

Versuch E1 „Vakuummessungen“

Matthias Kreier
Martin Mücke

02. November 2002

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Aufgabenstellung	3
2.1	Studium der Anlage	3
2.2	Kalibrierung von Vakuummetern	3
2.3	Studium des Absaugvorganges	3
2.3.1	Erzeugung von Feinvakuum mit der Drehschieberpumpe	3
2.3.2	Erzeugung von Hochvakuum mit der Turbomolekularpumpe	3
2.4	Messung des Saugvermögens in Abhängigkeit vom Druck	4
2.5	Tabellarische Zusammenstellung zum Saugvermögen	4
2.6	Bestimmung von Strömungswiderständen	4
2.7	Bestimmung der Leckrate	4
3	Studium der Anlage	4
4	Kalibrierung von Vakuummetern	6
4.1	Wärmeleitungs-(Pirani)-Vakuummeter	6
4.2	Ionisations-(Penning)-Vakuummeter	7
5	Studium des Absaugvorgangs	7
6	Messung des Saugvermögens in Abhängigkeit vom Druck	8
6.1	Das Saugvermögen für Rohr 1 und Rohr 3 nach Messung	8
7	Tabellarische Zusammenstellung zum Saugvermögen	9
8	Bestimmung von Strömungswiderständen	10
9	Bestimmung der Leckrate	10
A	Anhang	12

1 Einleitung

Ziel des Versuches ist es, einen tieferen Einblick in die Vakuumtechnik und ihrer Gesetzmäßigkeiten zu erlangen. Das beinhaltet zunächst, sich mit der Pumpenanordnung vertraut zu machen und diese bezüglich ihrer Dimensionierung zu beurteilen. Der Erzeugung von Fein- bzw. Hochvakuum einschließlich der Aufnahme des zeitlichen Druckverlaufs, schließen sich die Messung von Strömungswiderständen einiger Rohre/Ventile und der Leckrate unseres Pumpenstandes an. Desweiteren gilt es, sich mit den Messverfahren in verschiedenen Druckgebieten vertraut zu machen.

2 Aufgabenstellung

2.1 Studium der Anlage

Stellen Sie einen Plan des Hochvakuumumpenstandes Turbopack 5101 unter Berücksichtigung der bei der Bearbeitung der folgenden Aufgaben hinzukommenden Bauteile her.

Schätzen Sie die Größe der Strömungswiderstände der Rohrleitungen im Fein- und Hochvakuumbereich, und berechnen Sie ihren Einfluß auf das effektive Saugvermögen der Pumpanlage. Gleiche Abschätzungen sind für den Pumpstand HVP 500 (Sauggeschwindigkeit $500 \frac{l}{s}$) durchzuführen. Interpretieren Sie die Ergebnisse hinsichtlich Dimensionierung der Strömungswiderstände und Vakuumpumpen.

2.2 Kalibrierung von Vakuummetern

Stellen Sie die Kalibrierungskurve für ein

- (a) Wärmeleitungs-(Pirani)-Vakuummeter
- (b) Ionisations-(Penning)-Vakuummeter

mit Hilfe eines Vergleichsmeßgerätes her. Untersuchen Sie die Abhängigkeit der Messwerte von der Richtung der Druckänderung.

2.3 Studium des Absaugvorganges

Untersuchen Sie den Absaugvorgang durch Aufnahme des Druckabfalles in Abhängigkeit von der Zeit jeweils bis zur Erreichung eines Gleichgewichtszustandes.

2.3.1 Erzeugung von Feinvakuum mit der Drehschieberpumpe

1. nach längerem Lufteinbruch in den Rezipienten
2. nach längerem Pumpen im Vorvakuumbereich und danach kurzzeitigem Belüften des Rezipienten

2.3.2 Erzeugung von Hochvakuum mit der Turbomolekularpumpe

1. nach längerem Lufteinbruch in den Rezipienten und nachfolgender Evakuierung auf Vorvakuum
2. nach längerem Pumpen im Hochvakuumbereich und danach kurzzeitigem Schließen des Schieberventils mit nachfolgendem Druckanstieg im Rezipienten auf Vorvakuum.

Vergleichen Sie die im Experiment ermittelten Zeiten zur Einstellung eines Gleichgewichtszustandes mit den nach der allg. Druck-Zeit-Gleichung abgeschätzten Evakuierungszeiten. Interpretieren Sie die Ergebnisse hinsichtlich des Gültigkeitsbereichs der allg. Druck-Zeit-Gleichung. Geben Sie die erreichten Enddruckwerte an, vermerken Sie die dafür benötigten Zeitintervalle und diskutieren Sie Abweichungen zwischen Experiment und Werten, die in der Dokumentation angegeben sind.

