

**Fachpraktikum**

***Mikroelektronik und Sensorik***

**Versuch: Vakuummessung**



# Versuchsanleitung Vakuummessung

## 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 ( $10^5 \text{ Nm}^{-2}$ ) 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:

<b>Bereich</b>	<b>Druck in mbar</b>
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:

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

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

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  $\text{m}^3$ , l;  $\nu$  - 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  $\nu$  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  $\text{cm}^{-3}$ ,  $\text{m}^{-3}$ ;  $\rho$  als Dichte in  $\text{g cm}^{-3}$ ,  $\text{kg m}^{-3}$ ;

$G$  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

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

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

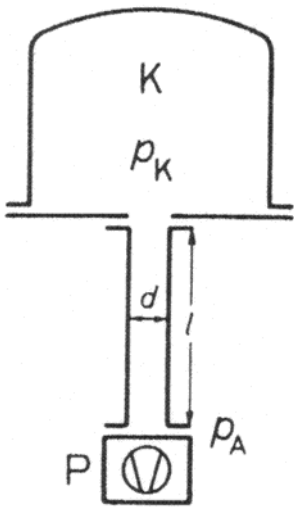
### 2.1.3. Gasgemische

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 vorgegebenen 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**).



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

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

**Abb. 1** Anordnung  
Pumpe -  
Verbindungsleitung -  
Rezipient

als Stoffmengenstromstärke

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

Wegen Gleichung (1) gilt

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

$p q_v = q_{pV}$  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  $\Delta p$  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  $s \cdot l^{-1}$ ,  $h \text{ m}^{-3}$ ,  $L$  in  $l \text{ s}^{-1}$ ;  $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ . 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  $p \cdot d < 10^{-2}$  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

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

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

der anwendende Ingenieur entnimmt die für den Entwurf seiner Vakuumanlage notwendigen Leitwerte Tabellenwerken 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. Messung niedriger Drücke

### 2.2.1. Übersicht

Druck und Teilchendichte eines Gases sind einander proportional (Gl. 2). Im allgemeinen besteht das in einer Vakuumkammer befindliche Gas aus einem Gemisch verschiedener Gase, die Teilchendichten und Partialdrucke der Komponenten addieren sich nach (Gl.4).

Will man also den in einem Vakuumgefäß herrschenden Druck bestimmen, muß man den durch die Gasmoleküle entsprechend ihrer Dichte und Temperatur auf die Gefäßwand ausgeübten Druck direkt messen, oder man kann andere Effekte, die von der Dichte abhängen und mit ihr in einem eindeutigen Zusammenhang stehen, zur Druckanzeige nutzen. Solche Effekte sind u.a. der durch thermisch emittierte Elektronen angeregte Ionenstrom, der Strom einer Kaltkathoden-Plasma-Entladung, die Wärmeleitfähigkeit eines Gases, die Reibung zwischen Gas und Festkörper.



Meßgeräte, die den Druck im Bereich zwischen 1013 mbar und den heute der Messung zugänglichen  $10^{-13}$  mbar messen, heißen Vakuummeter. Man unterscheidet Totaldruck- und Partialdruckmeßgeräte. Es ist zu beachten, daß die meisten Totaldruckmeßgeräte, nämlich die, die den Druck über die oben aufgeführten Effekte indirekt bestimmen, eine Gasartabhängigkeit besitzen, davon abhängig, ob und in welcher Weise der genutzte Effekt von der Zusammensetzung des Gases abhängt. Ferner ist zu beachten, daß, wenn zum Meßprinzip die Kompression des Gases gehört, eine Kondensation von Gaskomponenten (z.B. Wasserdampf) eintreten kann, es wird in diesem Fall die Summe aller nicht kondensierbaren Komponenten als Totaldruck gemessen.

Die Messung von Partialdrücken soll hier nicht behandelt werden, sie erfolgt mit Hilfe von Partialdruckmeßgeräten, die auf massenspektroskopischer Grundlage arbeiten.

