

Fachpraktikum

Mikroelektronik und Sensorik

Versuch: Vakuumerzeugung



Versuchsanleitung Vakuumerzeugung

1. Versuchsziel

Ziel des Versuches ist es, sich mit Grundlagen der Vakuumtechnik bekanntzumachen und Kenntnisse zur Vakuumerzeugung, zu Funktionsweise und Eigenschaften ausgewählter Vakuumpumpen zu erwerben.

2. Versuchsgrundlagen

Eine Vielzahl moderner technologischer Verfahren benötigt die Vakuumtechnik. Für wichtige Prozeßschritte der Halbleiter-Mikroelektroniktechnologie und Mikrosystemtechnik ist die Nutzung der Vakuumtechnik unabdingbar.

Damit gehören für einen Ingenieur der Elektrotechnik Grundkenntnisse zur Vakuumtechnik zum Handwerkszeug. Es ist das Anliegen dieses Versuches, zu deren Vermittlung beizutragen und eine gegebenenfalls später erforderliche weitere Einarbeitung in dieses Gebiet zu erleichtern.

2.1. Übersicht

Gravitation und nach allen Richtungen gleichförmige Druckausbreitung in Gasen sind die Ursachen dafür, daß in der Lufthülle der Erde im Bereich der Oberfläche ein Druck von etwa 1 bar (10^5 Nm^{-2}) herrscht, der je nach Wetterlage schwankt und mit zunehmender Höhe abnimmt. Wegen dieser Abhängigkeiten muß der Normdruck auf der Erdoberfläche definiert werden und ist mit 1013,25 mbar festgelegt. Als Vakuum bezeichnet man Drücke, die kleiner als der Normdruck sind. In 100 km Höhe ist der Druck bereits auf ein Millionstel dieses Wertes abgefallen, ab dieser Höhe bestehen Hochvakuumbedingungen, in 500 km Höhe herrscht ein Druck von 10^{-8} mbar, was Ultrahochvakuum entspricht.

Die Vakuumtechnik befaßt sich mit der technischen Erzeugung und Anwendung dieser Drücke. Realisierbar sind heute Drücke im 10^{-13} mbar-Bereich. Damit erstreckt sich der vakuumtechnisch genutzte Druckbereich über 10^{16} Größenordnungen. Es ist verständlich, daß sich über einen derart weiten Bereich sowohl für die Vakuumerzeugung, als auch für die Messung der Drücke unterschiedliche Prinzipien und konstruktive Ausführungen zur Anwendung kommen müssen und daß für die Arbeitstechniken in den ver-

schiedenen Druckbereichen unterschiedliche Kriterien zu beachten sind.

2.1.1. Vakuumbereiche und Druckeinheiten

Folgende Unterteilung in Druckbereiche der Vakuumtechnik hat sich bewährt:

Bereich	Druck in mbar
Großvakuum	1013 - 1
Feinvakuum	1 - 10^{-3}
Hochvakuum	10^{-3} - 10^{-7}
Ultrahochvakuum	$< 10^{-7}$

Die Maßeinheit für den Druck im Internationalen Einheitensystem (SI) ist das Pascal (Pa).

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ Nm}^{-2}.$$

Zulässig und verbreitet ist das Bar (bar). $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$, wobei üblicherweise das Millibar ($1 \text{ mbar} = 10^2 \text{ Pa}$) benutzt wird. Seit 1980 nicht mehr gültig, von Skalen betagter Meßgeräte und aus den Köpfen älterer Vakuumtechniker jedoch kaum zu tilgen ist das Torr. Das Torr ist an die physikalische Atmosphäre (atm) (Normaldruck) gekoppelt. Der Normaldruck hält einer Quecksilbersäule von 760 mm das Gleichgewicht. 1 Torr entspricht 1 mm Hg-Säule.

Die folgende Tabelle stellt die Druckeinheiten zusammen:

Einheit	Symbol	Bedeutung
Pascal	Pa	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ Nm}^{-2}$
Millibar	mbar	$1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa}$
Technische Atmosphäre ¹	at	$1 \text{ at} = 0.980665 \times 10^5 \text{ Pa}$
Torr ²	Torr	$1 \text{ Torr} = 133.3 \text{ Pa}$
Physikalische Atmosphäre ³	atm	$1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$
Meter Wassersäule	mWS	$1 \text{ mWS} = 0.1 \text{ at}$

¹ $1 \text{ at} = 1 \text{ kp/cm}^2$, ² $1 \text{ Torr} = 1 \text{ mm Quecksilbersäule}$, ³ $1 \text{ atm} = \text{mittlerer Luftdruck} = \text{Normaldruck } p_0$

