

Versuch: P2-42  
**Vakuum (1)**  
 - *Auswertung* -

Versuchsdurchführung: Montag, 26. Juni 2006

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Probeweise Evakuierung</b>	<b>2</b>
1.1 Druckänderungs-Geschwindigkeiten . . . . .	2
1.2 Messgeräte . . . . .	2
1.3 Gasentladungen . . . . .	3
<b>2 Belüften des Rezipienten</b>	<b>4</b>
<b>3 Druck-Zeit-Abhängigkeit der Evakuierung</b>	<b>4</b>
3.1 Evakuierung mit der Vorpumpe . . . . .	4
3.1.1 Messwerte des Membran-Vakuummeters . . . . .	4
3.1.2 Messwerte des Wärmeleitungs-Vakuummeters . . . . .	5
3.2 Evakuierung mit der Diffusionspumpe . . . . .	6
3.3 Kühlfinger . . . . .	7
<b>4 Aufdampfen eines Indium-Flecks</b>	<b>8</b>
<b>5 Leckrate des Rezipienten</b>	<b>8</b>
<b>6 Aufdampfbilder</b>	<b>9</b>
<b>7 Effektives Saugvermögen und Leitwert</b>	<b>9</b>
7.1 6 mm-Rohr . . . . .	9
7.2 2 mm-Rohr . . . . .	11
7.3 Theoretisch zu erwartende Leitwerte . . . . .	12
<b>8 Versuchsabbau</b>	<b>13</b>

# 1 Probeweise Evakuierung

Wie in der Vorbereitung im Detail erläutert, evakuierten wir zunächst mittels Vorpumpe die Diffusionspumpe und den Vakuumpuffer auf 0,04 Torr. Anschließend evakuierten wir mit der Vorpumpe den Rezipienten unter Beobachtung der Messgeräte.



## 1.1 Druckänderungs-Geschwindigkeiten

Auf unseren Messinstrumenten beobachteten wir qualitativ: während zu Beginn der Druck sehr schnell sank, verringerte sich mit abnehmendem Druck die Geschwindigkeit der Druckänderung. Im Bereich von 0,04 Torr bewegte sich der Zeiger fast gar nicht mehr! Die Begründung hierfür ist einfach: anfangs waren noch sehr viele Luftteilchen im System vorhanden, die Pumpe hatte leichtes Spiel große Mengen davon abzusaugen. Mit sinkendem Druck befinden sich viel weniger Luftteilchen im Rezipienten - umso schwerer wird es, diese auch noch abzusaugen. Die relativ „grobe“ Vorpumpe war dazu dann auch nicht in der Lage.

## 1.2 Messgeräte

Schon vor Versuchsbeginn wird beim Betrachten der Skalenbereiche der Messgeräte klar: nicht jedes Vakuummeter eignet sich für jeden Druckbereich. In folgender Auflistung seien die Geräte und ihre jeweiligen Einsatzbereiche aufgeführt:

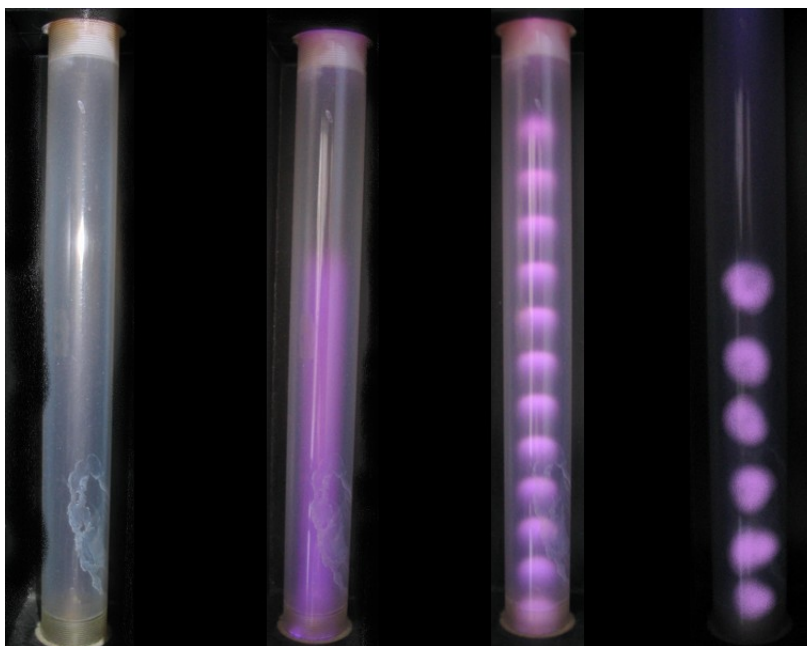
- **Membran-Vakuummeter:** geeignet für den Beginn der Messung, der Anzeigebereich geht von Normaldruck bis zu 1 Torr. Hier beobachteten wir die sehr schnelle Druckabnahme am Anfang. Unterhalb eines Druckes von 1 Torr bewegt sich der Zeiger zwar weiter, da aber keine Skala mehr vorhanden ist können wir davon ausgehen, dass dieses Messgerät sich in diesem Bereich nicht mehr eichen und somit auch nicht für eine Messung einsetzen lässt.
- **Wärmeleitungs-Vakuummeter:** Das Wärmeleitungs-Vakuummeter der Firma Pirani kann zwischen zwei Messbereichen umschalten. Der erste liefert Werte zwischen 0,1 Torr und 100 Torr, wobei man eigentlich erst unterhalb von 20 Torr einigermaßen genaue Werte ablesen kann. Oberhalb davon ist die nichtlineare Skala sehr grob. Der zweite Messbereich geht von 0,1 Torr bis  $10^{-3}$  Torr, die Umschaltung erfolgte automatisch durch das Gerät. Am Ende dieses Versuchsteils befanden wir uns im zweiten Messbereich.