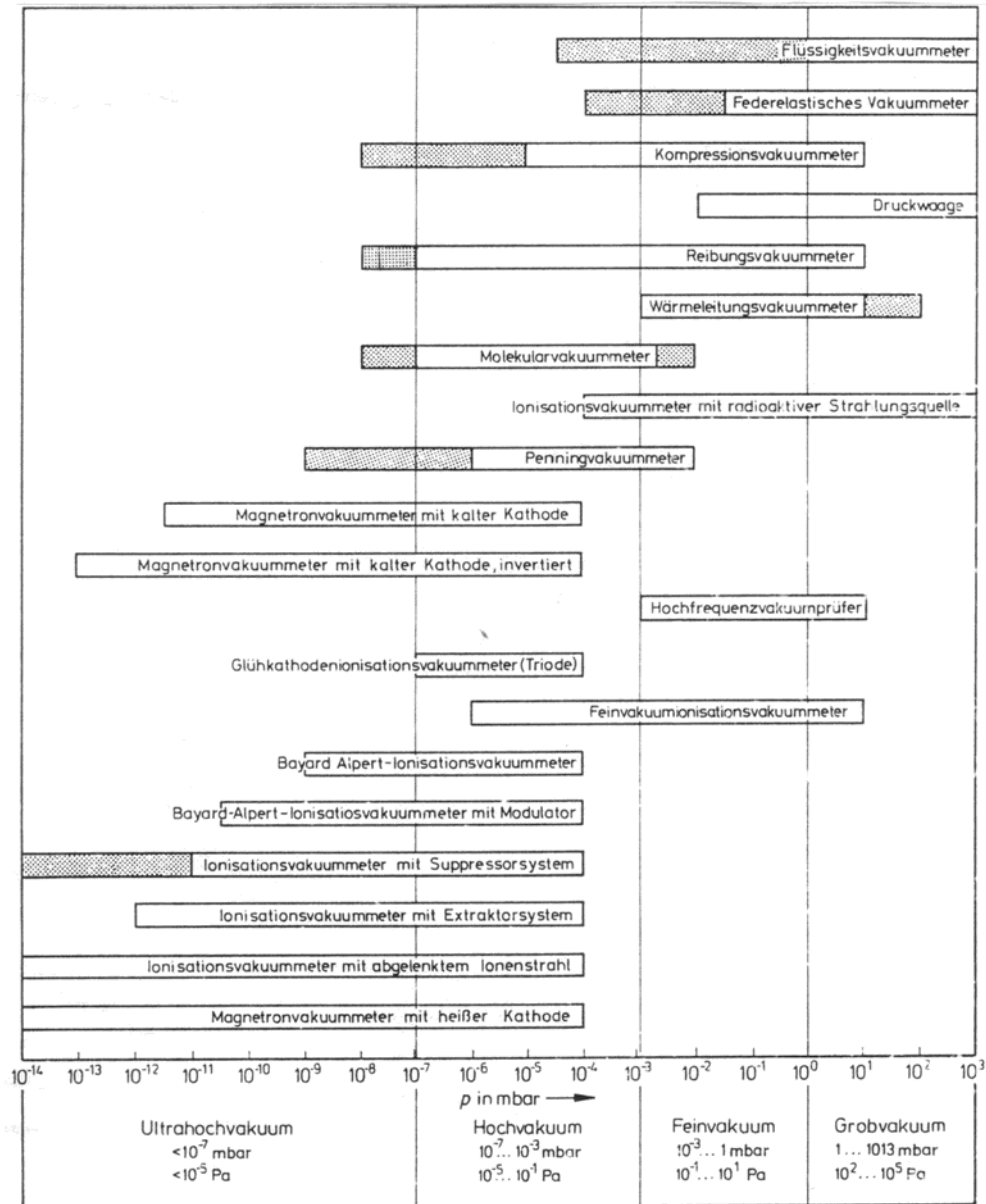
Der heute realisierbare Vakuumbereich erstreckt sich über 16 Größenordnungen. Ebenso wie bei der Vakuumerzeugung ist es nicht möglich, Meßgeräte zu bauen, die im gesamten Druckbereich messen können. Zur Totaldruckmessung stehen zur Überdeckung des Gesamtbereiches Vakuummeter zur Verfügung, die nach verschiedenen Meßprinzipien arbeiten. Gebräuchliche Vakuummeter und ihre Meßbereiche stellt DIN 28400 zusammen.

