

Prak.: P2 Semester: SS2020 Wochentag: Do Gruppennr.: 17

Name: Unser Vorname: Tabea

Name: Wisser Vorname: Christian

Emailadresse(n): t

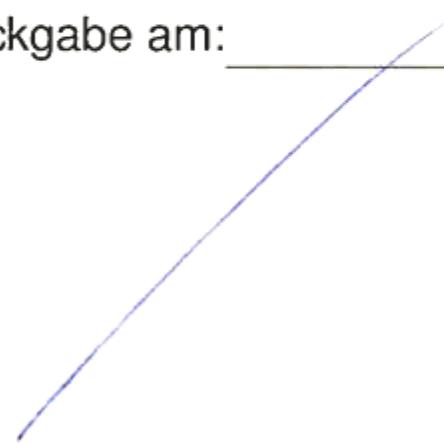
Versuch: Vakuum (P2-41) Fehlerrech.: Nein

Betreuer: Ioannis Karapatzakis Durchgeführt am: 02.07.20

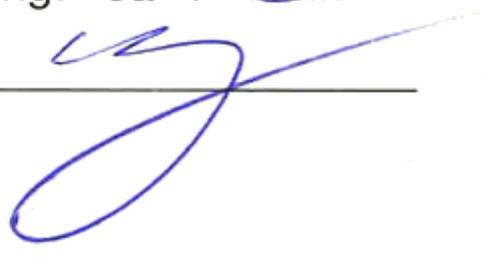
Wird vom Betreuer ausgefüllt.

1. Abgabe am: 3.7.20

Rückgabe am: _____ Begründung: _____



2. Abgabe am: _____

Ergebnis: + / 0 / - Fehlerrechnung: Ja / Nein
Datum: 3.7.20 Handzeichen: 

Bemerkungen:
Sehr schönes Protokoll!
Ausführliche Erklärung & tolle Plots!

Versuch P2-41,42,44

Vakuum

Raum F1-19

Dieser Versuch bietet einen Einblick in die für den Experimentalphysiker oft so wichtige Vakuumtechnik. Sie spielt eine wesentliche Rolle zum Beispiel in der Nanophysik, aber auch bei Großexperimenten wie KATRIN im Campus Nord oder dem LHC am CERN. Ein anderes Anwendungsbeispiel wäre die Dünnschichttechnik, mit welcher z.B. luftdichte Oberflächen in Chipstüten aufgedampft werden.

Sie lernen Prinzipien der Vakuumerzeugung und der Vakuummessung (Messung kleiner Drücke) kennen, gewinnen Erfahrung mit der Handhabung einer Vakuumanlage und - meist unvermeidlich - auch mit den praktischen Schwierigkeiten. Bei der Beschäftigung mit Wärmeleitungsmanometer, Gasentladung, Aufdampfversuch und Leitwertbestimmung haben Sie gute Gelegenheit, die Bedeutung der **'mittleren freien Weglänge'** kennen zu lernen. Die Funktionsprinzipien von Drehschieberpumpe, Turbomolekularpumpe, Wärmeleitungsmanometer und Ionisationsmanometer sollten Ihnen schon zu Beginn des Versuchs klar sein.

Hinweise:

Obwohl in diesem Versuch eine splittergeschützte Glasglocke verwendet wird, kann die evakuierte Glasglocke implodieren. Zum Schutz der Augen muss deshalb beim Arbeiten an der evakuierten Apparatur eine Schutzbrille getragen werden!

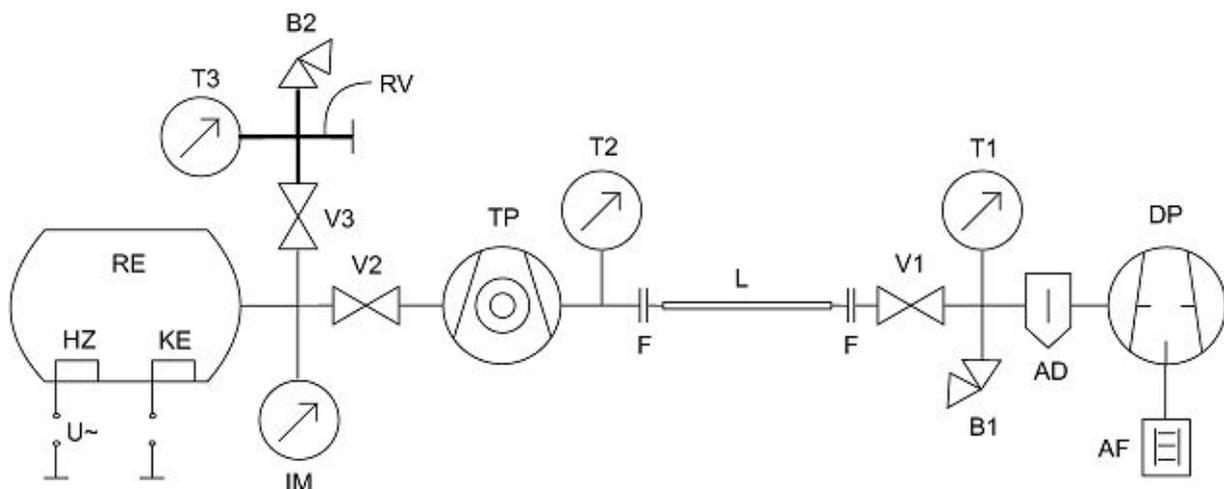
Die hier aufgebaute Apparatur ist sehr empfindlich. Bei fehlerhafter Handhabung können teure Schäden entstehen, weshalb die einzelnen Versuchsteile nur nach Rücksprache mit dem Betreuer gestartet werden dürfen!

Beim Arbeiten am Rezipienteninneren (Verdampferschiffchen laden, Glas putzen etc.) soll die Pumpenöffnung mit der bereitliegenden Plastikkappe abgedeckt werden. Vor dem Verbinden von Bauteilen mit Hilfe von Dichtungsringen müssen die Ringe und die Dichtflächen sorgfältig gereinigt werden.

Die Turbomolekularpumpe darf nur bei einem Vorvakuumdruck von besser als 10^{-1} mbar eingeschaltet werden.

Die Apparatur darf erst dann belüftet werden, wenn nach Abschalten der Turbomolekularpumpe deren **Rotor völlig zum Stillstand gekommen ist!** Das dauert einige Minuten! Ein Lufteinbruch bei rotierender Pumpe zerstört diese. Extreme Vorsicht!

