

Vakuumsversuch

Celina Wieberg	Aaron Schink
celina.wieberg@tu-dortmund.de	aaron.schink@tu-dortmund.de

Durchführung: DATUM	Abgabe: DATUM
---------------------	---------------

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Druckbereiche und Strömungsarten	3
2.2 Oberflächenphänomene und Gasdynamik	4
2.3 Leistung und Effizienz von Vakuumpumpen	4
2.4 Evakuierungskurve	5
2.5 Pumpen	6
2.5.1 Drehschieberpumpe	6
2.5.2 Turbomolekularpumpe	6
2.6 Vakuummessgeräte und Effizienzbereiche	7
2.6.1 Ionisations-Vakuummeter	7
2.6.2 Pirani-Vakuummeter	7
2.6.3 Piezo-Vakuummeter	7
3 Durchführung	8
4 Auswertung	8
5 Diskussion	8
Literatur	8

1 Zielsetzung

Ziel des Versuches ist es, die Grundlagen der Vakuumphysik, so wie den Umgang mit den entsprechenden Vakuumtechnik-Komponenten zu erlernen. Dazu werden Evakuierungskurven und effektives Saugvermögen von Drehschieber- und Turbomolekularpumpen analysiert und ihre Leckraten bestimmt.

2 Theorie

Das Vakuum ist ein Zustand geringer Gasdichte, also ein Raum, welcher Nahezu leer von Materie ist. Da dieser Raum nur wenige Teilchen enthält, ist der Druck in einem Vakuum deutlich geringer als der Atmosphärendruck. Druck ist definiert als die Kraft pro Fläche, die von Gasmolekülen ausgeübt wird, wenn sie auf eine Oberfläche stoßen. Die mittlere freie Weglänge, also die Strecke, welche ein Teilchen im Mittel zurücklegt, bevor es mit einem anderen kollidiert, ist folglich sehr hoch. Ein perfektes Vakuum ist in der Praxis nicht zu realisieren, zur mathematischen Beschreibung des Vakuums verwendet man die Zustandsgleichungen des idealen Gases, einem theoretischen Modell für ein Gas, in welchem die Teilchen keine Wechselwirkungen außer elastischen Stößen erfahren. Außerdem ist ihr Volumen vernachlässigbar und sie werden als punktförmige Teilchen angenommen. Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases ist gegeben durch

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

Dabei ist p der Druck, V das Volumen, N die Teilchenanzahl, k_B die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur. Bei konstanter Temperatur ist der Druck eines Gases umgekehrt proportional zum Volumen, das ist das Boyle-Mariottesche Gesetz,

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}. \quad (2)$$

2.1 Druckbereiche und Strömungsarten

Beim Evakuierungsvorgang fällt der Druck über die Zeit. Der normale Atmosphärendruck beträgt auf der Erdoberfläche 1 bar. Die Druckbereiche des Vakuums liegen bei folgenden Werten: Grobvakuum bei 1 bar bis 10^{-3} bar Feinvakuum von 10^{-3} bar bis 10^{-7} bar Hochvakuum von 10^{-7} bis 10^{-9} bar und das Hochvakuum liegt bei Werten unter 10^{-9} bar. Im niedrigen Druckbereich dominiert die molekulare Strömung, hier bewegen sich die Moleküle fast unabhängig voneinander, da sie nur selten kollidieren und ihre mittlere freie Weglänge größer ist als die Ausmaße des Behälters. In größeren Druckbereichen kollidieren die Teilchen oft und bewegen sich in geordneten Bahnen, das nennt man Laminare Strömung. Im folgenden betrachten wir ein Gemisch aus Gasen, der Gesamtdruck ist dabei die Summe aller Partialdrücke. Der Partialdruck eines Gases in einem Gasgemisch ist der Druck, den das Gas in dem Behälter alleine hätte.

