

Ausarbeitung zu "Vakuum"

Anfängerpraktikum Teil 2
Technische Universität München

Clara Donat, Matthias Quintern
Kurs 5, Team 7
Canio Himmelmann
Kurs 5 Team 8

24. August 2020

Einleitung

In diesem Versuch sollen einfache Vakuumtechniken demonstriert und die Eigenschaften von idealen Gasen untersucht werden. Um ein Vakuum zu erzeugen, reduziert man die Dichte des Gases in einem Volumen. Anschließend wird experimentell das (effektive) Saugvermögen einer Pumpe, teils auch bei verschiedenen Aufsätzen, bestimmt.

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	2
1.1 Eigenschaften idealer Gase	2
1.2 Vakuumtechnische Begriffe	2
2 Experimentelles Vorgehen	3
2.1 Kalibrierung des Pirani-Manometers	3
2.2 Saugvermögen der Pumpe	3
2.2.1 Saugvermögen der Pumpe	3
2.2.2 Effektives Saugvermögen mit verschiedenen Aufsätzen	3
3 Ergebnisse und Diskussion	4
3.1 Kalibrierung des Pirani-Manometers	4
3.2 Bestimmung des Saugvermögens	6
3.3 Effektives Saugvermögen der Pumpe	7
4 Anhang	9
5 Literaturverzeichnis	9

1 Grundlagen

1.1 Eigenschaften idealer Gase

In einem *idealen Gas* wechselwirken die einzelnen Teilchen nur durch elastische Stöße miteinander. Eine wichtige Größe bei Versuchen zum Vakuum ist der Druck p [Pa]. Je besser das Vakuum, desto geringer wird dieser. In der *Zustandsgleichung idealer Gase* (Gleichung 1) sind der Druck und weitere wichtige Größen wie die Temperatur T [K] und das Volumen V [m³] miteinander verknüpft:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T = N \cdot k_b \cdot T \quad (1)$$

n bezeichnet die Stoffmenge in mol, N die Teilchenzahl, R die universelle Gaskonstante und k_b die Boltzmann-Konstante.

Bei den hier im Versuch verwendeten Vakua verhält sich Luft annähernd wie ein ideales Gas.

1.2 Vakuumtechnische Begriffe

Eine typische Vakuumapparatur beinhaltet einen *Rezipienten* mit Volumen V und eine Pumpe mit Saugvermögen S zur Erzeugung des Vakuums. Das Saugvermögen lässt sich über

$$\frac{d(V \cdot p)}{dt} = -S \cdot p \quad (2)$$

bestimmen. Meistens befinden sich zwischen Pumpe und Rezipienten jedoch Rohre mit Leitwerten L_i oder Engstellen, die das tatsächliche Saugvermögen reduzieren. Bei n verschiedenen Leitwerten gilt dann für das effektive Saugvermögen S_{eff} :

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i} \quad (3)$$

Falls S_{eff} über den gesamten Druckbereich konstant ist, lässt sich $p(t)$ durch Integration von Gleichung 2 bestimmen:

$$p(t) = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{S_{eff} \cdot t}{V}\right) \quad (4)$$

Diese Formel ist für nicht-konstantes S_{eff} auch anwendbar, wenn man den Druckbereich so einschränkt, dass S_{eff} in diesem Bereich annähernd konstant ist.

Bei der Bestimmung der Leitwerte muss zwischen *molekularer* und *viskoser* Gasströmung unterschieden werden. Dazu benötigt man die mittlere freie Weglänge λ . Diese gibt an, welche Distanz ein Molekül im Mittel zurücklegen kann, bis es mit einem anderen Teilchen zusammenstößt. Bei hohen Drücken kann man das Gas wie ein zähes Medium betrachten und man spricht von viskoser Strömung. Wird der Druck geringer, so steigt λ an. Wenn die mittlere freie Weglänge größer wird als die Gefäßdimension, spricht man von molekularer Strömung. Der Übergang von viskoser zu molekularer Strömung findet in einem Druckbereich von $(1 - 10^{-3})$ hPa statt.

In einem Rohr der Länge l nimmt $p(x)$ linear mit x ab ($0 \leq x \leq l$). Man definiert $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$ wobei p_1, p_2 den Druck am Anfang und Ende des Rohrs bezeichnen. Für den Leitwert eines Rohres mit Durchmesser d und Länge l gilt dann für viskose Strömung:

$$L = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \eta \cdot l} \cdot \bar{p} \quad (5)$$

Und für molekulare Strömung:

$$L = \sqrt{\frac{\pi \cdot k_b \cdot T}{18 \cdot m}} \cdot \frac{d^3}{l} \quad (6)$$

η bezeichnet in Gleichung 5 die Viskosität des Gases.

2 Experimentelles Vorgehen

Bei den hier betrachteten Versuchen wird eine Drehschieberpumpe verwendet, um ein Vakuum zu erzeugen. Der maximal erreichbare Druck der Pumpe liegt bei ca. 10^{-3} hPa, also noch im Bereich des Feinvakuums. Zur Druckmessung wird ein Pirani-Manometer verwendet, welches zuvor mithilfe eines digitalen Membran-Manometers kalibriert wird.

Beim Pirani-Manometer wird in dem Raum, in welchem der Druck gemessen werden soll, ein Wolframdraht von Strom durchflossen. Das umliegende Gas kühlt den Draht abhängig vom Druck und der Wärmeleitfähigkeit. Um den von der Temperatur abhängigen Widerstand aber konstant zu halten, wird der Strom von einem Steuergerät geregelt. Durch den angezeigten Strom lässt sich dann auf den Druck schließen. Der Strom wird bei den Versuchen filmisch protokolliert und anschließend tabelliert.