Skizze der Apparatur:



DP Drehschieberpumpe; AF Auspuff-Filter; (AD Adsorptionsfalle); T1, T2, T3 Wärmeleitvakuummeter (Thermovac-Meßsonde); B1, B2 Belüftungsventil; V1, V2, V3 Vakuumventil; L austauschbare Verbindungsleitung; TP Turbomolekularpumpe (TURBOVAC); IM Ionisationsvakuummeter (Penning-Transmitter); RE Rezipient; RV Referenzvolumen; HZ wechselstrombeheiztes Verdampferschiffchen; KE mit Hochspannung versorgte Kugelelektroden.

Aufgaben:

In der Regel finden Sie die Apparatur unter Vorvakuum vor, das Aufdampfschiffchen mit Indium bestückt und die Glasglocke gereinigt von alten Aufdampfbelägen. Dann sollten Sie sich zunächst einen **Überblick über die Apparaturen verschaffen**, indem Sie die Leitungen verfolgen und die verwendeten Bauteile lokalisieren. Beachten Sie die Hinweise auf diesem Aufgabenblatt und schalten Sie die Apparatur nicht ohne den Betreuer ein! Die drei Versuchsaufbauten sind fast gleich; Apparatur 44 ist als einzige mit der Gasentladungsröhre für den Demoversuch ausgestattet, dafür fehlt hier die Möglichkeit der Messung der Überschlagsfestigkeit (Aufg. 6).

1. Demoversuch (für alle an Apparatur 44 vorhanden)

Beobachten, skizzieren und beschreiben Sie die Gasentladung in Abhängigkeit vom Druck. Evakuieren Sie den Rezipienten und die Gasentladungsröhre gemeinsam (Ventile V1 und V2 offen) **mit Hilfe der Drehschieberpumpe**, die Turbomolekularpumpe bleibt ausgeschaltet. Dabei ist das Hochspannungsgerät ($U=$) eingeschaltet. Erniedrigen Sie den Druck bis die Gasentladung erlischt. Schließen Sie nach dieser Aufgabe das unbezeichnete Ventil zur Gasentladungsröhre für alle folgenden Aufgaben. (Warum wohl?)

2. Bestimmen Sie den Leitwert eines Metallrohres. Wechseln Sie die Verbindungsleitung L (bisher Metall-Wellschlauch mit großem Querschnitt) gegen das etwa gleichlange Rohr mit $\sim 2\text{mm}$ Innendurchmesser aus. Nehmen Sie "gleichzeitig" den zeitlichen Verlauf des Druckes an beiden Messstellen T1 und T2 auf. Diskutieren Sie Ihr Ergebnis.

Schalten Sie nach der Messreihe die Drehschieberpumpe wieder ab, belüften Sie den Rezipienten und tauschen Sie das 2mm-Rohr wieder gegen den Metall-Wellschlauch aus.

3. Bestimmen Sie das Druckabhängige Saugvermögen $S(p)$ der Drehschieberpumpe. Evakuieren Sie dazu wieder die Apparatur mit Hilfe der Drehschieberpumpe. Nehmen Sie hierbei den zeitlichen Verlauf des Druckes p am Saugstutzen der Drehschieberpumpe auf (Messintervall zunächst so kurz wie möglich und später 15s). Verwenden Sie hierzu die Thermovac-Messsonde T1 und die Stoppuhr. Zeichnen Sie ein Diagramm $S(p)$. Bestimmen Sie aus dem linearen Bereich des Kurvenverlaufs das mittlere Saugvermögen \bar{S} . Schalten Sie nach der Messung die Drehschieberpumpe ab.

4. Bestimmen Sie mit Hilfe der Ionivac-Messröhre das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe. Da die Turbomolekularpumpe bis zur vollen Saugleistung eine Anlaufzeit von ca. 60s benötigt, sollte sie nicht erst bei sehr niedrigen Drücken eingeschaltet werden. Die Apparatur muss also vor diesem Versuchsteil bis zu einem Druck von ca. $2 \cdot 10^{-1}$ mbar teilbelüftet werden. Evakuieren Sie die Apparatur anschließend erneut mit der Drehschieberpumpe. Schalten Sie dann bei einem Druck von ca. $8 \cdot 10^{-2}$ mbar die Turbomolekularpumpe ein und lesen Sie den Druck der Ionivac-Messröhre ab. Bestimmen Sie das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe analog zu Aufgabe 4 (Messintervall 10s). Beachten Sie die Hinweise des Betreuers bzgl. der Turbomolekularpumpe und diskutieren Sie den physikalischen Hintergrund. Schätzen Sie ab, mit welcher Kraft die Glasglocke auf die Gummidichtung gedrückt wird. Überlegen Sie sich was an dieser Glasglocke besonders sein muss.

5. Führen Sie ein einstufiges, statisches Kalibrierungsverfahren durch. Bei einer statischen Expansion wird das Boyle-Mariottesche Gesetz eingesetzt. Mit Hilfe dieses Verfahrens könnten z.B. Druckmessgeräte kalibriert werden.

Zunächst soll das Ventil V3 geschlossen werden und der Rezipient mit Hilfe der Drehschieberpumpe und anschließend mit der Turbomolekularpumpe evakuiert werden. Bei einem Druck von $p < 10^{-4}$ mbar wird dann das Ventil V2 geschlossen und somit der Rezipient vom Rest der Apparatur getrennt. Die beiden Pumpen können ausgeschaltet werden. Öffnen Sie nun das Ventil V3 und lesen an der Messstelle T3 den sich einstellenden Gesamtdruck ab. Schließen sie anschließend wieder V3 und öffnen B2 damit sich in dem kleineren Referenzvolumen erneut Atmosphärendruck einstellt. Schließen Sie B2 und öffnen dann wieder V3 um eine erneute Expansion durchzuführen. Wiederholen Sie diesen Vorgang solange bis sich im Rezipienten ein Gesamtdruck von ca. 80mbar einstellt.

Skizzieren Sie den Druckverlauf und den Iterationszuwachs und bestimmen Sie das Expansionsverhältnis dieses Expansionssystems.

6. Bestimmen Sie die elektrische Durchschlagfestigkeit im Vakuum. (Kann nur an den Apparaturen 41 und 42 durchgeführt werden.) Die Turbomolekularpumpe ist ausgeschaltet und die Drehschieberpumpe läuft. Das Vakuum wird zunächst lediglich mit V1 geregelt.

Messen Sie die Überschlagsspannung zwischen zwei Metallkugeln in Abhängigkeit vom Druck. Beginnen Sie bei Atmosphärendruck (1000 mbar), erhöhen Sie die Spannung bis zur Entladung und evakuieren Sie die Apparatur anschließend mit der Drehschieberpumpe bis zu einem Druck von ca. 500 mbar. Schließen Sie V1 um den erreichten Druck zu halten und erhöhen sie wieder die Spannung bis zur Entladung. Evakuieren Sie weiter bis zur Hälfte des vorherigen Drucks und wiederholen Sie diese Vorgehensweise bis Sie einen Druck von ca. 0,05 mbar erreicht haben. In diesem Druckbereich wird es immer schwieriger den Druck konstant zu halten.