- **Kaltkathoden-Vakuummeter:** Unterhalb von 0,01 Torr liefert das Pirani-Vakuummeter ebenfalls keine sehr exakten Werte mehr, so dass wir dann in den folgenden Versuchsteilen das Penning-Kaltkathoden-Vakuummeter eingeschaltet haben (in Aufgabe 1 erreichten wir, mit der Vorpumpe allein, diesen Druck gar nicht). Da 0,01 Torr das Ende des Penning-Messbereichs darstellte, reichte dieses Instrument für alle kleineren in diesem Versuch erreichten Drücke vollkommen aus. Auf den Einsatz des Ionisations-Vakuummeters verzichteten wir weitgehend, da wir wie gerade erläutert nicht ganz so niedrige Drücke erreichten und das Gerät auch nach Auskunft des Betreuers nicht so gut funktionierte.

### 1.3 Gasentladungen

Neben den eben beschriebenen Messgeräten warfen wir auch ab und zu einen Blick auf die Gasentladungsröhre, an der eine Hochspannung anlag. Wir beobachteten bei den verschiedenen Drücken:

- $\sim 2$  Torr: keine Gasentladung zu erkennen
- $2 - 1$  Torr: Gasentladung in der Röhre steigt an
- $\sim 0,5$  Torr: Gasentladung in der ganzen Röhre sichtbar (durchgängiges Leuchten)
- $\sim 0,2$  Torr: Lila Ringe erkennbar
- $< 0,2$  Torr: Ringe werden weniger, wandern zur Anode



Dieses Verhalten lässt sich folgendermaßen erklären: Bei Normaldruck stoßen die Elektronen der Hochspannungsquelle wegen der kurzen mittleren Weglänge ständig mit Gasatomen - sie haben also gar nicht die Möglichkeit, stark beschleunigt zu werden und dementsprechend Energie zu „tanken“. Sinkt der Druck und damit die Zahl der Teilchen in der Röhre, so werden die Stöße seltener, die Elektronen können zwischen zwei Stößen ausreichend Energie gewinnen. Ab einem gewissen Druck reicht diese Energie aus, um das Elektron eines Gasteilchens anzuregen und somit (beim Zurückfallen in die Ausgangsschale) die Emission eines Photons zu bewirken. Dies nehmen wir als Leuchterscheinung wahr. Bei noch niedrigerem Druck sehen wir Ringe. Diese Struktur kommt dadurch zustande, dass die Elektronen eben erst eine gewisse Strecke beschleunigt werden müssen, bis sie ausreichend Energie haben um ein Gasteilchen zum Leuchten zu bringen. Haben sie ihre Energie abgegeben, müssen sie erst wieder beschleunigt werden - in diesem Bereich sehen wir also kein Leuchten, d.h. eine Lücke zwischen zwei Ringen.

Bei noch niedrigeren Drücken nimmt diese Erscheinung wieder ab, denn: es sind dann so wenige Gasteilchen im Entladungsrohr enthalten, dass die Wechselwirkung eines Elektrons der Spannungsquelle mit einem Gasteilchen allein aufgrund der kleinen Teilchenzahl unwahrscheinlich wird.

## 2 Belüften des Rezipienten

Die Belüftung wurde entsprechend der Anleitung durchgeführt. Auf ein Nachfüllen des Indiums konnte verzichtet werden, da noch eine ausreichende Menge des Stoffes vorhanden war.