Für die praktische Laborarbeit sollte man sich merken:

$$100 \text{ Pa} = 1 \text{ mbar} \approx \frac{3}{4} \text{ Torr}$$

2.1.2. Ideales Gasgesetz, Gaskinetik

Das Verhalten von idealen (nicht kondensierbaren) Gasen wird durch das universelle Gasgesetz, eine experimentell gefundene Beziehung, beschrieben

$$pV = \nu RT \quad (1)$$

mit p - Druck in Pa, mbar; V -Volumen in m^3 , l; ν - Stoffmenge, Anzahl der Mole; R - Gaskonstante ($R = 8,3144 \text{ Ws K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ oder $R = 83 \text{ mbar l K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$); T - Temperatur in K.

Die Stoffmenge ν kann ausgedrückt werden

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{G}{M}$$

wobei

$$M = N_A \cdot m; n = \frac{N}{V}; \rho = n \cdot m$$

gilt. Mit N als Anzahl der Teilchen im Volumen V , N_A als Anzahl der Teilchen in einem Mol (Avogadro-Konstante $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), M als Molarer Masse, m als Masse eines Teilchens in g, kg; n als Teilchendichte in cm^{-3} , m^{-3} ; ρ als Dichte in g cm^{-3} , kg m^{-3} ;

G als Masse des Gases in g, kg.

Gaskinetisch betrachtet, ergibt sich der Druck eines Gases auf die Wände des einschließenden Gefäßes aus der Summe der Stöße, die die Moleküle oder Atome eines Gases pro Flächeneinheit ausüben. Mit Hilfe der kinetischen Gastheorie läßt sich für ideale Gase berechnen:

$$p = n k T \quad (2)$$

mit k - Boltzmann-Konstante $k = 1,380 \cdot 10^{-23} \text{ W s K}^{-1}$.

Durch Vergleich von Gleichung (1) und Gleichung (2) ergibt sich der Zusammenhang von universeller Gaskonstante R , Boltzmannkonstante k und Avogadro-Konstante N_A

$$R = N_A \cdot k \quad (3)$$

Aus

$$p = nkT = n \frac{R}{N_A} \cdot T$$

geht hervor, daß Druck und Teilchendichte einander proportional sind. Für $T = 273 \text{ K}$ ergibt sich

$$2,65 \cdot 10^{16} \frac{p}{\text{mbar}} = \frac{n}{\text{cm}^{-3}}$$

Demnach enthält 1 cm^3 eines Gases bei einem Druck von 1000 mbar etwa $3 \cdot 10^{19}$ Teilchen, im Feinvakuumbereich (10^{-2} mbar) $3 \cdot 10^{14}$, im Hochvakuumbereich (10^{-6} mbar) $3 \cdot 10^{10}$ und bei sehr gutem Ultrahochvakuum (10^{-10} mbar) immerhin noch 3 Millionen Teilchen pro cm^3 .

2.1.3. Gasgemische

Handelt es sich um Gasgemische, ergibt sich die Teilchendichte n als Summe der Teilchendichten der Gaskomponenten n_i und entsprechend Gleichung (2) der Totaldruck p_t aus der Summe der Partialdrücke p_i

$$p_t = \sum p_i = kT \sum n_i \quad (4)$$

2.1.4. Strömungsvorgänge, Ohmsches Gesetz der Vakuumtechnik

Aufgabe der Vakuumtechnik ist es nun, durch Entfernen von Gasteilchen (Pumpen) aus einem vor-

gegebenen Volumen solche verringerten Teilchendichten und entsprechend reduzierte Drücke zu erzeugen, wie für den vorgesehenen technischen Anwendungsfall erforderlich sind. Die häufig sehr komplexen Apparaturen lassen sich auf folgende Anordnung zurückführen: Pumpe, Verbindungsleitung, Rezipient (**Abb. 1**).