Um leichter und schneller an weitere Messwerte zu kommen, evakuieren Sie nun zusätzlich und ohne Unterbrechung mit der Turbomolekularpumpe bis zu einem Druck von ungefähr $2 \cdot 10^{-4}$ mbar. Schalten Sie die Turbomolekularpumpe aus und schließen Sie V2. Der Druck steigt nun von alleine. Nehmen Sie sobald wie möglich ($U \leq 9$ kV) weitere Messwerte auf. Die Messreihe endet, wenn ein Druck von 0,05mbar erreicht ist.

Diskutieren Sie warum sich der Druck ab einem bestimmten Druckbereich nicht mehr genau einstellen lässt und warum er bei sehr kleinen Drücken kontinuierlich sinkt.

Beschreiben, skizzieren und diskutieren Sie das Ergebnis der Messung und die Art des Funkenüberschlags in den unterschiedlichen Druckbereichen. Sehen Sie Parallelen zum Demoversuch? Welche Folgen haben diese Ergebnisse für die Industrie?

7. Dampfen Sie bei drei verschiedenen Drücken jeweils eine Indium-Schicht durch eine Kreisblende auf eine schwenkbare Plexiglasscheibe auf. Es soll jeweils ein Fleck bei einem Druck von $p \leq 10^{-5}$ mbar, $p \approx 10^{-3}$ mbar und $p \approx 10^{-2}$ mbar aufgedampft werden. Beobachten Sie hierbei auch den benötigten Heizstrom und diskutieren Sie die Randschärfe der aufgedampften Flecken.

Achtung: Auch hier ist es wichtig zu wissen, was man tut: lokalisieren Sie zunächst das Tantal-Verdampferschiffchen im Rezipienten. Die Heizleitung reicht aus es vollständig zu zerstören! Der Heizstrom darf erst hochgedreht werden, wenn das Sollvakuum erreicht ist. Beobachten Sie beim Hochdrehen das Verdampferschiffchen. Es soll glühen, aber nicht schmelzen!

8. Bereiten Sie die Apparatur für die Nachfolger vor. Belüften Sie die Apparatur, reinigen Sie die Plexiglasscheibe und die Glasglocke von den Aufdampfbelägen, bestücken Sie das Aufdampfschiffchen mit etwas Indium (Menge von Betreuer überprüfen lassen) und setzen Sie die Glocke wieder auf den Dichtungsring. Anschließend evakuieren Sie die Apparatur mit der Drehschieberpumpe.

Umrechnungen:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2;$$

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kp/cm} \approx 0,981 \text{ bar};$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr} = 760 \text{ mm Hg} \approx 1013 \text{ mbar}$$

Volumenangaben:

Referenzvolumen (bei allen Apparaturen gleich): **0,034 liter**

Volumina der drei Rezipienten (bis V2, V3 und IM): (App41- **10.1**; App42- **10.0**; App44- **9.2**) **liter**

die Volumina der Gesamtapparaturen sind jeweils um 0.5 liter größer

(Hinweis: Die Glasglocken dürfen nicht vertauscht werden)

Stichworte:

Rotierende Pumpen (Drehschieberpumpe), Turbomolekularpumpe, Diffusionspumpe, Kryopumpe, Saugvermögen, Saugleistung, Kontinuumsströmung (laminar, turbulent), Molekularströmung, Strömungswiderstand bzw. Leitwert, mittlere freie Weglänge in Abhängigkeit vom Druck, Leckrate, Lecksuche, Membranmanometer, U-Rohr-Manometer, Wärmeleitungsmanometer, Ionisationsmanometer, Penning-Manometer, Gasgesetze, Partialdruck, Dampfdruck, Boyle-Mariottesches Gesetz.

Zubehör:

Zweistufige **Drehschieberpumpe** (DP) TRIVAC D2,5E mit vakuumseitiger Adsorptionsfalle (AD) und ausgangseitigem Auspuff-Filter (AF), Nennsaugvermögen 2,5 m³/h [App44: 1,6 m³/h];

Drei **Wärmeleitungsmanometer**-Sonden (T1,T2,T3) THERMOVAC Transmitter TTR91, Messbereich 5·10⁻⁴ mbar bis 1 bar;

Ionisationsmanometer-Messsonde (IM) Penning-Transmitter PTR225, Messbereich 1·10⁻⁹ – 1·10⁻²mbar;
Transmittercontroller DISPLAY THREE, = Elektronisches Vakuum-Druckmessgerät, Anzeigebereich 1·10⁻⁹ – 2000 mbar, 3-Kanalgerät;

Turbomolekularpumpe (TP) TURBOVAC 50, Saugvermögen ≥ 30 l/s, Flanschdurchmesser Vorvakuumseite 16 mm, Hochvakuumseite 65 mm, Drehfrequenz max. 7200 min⁻¹, Hochlaufzeit ca. 2 min;

Steuergerät TURBOTRONIK NT10 [NT50] für das kontrollierte Hochlaufen der Turbomolekularpumpe mit Start-/Stop-Tasten und Frequenzwandler für den Pumpenantriebsmotor (200 bis 1250 Hz), Anzeigelämpchen für ACCELERation / NORMALzustand / FAIL (fehlerhafter Zustand);

Rezipient (RE), Glasglocke auf Metallteller mit Gummidichtung, Nennmaße ~250 mm Höhe, ~220 mm Durchmesser;

Verdampferschiffchen (HZ) im Rezipienten, elektrisch direkt heizbar, mit Abschirmung und Lochblende und einer von außen schwenkbaren Plexiglasplatte (vorgesehen zum Aufdampfen von Indiumflecken)

Netzgerät für 6V~ und 50 A für den Strom durch das Verdampferschiffchen;

Kugelelektroden (KG) im Rezipienten, elektrisch aufladbar

HV-Netzgerät für 0...10kV mit Digital-Multimeter WAVETEX-Meterman 85XT um die Spannung beim Funkenüberschlag abzulesen (mit zwischengeschaltetem Widerstand R_i=10MΩ, Anzeige also U/10);

Stoppuhr, Schutzbrillen,

Schutzkappe zum Abdecken der Turbomolekularpumpe, wenn die Glasglocke abgenommen ist;

Metallwellschläuche: Länge x Durchmesser: (App41- **510x28**; App42- **440x21**; App44- **530x23**) mm²

