

Versuch Nr.V70

## Vakuumversuch

Niklas Düser  
niklas.dueser@tu-dortmund.de

Benedikt Sander  
benedikt.sander@tu-dortmund.de

Durchführung: 11.04.2022

Abgabe: 23.06.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Vakuum . . . . .	3
2.2	Fachbegriffe . . . . .	3
2.2.1	mittlere freie Weglänge . . . . .	3
2.2.2	Sorption . . . . .	3
2.3	Vakuumbereiche . . . . .	4
2.3.1	Großvakuum . . . . .	4
2.3.2	Feinvakuum . . . . .	4
2.3.3	Hoch und Ultrahochvakuum . . . . .	4
2.4	Arten der Vakuumerzeugung . . . . .	4
2.4.1	Drehschiebervakuumpumpe . . . . .	5
2.4.2	Turbomolekularpumpe . . . . .	5
2.5	Saugvermögen . . . . .	6
2.5.1	Messung der $p(t)$ -Kurve . . . . .	6
2.5.2	Leckratenmessung . . . . .	6
2.5.3	Leitwert . . . . .	7
2.6	Arten der Vakuummessung . . . . .	7
2.6.1	Pirani-Vakuummeter . . . . .	7
2.6.2	Penning-Vakuummeter . . . . .	7
2.6.3	Bayard-Alpert-Vakuummeter . . . . .	7
2.7	Piezo-Vakuummeter . . . . .	8

# 1 Zielsetzung

In diesem Versuch werden allgemeine theoretische Begriffe in Verbindung mit Vakuumina erläutert. Experimentiell wird das Saugvermögen einer Drehschieberpumpe und einer Turbomolekularpumpe bestimmt. Dazu werden jeweils einige Evakuierungskurven aufgenommen und Leckratenmessungen durchgeführt.

## 2 Theorie

### 2.1 Vakuum

Allgemein wird von einem Vakuum gesprochen, sobald der Druck innerhalb eines Gefäßes niedriger als sein Umgebungsdruck ist. Da der niedrigste auf der Erde vorkommende Atmosphärendruck in großer Höhe bei  $p = 300 \text{ mbar}$  liegt, wird ab dann von einem Vakuum gesprochen. Es ist in diesem Versuch eine gute Annäherung wenn wir bei dem vorliegendem Gas von idealem Gas sprechen. Dies bedeutet, dass jegliche Wechselwirkungen zwischen Teilchen nur durch vollkommen elastische Stöße passieren und die Gasteilchen keine Ausdehnung haben. Wenn dies angenommen wird, kann das Gas auch mit der Idalen Gasgleichung

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

beschreiben werden. Hier is  $p$  der Druck,  $V$  das Volumen,  $N$  die Teilchenzahl,  $K_b$  die Boltzmann Konstante und  $T$  die Temperatur. Ein SPEzialfall dieser Gleichung ist das *Gesetz von Boyle-Mariotte*, dieses besagt, dass bei konstanter Temperatur

$$p \approx V^{-1} \quad (2)$$

ist.

### 2.2 Fachbegriffe

#### 2.2.1 mittlere freie Weglänge

(nach Quelle [wiki:mfW]) Die *mittlere freie Weglänge* beschreibt die durschnittliche Fluglänge eines Gasteilchens zwischen zwei Kollisionen mit anderen Gasteilchen.

#### 2.2.2 Sorption

(nach Quelle [wiki:sor])

Bezeichnet den Vorgang einer Anreicherung eines Stoffes. Hier beschreibt die Absorption, wenn der Stoff innerhalb einer Phase aufgenommen wird, zum Beispiel die Aufnahme einer Elektromagnetischenwelle. Adsorption ist im Gegensatz zur Absortion die Analgerung auf der Oberfläche oder Grenzfläche eines Stoffes.

Im Gegensatz du der Sorption, beschreibt die **Desoprtion** den Prozess bei dem Atome oder Moleküle die Oberfläche eines Festkörpers verlassen und in die Gasphase übergehen.