2.1 Kalibrierung des Pirani-Manometers

Um das Manometer zu kalibrieren, muss zuerst der Widerstand des Wolframdrahtes bei Raumtemperatur ermittelt werden. Dieser kann leicht durch den vom Steuergerät angezeigten Wert für Strom und Spannung berechnet werden. Anschließend wird ein Vergleichswiderstand mit einem um $5 - 10 \Omega$ größeren Wert eingestellt. Das Steuergerät regelt den Strom durch das Pirani-Manometer so, dass der Widerstand dem des Vergleichswiderstandes entspricht.

Zu Kalibrierung wird ein weiteres Manometer benötigt. Beide werden wie in Abbildung 1 über einen Schlauch an die Drehschieberpumpe angeschlossen. Diese wird solange angeschaltet, bis sich ein konstanter Druck einstellt. Anschließend wird langsam wieder Luft über das Dosierventil eingelassen und genügend relevante Wertepaare für Druck und Strom werden notiert. Dabei wird ein Druckbereich von $10^{-2} - 10^3$ hPa abgedeckt. Alle weiteren Versuche finden in diesem Bereich statt.

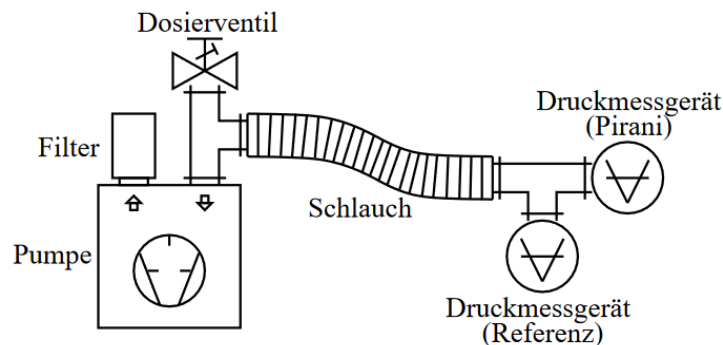


Abbildung 1: Aufbau zur Kalibrierung des Pirani-Manometers

2.2 Saugvermögen der Pumpe

2.2.1 Saugvermögen der Pumpe

Zur Bestimmung des Saugvermögens wird ein Kolbenprober mit $V = 100 \text{ mL}$ über einen Dreiweghahn und ein Dosierventil an die Pumpe angeschlossen. Der Aufbau ist in Abbildung 2 zu sehen. Nach dem Einschalten der Pumpe wird über das Dosierventil ein konstanter Druck eingestellt. Anschließend öffnet man den Dreiweghahn, wodurch Luft aus dem Gefäß gesaugt wird. Der Kolben bewegt sich ins Gefäß hinein, dadurch verkleinert sich das Volumen. Es wird die Zeit Δt gemessen, die für eine Volumenänderung von $\Delta V = 80 \text{ mL}$ benötigt wird. Die Versuchsdurchführung erfolgt bei vier verschiedenen Drücken im Bereich zwischen $0,5$ und 4 hPa .

2.2.2 Effektives Saugvermögen mit verschiedenen Aufsätzen

Zuletzt erfolgt die Bestimmung des effektiven Saugvermögens mit verschiedenen Leitwerten. Die Pumpe wird über einen Schlauch der Länge $l = (60,0 \pm 1,0) \text{ cm}$ und Durchmesser $d = (25,0 \pm 0,5) \text{ mm}$ mit einem

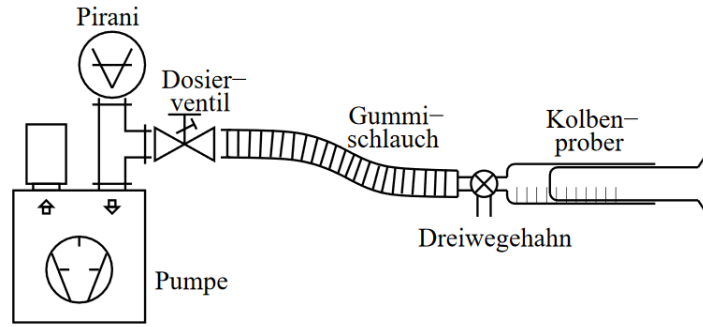


Abbildung 2: Aufbau zur Messung des Saugvermögens

Rezipienten mit Volumen $V = (3,0 \pm 0,1) \text{ l}$ verbunden. Dazwischen können noch verschiedene Kapillaren geschaltet werden. Die Pumpe wird für das Zeitintervall Δt eingeschaltet und der Druck in sinnvollen Zeitintervallen notiert. Es erfolgen drei Messungen: Die erste, mit nur dem Schlauch über zwei Minuten. Die zweite mit einer Kapillare mit Durchmesser $d_1 = (2,0 \pm 0,1) \text{ mm}$ und Länge $l = (9,5 \pm 0,2) \text{ cm}$ über acht Minuten und die dritte mit einer Kapillare von gleicher Länge und vom Durchmesser $d_1 = (3,0 \pm 0,1) \text{ mm}$ über acht Minuten

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Kalibrierung des Pirani-Manometers

Bei Raumdruck ergibt sich für den Wolframdraht ein Widerstand von $R = 37,9 [\Omega]$. Der eingestellte Vergleichswiderstand am Steuergerät beträgt $R_v = 44,0 \Omega$ und die Pumpe erreicht einen Minimaldruck von $p_{min} = (0,010 \pm 0,004) \text{ mbar}$. Es wurden 25 Strom-Druck-Wertepaare genommen, je 5 pro Zehnerpotenz, um eine vernünftige Funktion für den Druck in Abhängigkeit des Stromes zu finden. Die Werte sind in Tabelle 4 im Anhang und in Abbildung 3 aufgetragen. Eine möglichst genaue Funktion zu finden erweist sich als schwierig, da sich die Krümmung der Kurve oft ändert. Um die Messwerte möglichst genau anzunähern, wird die Funktion $p(I)$ in fünf Teilbereiche gesplittet, um ein Intervall von $I \in [3,0; 37,0] \text{ mA}$ abzudecken.