Dünnes Metallrohr: Durchmesser = 2mm bzw. 8mm

Literatur:

Wutz: Handbuch Vakuumtechnik

Edelmann: Vakuumphysik und -Technik

W. Pupp/H.K. Hartmann: Vakuumtechnik

Diels, Jaeckel : Leybold-Vakuumtaschenbuch

Allgemeine Lehrbücher der Physik

42

Zeit in s	p an T_1 [mbar]	p an T_2	p an T_1	p an T_M
5	1000	1000	1000	4,00 $\cdot 10^{-3}$
10	1000	1000	1000	1,97
15	1000	1000	1000	1,16
20	900	1000	1000	↑ 9,07
25	600	1000	850	5,81
30	420	1000	248	4,00
35	300	1000	129	3,57
40	230	1000	73,2	3,30
45	170	1000	45,5	3,13
50	150	1000	29,7	2,99
55	120	1000	20,5	2,85
60	107	1000	13,9	2,77
65	99,1	1000	9,3	2,66
70	75,2	1000	6,52	2,59
75	64,1	1000	4,38	2,52
80	56,9	1000	3,06	2,45
85	50,0	1000	2,19	2,39
90	43	800	1,58	2,34
105	30,7	400	↑ 6,52	2,19
120	22,5	250	3,18	2,09
135	16,5	173	1,84	1,99
150	12,6	133	↑ 1,29	1,92
165	9,8	104	9,60	1,86
180	7,69	86,2	8,03	1,80
195	6,14	71,9	7,06	1,75
210	5,0	62,9	6,26	1,71
225	4,05	54,3	5,69	1,67
240	3,40	48,0	5,47	1,63
255	2,89	43,7	5,09	1,59
270	2,47	40,0	4,84	1,56
285	2,13	36,5	4,66	1,53
300	1,88	33,6	4,47	1,50

Aufgabe 2
Aufgabe 3
Aufgabe 4

5.

Öffnung	p an T_3 [mbar]	...	
1	3,51	17	82,3
2	7,14	18	
3	11,0		
4	14,8		
5	18,4		
6	22,8		
7	26,6		
8	30,6		
9	35,3		
10	40,6		
11	45,9		
12	52,3		
13	58,1		
14	64,1		
15	70,1		
16	74,4		

S

6. Durchschlagsspannung in kV

P in mbar

4,6	1000
4,6 1,34	20540
1,23	261
0,99	121
0,78	61,2
0,702	30,7
0,408	14,8
0,38	7,15
0,376	3,10
0,361	1,54
0,42	0,770
0,445	0,366
0,536	0,177
0,551	0,079
0,826	0,0495
8,1	$3,98 \cdot 10^{-2}$
6,1	$4,9 \cdot 10^{-3}$
4,2	$6,25 \cdot 10^{-3}$
2,04	$9,9 \cdot 10^{-3}$

7.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenblatt	0
2	Messprotokoll	3
3	Gasentladung in Abhängigkeit vom Druck	5
4	Leitwert eines Metallrohres	7
5	Druckabhängiges Saugvermögen der Drehschieberpumpe	9
6	Saugvermögen der Turbomolekularpumpe	11
7	Statisches Kalibrierungsverfahren	13
8	Elektrische Durchschlagfestigkeit	15
9	Aufdampfen einer Indium-Schicht	16
	Literaturverzeichnis	17

Abbildungsverzeichnis

3.1	Gasentladungsröhre mit leuchtenden Flecken	5
4.1	Messwerte und Fit zur Bestimmung des Leitwerts eines Metallrohres	8
5.1	Saugleistung S der Drehschieberpumpe in Abhängigkeit vom Druck p (logarithmische Skala)	10
6.1	Messwerte und Fit zur Bestimmung des Saugvermögens der Turbomolekularpumpe	12
7.1	lineare Regression zur Bestimmung des Expansionsverhältnis	13
8.1	Überschlagsspannung in Abhängigkeit des Drucks	15
9.1	dünne Indium-Schichten auf der Plexiglasscheibe	16

3. Gasentladung in Abhängigkeit vom Druck

Bei diesem Versuch handelt es sich um einen Demonstrationsversuch. Er wird an der Apparatur 44 durch geführt. Zuerst wird der Rezipient zusammen mit der Gasentladungsröhre durch die Drehschieberpumpe evakuiert. Dabei ist das Hochspannungsgerät eingeschaltet. Bei hohem Druck war keinerlei Leuchten in der Gasentladungsröhre zu sehen. Die mittlere freie Weglänge der Elektronen war einfach zu gering, um durch die Spannung genug beschleunigt zu werden, um irgendwelche Teilchen in der Röhre zu ionisieren. Bei Verringerung des Drucks kam es dann erstmals zum Aufleuchten der Röhre am oberen Ende. Beim weiteren Evakuieren der Röhre bildeten sich äquidistante Lichtflecken im oberen Teil, zu sehen in Abbildung 3.1.