## 2.3 Vakuumbereiche

(nach Quelle [pfeiffer:grund])

Physikalisch sind mehrere Vakuumbereiche definiert, da die verschiedenen Dichten zu stark unterschiedlichem Gasverhalten führen.

### 2.3.1 Grobvakuum

Im ersten Druckbereich wird von einem Grobvakuum gesprochen, dieser ist zwischen 103 mbar und 1 mbar definiert. In diesem Bereich findet allgemein Viskose Strömung statt, in der der Großteil der Stöße zwischen den Gasteilchen untereinander und nicht mit der Gefäßwand stattfinden. Es muss jedoch abhängig von der Teilchengeschwindigkeit, der Teilchendichte und der Gefäßgröße zwischen laminarer oder turbulenter Strömung unterschieden.

### 2.3.2 Feinvakuum

Das Feinvakuum ist zwischen 1 mbar und  $1 \cdot 10^{-3}$  mbar definiert, hier findet Knudsen-Strömung statt.

### 2.3.3 Hoch und Ultrahochvakuum

Es wird ab einem Druck von  $1 \cdot 10^{-3}$  mbar bis  $1 \cdot 10^{-7}$  mbar von Hochvakuum gesprochen, von Ultrahochvakuum ist ab  $10^{-7}$  mbar die Rede. In diesen beiden Druckbereichen findet nur noch Molekulare-Strömung statt. Dies bedeutet, dass die Teilchen untereinander fast nicht mehr Wechselwirken, mathematisch ist hier die mittlere freie Weglänge größer als die Weite des Stömungskanal.

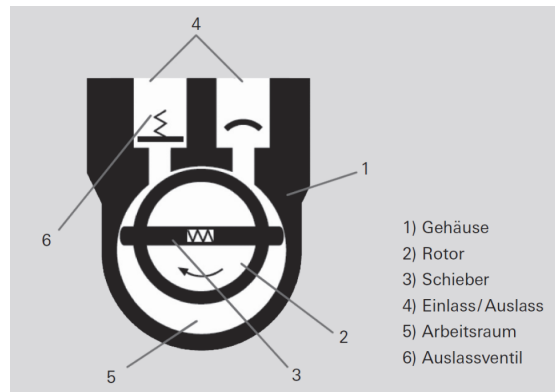
Diese unterschiedlichen Stömungsarten haben hohe Relevanz bei praktischen Anwendungen da zum Beispiel das effektive Saugvermögen von Vakuumpumpen beeinträchtigt wird. Im Grobvakuum ist es wichtig einen großen Leitungsdurchmesser einzubauen, damit laminare Stömung sicher gestellt ist, im Ultrahochvakuum reichen relativ kleine Leitungsdurchmesser jedoch wieder aus.

## 2.4 Arten der Vakuumerzeugung

(nach Quelle [peiffer])

Vakuumpumpen können sich stark in ihrer Funktionsweise abhängig vom Arbeitsbereich unterscheiden. Der größte Unterschied liegt zwischen gasbindenden und gasfördernden Vakuumpumpen, wobei sich gasfördernde Pumpen noch einmal in in verdrängende und kinetische Pumpen unterteilen. Gasbindende Vakuumpumpen funktionieren durch Sorption indem Gasteilchen von der Pumpe aufgenommen werden, dieses Prinzip ergibt erst bei bereits sehr gutem Vakuum Sinn. Gasfördernde Vakuum fördern Gas durch abgeschlossene Volumen die komprimiert werden oder sich ausdehnen. Kinetische Pumpen erhöhen das Vakuum indem Gasteilchen in richtung der Pumprichtung beschleunigt werden. Auch dieses Vakuumerzeugungsprinzip hat bei Atmosphärendruck einige Probleme und benötigt ein Vorvakuum.