$$p_1 : [3,0; 8,5] \rightarrow \mathbb{R}, p_1(I) = 8,673 \cdot 10^{-3} \cdot I^2 - 2,578 \cdot 10^{-2} \cdot I + 4,08 \cdot 10^{-3}$$

$$p_2 : (8,5; 15,0] \rightarrow \mathbb{R}, p_2(I) = 3,889 \cdot 10^{-2} \cdot I - 7,333 \cdot 10^{-2}$$

$$p_3 : (15,0; 33,5] \rightarrow \mathbb{R}, p_3(I) = 1,583 \cdot 10^{-2} \cdot I^2 - 3,266 \cdot 10^{-1} \cdot I + 1,994$$

$$p_4 : (33,5; 36,5] \rightarrow \mathbb{R}, p_4(I) = 1,249 \cdot 10^{-12} \cdot \exp(0,8819 \cdot I)$$

$$p_5 : (36,5; 37] \rightarrow \mathbb{R}, p_5(I) = 2002 \cdot I - 7,288 \cdot 10^4$$

Der Übersicht halber wird hier auf die Einheiten verzichtet. I ist in mA anzugeben und die Funktionen liefern ein Ergebnis in hPa bzw. mbar. Die fünf Graphen sind in Abbildung 3 aufgetragen. Das Fitten der Werte erfolgte mit MatLab. Das Programm liefert zu jedem Parameter den Konfidenzbereich auf dem Vertrauensniveau 95%. Mit den Intervallgrenzen $z_u = a - \sigma_a$ und $z_o = a + \sigma_a$ und dem Parameterwert a lässt sich für jeden Parameter die Standardabweichung durch $\sigma_a = z_o - a$, und die Unsicherheit durch $u(a) = 2\sigma_a$ berechnen. Die Parameterunsicherheiten zu berücksichtigen ergab jedoch viel zu hohe Gesamtunsicherheiten für $p(I)$, weshalb bei den folgenden Rechnungen darauf verzichtet wird. Es wird jedoch berücksichtigt, dass der angezeigte Strom ständig um 0,1 mA schwankte; daher folgt $u(I) = 0,1 \text{ mA}$.