2.2 Oberflächenphänomene und Gasdynamik

Um das Verhalten von Gasen in Vakuumexperimenten zu verstehen, muss man sich einige Phänomene klarmachen. Die Moleküle haben alle eine kinetische Energie, dadurch können sie im Vakuum von einem Bereich hoher Konzentration zu einem Bereich niedriger Konzentration gelangen. Diese so genannte Diffusion gewährleistet die Homogenität des Vakuums, kann aber durch Temperaturveränderung und Materialeigenschaften beeinflusst werden. Haften Gas oder Flüssigkeitsmoleküle an der Oberfläche eines Feststoffes, dringen aber nicht in ihn ein, so spricht man von Adsorption. Die Ursache von Adsorption sind oft Van-der-Waals Kräfte, die zur beschriebenen Anreicherung von Gasen nahe der Oberfläche führen. Dringen die Moleküle tatsächlich in den Feststoff ein, so handelt es sich um Absorption. Die Moleküle können dort chemisch gebunden oder gelöst werden. Im Vakuum tritt Absorption seltener auf als Adsorption. Beide Phänomene können zu einer Druckänderung des Systems führen, da die Prozesse reversibel sind, die Moleküle können also wieder freigesetzt werden. Diesen Prozess bezeichnet man als Desorption. Die Reversibilität der ersten Prozesse ist wichtig für die Aufrechterhaltung eines stabilen Vakuums, führt aber automatisch zu einem Druckanstieg. Werden Gase langsam aus Materialien freigesetzt, entstehen virtuelle Lecks im Vakuum. Ihr Ursprung liegt immer in interner Gasfreisetzung, sie entstehen nicht durch externe Quellen. Treten virtuelle Lecks auf, so können sie den Evakuierungsvorgang verlangsamen.

2.3 Leistung und Effizienz von Vakuumpumpen

Die Kenngrößen einer Vakuumpumpe sind wichtig um ihre Effizienz und ihre Arbeitsweise zu analysieren. Der Gasstrom in einer Pumpe beschreibt die Menge an Gas, die pro Zeiteinheit durch ein System bewegt wird. Die Saugleistung einer Pumpe ist ihre Fähigkeit, Gas aus einem System zu entfernen. Beides wird typischerweise in Liter pro Sekunde angegeben. Die Saugleistung lässt sich berechnen mit

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

Dabei ist V das Volumen und t die Zeit. Das Saugvermögen S ist definiert als die maximale Gasmenge, die die Pumpe bei einem bestimmten Druck abpumpen kann. Das Saugvermögen lässt sich mit der Evakuierungskurve berechnen und hängt von dem Betriebsdruck ab,

$$S = \frac{dpV}{dt} \quad (4)$$

In der Praxis treten Leistungsverluste in einer Pumpe auf, Gründe dafür sind thermische Effekte wie Temperaturänderung des Gases, Viskosität, raue Innenflächen von Rohren und Kollisionsverluste bei hohen Drücken. Es macht daher Sinn, ein effektives Saugvermögen zu definieren,

$$\frac{1}{Q_{eff}} = \frac{1}{Q} + \frac{1}{C} \quad (5)$$

Der Leitwert C eines Rohres beschreibt, wie effizient Gas durch das Rohr transportiert wird, er kann definiert werden über den Strömungswiderstand R welcher beschreibt, wie stark der Gasfluss durch das Rohr behindert wird und die Druckdifferenz *increment* p , die zwischen der Messsonde und der Pumpe herrscht.

$$C = \frac{1}{R} \quad (6)$$

Mit der Formel für den Gasfluss Q in Abhängigkeit von dem Strömungswiderstand und der Druckdifferenz

$$Q = \frac{\Delta p}{R} \quad (7)$$

kann man den Leitwert ausdrücken durch

$$C = \frac{Q}{\Delta p} \quad (8)$$

2.4 Evakuierungskurve

Die Evakuierungskurve beschreibt, wie der Druck während des Evakuierungsvorgangs durch eine Vakuumpumpe mit der Zeit fällt. Mithilfe der Kurve kann man Effizienz und Leistung der Pumpe analysieren. Man kann eine Differentialgleichung unter folgenden Annahmen herleiten:

- Die Temperatur T ist konstant.
- Das Gas lässt sich mit den Gesetzen der idealen Gasgleichung beschreiben.
- Das System ist abgeschlossen.