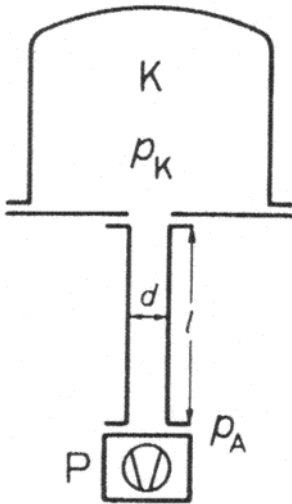


Abb. 1 Anordnung
Pumpe -
Verbindungsleitung -
Rezipient

Es ist sofort einzusehen, daß das Abpumpen von Gasteilchen im Bereich der Pumpe zu einer Strömung in diese Richtung und zu entsprechenden Druckdifferenzen führt. Bauteile der Leitung (Rohre, Blenden) setzen dieser Strömung einen Widerstand entgegen. Ganz analog wie für den Ladungstransport in der Elektrotechnik wird ein Ohmsches Gesetz der Vakuumtechnik definiert und zur Berechnung benutzt. Als Volumenstromstärke definiert man

$$q_v = \frac{dV}{dt} \text{ in } m^3 h^{-1}, l s^{-1} \quad (5)$$

als Stoffmengenstromstärke

$$q_v = \frac{dv}{dt} \text{ in } mol s^{-1} \quad (6)$$

Wegen Gleichung (1) gilt

$$p \frac{dV}{dt} = p q_v = \frac{dv}{dt} RT = q_v RT \quad (7)$$

$p q_v = q_{pV}$ bezeichnet man als pV-Stromstärke, sie ist bei konstanter Temperatur der Stoffmengenstromstärke proportional und wird üblicherweise in $mbar l s^{-1}$ gemessen. Den Volumenstrom q_v am Saugstutzen einer Pumpe nennt man **Saugvermögen**. Der pV-Strom an dieser Stelle ist die **Saugleistung** der Pumpe q_{pV} . Folglich gilt

$$q_{pV} = p \cdot S \quad (8)$$

Die treibende Kraft für den Gasteilchentransport q_{pV} ist die Druckdifferenz Δp über einem Widerstand (z.B. ein Rohrstück), analog zur Spannung für den Ladungstransport in der Elektrotechnik. Es wird definiert

$$W = \frac{\Delta p}{q_{pV}} \quad (9)$$

als Widerstand der Leitung bzw. der Kehrwert

$$L = \frac{1}{W} \quad (10)$$

als deren Leitwert. Als Dimensionen ergeben sich W in $s \cdot l^{-1}$, $h \cdot m^{-3}$, L in $l \cdot s^{-1}$; $m^3 \cdot h^{-1}$. Die aus der Elektrotechnik bekannten Beziehungen für Serien- und Parallelschaltungen können analog übernommen werden.

Für die in Abb.1 skizzierte Anordnung kann ein effektives Saugvermögen an der Verbindung Rezipient/Leitung angegeben werden. Bei konstanten Druckverhältnissen ist der q_{pV} -Strom an jedem Querschnitt gleich, es gilt

$$p_A \cdot S = p_K \cdot S_K = q_{pV} \quad (11)$$

$$S = \frac{dV}{dt} \text{ Saugvermögen am Ansaugflansch der Pumpe}$$

$$S_K = \frac{dV_K}{dt} \text{ effektives Saugvermögen am Kessel}$$

$$S_K = \frac{p_A}{p_K} S$$

$$L = \frac{q_{pV}}{p_K - p_A}$$

Z.B. reduziert ein Leitwert der Leitung von gleicher Größe wie das Saugvermögen der Pumpe das effektive Saugvermögen auf die Hälfte.

Widerstand bzw. Leitwert hängen stark davon ab, ob sich das Gas als viskoses Kontinuum laminar oder auch turbulent durch die Querschnitte bewegt oder ob Druck und Teilchendichte so niedrig sind, daß sich die Gasteilchen unbeeinflusst voneinander von Wand zu Wand bewegen. Das ist für $p \cdot d < 10^{-2} \text{ mbar cm}$ der Fall, dann ist die mittlere freie Weglänge größer als $d/2$, wobei d eine charakteristische Gefäßabmessung, z. B. der Rohrdurchmesser ist.

Zwischen mittlerer freier Weglänge l und Druck besteht die Beziehung

$$\bar{l} \cdot p \approx 6,65 \cdot 10^{-5} \text{ mmbar}$$

Berechnung und experimentelle Bestimmung solcher Leitwerte ist ein eigenes Kapitel der Vakuumtechnik,

der anwendende Ingenieur entnimmt die für den Entwurf seiner Vakuumanlage notwendigen Leitwertetabellenwerken und Firmenschriften.

