

VERSUCH NUMMER

TITEL

AUTOR A

authorA@udo.edu

AUTOR B

authorB@udo.edu

Durchführung: DATUM

Abgabe: DATUM

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Grundlagen	3
1.2	Strömungen	4
1.3	Saugvermögen, Leitwert	4
1.4	Evakuierungskurve	5
1.5	Lecks	5
1.6	Leckratenmessung	5
1.7	Vakuumpumpen	6
1.7.1	Drehschieberpumpe	6
1.7.2	Turbomolekularpumpe	6
1.8	Vakuummessung	7
1.8.1	Pirani-Vakuummeter	7
1.8.2	Kaltkathoden-Ionisationsvakuumeter	7
1.8.3	Heißkathoden-Ionisationsvakuumeter	7
1.8.4	Piezo-Vakuummeter	7
2	Aufbau	8
3	Durchführung	8
3.1	Turbomolekularpumpen Messungen	9
3.1.1	Evakuierungskurve	9
3.1.2	Leckratenmessung	9
3.2	Drehschieberpumpen Messungen	9
3.2.1	Evakuierungskurve	9
3.2.2	Leckratenmessung	9
4	Auswertung	10
5	Diskussion	10
	Literatur	10

1 Theorie

Ziel des Versuchs ist es, das effektive Saugvermögen einer Drehschieberpumpe und einer Turbomolekularpumpe, zu bestimmen. Dies geschieht zum Einen über die Evakuierungskurve und zum Anderen über eine Leckratenmessung. Zudem sollen die Grundlagen der Vakuumphysik erlernt werden.

1.1 Grundlagen

Vakuum ist definiert als Druck, der geringer ist als der Erdatmosphärendruck auf der Erdoberfläche. Dies ist in etwa bei 300mbar (auf dem Mount Everest) der Fall [S.9, 2]. Es gibt verschiedene Abstufungen von Vakuum. Diese reichen vom Grobvakuum bei $300\text{mbar} - 1\text{mbar}$, bis zum extrem hohen Vakuum bei Drücken von weniger als 10^{-12}mbar [S.10, 2]. Druck, über den das Vakuum definiert ist, beschreibt die senkrecht auf eine Fläche wirkende Kraft, also $p = \frac{F}{A}$. Um das Verhalten des Gases bzw. der Teilchen im Vakuum besser beschreiben zu können, wird dieses Gas als Ideales Gas angenommen. Bei idealem Gas werden die Gasteilchen als punktförmige Massen ohne Ausdehnung beschrieben. Die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen werden vernachlässigt, vor allem Van-der-Waals- und Dipol-Dipol-Kräfte. Zudem wird angenommen, dass die Teilchen ausschließlich elastisch mit anderen Gasteilchen und den Wänden stoßen. Wenn diese drei Annahmen gelten, ist das Produkt aus Druck und Volumen, bei konstanter Temperatur, konstant,

$$pV = \text{const} \quad (1)$$

so wie der Druck, in einem konstanten Volumen, proportional zur Temperatur, $p = \text{const} \cdot T$. Daraus ergibt sich die Ideale Gasgleichung,

$$pV = N \cdot k_B \cdot T. \quad (2)$$

Dabei ist N die Teilchenanzahl und k_B die Boltzmann-Konstante. Diese Gleichung kann als Ausdruck für den Druck in Abhängigkeit von der Teilchenzahldichte n geschrieben werden, denn $n = \frac{N}{V}$. Daraus folgt,

$$p = n \cdot k \cdot T. \quad (3)$$

Also ist die Teilchenzahldichte ein gutes Maß für den Druck und kann zur Beschreibung des Drucks verwendet werden [S.11, 2]. Ebenfalls eng mit der Teilchenzahldichte und damit dem Druck verknüpft und relevant für die Vakuumtechnik ist die mittlere freie Weglänge. Diese beschreibt die durchschnittliche Länge des Weges, eines Teilchens, bis es mit einem anderen Teilchen oder einer Wand zusammenstößt und ist gegeben als,

$$\bar{l} = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot p \cdot d_m^2}. \quad (4)$$

Mit dem Moleküldurchmesser d_m^2 [S.12, 2].