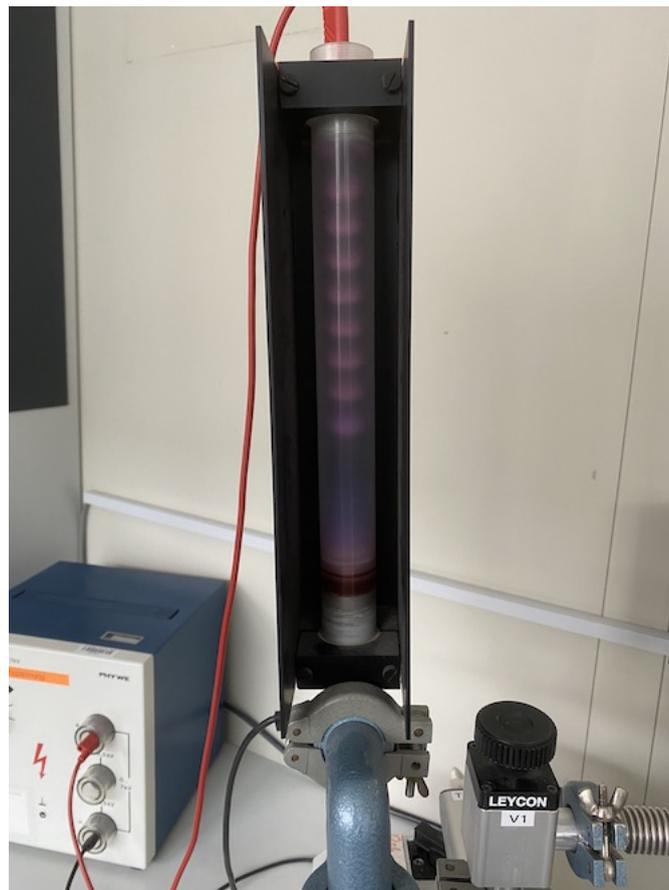


Abbildung 3.1: Gasentladungsröhre mit leuchtenden Flecken

Bei weiterem Evakuieren der Röhre entfernen sich die Flecken voneinander, das hat mit der Erhöhung der mittleren freien Weglänge zu tun. Die Erhöhung sorgt dafür, dass die Elektronen länger brauchen um mit einem Teilchen zu stoßen, dies erhöht den Abstand der Flecken. Bei zu geringen Druck leuchtet die Röhre gar nicht mehr, da keine Teilchen mehr vorhanden sind um zu stoßen bzw. die mittlere freie Weglänge entspricht genau der Länge der Röhre und es kommt zu keinen Stößen mehr. Verringert man die Spannung des Netzteils so verringert sich auch die Intensität der Lichtflecken, da die Spannung ein Maß dafür ist, wie viele Elektronen ausgelöst werden. Verringert sich die Anzahl der Elektronen, so verringert sich auch die Anzahl der Stöße was zu einer geringeren Emission von Licht führt. Wichtig ist, dass bei dem Stoß eines Elektrons mit einem Teilchen zuerst ein weiteres Elektron ausgeschlagen wird und somit das Teilchen ionisiert wird. Das anfängliche Elektron ist nun so langsam, da es all seine kinetische Energie zum Auslösen des anderen Elektrons benötigt hat, dass es durch das Teilchen eingefangen werden kann. Die gewonnene Bindungsenergie wird in Form von Photonen abgestrahlt. Das ausgeschlagene Elektron wird selbst wieder beschleunigt und der Prozess beginnt von vorne. Die Emission von Elektronen am Anfang geschieht durch Feldemission. Bei einem ausreichend starken elektrischen Feld ($>10^9 \frac{\text{V}}{\text{m}}$) werden aufgrund des Tunneleffekts Elektronen aus der Kathode gelöst. Um diese großen elektrischen Felder zu erzeugen werden Haarnadelkathoden verwendet. Sie sehen schematisch aus wie eine Nagelbrett. An den Spitzen der Kathodennadeln ist aufgrund der geringen Oberfläche das elektrische Feld sehr dicht zusammen gedrückt und lokal das Feld sehr groß, was für die Feldemission sorgt.

4. Leitwert eines Metallrohres

Die Verbindungsleitung L wird gegen ein Metallrohr getauscht, das einen Innendurchmesser von 2 mm hat. Über einen Zeitraum von 5 Minuten wird zunächst alle 5 s, dann nach 15 s jeweils an den Messstellen T1 und T2 der Druck p gemessen. Über diese Werte soll der Leitwert des Metallrohres G bestimmt werden.

Für den Leitwert gilt allgemein die Formel

$$G = \left(\frac{1}{S_{eff}} - \frac{1}{S} \right)^{-1}, \quad (4.1)$$

wobei das Saugvermögen S und das effektive Saugvermögen S_{eff} definiert sind über

$$S = \frac{dV}{dt}. \quad (4.2)$$

Durch Einsetzen der allgemeinen Gasgleichung $pV = nRT$ erhält man daraus eine Differentialgleichung, deren Lösung über Trennung der Variablen ermittelt werden kann. Man erhält daraus

$$\log \left(\frac{p}{p_0} \right) = -\frac{S}{V} \cdot t. \quad (4.3)$$

S lässt sich also bei logarithmischer Auftragung des Drucks unter Kenntnis des Volumens V direkt aus der Steigung ermitteln. p_0 ist der Anfangswert des Drucks, also $p_0 = 1000$ mbar. V entspricht dem Gesamtvolumen zusammen mit dem Volumen des zylinderförmigen Rohres, abzüglich des Schlauchvolumens, also

$$V = V_{ges} - V_{Schlauch} + V_{Rohr}. \quad (4.4)$$

Mit $V_{ges} = 10,51$ und der Näherung von Schlauch und Metallrohr als Zylinder erhält man durch Einsetzen der bekannten Längen und Durchmesser

$$V \approx 10,3491. \quad (4.5)$$

Beim Fit werden die anfänglich konstanten Werte ausgeklammert, da sie keine Aussage über die Saugleistung beinhalten und den linearen Fit nur verschlechtern würden. Auch die letzten Werte, die deutlich schwächer abfallen, als es ein linearer Zusammenhang nahelegen würde, werden ausgeklammert. Es wird also versucht, jeweils einen möglichst großen, möglichst linearen Bereich zu ermitteln, durch den dann die Fitgeraden hindurchgelegt werden. Das Ergebnis dieses Vorgangs ist in Abbildung 4.1 für beide Messstellen dargestellt. Der Fit liefert

$$S = 0,335 \frac{1}{s} \quad (4.6)$$

$$S_{eff} = 0,225 \frac{1}{s}, \quad (4.7)$$

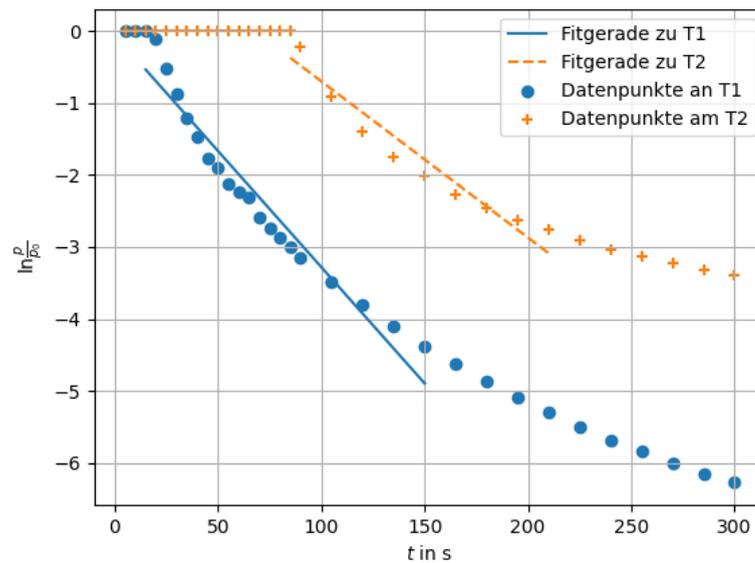


Abbildung 4.1: Messwerte und Fit zur Bestimmung des Leitwerts eines Metallrohres

mit Gleichung 4.1 folgt somit der experimentell ermittelte Leitwert

$$G = 0,687 \frac{1}{s}. \quad (4.8)$$

Zur weiteren Diskussion des Wertes ist es möglich, mithilfe der Knudsenformel (siehe [Vor]) den theoretischen Leitwert auszurechnen. Es gilt

$$G_{theo} = 135 \frac{d^4}{l} \bar{p} + 12,1 \frac{d^3}{l} \cdot \frac{1 + 192d\bar{p}}{1 + 237d\bar{p}}. \quad (4.9)$$

Dabei ist \bar{p} der gemittelte Druck von Anfang und Ende des Rohres,

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (4.10)$$

d der Durchmesser des Rohres in cm, und l die Länge des Rohres. Um einen vernünftigen Vergleich zu haben, wird der Leitwert für alle Werte in einem Bereich ausgerechnet, der beide Fits abdeckt (also von 90 s bis 150 s) und anschließend gemittelt.