Zum Evakuieren wird Zeit benötigt. Auch nach beliebig langer Pumpzeit wird bei sonst gleichen Bedingungen ein bestimmter Enddruck p_E nicht unterschritten. Beim Enddruck herrscht Gleichgewicht zwischen Saugleistung q_{pV} der Pumpe und "einströmenden" Gasstrom. Quelle dieses Gasstromes können Undichtheiten des Rezipienten, bei manchen Pumpenarten Rückströmungen durch die Pumpe selbst, und bei zunehmend niederen Drücken und höheren Temperaturen - Gasabgaben von den Wänden des Rezipienten und eingebauten Materialien in Abhängigkeit von deren Dampfdruck p_d sein. Man kann davon ausgehen, daß unterhalb 10^{-4} mbar, wesentlich mehr Gasmoleküle an den Wänden gebunden als im Volumen vorhanden sind.

2.2. Vakuumerzeugung

Zur Vakuumerzeugung werden Pumpen unterschiedlicher Wirkprinzipien und Konstruktion eingesetzt. Es gibt keine Pumpen, deren Einsatzbereich den gesamten Druckbereich von Normaldruck bei Ultrahochvakuum überstreicht, so daß zur Erzeugung niederer Drücke Kombinationen von Pumpen eingesetzt werden.

2.2.1. Einteilung der Vakuumpumpen

Zur Erzeugung des gewünschten Druckes in einem Vakuumgefäß gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

- (1) mit Hilfe einer Förderpumpe, bzw. der Reihenschaltung von zwei oder mehreren, den Gasstrom aus dem Rezipienten bis auf Atmosphärendruck zu verdichten und auszustoßen (Gastransfer-Vakuumpumpen), oder
- (2) bei einer nach außen abgeschlossener Kombination Pumpe - Rezipient, beginnend bei Normaldruck oder bei einem z.B. mit einer Förderpumpe erzeugten Ausgangsvakuum, durch Binden der Gasmoleküle

an oder in Festkörpern einen niedrigen Druck zu erzeugen (gasbindende Vakuumpumpen).

Die Gastransfer-Vakuumpumpen kann man nach dem Prinzip des Gasteilchentransportes noch in Verdränger-Vakuumpumpen und kinetische Vakuumpumpen unterteilen. Eine verbindliche Unterteilung der Vakuumpumpen enthält DIN 28400.

Wichtigste Vertreter der Verdränger-Vakuumpumpen sind:

Drehschiebervakuumpumpe

Sperrschiebervakuumpumpe

Wälzkolbenvakuumpumpe

Membranvakuumpumpe

Wichtigste Vertreter der kinetischen Vakuumpumpen sind:

Turbomolekularpumpe

Diffusionspumpe

Als wichtigste Vertreter der gasbindenden Vakuumpumpen sind zu nennen:

Adsorptionspumpe

Verdampferpumpe

Ionengeretterpumpe

Kryopumpe

Im Versuch sollen Sie die Drehschiebervakuumpumpe und die Turbomolekularpumpe näher kennenlernen. Beide Pumpen werden häufig als Reihenschaltung beschrieben, um Drücke bis in den UHV-Bereich zu erzeugen.

2.2.2. Drehschiebervakuumpumpe

Drehschieberpumpen erzeugen Drücke bis 10^{-3} mbar und arbeiten gegen Atmosphärendruck. Sie werden für Saugvermögen von 1 bis über 1000 m³/h gefertigt. Es gibt sie in ein- und zweistufiger Ausführung. Die zweistufigen Ausführungen erzeugen niedrigere Arbeits- und Enddrücke, wegen der Aufteilung der Druckstufung und weil das Öl der vakuumseitigen Stufe nicht mit Atmosphäre in Berührung kommt und bereits vorentgast ist.

Die Anwendungsgebiete solcher Pumpen sind breit: Halbleiterfertigung, Vakuumbeschichtung, Chemie-

und Pharmaindustrie, Metallurgie, Lampen- und Röhrenfertigung, Automobilindustrie, Lasertechnik, Forschung und Analysetechnik, Kältetechnik u.a. Gebiete.

Der Einsatz erfolgt für den Druckbereich bis 10^{-3} mbar allein, oft jedoch als Vorpumpe für Pumpenarten, die den Hochvakuum- und Ultrahochvakuumbereich erreichen.

In einem zylindrischen Gehäuse dreht sich ein exzentrisch gelagerter Rotor. In Schlitzen dieses Rotors befinden sich Schieber, die durch Federkraft oder auch nur durch die Fliehkraft an die Innenwand des Gehäuses gedrückt werden und dort entlanggleiten. Die Volumina zwischen den Schiebern werden bei jeder Umdrehung mit der Ansaugöffnung verbunden, nehmen über die Ansaugöffnung Gas aus dem zu evakuierenden Gefäß auf, verdichten dieses wegen des sich während der Umdrehung stetig verringernden Volumens, so daß es über das Auspuffventil ausgestoßen werden kann. **Abb. 2** zeigt das Prinzip.