2.4 Messung des Saugvermögens in Abhängigkeit vom Druck

Bestimmen Sie das effektive Saugvermögen des Pumpenstandes in Abhängigkeit vom Druck bei bekanntem Strömungswiderstand zweier unterschiedlich langer Rohre. Die Messung ist im Molekularströmungsbereich durchzuführen.

2.5 Tabellarische Zusammenstellung zum Saugvermögen

Stellen Sie tabellarisch die in den Aufgaben 2.1 und 2.4 ermittelten Werte des effektiven Saugvermögens der benutzten Vakuumpumpen zusammen. Interpretieren Sie die Ergebnisse.

2.6 Bestimmung von Strömungswiderständen

Messen Sie in Abhängigkeit vom Druck, um welchen Faktor das effektive Saugvermögen des Pumpenstandes durch den Einbau eines Eckventils erniedrigt wird. Bestimmen Sie den Strömungswiderstand des Ventils mit dem in Aufgabe 2.4 ermittelten effektiven Saugvermögen. Vergleichen Sie das resultat mit der Dokumentation.

2.7 Bestimmung der Leckrate

Berechnen Sie mit den in der Dokumentation angegebenen Daten die im vorhandenen Rezipientenvolumen minimal erreichbare Leckrate. Vergleichen Sie das Ergebnis mit den in der Aufgabe 2.4 erhaltenen Werten hinsichtlich effektiven Saugvermögens und erreichten Enddrucks.

Bestimmen Sie experimentell die bei Ihrem Versuchsaufbau erreichte Leckrate bei geschlossenen Ventilen aus der Messung des Druckanstiegs im Rezipienten in der Anfangsphase in Abhängigkeit von der Zeit. Geben Sie Ursachen für die ermittelte Leckrate an.

3 Studium der Anlage

Messaufbau

Einen Plan des Hochvakuumumpenstandes HVP 5101, der mit Hilfe der Bildzeichen der Vakuumtechnik nach [3] angefertigt wurde, befindet sich als Zeichnung im Anhang (Seite 12).

Strömungswiderstände und effektives Saugvermögen

Da beim Evakuieren oder Belüften des Rezipienten Gas durch eine Leitung strömt, ist die Kenntnis von Strömungswiderständen bzw. Leitwerten der verwendeten Rohre von erheblicher Bedeutung, da die Funktion einer Vakuumanlage von der Dimensionierung der Strömungskanäle stark beeinflusst wird.

Wird im Grobvakuumbereich ein Kessel über ein Rohr der Länge l vom Durchmesser d durch eine Pumpe vom Saugvermögen S , an deren Ansaugflansch der Druck p_A herrscht, ausgepumpt, so sinkt wegen des Widerstands W (Leitwert $L = \frac{1}{W}$) der Rohrleitung das Saugvermögen am Kessel S_K auf den Wert [1, S.95]

$$\frac{S_K}{S} = \frac{1}{\sqrt{1+x}}$$

wobei für laminare Luftströmung gilt:

$$x = 1,47 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{S \cdot l}{d^4 \cdot p_A}$$

Die Bedingung für laminare Strömung [1, S.96 (4.51)]

$$\frac{l}{p_A \cdot S} > 2,7$$

ist erfüllt, so dass die Anwendung obiger Gleichung gerechtfertigt ist. Mit einem Saugvermögen der Drehschieberpumpe $S = 1.5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, bei einem Ansaugdruck $p_A = 1 \text{ mbar}$ und den im Messprotokoll aufgelisteten Rohrgeometrien erhalten wir

$$S_K = S_{eff} = 0.982 \cdot S = 1.473 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Der Leitwert des Rohres ist nach