Die Zustandsgleichung für ein ideales Gas lautet:

$$p \cdot V = N K_b T \quad (9)$$

Da N , R , T konstant gilt: $p \cdot V = \text{konstant}$. Betrachtet man ein System welches mit einer Pumpe Evakuiert wird, ändert sich der Druck über die Zeit, Diese Änderung wird durch folgende Differentialgleichung beschrieben:

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

Dies ist eine lineare Differentialgleichung 1. n Ordnung die durch Trennung der Variablen gelöst wird. Man trennt p und t , integriert beide Seiten und erhält nach anwenden der Exponentialfunktion eine Gleichung die beschreibt wie der Druck $p(t)$ im Laufe der Zeit t abnimmt

$$p(t) = p_0 \cdot e^{-\frac{S}{V} \cdot t} \quad (11)$$

Dabei ist p_0 der Anfangsdruck. Unter berücksichtigung des Enddrucks modifiziert sich die Lösung zu:

$$p(t) = p_{end} + (p_0 - p_{end}) \cdot e^{-\frac{S}{V} \cdot t} \quad (12)$$

2.5 Pumpen

2.5.1 Drehschieberpumpe

Die Drehschieberpumpe ist eine Verdrängungspumpe, die für die Vakuumerzeugung genutzt werden kann. Sie besteht aus dem Stator, einem festen Gehäuse und einem Rotor in Form eines rotierenden Zylinders, welcher exentrisch im Gehäuse gelagert ist. Der Rotor besteht aus mehreren Schiebern, welche durch Zentrifugalkräfte oder Federn an die Innenwand des Gehäuses gepresst werden. Die Vakuumerzeugung läuft folgendermaßen ab: Sobald der Rotor sich dreht, entsteht ein vergrößerter Schöpfraum, welcher mithilfe der Ansaugstutzen das Gas einsaugt. Mit der Zeit erreicht der Schöpfraum sein maximales Volumen, sobald dies geschehen ist, beginnt er sich wieder zu verkleinern, wodurch das angesaugte Gas komprimiert wird. Dadurch erhöht sich der Druck. Schließlich wird das Gas durch den Auslassstutzen aus der Pumpe gedrückt und in das Abgassystem geleitet. Das Prinzip basiert darauf, dass durch die Rotation ein Volumen entsteht, welches sich vergrößert und verkleinert, wodurch ein Druckgradient entsteht, der das Gas durch die Pumpe transportiert.