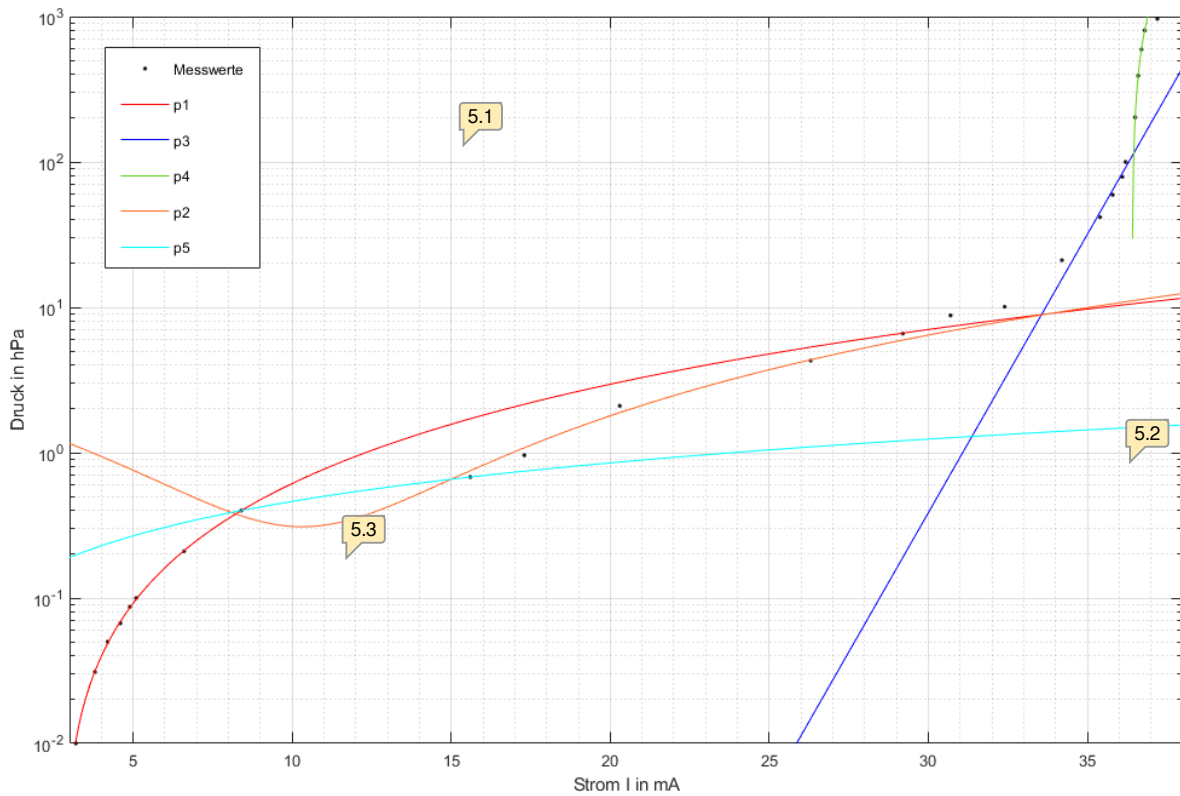


Abbildung 3: p-I Diagramm mit Messwerten und Fitkurven

Abbildung 4 zeigt die 25 Druckwerte, aufgetragen gegen die jeweilige Leistung des Manometers. Die Fehlerbalken für den Druck errechnen sich aus den Herstellerangaben des Membran-Manometers: $\pm 20\%$ des Wertes $\pm 0,002$ hPa für $p < 5$ hPa und $\pm 0,8\%$ für $p \geq 5$ hPa. Die Leistung kann durch $P = R_v \cdot I^2$ bestimmt werden, wobei für I die Werte aus Tabelle 4 verwendet wurden. Aus dem Diagramm wird deutlich, dass Leistung und Druck in einem Bereich von ca. 0,4 mW bis 13,5 mW annähernd proportional zueinander sind. Diese Werte liegen im Bereich der molekularen Strömung. Für Leistungen, die größer als 13,5 mW sind, befindet man sich im viskosen Strömungsbereich und der Druck steigt rapide nichtlinear an.

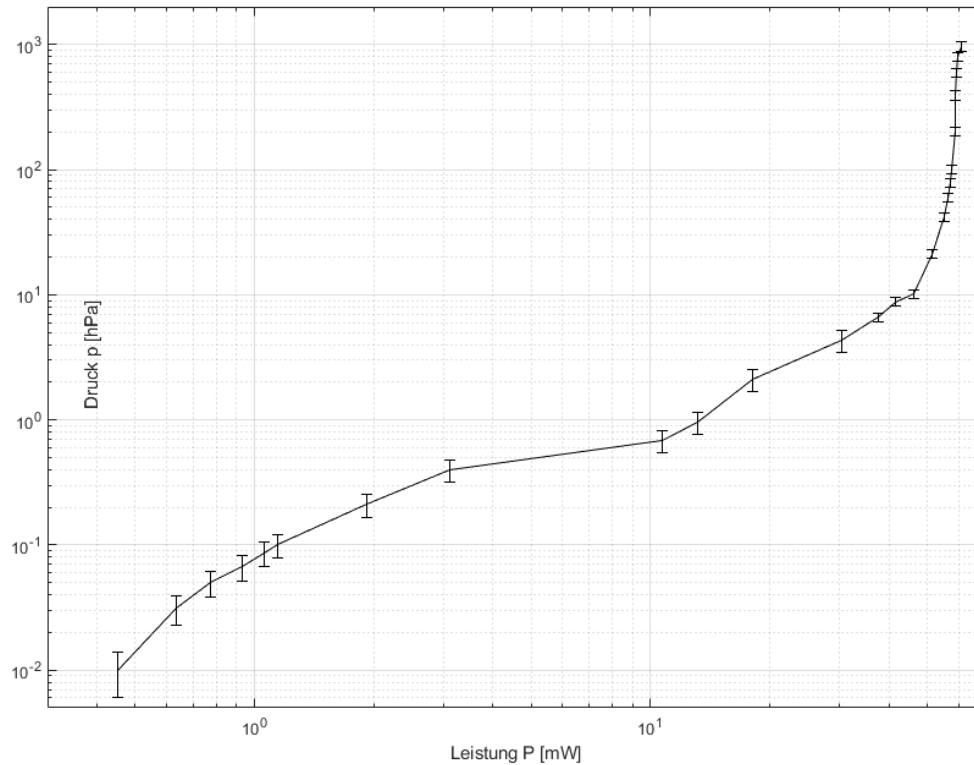


Abbildung 4: Druck-Leistungs-Diagramm mit Messwerten und Druck-Fehlerbalken

3.2 Bestimmung des Saugvermögens

Aus Gleichung 2 und der Bedingung, dass die Saugleistung am Kolbenprober (Druck $p_o = 960h$ Pa) gleich der Saugleistung an der Pumpe (Druck $p(t)$) ist, folgt:

$$S = \frac{p_o \cdot \Delta V}{p \cdot \Delta t} \tag{7}$$

Damit lässt sich mit Hilfe der gemessenen Drücke und Zeiten die Saugleistung bestimmen. Dies ergibt einen Mittelwert $\bar{S} = 3,5 \frac{m^3}{h}$. Die einzelnen Werte sind Tabelle 1 aufgetragen.

6.1

Δt [s]	$p(t)$ [hPa]	S [$\frac{m^3}{h}$]
286 ± 1	$0,51 \pm 0,07$	$1,91 \pm 0,16$
69 ± 1	$1,34 \pm 1,96$	$2,98 \pm 0,39$
29 ± 1	$2,29 \pm 1,96$	$4,16 \pm 0,72$
14 ± 1	$4,01 \pm 1,96$	$4,93 \pm 1,13$

Tabelle 1: Saugvermögen bei verschiedenen Drücken

Der Mittelwert liegt der Firmenangabe von $S = 3,7 \frac{m^3}{h}$ recht nahe. Die Angabe eines höheren Wertes lässt sich möglicherweise auf bessere Dichtungen zurückführen. Außerdem muss die Reibung des Glaskolbens berücksichtigt werden, der den Wert der Saugleistung etwas reduziert. Insbesondere bei 100 ml, wenn also der Kolben ganz ausgezogen ist, erzeugt dessen Gewicht ein Drehmoment um den Rand des Gefäßes, sodass das der Kolben gegen die Außenwand drückt und damit eine erhöhte Reibung entsteht.