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{L}$$

$$L = 81.8 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Im Hochvakuumbereich sprechen wir dagegen nicht mehr von viskoser, sondern von Molekularströmung. Dementsprechend gelten andere Gestzmäßigkeiten als im Grob-/Feinvakuumbereich. Für ein Rohr mit kreisförmigen Querschnitt der Fläche A , der Länge l und mit Radius r ergibt sich der Leitwert mit Hilfe der Knudsen-Beziehung [1, S.111]

$$L = \frac{\bar{c}}{4} A \cdot \left(1 + \frac{3}{8} \frac{l}{r} \Phi_K\right)^{-1}$$

wobei $\bar{c}_{Luft} = 464 \text{ m s}^{-1}$ die mittlere Teilchengeschwindigkeit der Luftmoleküle bei Zimmertemperatur und Φ_K ein Korrekturfaktor ist, der von der Geometrie des Rohres abhängt und aus [1, S.112 (Bild 4.17)] abgelesen werden kann. Daraus folgt:

$$L = 456.2 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$S_{eff} = 82.0 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Bei Verwendung der Diffusionspumpe HVP 500 mit einer Sauggeschwindigkeit von $500 \frac{\text{l}}{\text{s}}$ erhalten wir im

Feinvakuumbereich	$S_{eff} = 136.3 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0.273 \cdot S$
Hochvakuumbereich	$S_{eff} = 238.5 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0.477 \cdot S$

Diskussion

Es ist leicht zu erkennen, dass die Dimensionierung der Pumpenanordnung Turbopack 5105 gut gewählt ist, weil das effektive Saugvermögen beider Pumpen nicht zu stark gegenüber dem Nennsaugvermögen absinkt. Der Einsatz des HVP 500 dagegen wäre nicht zweckmäßig, denn ein Abfall des Saugvermögens auf über 50% bedeutet, dass ein Großteil der möglichen Pumpleistung nicht genutzt werden würde. In diesem Fall könnte man durch Erhöhung der Leitwerte der verwendeten Rohre auch das effektive Saugvermögen erhöhen.

4 Kalibrierung von Vakuummetern

Die Kalibrierung anhand eines Referenzmessgerätes (M301) erfolgte für ein Pirani-Vakuummeter (345) und ein Penning-Vakuummeter (GP330). Dabei notiert man den Verlauf der Druckanzeige im Vergleich zum Referenzgerät und untersucht diesen auf mögliche mathematische Zusammenhänge, um eine Kalibrierungskurve angeben zu können. Die Mittelwerte von den Messwerten der beiden aufgenommenen Messreihen sind graphisch in den Abbildungen 2 und 3 (Anhang) dargestellt. Man stellt fest, dass zwischen den logarithmisch aufgetragenen Werten ein linearer Zusammenhang der Form

$$\ln p = a \cdot \ln p_{ref} + b$$

besteht. Die Parameter a und b einschließlich ihrer Fehler lassen sich mit Hilfe der linearen Regression [4, S. 33] berechnen. Dies geschieht sowohl für steigenden, als auch für sinkenden Druck, so dass letztendlich die gewichteten Mittelwerte dieser Parameter [4, S. 34] die Kalibrierungskurven und die Messfehler der Geräte charakterisieren.

4.1 Wärmeleitungs-(Pirani)-Vakuummeter

Messprinzip dieses Vakuummeters ist die druckabhängige Wärmeleitfähigkeit des Gases im Rezipienten. Dabei wird ein Heizdraht, der Teil einer Wheatstoneschen Brücke ist, mit konstanter Heizspannung betrieben und der Widerstand des Drahtes als Maß seiner Temperatur in Abhängigkeit vom Druck gemessen. Eine Druckänderung hat eine Änderung des Widerstandes zur Folge, die wiederum eine Verstimmung der Wheatstoneschen Brücke verursacht. Bei entsprechender Kalibrierung lässt sich die gemessene Spannung zwischen den Enden der Brückendiagonale als Druck anzeigen.

Die Parameter der oben aufgeführten Geradengleichung, und der anschließend berechnete gewichtete Mittelwert sind

$$\begin{aligned} a_1 &= (1.09 \pm 0.04) & b_1 &= (0.95 \pm 0.29) \\ a_2 &= (1.12 \pm 0.06) & b_2 &= (1.31 \pm 0.56) \\ \implies a &= (1.10 \pm 0.03) \\ & b &= (1.07 \pm 0.27) \end{aligned}$$

Der gesamte Messgerätefehler setzt sich zusammen aus der Anzeigegenauigkeit von 1 digit und dem Fehler der berechneten Parameter.