1.2 Strömungen

Im Vakuum gibt es zwei wesentliche Arten von Strömungen, zum einen die viskosen Strömungen und zum anderen die molekularen Strömungen. Eine Kennzahl zur Unterscheidung der Strömungen ist die Knudsenzahl $K_n = \frac{\bar{l}}{d}$, also das Verhältnis zwischen mittlerer freier Weglänge und Weite des Strömungskanals. Bei einer Knudsenzahl von $K_n < 0,01$ ist die Strömung viskos, bei $K_n > 0,5$ ist die Strömung laminar. Zwischen den beiden Grenzen befindet sich die Knudsenströmung. Die viskose Strömung zeichnet sich dadurch aus, dass die Gasteilchen hauptsächlich untereinander Stöße ausführen und kaum mit den Wänden. In diesem Bereich gibt es zum einen die turbulente Strömung, bei der die Gasteilchen völlig ungeordnet sind. Diese Strömung tritt bei schnelleren Strömungsgeschwindigkeiten auf und ist im Vakuum nur beim Abpumpen von Atmosphärendruck und beim Belüften relevant. Zum anderen gibt es die laminare Strömung, bei der sich die Gasteilchen innerhalb parallel zueinander geordneten Schichten aufhalten. Dies geschieht bei langsameren Strömungsgeschwindigkeiten der viskosen Strömung. Die molekulare Strömung ist vor allem im Hochvakuum und ultra hoch Vakuum von Bedeutung, da bei einer so geringen Teilchenzahldichte, kaum Stöße mit anderen Teilchen erfolgen, sondern hauptsächlich mit Wänden [2].

1.3 Saugvermögen, Leitwert

Das Saugvermögen einer Vakuumpumpe gibt an, wie viel Gas sie pro Zeit aus dem Rezipienten saugen kann,

$$S = \frac{dV}{dt}. \quad (5)$$

Die Rohre und Behälter in der Vakuumtechnik haben ähnlich wie elektrische Leiter, einen Widerstand. Dieser Widerstand ist über die Druckdifferenz zwischen Ende und Anfang des Rohres und dem Gasstrom definiert,

$$W = \frac{\Delta p}{q_{pV}}. \quad (6)$$

Der Kehrwert des Widerstands wird Leitwert genannt und ist ein Maß dafür, wie gut der Gasstrom durch ein Gefäß fließen kann,

$$L = \frac{1}{W} = \frac{q_{pV}}{\Delta p}. \quad (7)$$

Aus diesem Rohrwiderstand ergibt sich, dass das Saugvermögen der Vakuumpumpe nicht dem theoretischen Wert entspricht, da die Pumpe normalerweise über einen Schlauch mit dem Rezipienten verbunden ist und dieser Schlauch aber auch der Rezipient selbst, einen Rohrwiderstand besitzen [S82, 1]. Das effektive Saugvermögen einer Vakuumpumpe ist daher,

$$S_{eff} = \frac{1}{S} + \frac{1}{L}. \quad (8)$$

1.4 Evakuierungskurve

Wird Gleichung (1) nach der Zeit abgeleitet,

$$\frac{dp}{dt}V + \frac{dV}{dt} = 0 \quad (9)$$

und anschließend umgestellt, so entsteht ein Ausdruck für das Saugvermögen,

$$\frac{dV}{dt} = S = -\frac{V dp}{p dt}. \quad (10)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung ist:

$$p(t) = p_0 \exp\left(-\frac{S}{V}t\right) \quad (11)$$

Weiter muss beachtet werden, dass jede Vakuumpumpe einen Enddruck $P_E \neq 0$ erzeugt. Dies führt zur abschließenden Gleichung für die Evakuierungskurve:

$$p(t) = (p_0 - P_E) \exp\left(-\frac{S}{V}t\right) + P_E. \quad (12)$$

Mit Hilfe dieser Formel kann aus der Evakuierungskurve das Saugvermögen einer Vakuumpumpe bestimmt werden, wobei hier nicht beachtet wurde, dass das Saugvermögen einer Vakuumpumpe nicht konstant über alle Drücke ist.

1.5 Lecks

Bei jedem Vakuumaufbau gibt es Lecks, die Verhindern, dass der Druck unter P_E sinkt. Es gibt zum einen reale Lecks, die von außerhalb der Vakuumanlage messbar sind, z.B. undichte Ventile aber auch "virtuelle" Lecks, bei denen das nicht der Fall ist. Diese "virtuellen" Lecks werden z.B. durch **Desorption** verursacht. Desorption beschreibt das Lösen/Austreten von Atomen oder Molekülen, von/aus einer Oberfläche. Diese Atome und Moleküle sind vorher durch **Sorption** angelagert worden. Bei der Sorption wird zwischen **Absorption**, also das in das Material rein diffundieren und **Adsorption**, dem Anlagern von Atomen und Molekülen an einer Oberfläche, unterschieden [S.62, 63, 1].