Man erhält so

$$G_{theo} = 1,201 \frac{1}{s}. \quad (4.11)$$

Auch wenn der theoretische Wert deutlich über dem experimentell ermittelten liegt, so passt zumindest die Größenordnung des Wertes. Bei der Berechnung des theoretischen Wertes fallen außerdem seine stark unterschiedlichen Werte je nach gewähltem Wertebereich auf. Daher muss auch seine Zuverlässigkeit infrage gestellt werden.

5. Druckabhängiges Saugvermögen der Drehschieberpumpe

Es soll das druckabhängige Saugvermögen der Drehschieberpumpe $S(p)$ ermittelt werden. Die Apparatur wird mithilfe der Pumpe evakuiert und dabei an der Messstelle T1 am Saugstutzen der Drehschieberpumpe der zeitliche Verlauf des Drucks aufgenommen. Das Metallrohr wird zuvor wieder durch den Schlauch ersetzt, das Gesamtvolumen kann daher wieder entsprechend der Angabe als

$$V = 10,51 \quad (5.1)$$

angenommen werden.

Man könnte analog zur vorangegangenen Aufgabe $\ln(p)$ über t auftragen und über den linearen Teil einen Fit durchführen; hier ist aber laut Aufgabenstellung eine andere Vorgehensweise gefordert.

Durch Umstellen von Gleichung 4.3 erhält man die benötigte Auswerteformel für das Saugvermögen S in Abhängigkeit vom Druck p

$$S(p) = -V \cdot \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \cdot \frac{1}{t} \quad (5.2)$$

mit dem Anfangsdruck $p_0 = 1000$ mbar.

Trägt man S über p auf, erhält man den in Abbildung 5.1 dargestellten Verlauf, an dem ein Abschnitt näherungsweise konstanter Saugleistung erkennbar ist.

Über Mittelwertbildung über die Werte für S in diesem linearen Bereich erhält man die mittlere Saugleistung der Drehschieberpumpe

$$\bar{S} = 0,756 \frac{1}{s} \approx 2,722 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}. \quad (5.3)$$

Dieser Wert weicht um 8,1% vom in der Versuchsanleitung angegebenen Wert von $\bar{S} = 2,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ ab und liegt damit in einem vernünftigen Rahmen.

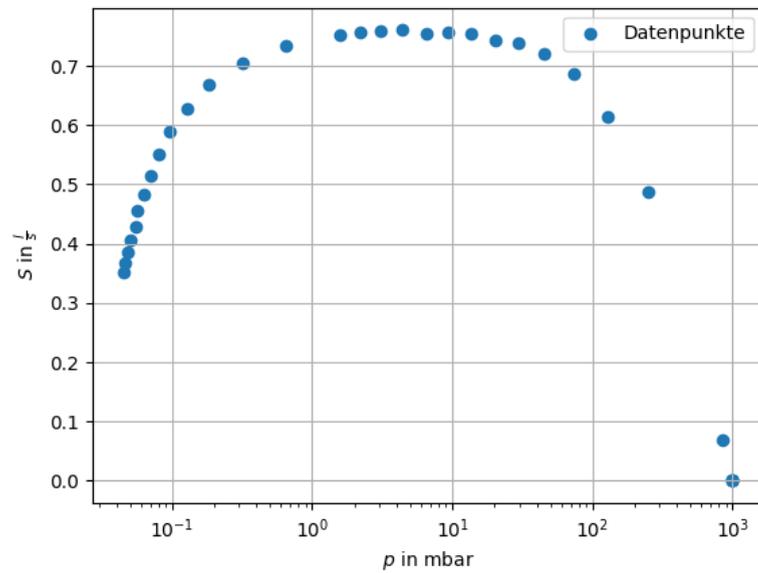


Abbildung 5.1: Saugleistung S der Drehschieberpumpe in Abhängigkeit vom Druck p (logarithmische Skala)

6. Saugvermögen der Turbomolekularpumpe

Um den Rezipienten weiter zu evakuieren, wird die Turbomolekularpumpe eingeschaltet. Eine solche Pumpe besteht aus mehreren Rotorscheaufeln, die mindestens so schnell rotieren müssen, dass sie in die Größenordnung der mittleren Geschwindigkeit der Gasteilchen kommen. Das eigentliche Funktionsprinzip besteht darin, dass Gasteilchen, die auf eine Rotorscheaufel treffen, durch deren Neigung mit einer höheren Wahrscheinlichkeit in eine bestimmte Richtung reflektiert werden. Diese Richtung entspricht der Pumprichtung. Im Mittel werden so die Gasteilchen aus dem zu evakuierenden Behälter heraustransportiert. Analog zu Kapitel 4 soll zu das Saugvermögen dieser Pumpe bestimmt werden. Der Druck wird in den entsprechenden Zeitintervallen an der Ionivac-Messröhre abgelesen. Es wird wieder $\log\left(\frac{p}{p_0}\right)$ über t im Diagramm aufgetragen. Der Anfangsdruck beträgt diesmal $p_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ mbar. Beim Fit werden diesmal keine Anfangswerte ausgelassen, da der Druck von Anfang an stark sinkt. Es wird allerdings wieder nur über den linearen Bereich gefittet, sodass die Messwerte ab dem Zeitpunkt von 35 s, an dem ein Knick erkennbar ist, nicht berücksichtigt werden. Das ist auch in Abbildung 6.1 dargestellt.

Der Fit liefert über die Steigung einen Wert für das Saugvermögen von

$$S = 0,925 \frac{1}{\text{s}}, \quad (6.1)$$

was weniger als einem Dreißigstel des angegebenen Werts von $S = 30 \frac{1}{\text{s}}$ für die Turbomolekularpumpe entspricht. Die Ursache für diese erhebliche Abweichung könnte im verwendeten Druckbereich liegen, der dem unteren Ende des typischen Anwendungsbereichs der Turbomolekularpumpe entspricht. Ein weiteres Problem könnte das vergleichsweise geringe Volumen des Rezipienten darstellen, durch welches nicht das volle Saugvermögen der Pumpe ausgenutzt werden kann.