4.2 Ionisations-(Penning)-Vakuummeter

Zwischen zwei Metallelektroden wird durch Anlegen einer hohen Gleichspannung eine Gasentladung gezündet und der Strom gemessen. Dieser Strom ist druckabhängig und dient als Messgröße. Die Rechnungen werden analog zum Pirani-Messgerät durchgeführt.

$$\begin{aligned} a_1 &= (1.10 \pm 0.05) & b_1 &= (0.43 \pm 0.49) \\ a_2 &= (1.08 \pm 0.06) & b_2 &= (0.31 \pm 0.55) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \begin{aligned} a &= (1.09 \pm 0.04) \\ b &= (0.37 \pm 0.29) \end{aligned}$$

5 Studium des Absaugvorgangs

Von dem Plotter, der den zeitlichen Verlauf des Druckes im Rezipienten aufzeichnen konnte, haben wir zu jeder Teilaufgabe eine graphische Darstellung erstellen lassen, aus der sich qualitative sowie quantitative Aussagen ableiten lassen. Um den Gültigkeitsbereich der allg. Druck-Zeit-Gleichung [2]

$$p = p_o \exp\left(-\frac{S_{eff}}{V}t\right)$$

zu überprüfen, betrachten wir die experimentell ermittelten Evakuierungszeiten bis zur Einstellung eines Gleichgewichtszustandes und vergleichen mit

$$t = \frac{V}{S_{eff}} \ln \frac{p_o}{p}$$

Desweiteren sind anhand der experimentell ermittelten Evakuierungszeiten nach obiger Gleichung die effektiven Saugvermögen berechnet worden. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

	p_o [mbar]	p_e [mbar]	Zeit (Exp.) in s	Zeit (Formel) [s]	S_{eff}
Feinvakuum a)	$1.5 \cdot 10^2$	$6.0 \cdot 10^{-3}$	450	12.5	$0.04 \frac{l}{s}$
Feinvakuum b)	$6.0 \cdot 10^0$	$6.0 \cdot 10^{-3}$	70	8.66	$0.18 \frac{l}{s}$
Hochvakuum a)	$6.0 \cdot 10^{-3}$	$6.9 \cdot 10^{-6}$	1200	0.15	$0.01 \frac{l}{s}$
Hochvakuum b)	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$8.0 \cdot 10^{-6}$	165	0.12	$0.06 \frac{l}{s}$

Die erreichten Enddruckwerte während des Absaugvorgangs waren

$$\begin{aligned} \text{Vorvakuumpumpe} & \quad p_e = 6 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \\ \text{Turbomolekularpumpe} & \quad p_e = 6.9 \cdot 10^{-6} \text{ mbar} \end{aligned}$$

wobei zu bemerken ist, dass der Enddruck der TMP nach 36 Std. auf $p_e = 2.1 \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$ weiter gesunken ist.

Interpretation der Ergebnisse

Bei Betrachtung der Evakuierungszeiten ist festzustellen, dass zwischen Experiment und Theorie große Unterschiede auftreten, die bei den Messungen nach kurzzeitigem Lufteinbruch geringer ausfallen als nach längerem Lufteinbruch in den Rezipienten. Führt man überschlagsmäßig eine Rechnung für den anfänglich sehr steilen Druckabfall durch, so sind die von Theorie und

Experiment angegebenen Evakuierungszeiten zumindest in der gleichen Größenordnung. Daraus folgt, dass die allgemeine Druck-Zeit-Gleichung näherungsweise nur für den Beginn des Absaugvorganges geeignet ist. Ursache dafür ist der mit der Zeit wachsende Einfluß der „Entgasung“ (\rightarrow Desorption von Gasmolekülen, die an den Wänden des Rezipienten haften), sowie den für geringer werdende Drücke wachsenden Einfluß realer und virtueller Lecke. Qualitativ ist dieser Zusammenhang der Graphik aus einer Schrift der TH Ilmenau [2, S.4] zu entnehmen. Dem Druckverlauf des Druck-Zeit-Gesetzes überlagert sich eine Kurve, in welcher der Druck proportional zur freierwerdenden Gasmenge ist und ansteigt. Die resultierende Kurve müsste demnach besser mit den experimentellen Erkenntnissen übereinstimmen.

Das berechnete effektive Saugvermögen der Pumpen ist um mehrere Größenordnungen kleiner als der in Kapitel 3 berechnete Wert. Die größten Abweichungen erhalten wir für die Turbomolekularpumpe. Es ist denkbar, dass der oben beschriebene Einfluß von Leckraten, Entgasung etc. das Saugvermögen der Pumpen nach unten korrigiert, aber dass solche starken Abweichungen auftreten, hätten wir nicht gedacht.