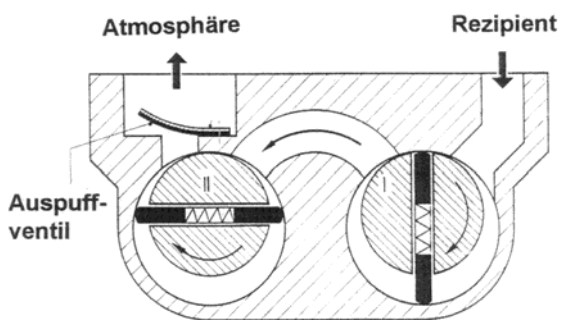


Abb. 2 Prinzip einer zweistufigen Drehschieberpumpe

Drehschieberpumpen sind ölgedichtet. Das Öl dient gleichzeitig der Schmierung und Abführung der Kompressionswärme.

Drehschieberpumpen besitzen ein Gasballastventil. In der Kompressionsphase muß das abgepumpte Gas auf über Atmosphärendruck (etwa 1,5 bar) verdichtet werden, um das Auslaßventil zu öffnen. Werden nun kondensierbare Dämpfe gepumpt, können diese nur bis zum Sättigungsdampfdruck komprimiert werden, sie fallen dann flüssig

aus, trotz weiterer Volumenverkleinerung steigt der Druck nicht weiter an. Typisches Beispiel ist das Pumpen von Wasserdampf, wo z.B. bei einer Pumpentemperatur von 60 °C der Sättigungsdampfdruck 200 mbar beträgt. Das mit dem Pumpenöl emulgierende Wasser verschlechtert dessen Eigenschaften sehr. Über den Gasballasteinlaß wird nun in der Kompressionsphase so viel nicht kondensierbares Gas (trockene Luft) in das Schöpfvolumen eingelassen, daß der Partialdruck der Dämpfe bei Kompression zum Öffnen des Ausstoßventiles den Sättigungsdampfdruck nicht übersteigt. Damit fallen die Dämpfe nicht aus und werden über das Auspuffventil ausgestoßen. Werden aus einem Rezipienten gleichzeitig nicht kondensierbare Gase (Permanentgase) und Dämpfe abgepummt, reicht der Anteil der Permanentgase zum Verhindern einer Kondensation aus, so lange

$$\frac{P_D}{P_D + P_G} < \frac{P_{DSätt}}{P_{Verd}} \quad (13)$$

Bei Betrieb mit Gasballast werden nicht so niedrige Enddrücke erreicht.

2.2.3. Turbomolekularpumpe

Die Turbomolekularpumpe ist der inzwischen verbreitetste Erzeuger von Hochvakuum. Sie hat seit Anfang der 60er Jahre die Diffusionspumpe aus vielen Anwendungsgebieten verdrängt. Erreichbare Enddrücke liegen im

10^{-11} mbar-Bereich. Sie kann nicht auf Atmosphärendruck verdichten und benötigt deshalb eine Vorpumpe, die Drücke von 10^{-2} mbar erzeugen sollte. Sonderbauformen der Turbomolekularpumpe können mit einem Vordruck von besser 10 mbar betrieben werden. Turbomolekularpumpen werden für die verschiedensten Anwendungsfälle mit Saugvermögen von 30 l s^{-1} bis über 1000 l s^{-1} gefertigt. Die Anwendungspalette ist breit: Wissenschaft und Forschung, Gas- und Festkörperanalytik, Halbleiterindustrie, insbesondere in den Prozessen: Ionenimplantation, Lithografie, Sputtern, Ätzen, Hochvakuumbeschichtungstechniken.

Das Prinzip der Turbomolekularpumpe besteht darin, daß die Gasteilchen durch Zusammenstöße mit schnell bewegten Flächen eines Rotors Impulse in Förderrichtung erhalten. Da im molekularen Strömungsbereich, in dem die Turbomolekularpumpe arbeitet, die Zusammenstöße der Gasteilchen untereinander zu vernachlässigen sind, erhalten die Teilchen die volle Wandgeschwindigkeit zusätzlich zu ihrer ungerichteten thermischen Geschwindigkeit.