Im Versuch sollen folgende Vakuummeter behandelt werden:

Als Flüssigvakuummeter das U-Rohr-Quecksilber-Vakuummeter, das Kompressionsvakuummeter nach MCLLeod, das Membranvakuummeter als federelastisches Vakuummeter, das Wärmeleitvakuummeter (Pirani-Vakuummeter) und das Ionisationsvakuummeter.

### 2.2.2. U-Rohr Vakuummeter

Der Aufbau entspricht einem Hg-Barometer zur Luftdruckmessung. In einem Schenkel eines mit Quecksilber gefüllten U-Rohres wird über dem Hg-Spiegel ein Druck unter  $10^{-3}$  mbar erzeugt, dort stellt sich der Hg-Dampfdruck von etwa  $10^{-3}$  mbar bei 20 °C ein. Der Druck über dem Hg-Spiegel im anderen U-Rohr-Schenkel kann direkt als Höhendifferenz der beiden Hg-Spiegel abgelesen werden. Für den Druckbereich von Atmosphäre bis etwa 1 mbar, für den ein solches einfaches Gerät eingesetzt wird, entspricht der Bezugsdruck von etwa  $10^{-3}$  mbar dem Wert Null. Dieses Gerät ist, ebenso wie das unter 2.2.3. beschriebene Kompressionsvakuummeter für die industrielle Praxis völlig ungeeignet, umständliche manuelle Bedienung und die Toxizität des Quecksilbers sind Gründe dafür. Für die Labor- und Eichpraxis hat dieser gasartunabhängige und genaue Totaldruckmesser für den Grobvakuumbereich Bedeutung.

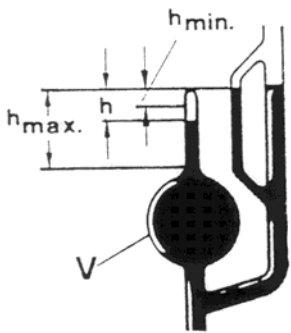


**Abb. 2** Meßbereich gebräuchlicher Vakuummeter nach DIN 28400, Teil 3, Okt. 1980

### 2.2.3. Kompressionsvakuummeter

Die gleiche Bewertung für den Einsatz gilt für das Kompressionsvakuummeter nach McLeod. Bezüglich des Druckbereiches jedoch ist dieses Gerät bis in den  $10^{-5}$  mbar-Bereich als gasartunabhängiger Druck-

messer zu verwenden. Die Messung niedriger Drücke ist beim U-Rohr-Vakuummeter durch die Meßgenauigkeit der Höhendifferenz der beiden Hg-Spiegel begrenzt. Der Trick des Kompressionsvakuummeters ist nun der - wie schon der Name verrät -, daß das Gas, dessen Druck man messen will, in ein bekanntes Volumen eingeschlossen und durch hochsteigendes Quecksilber so weit komprimiert wird, daß sein Druck mit einem U-Rohr-Manometer gut meßbar ist. **Abb. 3** zeigt den Aufbau des Gerätes.



**Abb. 3** Prinzipieller Aufbau des McLeod-Vakuummeters

Nach dem universellen Gasgesetz muß bei konstanter Temperatur gelten:

$$p V = p_k V_k \quad (12)$$

Im gleichen Verhältnis, mit dem das Volumen verringert wird, erhöht sich der Druck, z. B. mit  $V/V_k = 10^4$  wird  $p = 10^{-4}$  mbar zu  $p_k = 1$  mbar und damit meßbar.

Sind im zu messenden Gas kondensierbare Gase, wie Wasserdampf oder Öldämpfe enthalten, können diese bei Kompression kondensieren und das Meßergebnis verfälschen.