### 2.4.1 Drehschiebervakuumpumpe



**Abbildung 1:** Der schematische Aufbau einer Drehschiebervakuumpumpe

Die Drehschiebervpumpe ist eine Rotationsverdrängerpumpe. Sie besteht aus dem Gehäuse (1), dem eingebauten Rotor(2), den mit Flieh- und Federkraft radial bewegten Schiebern(3) und dem Ein- bzw. Auslass(4). Das Innere des Arbeitsraumes(5) wird durch den Stator, den Rotor und die Schieber in mehrere Bereiche eingeteilt. Diese Saugen beim neuen Gas aus dem Rezipienten und erhöhen dessen Vakuum, wenn sie expandieren. Sobald das Volumen dann wieder vom Rezipienten getrennt ist, wird es komprimiert, um dann Gas durch den Auslass zu drücken. Eine zweistufige Drehschiebervpumpe kann Drücke bis zu  $5 \cdot 10^{-4}$  mbar erreichen, in diesem Versuch wird jedoch nur eine einstufige Pumpe mit einem Enddruck von  $p = 2,1 \cdot 10^{-2}$  mbar benutzt. Ein Nachteil der Drehschiebervpumpe ist, dass unter anderem zum Abschließen der Kammern, Öl verwendet wird. Mittels Desorption können daher Moleküle aus dem Öl in das Gas übergehen und dieses verunreinigen.

[pfeiffer]

### 2.4.2 Turbomolekularpumpe

[pfeiffer] Turbomolekularpumpen sind Turbinenähnliche kinetische Vakuumpumpen. In dem Gehäuse ist ein mehrstufiger, Rotor mit Schaufeln. Zwischen den Rotorscheiben sind beschauelte Statorscheiben mit spiegelverkehrter Symmetrie zu den Rotorscheiben. Die Rotorscheiben drehen sich nun mit bis zu 1500 Hz, damit die Schaufeln eine Rotationsgeschwindigkeit ähnlich der mittleren Teilchengeschwindigkeit haben. Durch Wechselwirkung mit den Rotor- und Statorschaufeln werden die Gasteilchen in Pumpenrichtung beschleunigt. Eine Voraussetzung für diese Funktionsweise ist, dass in der Pumpe Molekularströmung vorliegt. Die mittlere freie Weglänge muss größer sein, als die Abstände zwischen Rotor- und Statorscheiben, damit die Teilchen ihre Bewegungsrichtung beibehalten.

## 2.5 Saugvermögen

Im Allgemeinen beschreibt das Saugvermögen  $S$  einer Vakuumpumpe, wie viel Gas sie aus dem Rezipienten ziehen kann.

$$S = \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

Um dieses zu Bestimmen werden in diesem Versuch Evakuierungskurven, also der Druck innerhalb des Rezipienten und Leckratenmessungen durchgeführt.

### 2.5.1 Messung der $p(t)$ -Kurve

Wird die Gleichung:

$$p \cdot V = \text{const} \quad (4)$$

nach der Zeit abgeleitet, entstehen auf der linken Seite zwei Summanden. Wird nun mit dem Druck  $p$  multipliziert, kann die Ableitung des Volumens als das Saugvermögen  $S$  identifiziert werden. Durch verschieben der Terme entsteht folgende Gleichung:

$$\frac{dV}{dt} = S = -\frac{V}{p} \frac{dp}{dt} \quad (5)$$

Diese Differentialgleichung wird mittels einer Exponentialfunktion mit dem Saugvermögen  $S$  dem Volumen  $V$  und der Zeit  $t$  im Exponenten gelöst:

$$p(t) = p_0 \exp\left(-\frac{S}{V_0} t\right) \quad (6)$$

Jedoch muss noch beachtet werden, dass alle Vakuumpumpen einen gewissen Enddruck  $p_E$  haben. Sobald dieser Druck erreicht ist, kann die Pumpe den Druck nicht weiter erhöhen und es entsteht ein Gleichgewicht des Saugvermögens und Vakuumreduzierende Prozesse wie Desorptions oder Lecks. Der Gleichgewichtsdruck wird in der Evakuierungskurve durch verschieben und skalieren der Exponentialfunktion eingerechnet:

$$p(t) = (p_0 - p_E) \exp\left(-\frac{S}{V_0} t\right) + p_E \quad (7)$$

Mit dieser Formel lässt sich aus der Evakuierungskurve eine Schätzung für das Saugvermögen einer Vakuumpumpe berechnen. Jedoch muss beim Auswerten darauf geachtet werden, dass Vakuumpumpen zum Beispiel in unterschiedlichen Strömungsarten, auch verschiedene Saugvermögen haben.