Eine zusätzliche Ungenauigkeit ergibt sich durch das Ablesen der Messstriche am Kolbenprober. Die Messstriche haben eine gewisse Dicke, sodass sie nicht den absolut exakten Wert angeben. Die Volumengenauigkeit wurde daher auf $u(V) = 1,0 \text{ ml}$ abgeschätzt. Außerdem ist der Kolben bei der Messung in recht schneller Bewegung, was es schwierig macht, per Augenmaß im richtigen Moment die Zeit zu stoppen. Dies führt trotz genauer Smartphone-Stoppuhren zu einer zeitlichen Ungenauigkeit, die auf $u(t) = 1,0 \text{ s}$ geschätzt wird. Zusätzlich war zu beobachten, dass während des Saugvorgangs der angezeigte Strom und damit auch der Druck schwankte, was ebenfalls den Wert der Saugleistung etwas verfälscht. $u(p(t))$ wurde bestimmt, indem die geschätzte Unsicherheit des Stroms $u(I) = 0,1 \text{ mA}$ in die in Abschnitt 3.1 bestimmten passenden $p(I)$ -Funktionen eingesetzt wurde. Im Gegensatz dazu kann man $u(S)$ mithilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnen.

3.3 Effektives Saugvermögen der Pumpe

Das folgende $p(t)$ -Diagramm zeigt die bei den drei Messungen notierten Druckwerte.

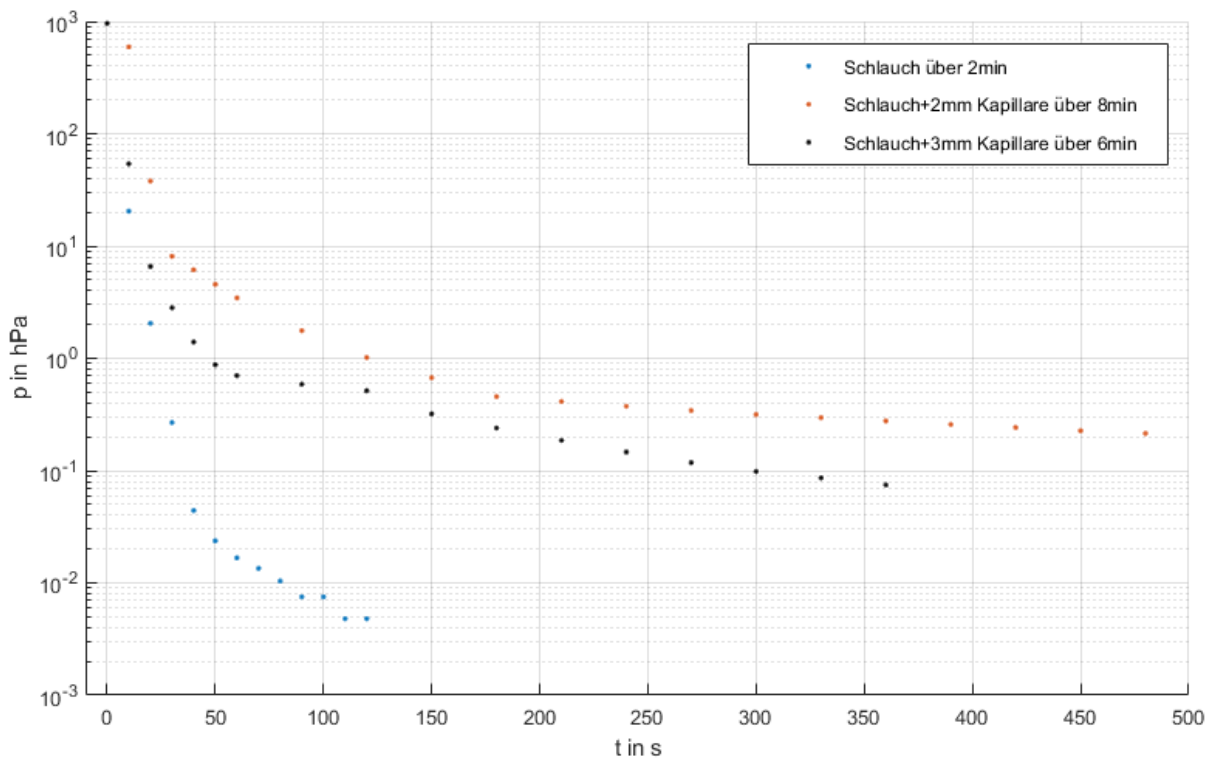


Abbildung 5: p - t Diagramm der 3 Messungen

Während bei kleinen Zeiten im viskosen Strömungsbereich ein rapider Druckabfall zu beobachten ist, nimmt der Druck bei molekularer Strömung sehr viel langsamer ab. Die logarithmische Steigung b der Funktionen lässt sich mit

$$b = \frac{\Delta \ln(p(t))}{\Delta t} \quad (8)$$

auch numerisch berechnen. Mit Gleichung 8 ergeben sich folgende Werte:

Messung	b im viskosen Bereich [$\frac{hPa}{s}$]	b im molekularen Bereich [$\frac{hPa}{s}$]
1	-0,19	-0,044
2	-0,059	-0,0025
3	-0,14	-0,0064

Tabelle 2: logarithmische Steigung im viskosen und molekularen Bereich

Um das effektive Saugvermögen des Schlauchs und der Kapillare mit 2mm Durchmesser berechnen zu können, benötigt man Gleichung 4. Löst man diese nach S_{eff} auf, ergibt sich folgender Ausdruck.

$$S_{eff} = -\ln\left(\frac{p(t)}{p_0}\right) \frac{V}{t} \quad (9)$$

Für V wird hier jeweils das Volumen des Schlauchs oder der Kapillare eingesetzt und der Normaldruck p_0 in Garching liegt bei ca. 960 hPa. Zum Zeitpunkt t wurde der angezeigte Strom I in mA notiert. Dieser kann nun mithilfe der bei der Kalibrierung des Pirani-Manometers bestimmten $p(I)$ -Funktion in $p(t)$ umgerechnet werden.