Rotoren mit schräg angeordneten Schaufeln, zwischen denen sich die Pumpkanäle ergeben, drehen sich zwischen Statoren mit dazu spiegelbildlich angeordneten Flächen mit hoher Geschwindigkeit (Bereich $50 \cdot 10^3 \text{ U min}^{-1}$). Jeder Kanal einer Scheibe bildet eine einzelne Molekularpumpe, sämtliche 20 bis 50 Kanäle einer Scheibe sind parallel geschaltet. Die Kombination Rotorscheibe - Statorscheibe bildet eine Pumpstufe, mit der eine bestimmte Kompression (z.B. 30 für Luft), begrenzt durch die Rückströmung infolge der thermischen Bewegung der Gasteilchen, erzeugt wird. Durch die Serienschaltung mehrerer Pumpstufen (Rotor/Stator) multiplizieren sich die Kompressionen, so daß z.B. bei 6 Pumpstufen für Luft eine Kompression von 10^9 erzielt wird. Da die Fördergeschwindigkeit bei gleichem Teilchenstrom mit wachsender Verdichtung abnimmt, also in den ersten Pumpstufen am Ansaugstutzen am höchsten sein muß, sind dort die Schaufeln schräger gestellt. **Abb. 3** zeigt den prinzipiellen Aufbau.

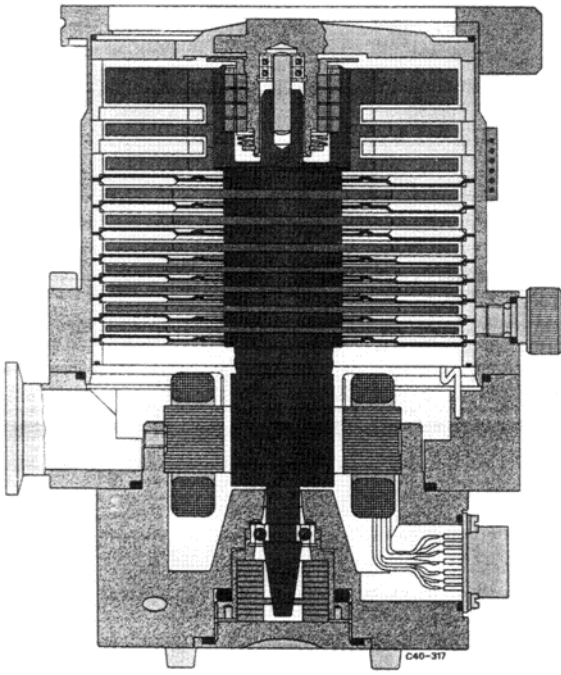


Abb. 3 Schnittdarstellung einer Turbomolekularpumpe (Prospekt Balzers)

Unter dem Ansaugstutzen mit einem für die jeweilige Pumpengröße möglichst großen Durchmesser befindet sich die Rotor-Stator-Kombination. Sie ist optisch dicht, um die Rückströmung gering zu halten. Der kollektorlose Antriebsmotor befindet sich im Vorvakuumbereich und wird mit einer Antriebsspannung einer Frequenz von etwa 1 kHz betrieben. Diese wird in einem elektronischen Frequenzwandler erzeugt, der gleichzeitig den geregelten Hochlauf und die Funktionsüberwachung der Pumpe übernimmt. Hohe Lagerqualität und sorgfältiges Auswuchten des Rotors sind für Zuverlässigkeit und Lebensdauer wichtig. Es werden fettgeschmierte Kugellager mit keramischen Kugeln eingesetzt. Für absolute Schmiermittelfreiheit werden berührungslose Magnetlager eingesetzt, die aus Permanentmagnetfeldern und elektro-

nisch geregelten Elektromagnetkomponenten bestehen. Die Kühlung erfolgt durch Kühlwasser, bei kleineren Leistungen ist auch Luftkühlung möglich. Die Einbaulage moderner Pumpen ist beliebig. Für höhere Vorvakuumdrücke (besser

10 mbar), die den Einsatz von Membranpumpen anstelle von Drehschieberpumpen als Vorpumpen gestatten, gibt es Sonderbauformen. Diese ergänzen die Turbomolekularpumpe auf der Vorvakuumseite durch eine sich auf der verlängerten Rotorachse befindende zusätzliche Molekularpumpe für höhere Drücke. Diese ist so konstruiert, daß durch geringe Spaltabmessungen von weniger 1/10 mm bei höheren Drücken noch molekulare Strömungsverhältnisse erreicht werden.

Die wichtigsten vakuumtechnischen Kenngrößen der Turbomolekularpumpe sind: Saugvermögen, Kompression und erreichbarer Enddruck.