1.6 Leckratenmessung

Das Saugvermögen kann auch über die Leckratenmessung bestimmt werden. Dafür muss zunächst eine Leckrate Q eingestellt werden, diese wird über den Gleichgewichtsdruck P_g definiert,

$$S = \frac{Q}{P_g}, \quad (13)$$

mit,

$$Q = V_0 \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (14)$$

Aus Gleichung (13) und (14) folgt für das Saugvermögen:

$$S = \frac{V_0}{p_g} \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (15)$$

1.7 Vakuumpumpen

1.7.1 Drehschieberpumpe

Die Drehschieberpumpe ist eine gasfördernde Vakuumpumpe, das heißt sie erzeugt ein Vakuum durch absaugen und einschließen einzelner Teilvolumen und anschließendem Ausstoß dieser Volumen. Hierfür ist die Drehschieberpumpe, wie in Abbildung ?? schematisch dargestellt, aufgebaut. Durch das Drehen des Rotors und das Abdichten der einzelnen Volumina durch die Schieber mit Hilfe von Federn, wird das Volumen am Ansaugventil vergrößert, so dass Gas aus dem Rezipienten, in die Pumpe strömt. Dieses Volumen wird nun in Richtung Auslassventil befördert und dort komprimiert, bis der Druck hoch genug ist um das Auslassventil zu öffnen. Drehschieberpumpen werden bei Atmosphärendruck bis hin zum Feinvakuum ($p = 10^{-3} \text{ mbar}$) benutzt. Tieferer Drücke werden nicht erreicht, da bei tieferen Drücken, zu viel Öl, welches das Auslassventil bedeckt und die Schieber abdichtet, gasförmig wird und zurück in den Rezipienten diffundiert [S.60, 61, 2].

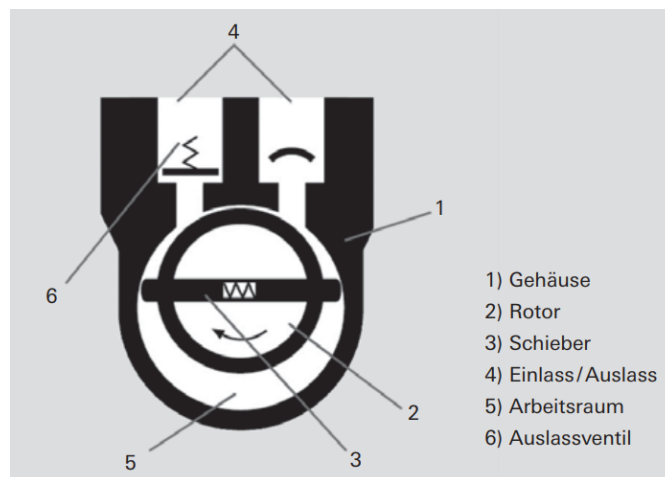


Abbildung 1: Schematische Abbildung einer Drehschieberpumpe.

1.7.2 Turbomolekularpumpe

Turbomolekularpumpen sind kinetische Vakuumpumpen. Sie sind turbinenähnlich aufgebaut, innerhalb des Gehäuses sind mehrere Schichten abwechselnd mit Rotorscheiben und Statorscheiben besetzt. Die Schaufeln der Schichten sind angewinkelt und zwischen Rotor und Stator spiegelverkehrt. Zur Erzeugung eines Vakuums macht sich die Turbopumpe den Effekt der Adsorption zu nutze. Die Rotoren drehen sich während sich ein Molekül an dem Rotorblatt anheftet. Bei der Desorption hat das Molekül durch die angewinkelte

Rotorscheibe und deren Rotation, einen Impuls, der bevorzugt weg vom Rezipienten zeigt. Damit dieses Prinzip funktioniert, muss eine Molekulare Strömung herrschen, daher benötigt die Turbopumpe ein Vorvakuum. Zudem müssen die Rotorblätter ähnliche Geschwindigkeiten erreichen wie die Gasmoleküle, weshalb der Rotor sich mit bis zu 1500 Hz dreht. Damit erreicht die Pumpe Drücke im Bereich des Hochvakuums [S.83, 84, 2].