Als Mittelwerte für das effektive Saugvermögen bei viskoser Strömung (also im Druckbereich von $p(t) = 1-1000$ hPa) erhält man somit für den Schlauch $S_{eff} = 0,37 \frac{m^3}{h}$ bzw. $S_{eff} = 1,1 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{h}$ für die Kapillare. Bei molekularer Strömung ($p(t) = 10^{-3}-1$ hPa) ergeben sich mit $S_{eff} = 0,18 \frac{m^3}{h}$ für den Schlauch und $S_{eff} = 1,03 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{h}$ für die Kapillare etwas kleinere Mittelwerte.

Als Vergleich zu diesen experimentell ermittelten Ergebnissen soll S_{eff} nun auch noch theoretisch bestimmt werden. Dazu berechnet man für viskose Ströme mit Gleichung 5 zunächst die Leitwerte des Schlauchs und der beiden Kapillaren, wobei \bar{p} hier als 5 hPa und die Viskosität η als $1,82 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{ms}$ angenommen werden.

In einem niedrigeren Druckbereich bei einer Lufttemperatur von $T = 20^\circ C$ muss man stattdessen

$$L = 121 \frac{m}{s} \cdot \frac{d^3}{l} \quad (10)$$

zur Bestimmung der Leitwerte verwenden.

Das effektive Saugvermögen kann für beide Strömungsarten schließlich mit Gleichung 3 berechnet werden, da es sich um eine Reihenschaltung des Schlauchs und der jeweiligen Kapillare handelt. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen.

	$L_S [\frac{m^3}{h}]$	$L_{K1} [\frac{m^3}{h}]$	$L_{K2} [\frac{m^3}{h}]$
viskose Strömung	$1580,34 \pm 129,14$	$0,409 \pm 0,082$	$2,07 \pm 0,28$
molekulare Strömung	$11,34 \pm 0,19$	$0,0367 \pm 0,0055$	$0,124 \pm 0,013$
	$S_{eff,S} [\frac{m^3}{h}]$	$S_{eff,S+K1} [\frac{m^3}{h}]$	$S_{eff,S+K2} [\frac{m^3}{h}]$
viskose Strömung	$0,37 \pm 0,099$	$0,037 \pm 0,067$	$0,13 \pm 0,12$
molekulare Strömung	$0,279 \pm 0,058$	$0,0037 \pm 0,0055$	$0,012 \pm 0,012$

Tabelle 3: Leitwerte und effektives Saugvermögen des Schlauchs und der Kapillaren

Die Indizes S, K1 und K2 stehen hier jeweils für den Schlauch und die Kapillare mit 2mm oder 3mm Durchmesser. $u(S_{eff})$ nimmt relativ große Werte an, da das effektive Saugvermögen von vielen unterschiedlichen Variablen abhängt. Die experimentellen und theoretischen Werte für $S_{eff,S}$ stimmen innerhalb der Unsicherheiten überein.

4 Anhang

Nr.	Druck [mBar]	Strom [mA]	Nr.	Druck [mBar]	Strom [mA]
1	0,010	3,2	14	8,80	30,7
2	0,031	3,8	15	10,10	32,4
3	0,050	4,2	16	21,10	34,2
4	0,067	4,6	17	41,70	35,4
5	0,087	4,9	18	59,40	35,8
6	0,10	5,1	19	78,90	36,1
7	0,21	6,6	20	100,00	36,2
8	0,40	8,4	21	203,20	36,5
9	0,68	15,6	22	392,40	36,6
10	0,96	17,3	23	593,30	36,7
11	2,10	20,3	24	803,60	36,8
12	4,30	26,3	25	964,30	37,2
13	6,60	29,2			

Tabelle 4: Messwerte zur Piranimanometer Kalibrierung

	a_i	z_{a_i}	$u(a)$	b_i	z_{b_i}	$u(b)$	c_i	z_{c_i}	$u(c)$
1	0,008673	0,009277	0,0012	-0,02578	-0,01865	0,014	0,004081	0,023600	0,039
2				0,03889	0,03889	0	0,07333	0,07333	0
3	0,01583	0,02538	0,0191	-0,3266	0,009462	0,672124	1,994	4,764	5,5
4	$1,249 \cdot 10^{-12}$	$1,44 \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-11}$	0,8819	1,175	0,5862			
5			0	2002	2146	288	-72880	-67610	10^4

Tabelle 5: Parameterwerte mit oberer Konfidenzintervall-Grenze und Unsicherheit

5 Literaturverzeichnis

1. Anleitung Versuch "Vakuum"

Bezugsquelle: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap2/VAK.pdf>

2. Gebrauchsanleitung des Membran-Manometers Ilmvac-Piza-111"

Bezugsquelle: <https://www.manualslib.com/manual/1388568/Ilmvac-Piza-111.html?page=9#manual>

Versuch Vakuum

24.9.20

Strom schwankt leicht

① $R_v = 44 \Omega$, $R = 37,9 \Omega$, $I = 39,3 \text{ mA}$, $U = 1,69 \text{ V}$

③ Unsicherheit Dichtung Schlauch

	geplant:		eingestellt:
a)	0,57 hPa	14,5 mA	14,9 mA
b)	1,4 hPa	18,5 mA	18,4 mA
c)	2,6 hPa	21,4 mA	21,5 mA
d)	3,9 hPa	25,6 mA	25,6 mA

d) $t_1 = 4 \text{ min } 45 \text{ s}$, $t_2 = 4 \text{ min } 46 \text{ s}$, bei $\Delta V = 40 \text{ mL}$: $t_3 = 3 \text{ min } 23 \text{ s}$
 nichtlinearer Verlauf (ev. Reibung beim Kalden)

b) t_1 / , $t_2 = 1 \text{ min } 09 \text{ s}$, bei $\Delta V = 40 \text{ mL}$: $t_3 = 34,5 \text{ s}$

c) $t_1 = 29 \text{ s}$, $t_2 = 29 \text{ s}$, bei $\Delta V = 40 \text{ mL}$: $t_3 = 14 \text{ s}$

d) $t_1 = 15 \text{ s}$, $t_2 = 14 \text{ s}$, bei $\Delta V = 40 \text{ mL}$: $t_3 = 7 \text{ s}$