Die Messung wird wie folgt durchgeführt:

Zunächst befindet sich das Quecksilber im Steigrohr S so tief, daß alle Teile des Manometers miteinander verbunden sind und sich überall der Druck  $p$  einstellt. Nun läßt man das Quecksilber durch den äußeren Luftdruck hochsteigen, wobei an der Stelle A das Volumen  $V$  abgetrennt wird. Dieses wird beim weiteren Hochsteigen des Quecksilber komprimiert. Man läßt das Quecksilber bis zur Nullmarke der Vergleichskapillare (Höhe des oberen Endes der Meßkapillare) ansteigen. Zwischen dieser Nullmarke und der Höhe des Hg-Spiegels befindet sich nun das komprimierte Volumen  $V_k$ , das aus  $h$  und dem Kapillardurchmesser berechnet wird. Meß- und Vergleichskapillare haben den gleichen Durchmesser, um Verfälschung durch ungleiche Kapillardepression zu erreichen.

$$p V = p_k V_k = (\rho g h + p) h A_k \quad (13)$$

für  $hA_k \ll V$  ergibt sich

$$p = \rho g A_k V^{-1} h^2 \quad (14)$$

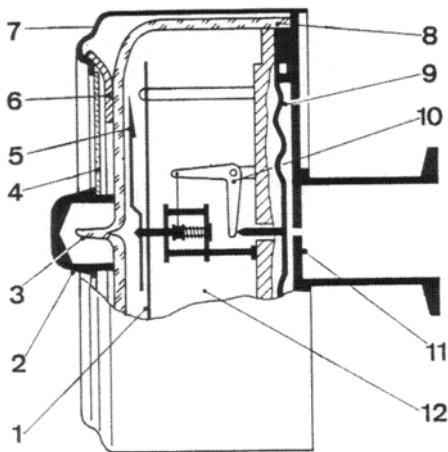
wobei  $\rho$  die Dichte des Hg,  $g$  die Erdbeschleunigung,  $A_k$  der Querschnitt der Kapillaren und  $h$  die gemessene Höhendifferenz sind.

Damit ist die Druckmessung auf die Bestimmung von Geometrie Größen zurückgeführt, das McLeod-

Vakuummeter ist ein absolut messendes Gerät, für das keine weitere Eichung erforderlich ist.

### 2.2.3. Membranvakuummeter

Membranvakuummeter sind mechanische Vakuummeter die den Totaldruck direkt als Folge der thermischen Bewegung der Teilchen auf die Flächeneinheit der Wand messen. Im Gegensatz zu den unter 2.2.2. genannten Laborgeräten sind sie für den industriellen Einsatz gut geeignet. In ihrer rein mechanischen Bauform überstrecken sie den Druckbereich von 1 bis 1000 mbar. Bezugsdruck ist der Wert "Null" im Inneren einer Dose mit elastischer Stirnfläche, die auf ausreichend niedrigen Druck evakuiert wurde. Die Druckdifferenz zwischen Doseninnerem und dem äußeren, vakuumdicht an das zu messende Volumen angeschlossenen Raum bewegt die Membran, deren Bewegung mechanisch oder elektromechanisch (induktiv, kapazitiv, piezoelektrisch u. a.) gewandelt zur Anzeige gebracht wird. Die Geräteteile dazu befinden sich im Inneren der Druckdose, so kommen sie mit dem zu messenden Gas nicht in Berührung. Durch geeignete Membrangestaltung kann man den unteren Anzeigebereich dehnen und z. B. eine etwa logarithmische Skalenteilung erzielen. **Abb. 4** zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Membranvakuummeters.



Sehr präzise gefertigte Druckaufnehmer nach diesem Prinzip registrieren die Membrandurchbiegung zwischen Meßkammer und Vergleichskammer, die entweder einen möglichst niedrigen Druck enthält und verschlossen ist, oder an eine Pumpanordnung mit gemessenem Vergleichsdruck angeschlossen ist, kapazitiv. Über Kapazitätsänderungen können noch Durchbiegungen von wenigen nm registriert und damit Druckdifferenzen bis zu  $10^{-6}$  mbar gemessen werden.