1.8 Vakuummessung

1.8.1 Pirani-Vakuummeter

Das Pirani-Vakuummeter ist ein Wärmeleitungsvakuummeter. Es besteht aus einem Heizdraht in der Mitte eines Gehäuses. Der Druck wird bestimmt, in dem die Wärmeleitfähigkeit des Gases zwischen Heizdraht und Gehäuse gemessen wird. Diese ist im Bereich von 10mbar bis 10^{-4} mbar hauptsächlich durch Stöße der Gasteilchen gegeben und verläuft linear zum Druck [S.93, 94, 2].

1.8.2 Kaltkathoden-Ionisationsvakuummeter

Bei diesem Vakuummeter werden durch ein elektrisches Feld Elektronen aus der Kathode gelöst und in Richtung Anode beschleunigt. Zwischen Kathode und Anode ionisieren die Elektronen durch Stöße die Gas-Teilchen, wodurch eine Gasentladung zustande kommt. Der Gasentladungsstrom ist dann proportional zum Druck. Das Kaltkathoden-Ionisationsvakuummeter kann für Druckbereiche unterhalb von $p = 10^{-2}\text{ mbar}$ genutzt werden [S.94, 2].

1.8.3 Heißkathoden-Ionisationsvakuummeter

Das Prinzip ist ähnlich zum Kaltkathoden-Ionisationsvakuummeter, nur werden hier die Elektronen durch das Anlegen einer Spannung an einen Glühdrat und den dadurch provozierten Glühelektrischen Effekt erzeugt. Die Druckbestimmung erfolgt ebenfalls durch Ionisation der Gas-Teilchen [S.94, 95, 2].

1.8.4 Piezo-Vakuummeter

Das Piezo-Vakuummeter besteht aus einem Volumen mit Druck p_0 , welches durch eine Membran von dem Volumen des Rezipienten mit p_1 , getrennt ist. Bei Druckunterschieden zwischen p_0 und p_1 wirkt eine Kraft auf die Oberfläche der Membran, wodurch diese gedehnt wird. In der Membran sind piesokristalle eindiffundiert, welche bei besagter Dehnung eine Spannung erzeugen, durch die auf den Druck im Rezipienten geschlossen werden kann. Diese Art von Vakuummeter wird vorallem im Grobvakuum eingesetzt [S.92, 2].

2 Aufbau

Auf Bild ?? ist der Versuchsaufbau zu sehen. Der Rezipient (R) ist mit der Turbomolekularpumpe (P2) verbunden, welche wiederum mit der Drehschieberpumpe (P1) verbunden ist. Über das Ventil (V1) kann die Drehschieberpumpe vom restlichen Aufbau abgeschiebert werden. Das selbe ist für die Turbopumpe mit dem Ventil (V2) möglich. Zum Belüften des Rezipienten sind ein Ventil (V3) und ein Drosselventil (D1) mit dem Rezipienten verbunden. Die für den Versuch genutzten Messgeräte sind zum einen das Pirani-Kaltkathoden-Vakuummeter (M1) zur Bestimmung der von der Turbopumpe erzeugten Drücke und das Piezo-Pirani-Vakuummeter (M2) für die Drücke, die durch die Drehschieberpumpe erzeugt werden.