### 2.5.2 Leckratenmessung

Zur Berechnung des Saugvermögens, mittels Leckratenmessung, muss zunächst die Leckrate  $Q$  mittels des Gleichgewichtsdruck  $p_g$  definiert werden:

$$S = \frac{Q}{p_g}, \quad (8)$$

und

$$Q = V_0 \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (9)$$

Hier raus folgt nun wieder ein Ausdruck für das Saugvermögen der Vakuumpumpe:

$$S = \frac{V_0}{p_g} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (10)$$

### 2.5.3 Leitwert

Bei all diesen Berechnungen ist zu bedenken, dass das theoretische Saugvermögen  $S_0$  immer durch Vakuumanlage reduziert wird. Dieser Effekt wird durch den Leitwert des Rezipienten beschrieben, er gibt den reziproken Strömungswiderstand der Schläuche und Verbindungen an. Das effektive Saugvermögen  $S_{\text{eff}}$ , dass tatsächlich am Rezipienten ankommt, berechnet sich damit zu:

$$S_{\text{eff}} = \frac{S_0 \cdot L}{S_0 + L}. \quad (11)$$

## 2.6 Arten der Vakuummessung

### 2.6.1 Pirani-Vakuummeter

Das Pirani-Vakuummeter arbeitet optimal im Bereich des Feinvakuums, es nutzt aus, dass in diesem Druckbereich der Wärmeleitfähigkeit proportional zum Druck ist. Der Wärmetransport geschieht hier primär durch direkte Stöße von Gasteilchen untereinander. Die Messung erfolgt über einen Draht in dem Rezipienten, durch den ein konstanter Strom fließt. Nun kann mittels einer Wheatstone-Brücke der Widerstand dieses Leiters und somit die Temperatur des Drahtes bestimmt werden. Da der Draht sich abhängig von dem Druck im Rezipienten, unterschiedlich schnell abkühlt, kann mit dieser Methode auch der Druck in dem Rezipienten bestimmt werden.

### 2.6.2 Penning-Vakuummeter

Das Penning-Vakuummeter ist ein Kalt-Ionisations-Vakuummeter, es arbeitet im Hoch- und Ultrahochvakuum. Es beruht darauf, dass durch ein Elektrisches Feld Atome ionisiert werden. Die frei werdenden Elektronen werden beschleunigt und ionisierten auf ihrem Beschleunigungsweg weitere Atome. Diese Ionen werden dann zu der Kathode beschleunigt und erzeugen dort einen Strom, welcher ein Maß für das Vakuum ist.

### 2.6.3 Bayard-Alpert-Vakuummeter

Das Bayard-Alpert-Vakuummeter ist eine Heiß-Ionisations-Vakuummeter, es arbeitet sehr Analog zu dem Penning-Vakuummeter. Der einzige Unterschied ist, dass die Elektronen durch einen Glühdraht frei werden.

## 2.7 Piezo-Vakuummeter

Ein Piezo-Vakuummeter misst das Vakuum direkt indem es die Kraft des Gases auf eine Oberfläche misst. Da mit immer besser werdendem Vakuum, auch die Kraft abnimmt, eignet sich dieses Vakuummeter am besten für das Grobvakuum (1000 mbar bis 300 mbar). Die konkrete Messung erfolgt mittels Piezo-Kristallen, welche bei Kompression eine Spannung erzeugen, die dann abgelesen wird. Aufgrund der ähnlichen Arbeitsbereiche werden wie auch in diesem Versuch, Piezo- und Pirani-Vakuummeter oft in einem Messgerät kombiniert.