## 3 Druck-Zeit-Abhängigkeit der Evakuierung

### 3.1 Evakuierung mit der Vorpumpe

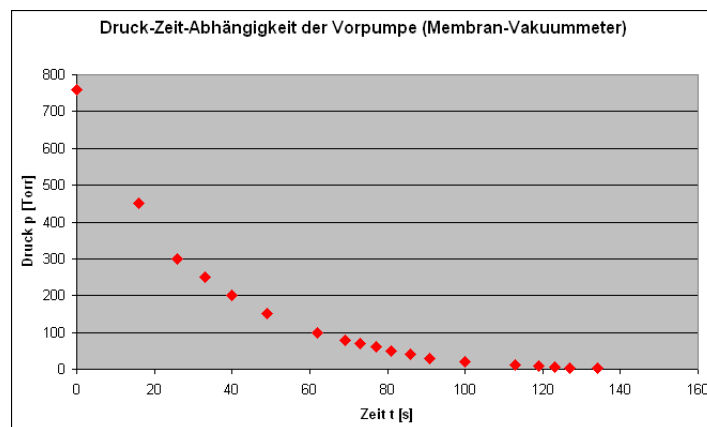
Bei der erneuten Evakuierung mittels Vorpumpe notierten wir diesmal den Druck in Abhängigkeit von der Zeit. Weil beim Wechsel der Messgeräte eine gewisse Diskrepanz feststellbar war (trotz fortgeschrittener Zeit plötzlich höherer Druckwert), betrachten wir die Ergebnisse der beiden Messgeräte einzeln:

#### 3.1.1 Messwerte des Membran-Vakuummeters

Von Normaldruck bis ca. 1 Torr lieferte das Membran-Vakuummeter gute Ergebnisse:

Zeit $t$ [s]	Druck $p$ [Torr]	$\ln p$
0	760	6,633318433
16	450	6,109247583
26	300	5,703782475
33	250	5,521460918
40	200	5,298317367
49	150	5,010635294
62	100	4,605170186
69	80	4,382026635
73	70	4,248495242
77	60	4,094344562
81	50	3,912023005
86	40	3,688879454
91	30	3,401197382
100	20	2,995732274
113	12	2,48490665
119	8	2,079441542
123	6	1,791759469
127	4	1,386294361
134	2	0,693147181

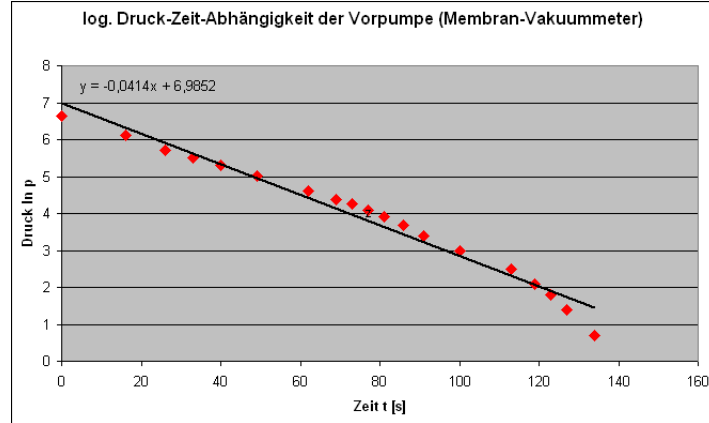
Aufgetragen im Schaubild sieht man sehr schön die exponentielle Druckabnahme:



In der Vorbereitung haben wir hergeleitet, wie man aus dem Zusammenhang zwischen Druck und Zeit das Saugvermögen der verwendeten Pumpe errechnen kann: hierzu tragen wir den Logarithmus des Drucks (deshalb schon in obiger Tabelle eingefügt) über der Zeit auf, womit wir eine Gerade erhalten sollten. Deren Steigung  $m$  ist, wie wir in der Vorbereitung gezeigt haben, gerade der negative Quotient von Saugvermögen und Volumen, also:

$$S = -V \cdot m \quad (1)$$

Der  $\ln p$  über  $t$ -Auftragung entnehmen wir die Steigung  $m = -0,0414$ :



Da das Volumen der Glasglocke mit  $V = 13 \text{ l}$  angegeben wurde, erhalten wir mit Formel (1) ein Saugvermögen von

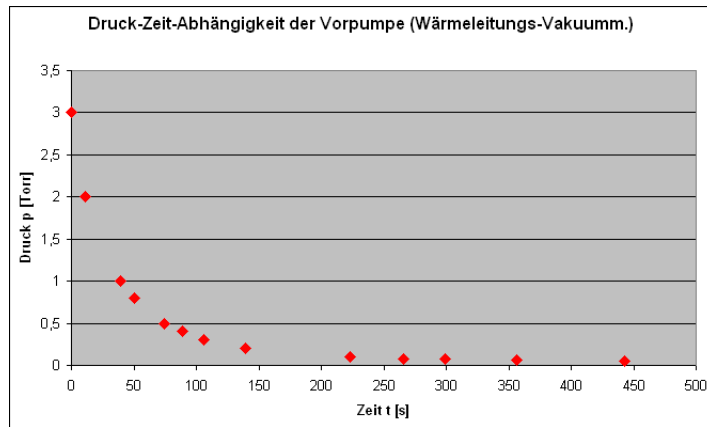
$$S = 0,538 \frac{\text{l}}{\text{s}}. \quad (2)$$