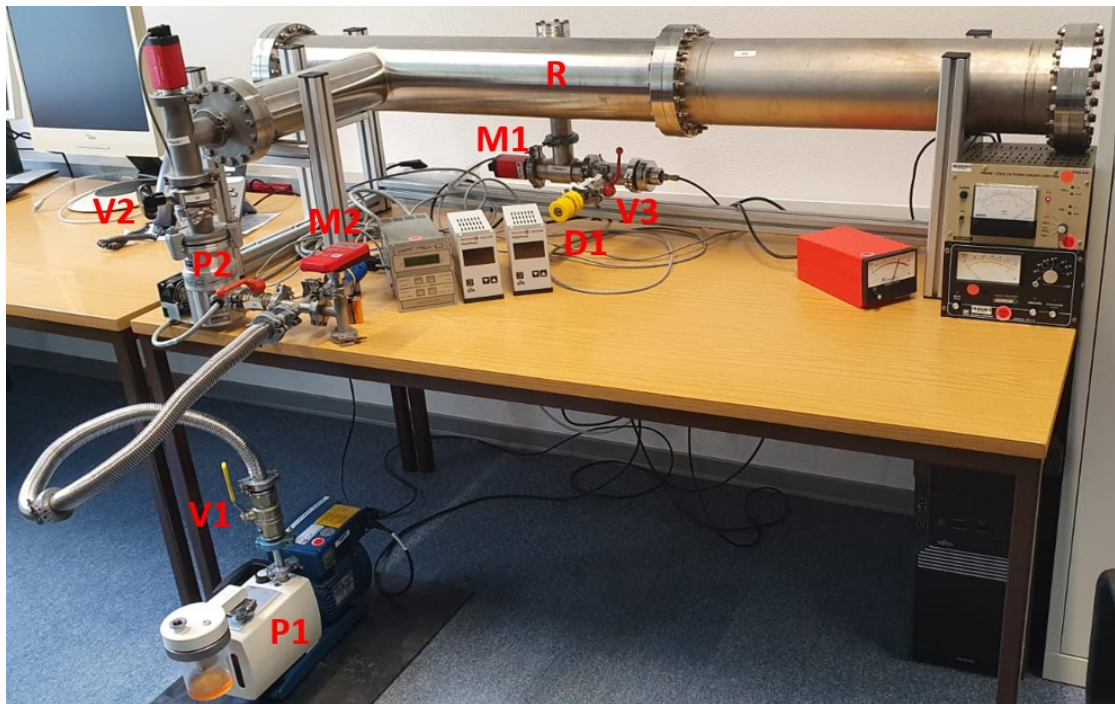


Abbildung 2: Versuchsaufbau.

3 Durchführung

Bevor die eigentlichen Messungen beginnen können, muss überprüft werden ob die Anlage dicht ist. Dafür wird der Rezipient evakuiert und festgestellt ob der Enddruck im Bereich der entsprechenden Pumpe liegt. Ist dies nicht der Fall, muss die Apperatur überprüft werden und undichte Stellen abgedichtet werden.

3.1 Turbomolekularpumpen Messungen

Da die Turbomolekularpumpe schon vor Beginn des Versuchs lief, wurde mit der Bestimmung der Saugleistung der Turbopumpe begonnen.

3.1.1 Evakuierungskurve

Zur Bestimmung der Evakuierungskurve laufen beide Pumpen und die Ventile zum Rezipienten sind geöffnet. Nun wird der Rezipient vorsichtig mit geöffnetem V3 und über das Drosselventil (D1) belüftet, bis der Druck im Rezipienten bei $p_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ liegt. Anschließend wird V3 geschlossen und für 120 s alle 10 s der Druck im Rezipienten abgelesen. Diese Prozedur wird drei mal durchgeführt.

3.1.2 Leckratenmessung

Für die Leckratenmessung wird bei laufenden Pumpen und geöffneten V1 und V2 über das Drosselventil ein Gleichgewichtsdruck eingestellt. Danach wird die Turbomolekularpumpe durch schließen des Ventils V2 abgeschiebert und 120 s lang alle 10 s der Druck gemessen. Dies wird insgesamt 3 mal pro Gleichgewichtsdruck und mit vier verschiedenen Gleichgewichtsdrücken ($p_g = 5 \cdot 10^{-5}; 7 \cdot 10^{-5}; 1 \cdot 10^{-4}; 2 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$) durchgeführt.

3.2 Drehschieberpumpen Messungen

Für die Messungen mit der Drehschieberpumpe wird die Turbomolekularpumpe ausgestellt. Das Ventil V2 bleibt die gesamte Zeit geöffnet.

3.2.1 Evakuierungskurve

Bei der Bestimmung der Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe bleiben V1 und V2 geöffnet, der Rezipient wird über V3 und D1 geflutet, bis Atmosphärendruck innerhalb herrscht. Dann wird V3 geschlossen und 600 s lang alle 10 s der Druck im Rezipienten abgelesen. Auch diese Messung wird drei mal durchgeführt.

3.2.2 Leckratenmessung

Die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe verläuft fast Äquivalent zur Messung mit der Turbomolekularpumpe. Über das Drosselventil D1 werden vier verschiedene Gleichgewichtsdrücke ($p_g = 0, 5; 10; 50; 100 \text{ mbar}$) eingestellt. Anschließend wird die Pumpe über V1 abgeschiebert und 200 s alle 10 s der Druck bestimmt. Für jeden Gleichgewichtsdruck wird die Messung wieder 3 mal durchgeführt.

4 Auswertung

5 Diskussion

Literatur

- [1] Wilhelm Walacher Max Wutz Hermann Adam. *Theorie und Praxis der Vakuumtechnik*. 1992.
- [2] Pfeiffer Vacuum. *The Vacuum technology book*. URL: <http://www.pfeiffer-vacuum.de/know-how/container.action> (besucht am 29.04.2022).