## 3 Aufbau

## 4 Durchführung

Zunächst wird die Funktionsfähigkeit der Anlage überprüft und vorbereitet. Dazu wird getestet ob die Drehschieberpumpe innerhalb von maximal 10 Minuten in der Lage ist einen Enddruck  $P_E$  von 0,03 mbar bis 0,05 mbar zu erzeugen. Ist dem nicht so, muss die Anlage auf undichte Stellen überprüft werden. Weiterhin wird dann mit dem bereits vorhandenen Vorvakuum, die Turbopumpe eingeschaltet. Um Wasseranlagen zu entfernen und Desorption vorzubeugen wird die Anlage auch einmal mit einem Heißluftfön erhitzt. Die Turbopumpe sollte dann in der Lage sein einen Druck von  $2 \cdot 10^{-5}$  mbar bis  $8 \cdot 10^{-5}$  mbar zu erzeugen.

### 4.1 Messungen Zur Drehschieberpumpe

Sobald bestätigt wurde, dass der Pumpstand ausreichend dicht ist, können Evakuierungskurven aufgenommen und Leckratenmessungen durchgeführt werden.

#### 4.1.1 Evakuierungskurve

Zunächst muss nun die Turbopumpe abgeschaltet werden um Schäden an der Pumpe zu verhindern und das Vakuum wieder auf den Druckbereich der Drehschieberpumpe reduziert werden. Dann wird die Drehschieberpumpe abgeschoben und der Rezipient belüftet indem für ca. 5 Sekunden D1 und V3 geöffnet wird bis wieder Normaldruck in dem Rezipienten herrscht. Sobald der Rezipient wieder dicht ist, wird der Zugang zu der Drehschieberpumpe geöffnet und der Druckabfall als Funktion der Zeit vermessen. Dazu werden für eine Gesamt Messzeit von 600 s alle 10 s der Druck an dem Digitalen Vakuummeter abgelesen. Bei dieser Messung sollte ein Enddruck von  $P_E$  von zwischen 0,1 mbar und 0,08 mbar erreicht werden. Diese Messung wird dann 3-mal wiederholt.

#### 4.1.2 Leckratenmessung

Die Leckratenmessung wird durchgeführt indem mittels des Nadelventils ein Gleichgewichtsdruck  $p_g$  eingestellt und dann bei weithin offenem Dosierventil die Pumpe vom System abgeschoben wird. Den darauf folgenden Druckanstieg wird dann als Funktion der



Zeit über 200 s in 10 s Abständen gemessen, Diese Messung wird mit 4 Gleichgewichtsdrücken  $p_g = 0, 4; 10; 40; 80$  mbar und jeweils 3 Messreihen durchgeführt.

## 4.2 Messung zur Turbopumpe

Die Messungen zu der Turbopumpe laufen analog zu denen der Drehschieberpumpe. Es ist hier wichtig darauf zu Achten, dass bevor die Turbopumpe eingeschalten wird, bereits eine Vorvakuum von mindestens  $10 \cdot 10^{-1}$  mbar mit der Drehschieberpumpe erzeugt wurde.

## 4.3 Evakuierungskurve

Dieses mal wird der Rezipient nicht komplett belüftet damit die Turbopumpe direkt starten kann. Als Startdruck wird mit dem Dosierventil bei laufender Pumpe ein Druck von  $1,6 \cdot 10^{-3}$  mbar eingestellt. Dann wird das Ventil geschlossen und das zunehmende Vakuum in einer  $p(t)$ -Kurve über 200 s alle 10 s aufgenommen. Auch diese Messung wird 3 mal wiederholt.

## 4.4 Leckratenmessung

Die Leckratenmessungen der Turbopumpe läuft sehr analog zu denen der Drehschieberpumpe, es werden lediglich nur über 120 s Werte aufgenommen. Und die Gleichgewichtsdrücke von denen die Leckratenmessung startet sind:  $(1&2) \cdot 10^{-4}$  mbar und  $(5&7) \cdot 10^{-5}$  mbar.