Es soll abgeschätzt werden, mit welcher Kraft die Glasglocke auf die Gummidichtung gedrückt wird. Unter der Annahme, dass der Druck im Rezipienten p_i vernachlässigbar klein gegenüber dem Außendruck $p_a \approx 10^5$ Pa ist, gilt für die Druckdifferenz $\Delta p = p_a - p_i \approx p_a$. Somit folgt für die Kraft

$$F = \Delta p \cdot A \approx p_a \cdot A = p_a \cdot \left(\frac{d^2}{4}\right) \approx 3,8 \text{ kN} \quad (6.2)$$

mit dem Durchmesser der Glasglocke $d = 0,22$ m. Die Glasglocke muss daher entsprechend stabil sein.

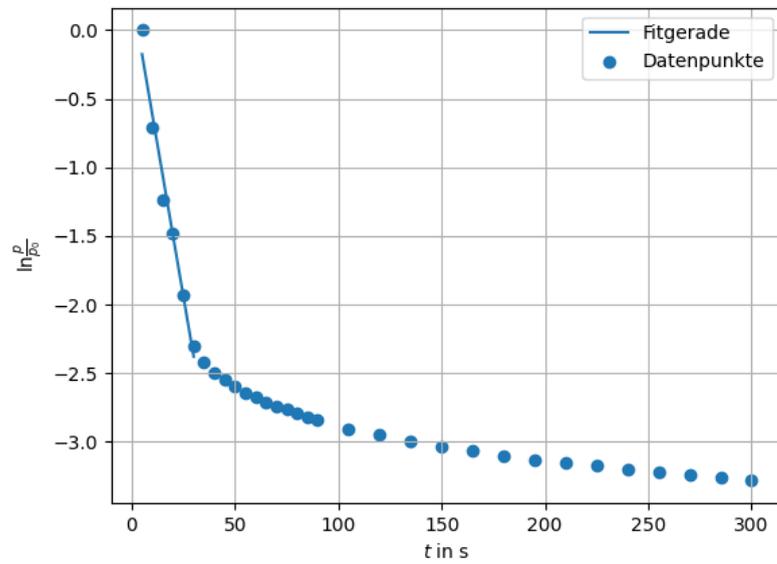


Abbildung 6.1: Messwerte und Fit zur Bestimmung des Saugvermögens der Turbomolekularpumpe

7. Statisches Kalibrierungsverfahren

Das Ventil V3 wird geschlossen und der Rezipient durch die Drehschieberpumpe und die Turbomolekularpumpe bis auf einen Druck von $p < 10^{-4}$ mbar evakuiert. Nun wird das Ventil V2 geschlossen, damit der Rezipient von den Pumpen und dem Rest getrennt wird. Nun wird V3 immer wieder geöffnet und geschlossen, damit ein Druckausgleich zwischen dem Rezipienten und dem Referenzvolumen geschieht. Das Referenzvolumen wird immer, wenn es vom Rezipienten durch V3 getrennt wird, entlüftet. Bei jedem Öffnen und Schließen der Apparatur wird an T3 gemessen, welcher Gleichgewichtsdruck sich einstellt. Aus diesen Messwerten soll das Expansionsverhältnis des Systems bestimmt werden. Die Messwerte sind im Messprotokoll zu sehen. Für das Expansionsverhältnis ϵ_{exp} gilt

$$\epsilon_{exp} = \frac{p_a \cdot i}{p_i} = \frac{1000 \text{ mbar} \cdot i}{p_i}. \quad (7.1)$$

Damit wird das Expansionsverhältnis durch lineare Regression bestimmen können, multiplizieren wird die Gleichung mit p_i und tragen die linke Seite auf die X- und die rechte auf die Y-Achse auf. Der Fit durch kafe ist in Abbildung 7.1 zu sehen. Der aus der linearen

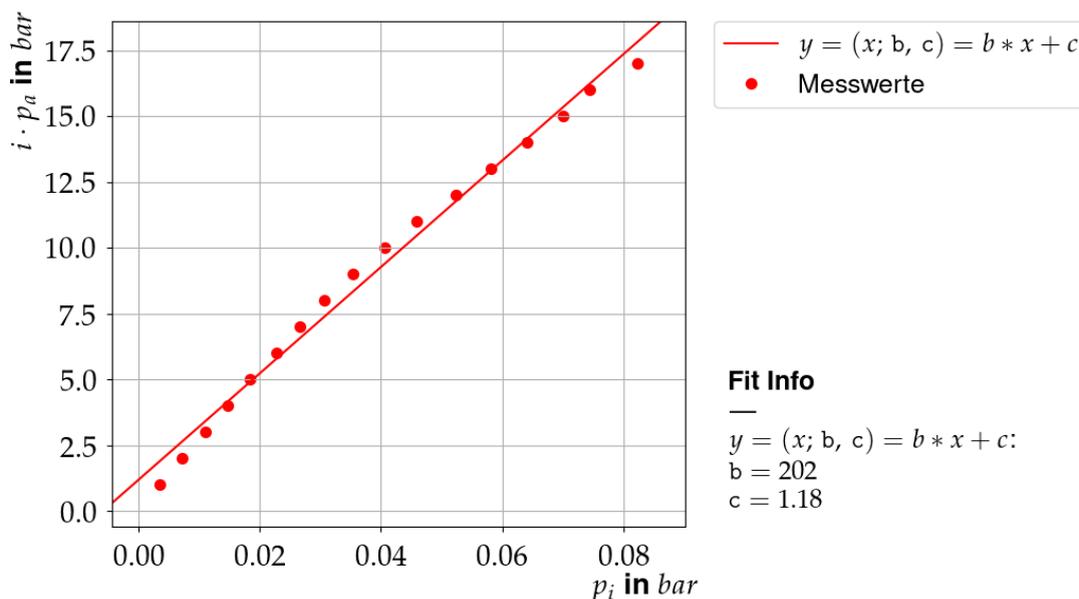


Abbildung 7.1: lineare Regression zur Bestimmung des Expansionsverhältnis

Regression bestimmte Wert ist

$$\epsilon_{exp} = 202 \quad (7.2)$$

Der theoretische Wert für das Expansionsverhältnis ist

$$\epsilon_{theo} = \frac{V_{rez}}{V_{ref}} = \frac{10,01}{0,0341} = 294,12 \quad (7.3)$$

Damit weicht der experimentell bestimmte Wert um 31,32% von dem theoretischen ab. Dies kann an dem sehr kleinen Referenzvolumen liegen, da nur kleinste nicht berücksichtigte Volumina in den Ventilen oder anderen nicht abtrennbaren Messinstrumenten eine große Rolle spielen.