Das Saugvermögen S einer Turbomolekularpumpe ist über einen pumpenspezifischen Geometriefaktor der Umfangsgeschwindigkeit der Rotorschaukeln proportional. Es ist im molekularen Strömungsbereich (unter 10^{-3} mbar) druckunabhängig und nimmt bei Drücken über 10^{-3} mbar ab, wenn der molekulare Strömungsbereich verlassen wird und die thermische Wechselwirkung der Gasteilchen untereinander zunimmt. Das Saugvermögen ist für leichte Gase etwas größer, weil für diese die Leitwerte der Eingangskanäle und des Ansaugstutzens größer sind.

Die Kompression eines Gases ist das Partialdruckverhältnis von Vorvakuum- zur Hochvakuumseite dieses Gases. Es hängt von den Durchgangswahrscheinlichkeiten in beiden Richtungen ab, die ihrerseits vom Verhältnis der Schaufelumfangsgeschwindigkeit zur mittleren thermischen Geschwindigkeit abhängen. Die Kompression nimmt exponentiell mit der Wurzel an der relativen Atom/Molekülmasse zu. Übliche Werte sind: $K_{\text{H}_2} = 10^3$, $K_{\text{He}} = 10^4$, $K_{\text{N}_2} = 10^9$. Für schwerere Gase, z.B. Öldämpfe und deren Bruchstücke sind die Kompressionen extrem hoch.

Die Summe der Endpartialdrücke p_i ergeben den Enddruck p_0 . Die Endpartialdrücke werden durch die Partialdrücke auf der Vorvakuumseite p_{ivor} und die zugehörigen Kompressionen K_i der Turbomolekularpumpe bestimmt.

$$p_0 = \sum_i p_i = \sum_i \frac{p_{\text{ivor}}}{K_i} \quad (14)$$

Kritisch bezüglich erreichbaren Enddruckes ist demnach der Anteil leichter Gase (H_2 , He) auf der Vorvakuumseite. Der H_2 -Partialdruck über einer Drehschieberpumpe beträgt etwa $5 \cdot 10^{-7}$ mbar, so daß sich ein H_2 -Enddruck $p_{\text{H}_2} \approx 5 \cdot 10^{-10}$ mbar ergibt. Wegen der hohen Kompressionen für Öldämpfe (z.B. für $M_i = 100$ ergibt sich $K_{100} = 10^{16}$) ist trotz Verwendung ölgedichteter Vorpumpen und evtl. fettgeschmierter Lager der Turbomolekularpumpe selbst das Vakuum über der Turbomolekularpumpe praktisch öldampf-frei, ein wichtiger Vorteil der Turbomolekularpumpe.

2.3. Saugvermögensmessung

2.3.1. Ermittlung an den Druck-Zeit-Verlauf

Unter der Voraussetzung, daß das Saugvermögen im betrachteten Zeitintervall konstant, kein Leck im Rezipienten vorhanden ist und Wanddesorption nicht auftritt, gilt für den Druckverlauf

$$p(t) = p_a \cdot \exp - \frac{S}{V} t \quad (15)$$

$$\text{bzw. } p(\Delta t) = p_1 \exp - \frac{S}{V} \Delta t$$

Daraus ergibt sich

$$S = \frac{V}{t} \ln \frac{p_a}{p(t)} \quad (16)$$

Nach dieser Methode kann das Saugvermögen von Vorpumpen im Druckbereich bis 10^{-3} mbar bestimmt werden.

2.3.2. Ermittlung aus Gasstrom und Druck

Diese Methode wird im Druckbereich bis 10^{-6} mbar verwendet. Ein aus einer Kammer bestehender Meßdom, dessen Gestaltung nach DIN genormt ist, weil Art der Gaseinströmung und Druckmeßort das Ergebnis beeinflussen, wird auf die Pumpe aufgesetzt, über einen Strömungsmesser wird ein pV-Gasstrom eingelassen und der Druck im Meßdom gemessen. Dabei hängt der Meßwert unmittelbar von der Genauigkeit der Druckmessung ab, was Druckmeßgeräte mit kleinem Meßfehler erfordert. Es gilt

$$S = \frac{q_{pV}}{p} \quad (17)$$

2.3.3. Ermittlung aus Leitwert und Druckdifferenz

Es wird ein Meßdom aus zwei Kammern verwendet. Die Kammern sind durch einen bekannten Strömungsleitwert (Blende) verbunden, in beiden wird der Druck gemessen. Aus Druckdifferenz und Leitwert ergibt sich der Gasstrom, daraus und aus dem Druck in der Meßkammer über der Pumpe das Saugvermögen

$$q_{pV} = L (p_1 - p_2) \quad (18)$$

$$S = L \left(\frac{p_1}{p_2} - 1 \right) \quad (19)$$

Da hier der Quotient der Drücke eingeht, ist die Genauigkeitsforderung an die Druckmessung geringer. Dieses Verfahren wird für Drücke unter 10^{-6} mbar verwendet.