④ Länge Schlauch: $(60 \pm 1) \text{ cm}$

a) nur Schlauch über 2 min, bei $t = 0 \text{ s}$ $I = 36,2 \text{ mA}$

t	I in mA	t	I in mA
bes 10s	34,5	100s	3,1
20s	20,8	110s	3,0
30s	7,2	120s	3,0
40s	4,1		
50s	3,6		
60s	3,4		
70s	3,3		
80s	3,2		
90s	3,1		

b) Schlauch & Kapillare mit ^{großem} ~~kleinem~~ Durchm. $O_s: 36,6 \text{ mA}$

t in s	I in mA
10	35,6
20	30,2
30	22,9
40	18,6
50	15,0
60	13,8
90	10,7
120	8,9
150	7,7
180	6,9
210	6,3
240	5,8
270	5,4
300	5,1
330	4,9
360	4,7
390	4,5
420	4,4
450	4,2
480	4,1

c) Schlauch & ~~kleinem~~ Kap. mit ^{kleinem} ~~großem~~ Durchmesser $O_s: 37,0 \text{ mA}$ (38)

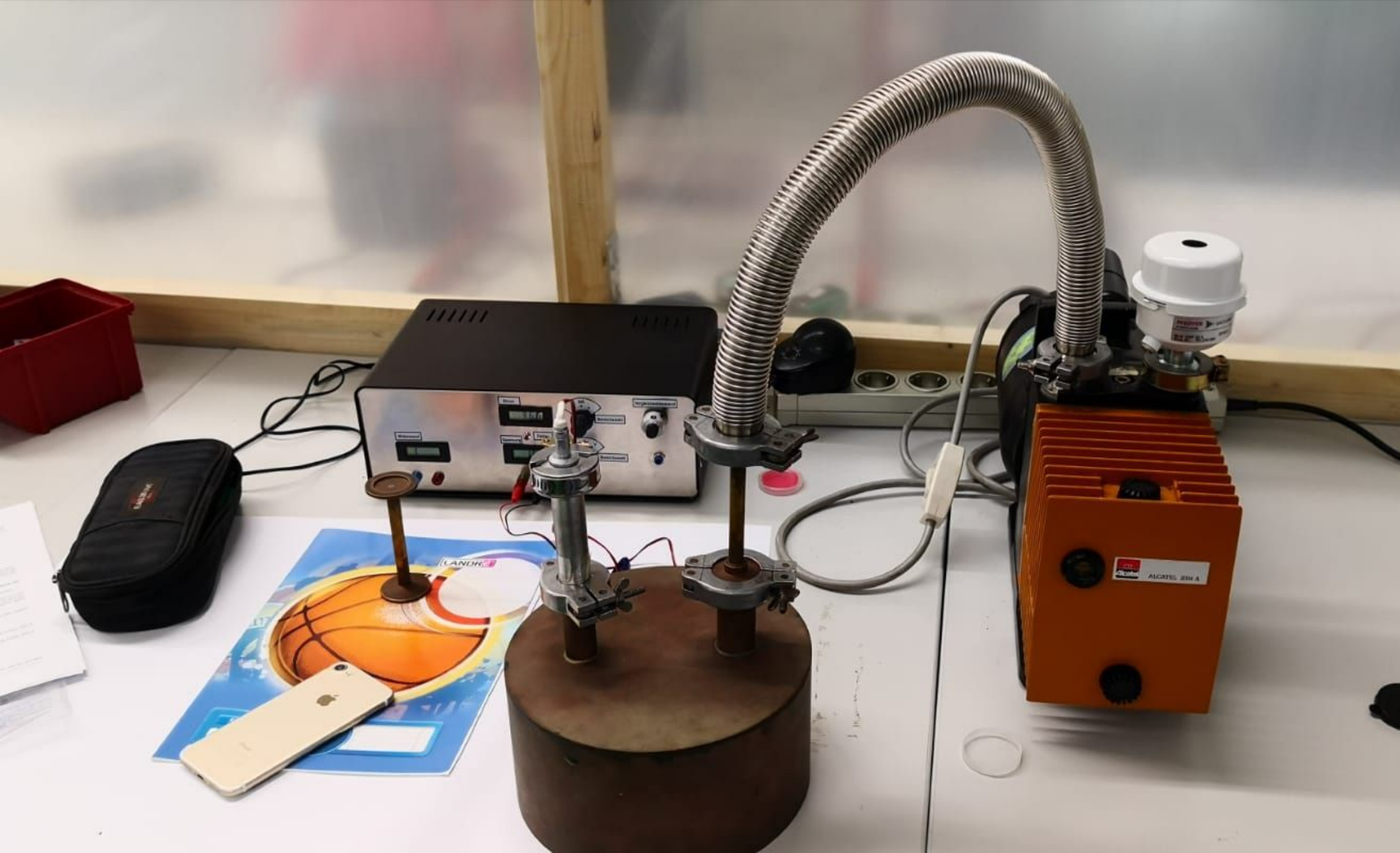
t in s	I in mA
10	36,7
20	35,2
30	32,5
40	29,5
50	26,7
60	24,4
90	19,9
120	17,0
150	15,1
180	13,6
210	12,5
240	11,5
270	10,7
300	10,0
330	9,5
360	9,0
390	8,5
420	8,1
450	7,7
480	7,4