### 3.1.2 Messwerte des Wärmeleitungs-Vakuummeters

Während des Versuchs lief die Stoppuhr natürlich weiter, im Sinne schönerer Schaubilder haben wir allerdings rechnerisch die Zeit nach dem Messgerätewechsel wieder auf 0 gesetzt. In der Messtabelle ist allerdings weiterhin der unkorrigierte Zeitwert aufgeführt:

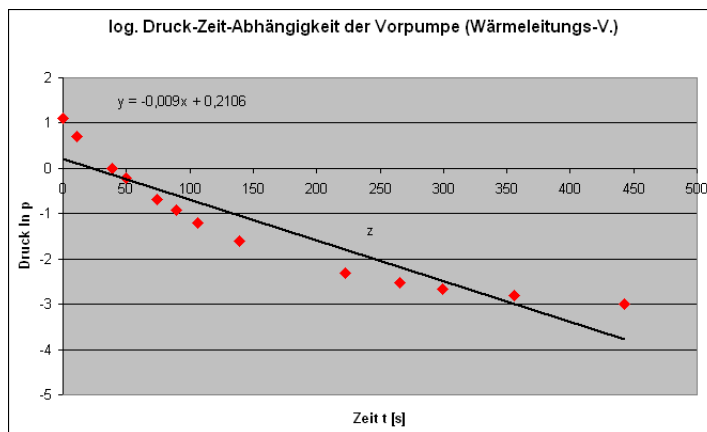
Zeit $t$ [s]	Druck $p$ [Torr]	$\ln p$
169	3	1,098612289
180	2	0,693147181
208	1	0
219	0,8	-0,223143551
243	0,5	-0,693147181
258	0,4	-0,916290732
275	0,3	-1,203972804
308	0,2	-1,609437912
392	0,1	-2,302585093
435	0,08	-2,525728644
468	0,07	-2,659260037
525	0,06	-2,813410717
612	0,05	-2,995732274

Das Schaubild, nun mit der „zurückgestellten“ Zeitachse, liefert wieder schön einen exponentiellen Zusammenhang, diesmal natürlich in einem deutlich geringeren Druckbereich.



Zur Bestimmung des Saugvermögens tragen wir wieder  $\ln p$  über  $t$  auf, lesen die Steigung der Ausgleichsgeraden ab und berechnen mit Formel (1) das Saugvermögen. Wir erhalten diesmal ein Saugvermögen der Vorpumpe von:

$$S = 0,117 \frac{l}{s} \quad (3)$$



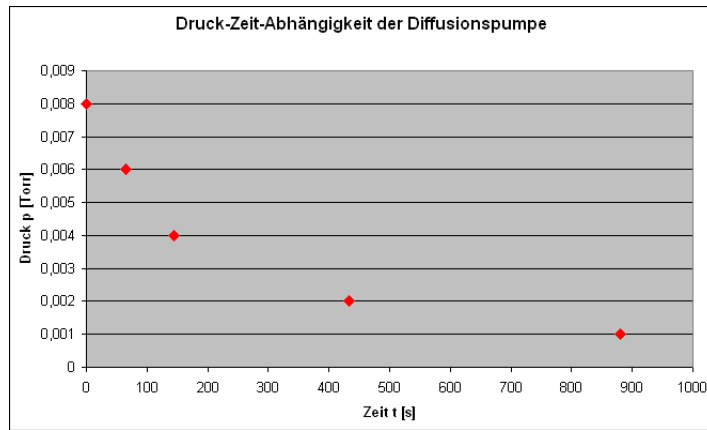
Bei niedrigeren Drücken ist das Saugvermögen der Pumpe also deutlich geringer.

### 3.2 Evakuierung mit der Diffusionspumpe

Nachdem mit der Vorpumpe keine nennenswerte Evakuierung mehr erzielt werden konnte, öffneten wir ein Ventil, so dass die Diffusionspumpe ihre Arbeit aufnehmen konnte. Sehr schnell sank der Druck weiter ab - leider war der Druckabfall so rasch, dass wir anfangs keine Messwerte aufnehmen konnten. Folgende fünf  $(p, t)$ -Wertepaare konnten dann aber doch noch aufgenommen werden:

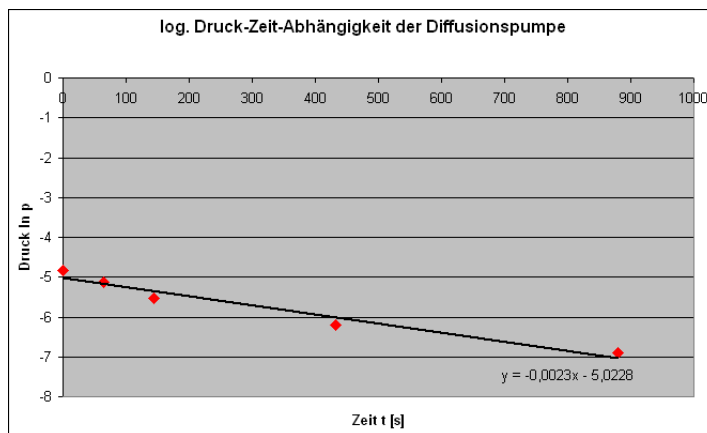
Zeit $t$ [s]	Druck $p$ [Torr]	$\ln p$
805	0,008	-4,828313737
870	0,006	-5,11599581
949	0,004	-5,521460918
1238	0,002	-6,214608098
1685	0,001	-6,907755279

Mit aus optischen Gründen auf 0 skaliertem Zeit ergibt sich auch hier ein exponentieller Zusammenhang zwischen Druck und Zeit:



Aus logarithmischer Auftragung, Steigung  $m$  der Ausgleichsgeraden und mit Formel (1) erhalten wir ein Saugvermögen der Diffusionspumpe von:

$$S = 0,030 \frac{l}{s} \quad (4)$$



Da wir wie gesagt die Messung erst eher gegen Ende des Saugvorgangs vornahmen, ist wie in 3.1 mit einem deutlich höheren Saugvermögen bei einem höheren Ausgangsdruck zu rechnen. Den Zahlenwert konnten wir aus o.g. Gründen allerdings nicht bestimmen.

### 3.3 Kühlfinger

Anschließend füllten wir flüssigen Stickstoff in den Kühlfinger der Glasglocke. Der Druck sank sofort von ca.  $1 \cdot 10^{-3}$  Torr auf  $2 \cdot 10^{-5}$  Torr, also einen deutlich niedrigeren Wert. Begründung: Die kinetische Energie der Gasteilchen hängt von der Temperatur ab. Sinkt die Temperatur, so steht den Gasteilchen auch weniger kinetische Energie zur Verfügung, die Geschwindigkeit nimmt ab. Dementsprechend stoßen auch weniger Teilchen aneinander und an die Glaswand, weshalb ein geringerer Druck zu verzeichnen ist (Druck lässt sich ja gerade als Stoß der Gasteilchen mit den Wänden beschreiben). Darüber hinaus führt die niedrige Temperatur dazu, dass evtl. noch im Kolben befindliche Luft kondensiert, was den Druck noch weiter verringert.



## 4 Aufdampfen eines Indium-Flecks

Bei dem in 3.3 mittels Kühlung erreichten niedrigen Druck dampften wir einen ersten Indium-Fleck auf die Glasscheibe auf. Die Auswertung dieses Versuchsteils möchten wir weiter hinten, in Aufgabe 6 gemeinsam mit den später aufgedampften Indiumflecken vornehmen.

## 5 Leckrate des Rezipienten

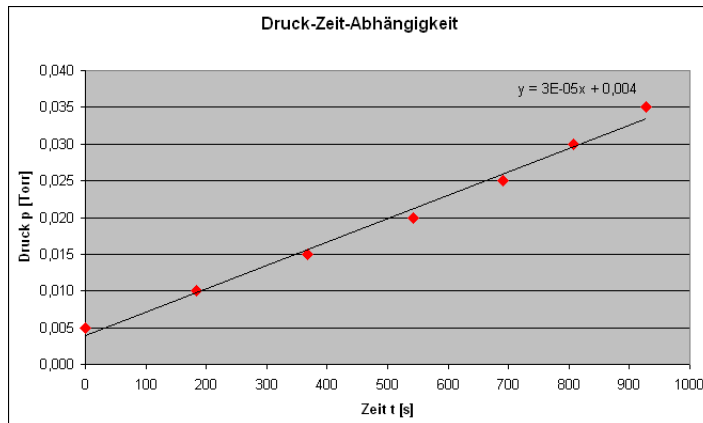
Nach dem Schließen der Zuleitungsventile beobachteten wir, wie der Druck aufgrund von Lecks in den Dichtungen von alleine ansteigt. Die Leckrate  $Q$  beträgt, wie in der Vorbereitung gezeigt:

$$Q = \frac{\Delta p \cdot V}{\Delta t} \quad (5)$$

Nach dem Schließen von Ventil V4 haben wir gemessen:

Zeit $t$ [s]	Druck $p$ [Torr]
0	0,005
183	0,010
368	0,015
543	0,020
691	0,025
808	0,030
927	0,035

Im Schaubild ergibt sich der erwartete lineare Zusammenhang:



Die Steigung in diesem Diagramm, also der Quotient  $\frac{\Delta p}{\Delta t}$ , ist  $3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Torr}}{\text{s}}$ . Setzen wir dies und das Glaslockenvolumen  $V = 13 \text{ l}$  in Formel (5) ein, so erhalten wir eine Leckrate von:

$$Q = 3,9 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Torr} \cdot \text{l}}{\text{s}} = 0,052 \frac{\text{Pa} \cdot \text{l}}{\text{s}} \quad (6)$$



## 6 Aufdampfbilder

Bei der Messung der Leckrate in Aufgabe 5 stieg der Druck an. Wir evakuierten wieder auf 0,004 Torr und dampften einen zweiten Indiumfleck neben den aus Aufgabe 4. Zur Erinnerung: in Aufgabe 4 hatten wir bei weit niedrigerem Druck,  $\sim 4 \cdot 10^{-5}$ , einen ersten Indium-Fleck aufgedampft. Ganz am Schluss gelang es uns (wieder bei Normaldruck), die beiden Flecken photographisch festzuhalten:



Der linke Fleck entstand bei dem tieferen Druck (Aufg. 4), der rechte bei dem höheren (Aufg. 6). Wie erwartet ist der Fleck, der bei tieferem Druck entstanden ist, deutlich schärfer abgegrenzt. Dies liegt daran, dass bei niedrigerem Druck aufgrund der geringeren Teilchendichte weniger Stöße stattfinden, die den Indium-Dampf streuen. Wir versuchten später auch noch bei höherem Druck einen Fleck aufzudampfen, was allerdings misslang. Die mittlere freie Weglänge war wohl schon so kurz, dass die Teilchen in alle Richtungen gestreut und überhaupt nicht mehr auf der Glasplatte wahrgenommen werden konnten.

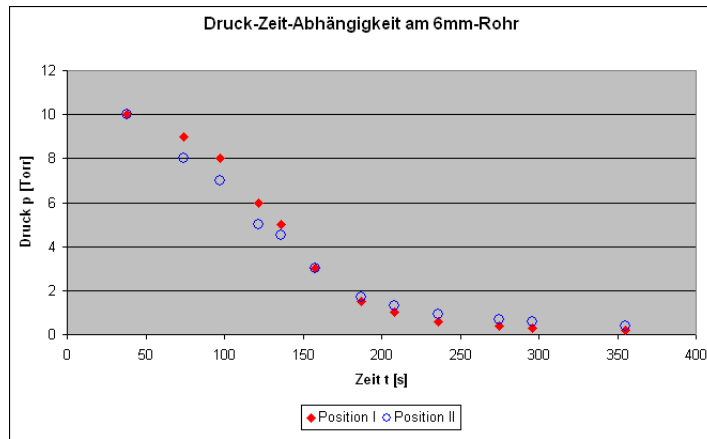
## 7 Effektives Saugvermögen und Leitwert

### 7.1 6 mm-Rohr

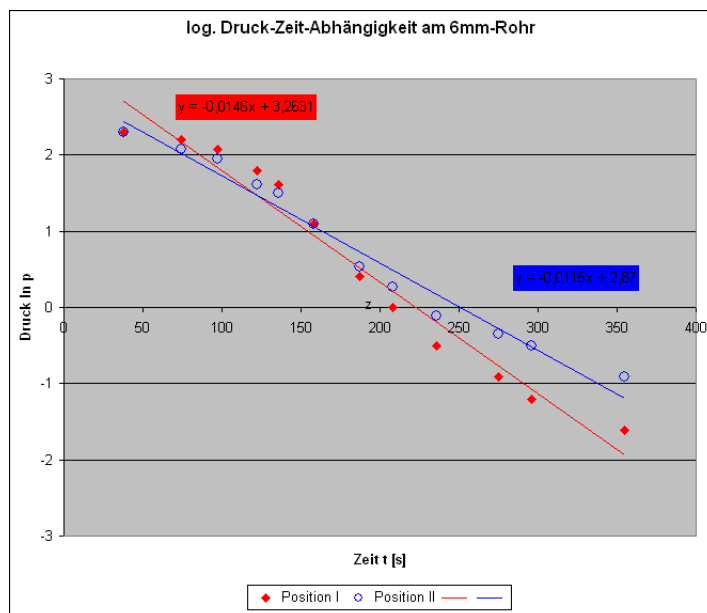
Zunächst bauten wir das Rohr mit einem Durchmesser von 6 mm zwischen Pumpe und Rezipient ein. An zwei Messpunkten - vor und hinter dem Rohr - nahmen wir zu verschiedenen Zeitpunkten die jeweiligen Drücke auf, die sich bei der Evakuierung ergaben.