8. Elektrische Durchschlagfestigkeit

Nun wird die Überschlagespannung zwischen zwei Metallkugeln in Abhängigkeit vom Druck gemessen. Es wird bei 1000 mbar begonnen und der Druck immer halbiert durch Evakuierung mit der Drehschieberpumpe bis zu einem Druck von 0,05 mbar. Der Druck wird konstantgehalten, indem V1 geschlossen wird. Danach wird mit der Turbomolekularpumpe ein Druck von 0,0002 mbar erzeugt und V2 geschlossen. Jetzt stellen wir eine Spannung am Spannungsgenerator ein und notieren, während der Druck langsam durch die Lecks steigt, bei welchem Druck die Spannung abfällt. Dies wird solange wiederholt, bis 4 Messwerte aufgenommen sind. Im Moment des Überschlags ist zwischen den beiden Kugeln ein Funke zu sehen. Sobald der Druck im Rezipienten niedriger wird, ist dieser mit dem Auge nicht mehr zu erkennen. Dies liegt an der geringeren Anzahl an Atomen bzw. Molekülen, die ionisiert werden können. Die Überschlagespannung in Abhängigkeit des Drucks ist in Abbildung 8.1 zu sehen. Der Anstieg der Überschlagespannung bei hohem Druck lässt sich

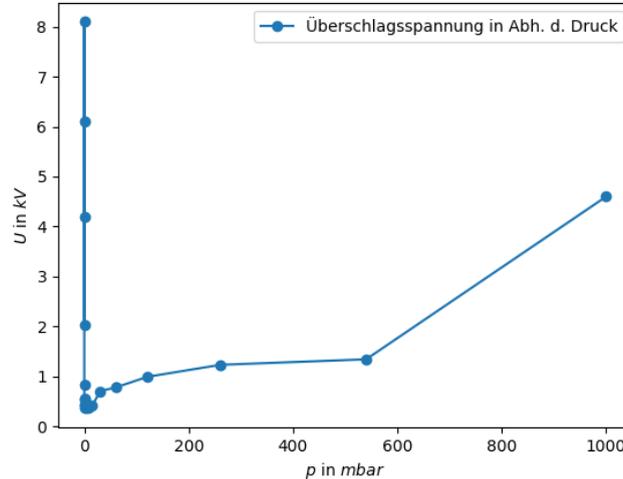


Abbildung 8.1: Überschlagespannung in Abhängigkeit des Drucks

über die mittlere freie Weglänge der beschleunigten Elektronen erklären, da diese bei großer Teilchenzahl sehr gering wird. Dadurch stoßen sie sehr oft mit den sie umgebenden Teilchen und erreichen nicht die erforderliche Energie um die Teilchen zu ionisieren. Deswegen muss eine sehr Spannung angelegt werden um die Elektronen hinreichend zu beschleunigen. Bei sehr geringen Drücken steigt die Überschlagespannung erneut, dies lässt sich durch die Abwesenheit von ionisierbaren Teilchen erklären. Ein Minimum der Überschlagespannung ist dann erreicht, wenn die mittlere freie Weglänge der Elektronen genau dem Abstand zwischen den beiden Kugeln entspricht. Was bei unseren Messwerten bei einem Druck von 1,54 mbar der Fall war.

9. Aufdampfen einer Indium-Schicht

Nun werden dünne Indium-Schichten durch eine Lochblende auf eine Plexiglasscheibe gedampft. Hierzu wird ein Verdampferschiffchen, das sich im Rezipienten befindet, mit Indium bestückt und mithilfe eines Netzteils ein Heizstrom angelegt. Dies passiert bei zwei Drücken. Das Ergebnis ist in Abbildung 9.1 zu sehen. Der linke Fleck ist bei dem

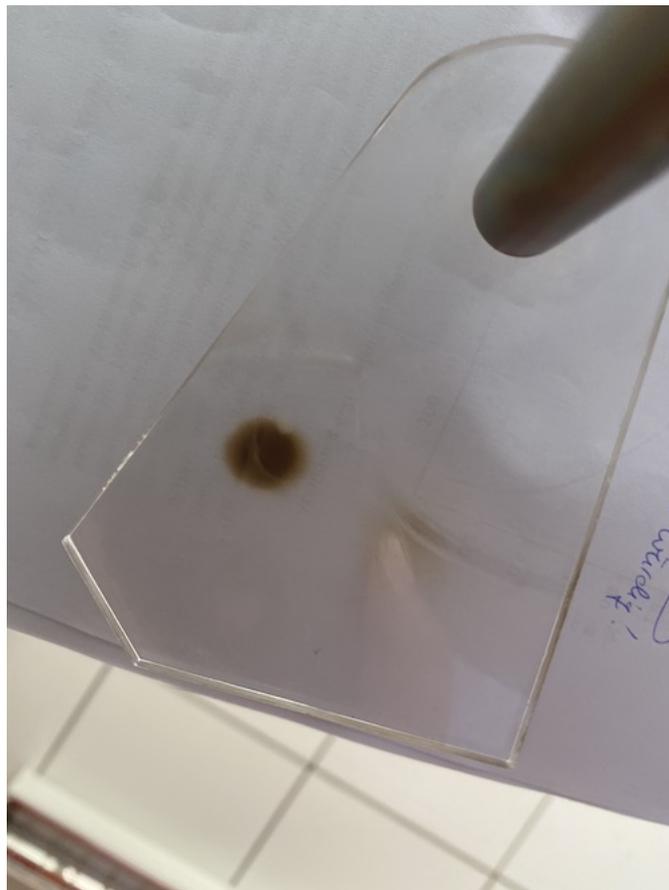


Abbildung 9.1: dünne Indium-Schichten auf der Plexiglasscheibe

niedrigerem Druck entstanden, der rechte bei dem höheren. Es ist klar zu erkennen, dass bei niedrigerem Druck der Rand des Kreises schärfer und die Intensität höher ist. Dies hängt mit der höheren freien Weglänge zusammen. Bei einer höheren freien Weglänge kommt es zu weniger Stößen bis zum Auftreffen auf dem Plexiglas, was für eine geringere Streuung durch die Stöße sorgt. Auch war bei niedrigerem Druck ein geringerer Heizstrom vonnöten.

Literaturverzeichnis

[Ver] *Versuchsanleitung zum Versuch Vakuum.*

[Vor] *Vorbereitungsmappe Versuch Vakuum.*