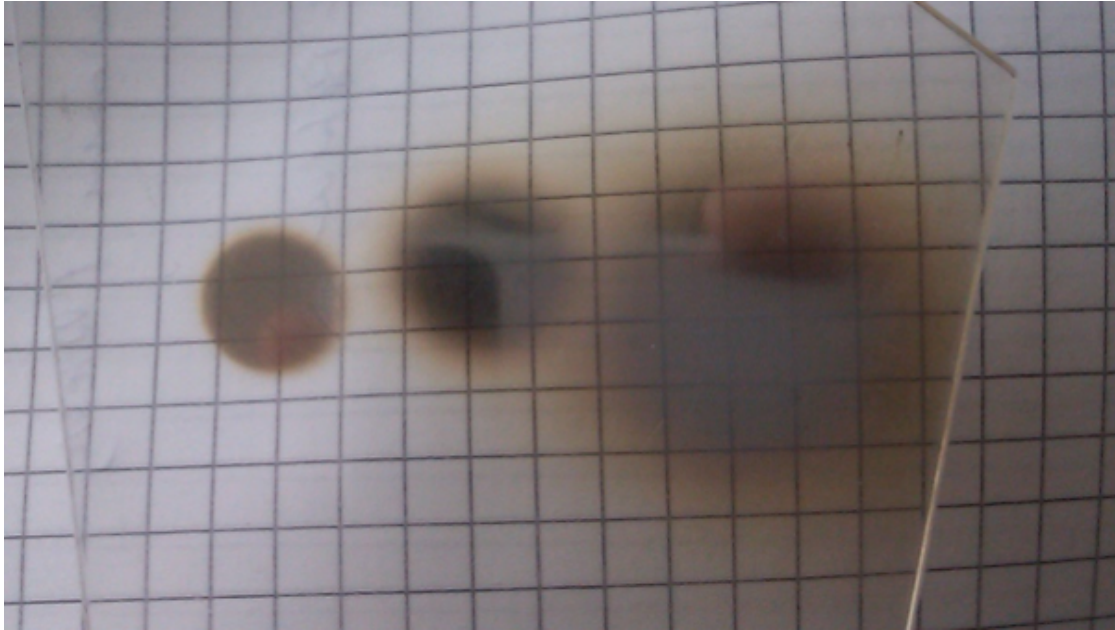


Abbildung 7: Aufgedampfte Indium Schichten

In Abbildung 7 erkennt man von links nach rechts die aufgedampften Indium Schichten. Die zugehörigen Drücke waren $p_1 = 3.1 \cdot 10^{-5}$ mbar, $p_2 = 1 \cdot 10^{-3}$ mbar und $p_3 = 1 \cdot 10^{-2}$ mbar. Man erkennt in der Abbildung sehr schön, wie der Rand der kreisförmigen Indium-Schicht mit steigendem Druck immer mehr verschwimmt und unscharf wird. Gleichzeitig wird der Fleck größer. Dies ist auf die sinkende mittlere freie Weglänge der verdampften Indium-Atome in der Restluft im Rezipienten zurückzuführen, infolgedessen kommt es vermehrt zu Stößen, die das Indium auf seinem Weg zur Plexiglasscheibe ablenken.

8 Versuch 8: Vorbereitung der Apparatur für die Nachfolger

Nach Versuchsende wurde die Apparatur mit Aceton gereinigt und wieder in den Ursprungszustand versetzt, sodass sie auch (hoffentlich vielen) weiteren Praktikumsgruppen für Versuche zur Verfügung steht.

Literatur

[Aufgabenstellung] Aufgabenstellung zu den Versuchen P2-41,42

[Vorbereitungshilfe] Vorbereitungshilfe zu den Versuchen P2-41,42

[Umrath] W. Umrath: Grundlagen der Vakuumtechnik