**Abb. 4** Schnitt eines Membran-Vakuummeters: 1 - spiegelnde Abdeckplatte, 2 - Schutzkappe, 3 - Abziehspitze, 4 - Plexiglasscheibe, 5 - Zeiger, 6 - Skale, 7 - Blechmantel, 8 - Glasglocke, 9 - Membran, 10 - Hebelsystem, 11 - Abschlußseite, 12 - Vergleichsvakuum

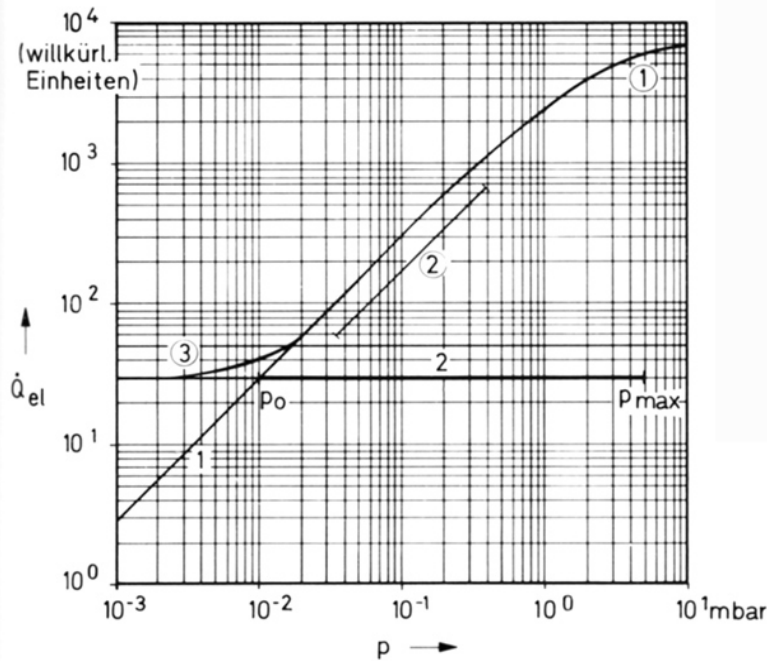
#### 2.2.4. Wärmeleitvakuummeter

Wärmeleitvakuummeter messen den Druck indirekt über die von der Dichte des Gases abhängige Ableitung der Wärme von einem erhitzten dünnen Draht, dessen Temperaturabhängigkeit des Widerstandes als Meßgröße für den Druck genutzt wird. Da die Wärmeleitung auch von der Art des Gases abhängt, ist die Druckanzeige gasartabhängig. Die Eichung erfolgt meist für  $N_2$ . Für andere Gaszusammensetzungen muß über Faktoren, die gasart- und auch druckabhängig sind, korrigiert werden. Wärmeleitvakuummeter heißen auch nach ihrem Erfinder Pirani-Vakuummeter. Sie überstreichen einen Druckmeßbereich von 100 mbar bis  $10^{-3}$  mbar und sind die im Feinvakuumbereich am häufigsten verwendeten Meßgeräte.

Die Meßzelle des Wärmeleitvakuummeters besteht aus einem dünnen Draht mit einem Durchmesser von 10 ... 50  $\mu\text{m}$  und einer Länge von 5 bis 10 cm, der in einem Rohr von 2 bis 3 cm Durchmesser konzentrisch angeordnet ist. Der Draht wird durch Stromdurchgang erwärmt (Draht  $\approx 400$  K, Wand  $\approx 300$  K). Im Gleichgewicht ist die zugeführte elektrische Leistung gleich der abgeführten Wärmeleistung, die für den Fall, daß die mittlere freie Weglänge groß gegen den Drahtdurchmesser ist, dem Druck proportional ist. Bei hohen Drücken und kleinen mittleren freien Weglängen ergibt sich Druckunabhängigkeit, was den Meßbereich nach oben begrenzt. Zusätzlich tritt Wärmeleistungsverlust durch Strahlung und Ableitung über die Drahtenden auf, der der Wärmeleitung durch das Gas überlagert ist und den Meßbereich nach unten begrenzt. **Abb. 5** zeigt die Verhältnisse.