Zeit $t$ [s]	Druck $p_1$ [Torr]	$\ln p_1$	Druck $p_2$ [Torr]	$\ln p_2$
38	10	2,302585093	10	2,302585093
74	9	2,197224577	8	2,079441542
97	8	2,079441542	7	1,945910149
122	6	1,791759469	5	1,609437912
136	5	1,609437912	4,5	1,504077397
158	3	1,098612289	3	1,098612289
187	1,5	0,405465108	1,7	0,530628251
208	1	0	1,3	0,262364264
236	0,6	-0,510825624	0,9	-0,105360516
275	0,4	-0,916290732	0,7	-0,356674944
296	0,3	-1,203972804	0,6	-0,510825624
355	0,2	-1,609437912	0,4	-0,916290732

Trägt man  $p$  über  $t$  auf, sehen wir wieder den schon aus den vorherigen Aufgabenteilen bekannten exponentiellen Druck-Zeit-Zusammenhang.



Vollkommen analog zu Aufgabe 3 bestimmen wir nun über logarithmische Auftragung (die Logarithmenwerte sind bereits in obiger Tabelle eingetragen) mit Formel (1) das Saugvermögen vor und hinter dem Rohr. Hierzu müssen wir lediglich die Steigung der Ausgleichsgeraden der logarithmischen Auftragung mit dem Volumen  $V = 13 \text{ l}$  der Glasglocke multiplizieren.



Wir erhalten also:

$$S_1 = 0,190 \frac{l}{s} \quad (7)$$

$$S_2 = 0,150 \frac{l}{s} \quad (8)$$

Wie schon in der Vorbereitung erwähnt, gilt für den Leitwert der Anordnung:

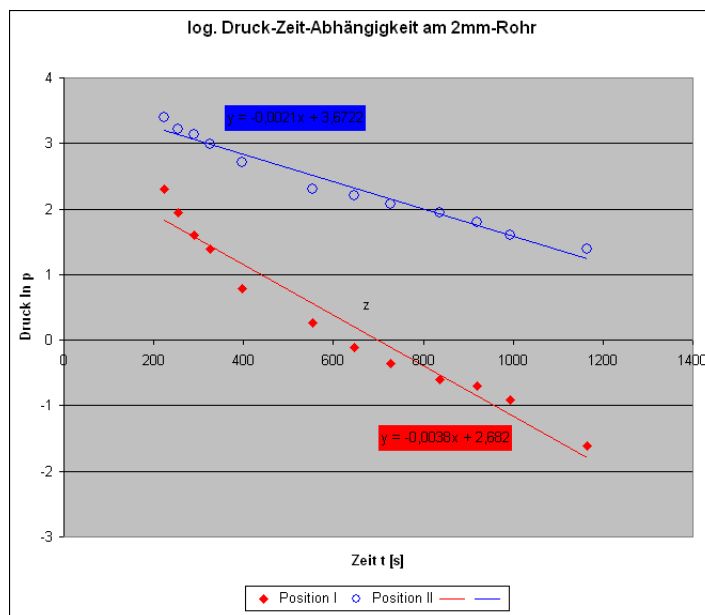
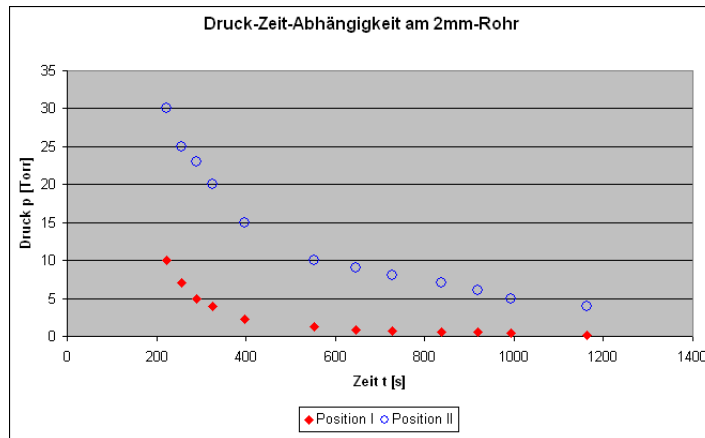
$$L = \frac{S_1 \cdot S_2}{S_1 - S_2} = 0,713 \frac{l}{s} \quad (9)$$

## 7.2 2 mm-Rohr

Nach dem Auswechseln des Verbindungsrohres erhielten wir für das dünnere Rohr folgende Relation zwischen Druck und Zeit an den beiden Messpositionen:

Zeit $t$ [s]	Druck $p_1$ [Torr]	$\ln p_1$	Druck $p_2$ [Torr]	$\ln p_2$
223	10	2,302585093	30	3,401197382
255	7	1,945910149	25	3,218875825
290	5	1,609437912	23	3,135494216
326	4	1,386294361	20	2,995732274
397	2,2	0,78845736	15	2,708050201
553	1,3	0,262364264	10	2,302585093
647	0,9	-0,105360516	9	2,197224577
727	0,7	-0,356674944	8	2,079441542
837	0,55	-0,597837001	7	1,945910149
919	0,5	-0,693147181	6	1,791759469
993	0,4	-0,916290732	5	1,609437912
1164	0,2	-1,609437912	4	1,386294361

p-t-Diagramm und logarithmisches p-t-Diagramm sehen folgendermaßen aus:



Mit  $S = -V \cdot m$  erhalten wir mit den Steigungen der Ausgleichsgeraden im logarithmischen Schaubild, die im Diagramm eingetragen sind:

$$S_1 = 0,049 \frac{l}{s} \quad (10)$$

$$S_2 = 0,027 \frac{l}{s} \quad (11)$$

Der Leitwert des 2 mm-Rohres beträgt also:

$$L = \frac{S_1 \cdot S_2}{S_1 - S_2} = 0,060 \frac{l}{s} \quad (12)$$

Wie erwartet ist der Leitwert des Rohres mit größerem Durchmesser deutlich größer!

### 7.3 Theoretisch zu erwartende Leitwerte

Um zu überprüfen, um welche Art von Strömung es sich handelt, seien in untenstehender Tabelle die Messwerte der beiden Rohre noch einmal aufgelistet. Die Tabelle wurde ergänzt um den jeweils berechneten Leitwert für laminare und für molekulare Strömung. Die verwendeten Formeln lauteten:

$$L_{laminar} = 135 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p} \quad (13)$$

$$L_{molekular} = 12,1 \cdot \frac{d^3}{l} \quad (14)$$

Hierbei bezeichnen  $d$  den Rohrdurchmesser,  $l$  die Rohrlänge (jeweils in cm) sowie  $\bar{p}$  der Mittelwert aus dem Druck am Anfang und dem Druck am Ende des Rohres. Wie wir schon Gleichung (14) ansehen, ist der Leitwert der Molekularströmung unabhängig vom Druck, weshalb in folgender Tabelle jeweils der gleiche Wert auftaucht.

Rohrdurchmesser 6 mm:

Zeit $t$ [s]	Druck $p_1$ [Torr]	Druck $p_2$ [Torr]	$L_{laminar}$ [l/s]	$L_{molekular}$ [l/s]
38	10	10	2,1870	0,0327
74	9	8	1,8590	0,0327
97	8	7	1,6403	0,0327
122	6	5	1,2029	0,0327
136	5	4,5	1,0388	0,0327
158	3	3	0,6561	0,0327
187	1,5	1,7	0,3499	0,0327
208	1	1,3	0,2515	0,0327
236	0,6	0,9	0,1640	0,0327
275	0,4	0,7	0,1203	0,0327
296	0,3	0,6	0,0984	0,0327
355	0,2	0,4	0,0656	0,0327
		<b>Mittelwerte:</b>	0,8028	0,0327

Rohrdurchmesser 2 mm:

Zeit $t$ [s]	Druck $p_1$ [Torr]	Druck $p_2$ [Torr]	$L_{laminar}$ [l/s]	$L_{molekular}$ [l/s]
223	10	30	0,0540	0,0012
255	7	25	0,0432	0,0012
290	5	23	0,0378	0,0012
326	4	20	0,0324	0,0012
397	2,2	15	0,0232	0,0012
553	1,3	10	0,0153	0,0012
647	0,9	9	0,0134	0,0012
727	0,7	8	0,0117	0,0012
837	0,55	7	0,0102	0,0012
919	0,5	6	0,0088	0,0012
993	0,4	5	0,0073	0,0012
1164	0,2	4	0,0057	0,0012
		<b>Mittelwerte:</b>	0,0219	0,0012

Wir stellen fest: beim 6 mm-Rohr liegen Messwert ( $0,7\frac{l}{s}$ ) und Mittelwert des mit der Laminarformel berechneten Leitwerts ( $0,8\frac{l}{s}$ ) recht nah beieinander. Wir können also mit einiger Sicherheit davon ausgehen, dass im großen Rohr Laminarströmung vorherrscht. Das Gas bewegt sich also weitgehend frei von Turbulenzen, sich nicht vermischende Schichten können nebeneinander strömen.

Beim kleineren Rohrdurchmesser greift die laminare Formel aber lange nicht so gut: theoretische  $0,02\frac{l}{s}$  stehen hier gemessenen  $0,06\frac{l}{s}$  gegenüber. Bei kleinerem Rohrdurchmesser scheinen sich also schon mehr Stöße mit den Rohrwänden zu ergeben, die Turbulenzen verursachen und die Strömung nicht mehr ganz so laminar fließen lassen - wenngleich reine Molekularströmung (Stöße mit den Wänden überwiegen hierbei tatsächlich) noch lange nicht vorliegt, wie die weiterhin große Diskrepanz zwischen unserem Messwert und der Theorie in diesem Fall zeigen.

## 8 Versuchsabbau

Gemäß Anweisung wurde der „geordnete Rückzug“ angetreten und wie gewünscht der Versuchsaufbau unter Vorvakuumdruck hinterlassen.