3. Aufgaben zur Vorbereitung

- 3.1. Wie sind Druck und Teilchendichte verknüpft, welche Teilchendichten sind bei welchem Druck vorhanden?
- 3.2. Wie sind die Druckeinheiten definiert?
- 3.3. Wodurch unterscheiden sich Gastransfer- und gasbindende Vakuumpumpen. Nennen Sie Beispiele und beschreiben Sie die Funktion.
- 3.4. Welche Funktion hat das Gasballastventil einer Drehschieberpumpe?
- 3.5. Beschreiben Sie Aufbau und Wirkungsweise der Turbomolekularpumpe.
- 3.6. Welche Methoden der Saugvermögensmessung sind Ihnen bekannt?
- 3.7. Was ist bei der Reihenschaltung von Pumpen bezüglich Saugvermögen zu beachten?
- 3.8. Wie errechnet sich das effektive Saugvermögen am Rezipientenflansch einer Vakuumanlage?
- 3.9. Studieren Sie Aufbau und Funktion des Versuchstandes nach Abb. 4.

4. Praktikumsaufgaben

- 4.1. Messung des Saugvermögens $S = f(p)$ einer Turbomolekularpumpe Typ TPU 060 im Druckbereich 10^{-5} mbar ... 10^{-2} mbar.
- 4.2. Messung des Saugvermögens einer Vorvakuumpumpe Typ TRIVAC 01,6 B im Druckbereich von Atmosphärendruck bis 10^{-2} mbar
 - (a) durch Aufnahme einer Druck-Zeit-Kurve $p = f(t)$ mit und ohne Gasballast (Volumen der Meßapparatur: 5,0 l)

(b) mit Hilfe eines U-Rohrmanometers

(c) mit Hilfe eines Rotameters

5. Literatur

- [1] M. Wutz, H. Adam, W. Walcher, Theorie und Praxis der Vakuumtechnik, Friedr. Vieweg u. Sohn, Braunschweig/Wiesbaden 4. Aufl., 1988.
- [2] W. Pupp, H. K. Hartmann, Vakuumtechnik, Grundlagen und Anwendungen, Carl Hauser Verlag München Wien.
- [3] Chr. Edelmann, Wissensspeicher Vakuumtechnik, Fachbuchverlag Leipzig, 1985

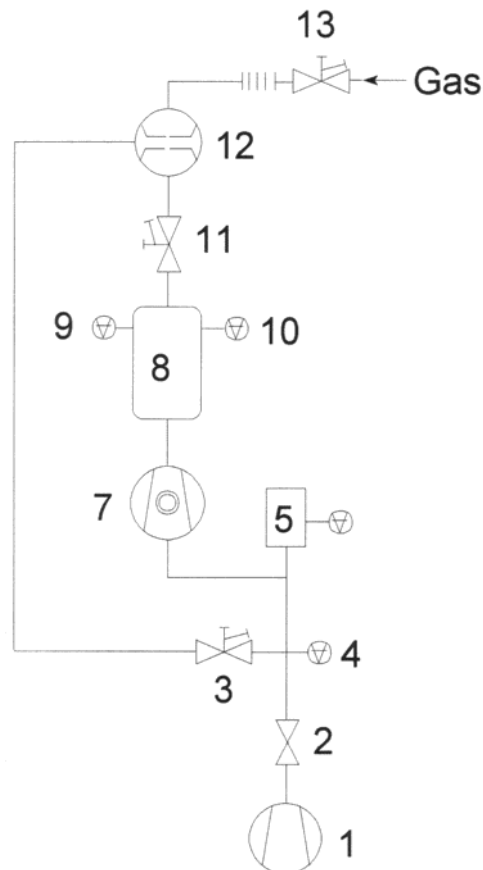


Abb. 4 Saugvermögensmeßstand (Bildzeichen nach DIN 28401): 1 - Vorvakuumpumpe; 2 - Vorvakuumventil; 3, 11, 13 - Dosierventil; 4 - Pirani-Vakuummeter; 5 - Vakuumbehälter; 6 - Membran-Vakuummeter; 7 - Turbomolekularpumpe; 8 - Meßdom; 10 - Ionisationsmeßröhre; 12 - Strömungsmesser

Erstellt von Dr. Ing. H. Rößler