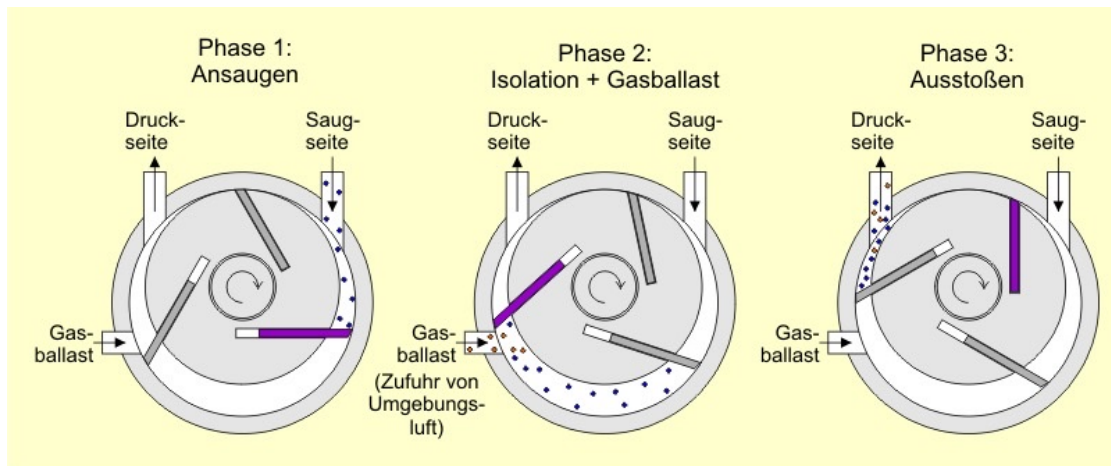


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Drehschieberpumpe

2.5.2 Turbomolekularpumpe

Die Turbomolekularpumpe ist eine mechanische Vakuumpumpe, welche das Prinzip der molekularen Strömung nutzt. Die Pumpe besteht aus einem Rotor und einigen Statorscheiben. Der Rotor ist scheibenförmig und besitzt Schaufeln, die wie bei einer Turbine angeordnet sind. Zwischen den Schaufeln befinden sich Spalten, die als Transportkanäle für das Gas dienen. Durch die Ansaugstutz wird das Gas in die Pumpe geleitet und gelangt dort in die Spalten zwischen den rotierenden Statorschaufeln. Durch die hohe Geschwindigkeit des Rotors bekommen die Gasmoleküle Impulse übertragen, wodurch sie wiederholt mit den Schaufeln kollidieren können und so durch die Pumpe transportiert werden. Die Moleküle werden in Richtung des Auslasses beschleunigt und bei Erreichen

des Auslassstutzen aus der Pumpe geleitet. Dadurch wird der Druck in der Kammer verringert, was ein Vakuum erzeugt. Die Pumpe basiert also auf der kinetischen Energie der Gasmoleküle. Die Pumpen sind besonders effektiv im Hochvakuum Bereich.

2.6 Vakuummessgeräte und Effizienzbereiche

2.6.1 Ionisations-Vakuummeter

Die Ionisations-Vakuummeter sind in der Lage sehr niedrige Drücke präzise zu messen, sie werden also in Druckbereichen die dem Hochvakuum und dem Ultrahochvakuum entsprechen verwendet. In dem Gerät befindet sich ein Elektronenemitter, welcher Elektronen erzeugt. Diese werden durch ein elektrisches Feld beschleunigt und ionisieren die Gasmoleküle sobald sie aufeinander treffen. Die entstandenen Ionen werden durch ein weiteres elektrisches Feld zu einer Sammelelektrode hin beschleunigt. Dieser Ionenstrom ist proportional zu der Anzahl der ionisierten Moleküle im Vakuum und wird von einem Amperemeter gemessen. Da der Strom proportional zu der Gasdichte und damit zu dem Druck im Vakuum ist, kann der gemessene Strom einfach in einen Druckwert umgerechnet werden. Die Druckveränderungen entstehen also durch den Ionisationsprozess.

2.6.2 Pirani-Vakuummeter

Das Pirani-Vakuummeter ist ideal um mittlere Drücke im Bereich von 10^{-7} bar bis 0,01 bar zu messen. Ein konstanter Strom erhitzt einen Draht aus Platin oder Wolfram, welcher sich in einem Gehäuse durch das Gas strömen kann. Die Temperatur des Drahtes ist dabei abhängig von dem Druck des umgebenden Gases. Ist der Druck gering, so ist der Draht heiß. Das liegt daran, dass das Gas bei wenig Druck und damit geringer Gasdichte ein schlechter Wärmeleiter ist und nur wenig Wärme vom Draht abführen kann. Mit der selben Argumentation ist der Draht bei hohem Druck kühler. Die Temperaturveränderung führt zu einer Veränderung des elektrischen Widerstandes des Drahtes. Diese Veränderung wird mit einer Brückenschaltung gemessen und daraus kann dann der Druck bestimmt werden.