Der erreichbare Enddruck der Vorvakuumpumpe ist in der Dokumentation mit $p_e = 2 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ angegeben und ließ sich im Experiment bei Betrachtung der Größenordnung reproduzieren. Der maximale Enddruck der TMP hingegen ($p_e \leq 5 \cdot 10^{-8} \text{ mbar}$) wurde deutlich überschritten. Ursache dafür sind unter anderem die Leckraten der verwendeten Bauteile (siehe Kapitel 9). Auch durch Ausheizen der Anlage, das erst ab Drücken unterhalb von $p = 10^{-6} \text{ mbar}$ relevant wird, hätte der erreichte Enddruck um einen Faktor der Größenordnung 10^{-1} verringert werden können [1, S.265/269].

6 Messung des Saugvermögens in Abhängigkeit vom Druck

Der Leitwert der beiden von uns verwendeten Rohre lässt sich leicht über die in Kapitel 3 angegebene Knudsen-Beziehung berechnen.

$$\begin{aligned} \text{Rohr 1 } (l = 250\text{mm}, d = 15\text{mm}) \quad L &= 1.439 \frac{\text{l}}{\text{s}} \\ \text{Rohr 3 } (l = 130\text{mm}, d = 40\text{mm}) \quad L &= 37.844 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Eine Abschätzung des effektiven Saugvermögens der Turbomolekularpumpe mit nachfolgender Gleichung ergibt ($S = 82 \frac{\text{l}}{\text{s}}$, siehe Kap.3):

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{L}$$

$$\begin{aligned} \text{Rohr 1} \quad S_{eff} &= 1.41 \frac{\text{l}}{\text{s}} \\ \text{Rohr 3} \quad S_{eff} &= 25.88 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{aligned}$$

6.1 Das Saugvermögen für Rohr 1 und Rohr 3 nach Messung

Betrachtet man die Zeiten, die zum Erreichen eines Druckes, ausgehend vom Druck p_o , für verschiedene Konfigurationen der Messapparatur benötigt werden, so gilt zunächst die Druck-Zeit-Gleichung separat für beide Aufbauten. Betrachtet man gleiche Anfangs- und Enddrücke, so lassen sich beide Gleichungen gleichsetzen, und das effektive Saugvermögen in Abhängigkeit

vom Verhältnis der Evakuierungszeiten (abhängig vom Druck) berechnen.

$$p_0 e^{-\frac{S_1}{V} t_2} = p_0 e^{-\frac{S_2}{V} t_2}$$

$$\rightarrow S_2 = \frac{t_1}{t_2} S_1$$

Ausgehend vom Saugvermögen $S_1 = 82 \frac{l}{s}$ und mit den aufgenommenen Zeiten (Messprotokoll) erhalten wir für die Druckbereiche folgende Saugvermögen:

p [mbar] Druckbereich	Zeit t_1 [s] ohne Rohr	Zeit t [s] Rohr 1	Zeit t [s] Rohr 3	$S_{eff}(p)$ [$\frac{l}{s}$] Rohr 1	$S_{eff}(p)$ [$\frac{l}{s}$] Rohr 3
$1 \cdot 10^{-4} > p > 8 \cdot 10^{-5}$	52	65	50	≈ 65.6	≈ 85.2
$8 \cdot 10^{-5} > p > 6 \cdot 10^{-5}$	100	135	98	≈ 60.7	≈ 83.6
$6 \cdot 10^{-5} > p > 4 \cdot 10^{-5}$	198	300	214	≈ 54.1	≈ 75.9
$4 \cdot 10^{-5} > p > 2 \cdot 10^{-5}$	490	960	658	≈ 41.9	≈ 61.1

Das bessere Saugvermögen für das Rohr 3 in den obersten beiden Druckbereichen gegenüber der Messung ohne Rohr kann einerseits auf Messgerätefehler, die bei der Zeit- und Druckmessung auftreten, andererseits auch auf mögliche systematische Fehler der Anlage zurückgeführt werden.

Desweiteren ist zu erkennen, dass mit abnehmenden Druck auch das Saugvermögen der Anlage abnimmt. Dies steht in Widerspruch zur Abbildung für das Saugvermögen aus der Dokumentation zur TMP 5105. Demnach müsste das Saugvermögen für kleiner werdende Drücke ansteigen, bis es einen konstanten Wert für $p < 10^{-3} \text{ mbar}$ erreicht. Dieser Zusammenhang ist dadurch begründet, dass bei größeren Drücken der Bereich der Molekularströmung verlassen wird [1, S.260]. Unsere Vermutung ist dahingehend, dass die von uns gewählte Messmethode nicht geeignet ist, das Saugvermögen als Funktion des Druckes an verschiedenen Rohren zu ermitteln. Grund dafür könnte die Nicht-Gültigkeit der Druck-Zeit-Gleichung im Molekularströmungsbereich sein (vgl. Kapitel 5).