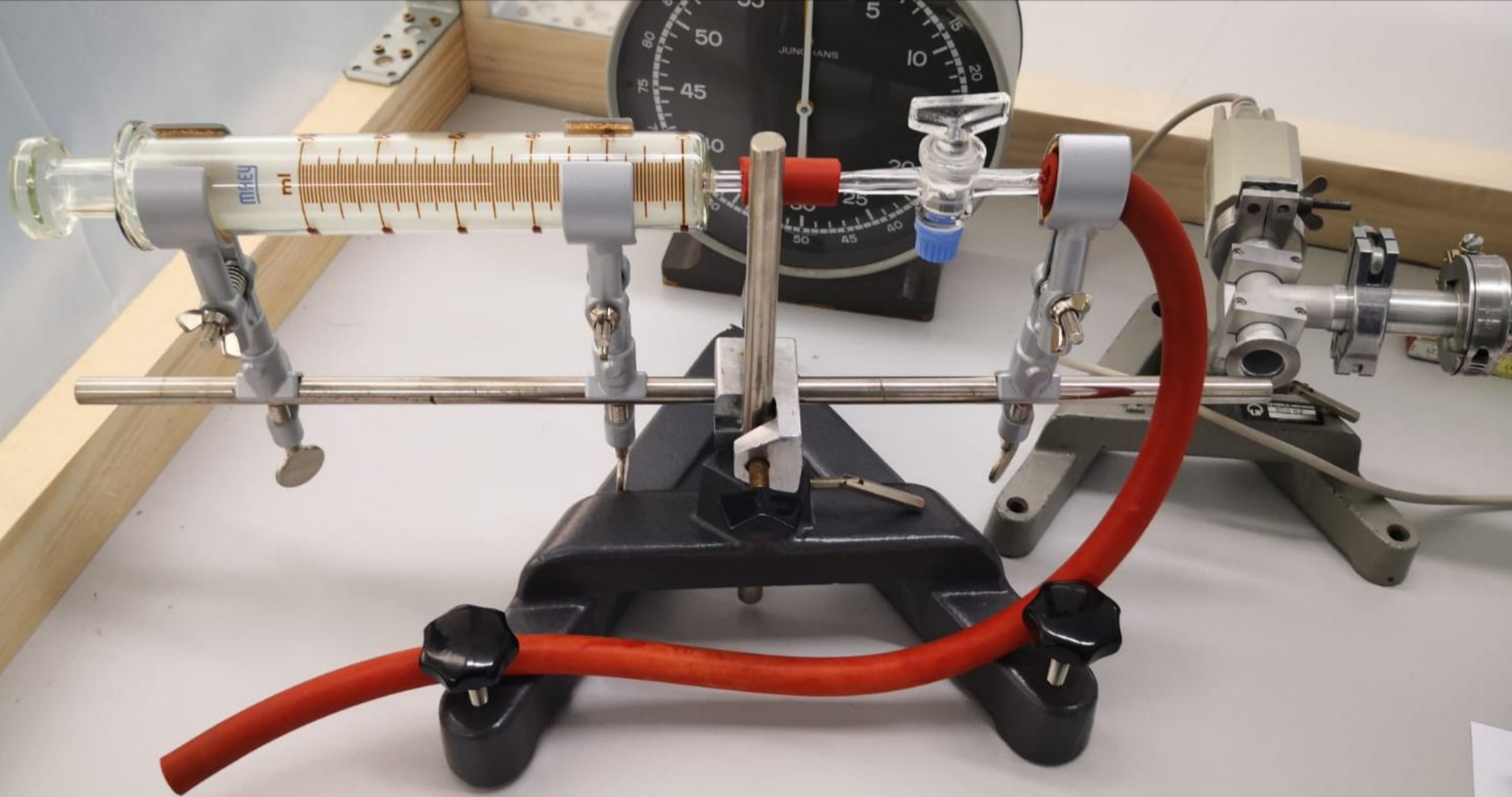
Unsicherheit $t = \pm 1 \text{ s}$

Unsicherheit $I \approx \pm 0,2 \text{ mA}$

②

<u>Druck in mbar</u>	<u>Strom in mA</u>
0,010	3,2
0,031	3,8
0,050	4,2
0,067	4,6
0,087	4,9
<hr/>	
0,10	5,1
0,21	6,6
0,40	8,4
0,68	15,6
0,96	17,3
<hr/>	
2,10	20,3
4,30	26,3
6,60	29,2
8,80	30,7
10,10	32,4
<hr/>	
21,10	34,2
41,70	35,4
59,40	35,8
78,90	36,1
100,00	36,2
<hr/>	
203,20	36,5
392,40	36,6
593,30	36,7
803,60	36,8
964,30	37,2





Index der Kommentare

- 3.1 10^{-2}
- 3.2 minimal
- 3.3 Der Widerstand musste nicht berechnet werden. Ihr konntet ihn einfach ablesen, als ihr das Pirani manometer links an den Steuerkasten angeschlossen habt.
- 5.1 Für die Übersichtlichkeit sollte man die jeweiligen Fitfunktionen nur in ihrem jeweils gültigem Bereich plotten
- 5.2 Ich dachte der 5te Fit gilt für den letzten Druckbereich. Sieht hier irgendwie so aus als würde die Kurve zu keinem Abschnitt gehören
- 5.3 In diesem Bereich ist die Funktion sehr unphysikalisch, da mit steigender Stromstärke auch der Druck steigt und nicht sinkt
- 6.1 Wenn ihr noch eine Unsicherheit auf den gemittelten Wert angebt, könnt ihr eine Aussage darüber treffen, ob der Wert innerhalb seiner Fehlergrenzen noch mit dem Herstellerwert übereinstimmt