2.6.3 Piezo-Vakuummeter

Das Piezo-Vakuummeter arbeitet effizient bei Druckbereichen von einem bar, also bei Atmosphärendruck. In dem Vakuummeter befindet sich eine Membran, welche von einem Gas umgeben ist. Der Druck des Gases übt eine Kraft auf die Membran aus, wodurch diese sich verformt. Ist der Druck höher, so ist auch das Ausmaß der Verformung größer. Ein piezoelektrisches Material, welches sich direkt an der Membran befindet kann die Verformung der Membran in ein elektrisches Signal übersetzen. Diesen Effekt nennt man den Piezoelektrischen Effekt, die Spannung entsteht durch die Verschiebung von elektrischen Ladungen innerhalb des Materials. Das Material muss dafür eine asymmetrische Kristallstruktur besitzen, sodass die positiven und negativen Ladungen im Kristall nicht symmetrisch verteilt sind. Der mechanische Druck auf das Material verschiebt die Atome innerhalb des Kristallgitters und damit die Verteilung der Ladungen im Material. Das

daraus resultierende Dipolmoment erzeugt eine messbare elektrische Spannung. Aus dieser Spannung kann der Druck bestimmt werden. Druck und Spannung sind proportional zueinander und zur Verformung der Membran.

[1]

3 Durchführung

4 Auswertung

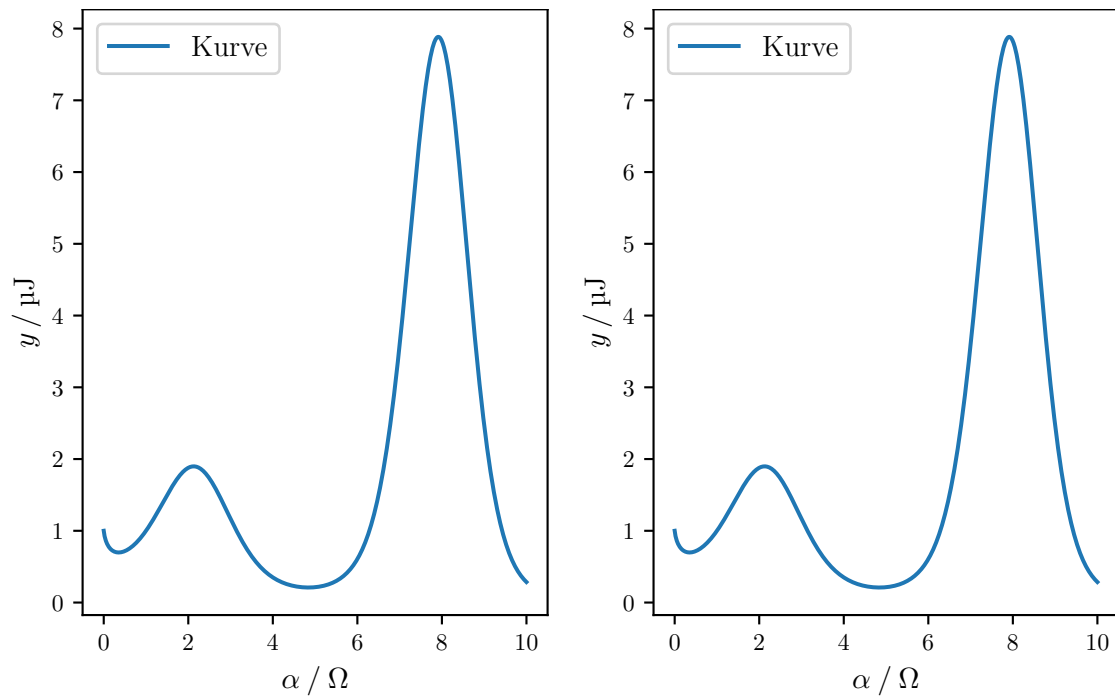


Abbildung 2: Plot.

5 Diskussion

Literatur

[1] TU Dortmund. *Versuch zum Literaturverzeichnis*. 2014.