7 Tabellarische Zusammenstellung zum Saugvermögen

Zusammenfassend sind nachfolgend die berechneten und gemessenen Werte für das effektive Saugvermögen aufgeführt. Die Ergebnisse des Kapitels 6 werden aufgrund der angezweifelte Richtigkeit nicht aufgeführt.

	S_{eff} [$\frac{l}{s}$] Drehschieberpumpe	S_{eff} [$\frac{l}{s}$] Turbomolekularpumpe
Abschätzung mit Leitwert nach Kap.3	1.473	82.0
Absaugvorgang nach längerem Lufteinbruch	0.04	0.01
Absaugvorgang nach kurzem Lufteinbruch	0.18	0.06
langes Rohr (Kap.6) Leitwertberechnung	-	1.4
kurzes Rohr (Kap.6) Leitwertberechnung	-	25.9

Interpretation

Die aus der Analyse des Absaugvorgangs berechneten Werte S_{eff} unterscheiden sich von den anderen teilweise um mehrere Größenordnungen, so dass diese als nicht aussagekräftig angesehen werden können. Dabei ist die Ursache ein weiteres Mal im Gültigkeitsbereich der verwendeten Druck-Zeit-Gleichung zu suchen (vgl. Kapitel 5/6). Bestenfalls für den viskosen Strömungsbereich (Drehschieberpumpe) kann in grösster Näherung von einer Übereinstimmung gesprochen werden.

8 Bestimmung von Strömungswiderständen

In Analogie zum Kapitel 6 wird das effektive Saugvermögen an dem Eckventil über das Verhältnis der Evakuierungszeiten berechnet. Ist S_{eff} am Eckventil bekannt, so kann über die grundlegende Beziehung

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{S_{eff}} - \frac{1}{S_1}$$

der Leitwert des Bauelements bestimmt werden.

p [mbar] Druckbereich	Zeit t_1 [s] ohne Ventil	Zeit t [s] mit Ventil	$S_{eff}(p)$ [$\frac{L}{s}$]	L [$\frac{L}{s}$]
$1 \cdot 10^{-4} > p > 8 \cdot 10^{-5}$	52	90	47.4	30.0
$8 \cdot 10^{-5} > p > 6 \cdot 10^{-5}$	100	190	43.2	28.3
$6 \cdot 10^{-5} > p > 4 \cdot 10^{-5}$	198	360	45.1	29.1
$4 \cdot 10^{-5} > p > 2 \cdot 10^{-5}$	490	1160	34.6	24.4

Aus der Dokumentation entnehmen wir den tatsächlichen Wert für den Leitwert des Eckventils $L_{ventil} = 32 \text{ l s}^{-1}$ und stellen fest, in guter Näherung stimmen die von uns bestimmten Werte mit dem Referenzwert überein.

9 Bestimmung der Leckrate

Zur Berechnung der Leckrate im vorhandenen Rezipientenvolumen summiert man die in der Dokumentation angegebenen Leckraten der einzelnen Bauteile. Dies wären im Einzelnen

Bauteil	Leckrate q [$\frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}}$]	Anzahl	Leckrate q [$\frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}}$]
Flansche	$1 \cdot 10^{-8}$	13	$1.3 \cdot 10^{-7}$
Nadelventil	$1 \cdot 10^{-5}$	1	$1.0 \cdot 10^{-5}$
Belüftungsventil	$1 \cdot 10^{-5}$	1	$1.0 \cdot 10^{-5}$
Absperrschieber	$1 \cdot 10^{-6}$	1	$1.0 \cdot 10^{-6}$
Eckventil	$1 \cdot 10^{-9}$	1	$1.0 \cdot 10^{-9}$
Messköpfe	$1 \cdot 10^{-7}$	4	$4.0 \cdot 10^{-7}$

Die gesamte Leckrate ist damit

$$q_L \approx 2.1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}}$$

Unter Verwendung der erreichten Enddrücke aus Kapitel 5 ergibt sich nach [2, S.3] für die

Turbomolekularpumpe

$$S_{eff} = \frac{q_L}{p_e} = 10 \frac{l}{s}$$

Experimentell kann die Leckrate bei geschlossenen Ventilen anhand des Druckanstiegs im Rezipienten bestimmt werden. Aus der graphischen Darstellung lässt sich die Steigung der Kurve ablesen und dann die Leckrate berechnen.

$$q_L = V_{Rez.} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t} \approx 8.5 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \frac{l}{s}$$

Die experimentell ermittelte Leckrate ist damit zwar größer als die theoretisch abgeschätzte, aber von der gleichen Größenordnung. Die Differenz ist auf Lecke zurückzuführen, die nicht in die Berechnung mit eingeflossen sind, z.B. die Entgasung der Wände etc.

A Anhang

Abbildung 1

Abbildung 2

Abbildung 2. Kalibrierungskurve für steigenden Druck im Rezipienten

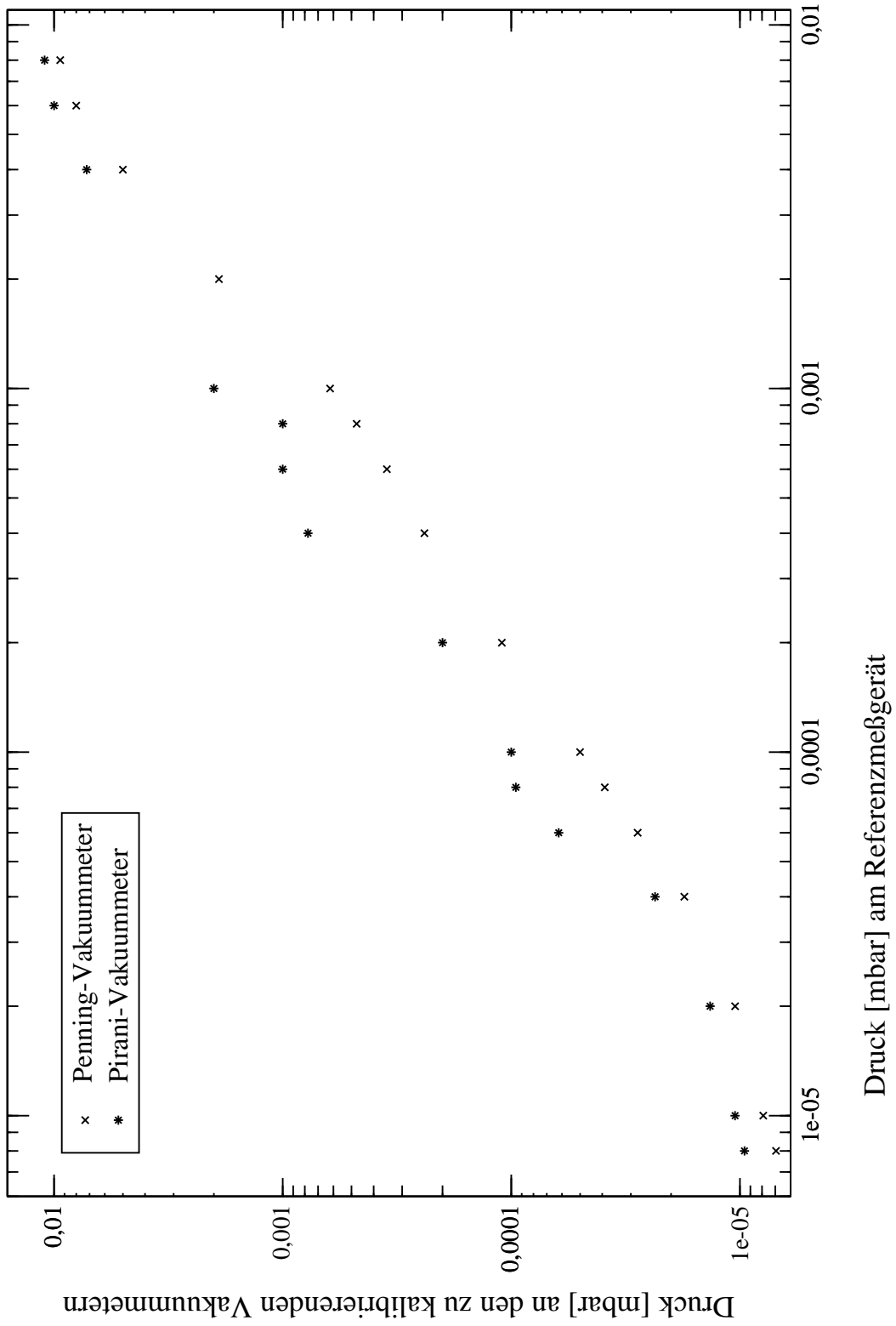
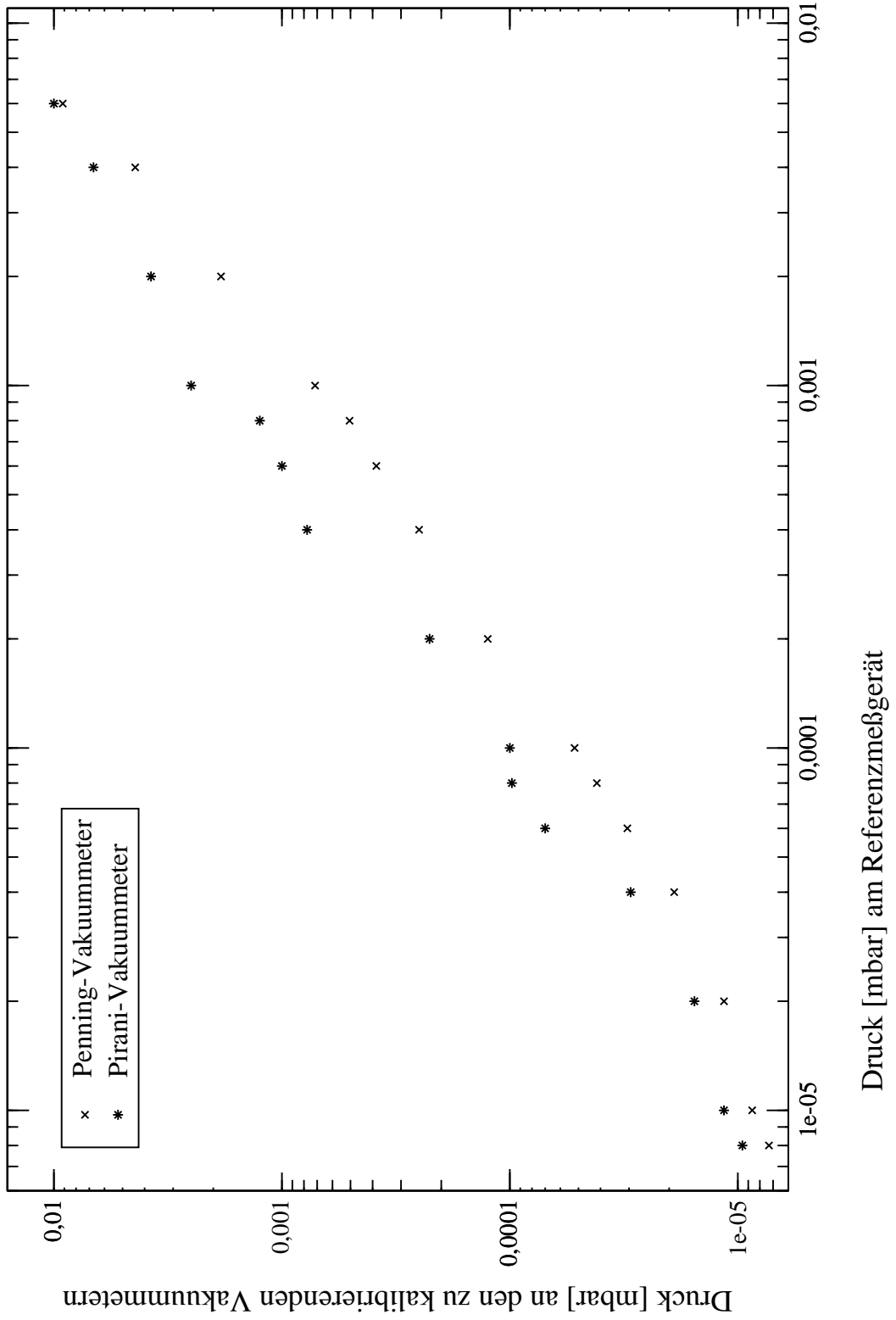


Abbildung 3

Abbildung 3. Kalibrierungskurve für sinkenden Druck im Rezipienten



Literatur

- [1] Wutz, Adam, Walcher: 'Theorie und Praxis der Vakuumtechnik'
- [2] Schrift der TH Ilmenau: 'Einführung in die Vakuumtechnik und Aufgabensammlung'
- [3] Fa. Leybold AG, Vakuumtechnik: 'Bildzeichen für die Vakuumtechnik'
- [4] Institut für Physik: 'Skript zum physikalischen Praktikum - Einführung'