Der Meßdraht befindet sich in einem Zweig einer Wheatstoneschen Brücke. Zwei Ausführungen sind gebräuchlich:

Bei konstanter zugeführter elektrischer Leistung verändert sich druckabhängig die Heizertemperatur, die zur Widerstandsänderung und zur gemessenen und in mbar geeichten Brückenverstimmung führt. Oder die Brückenspannung wird so geregelt, daß der Widerstand und damit dessen Temperatur unabhängig von sich druckabhängig ändernder Wärmeabgabe bleibt. Die sich ändernde Brückenspannung dient als Anzeigegröße für den Druck.

**Abb. 5**

Zugeführte elektrische Leistung in Abhängigkeit vom Gasdruck  $p$  in einem Wärmeteitvakuummeter (schematisch)

1- Wärmeleitung durch das Gas

2- Wärmeableitung an den Drahtenden und Wärmeabstrahlung des Drahtes

① Bereich der gasdruckunabhängigen Wärmeleitung

② Bereich der druckproportionalen Wärmeleitung

③ Bereich, in dem die Wärmeleitung durch das Gas vernachlässigbar ist,

$p_0$  Nulldruck,  $p_0 \dots p_{max}$  Meßbereich

#### 2.2.4. Ionisationsvakuummeter

Ionisationsvakuummeter mit Glühkatode sind die im Hochvakuum und Ultrahochvakuum am häufigsten benutzten Druckmeßgeräte. Sie beruhen auf der Ionisation der Gasmoleküle durch thermisch ausgelöste und beschleunigte Elektronen und darauf, daß bei konstantem Elektronenstrom der Ionenstrom, der eine Auffängerelektrode erreicht, dem Druck proportional ist.

mit  $I_{ion}$  als dem Ionenstrom,  $I_e$  als dem Elektronenstrom und  $c$  als der Gerätekonstante.

Ionisationsvakuummeter können im Druckbereich von  $10^{-3}$  mbar (bei Einsatz von Rhenium - anstelle von

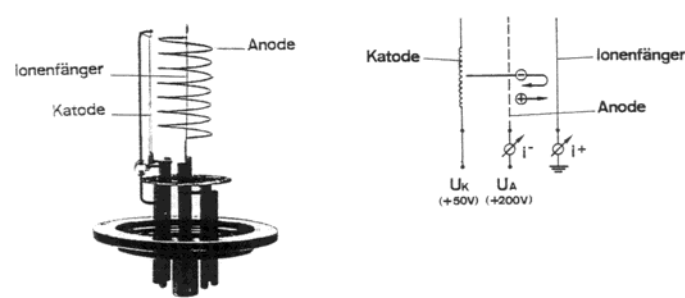
$$I_{ion} = C I_e p \quad (15)$$

Wolframkatoden bis  $10^{-2}$  mbar) bis  $10^{-10}$  mbar (bei speziellen Konstruktionen auch bis  $10^{-13}$  mbar) eingesetzt werden. Zu hohen Drücken hin ist der Einsatz durch die Beständigkeit der Katode für die Emission der Elektronen, nach niedrigen Drücken durch eine Reihe von Effekten, die die Proportionalität von Druck und Ionenstrom stören, begrenzt. Meßsysteme von Ionisationsvakuummetern gibt es in verschiedenen Bauformen, die gebräuchlichste ist die nach Bayard-Alpert. **Abb. 5** zeigt den Aufbau und

die angelegten Potentiale. Der Elektronenstrom wird auf einem konstanten Wert gehalten, der bei den meisten Geräten um den Faktor 10 oder 100 geändert werden kann. Der gemessene Ionenstrom ist die druckabhängige Meßgröße.

Die untere Meßgrenze wird hauptsächlich durch 2 Effekte begrenzt: Röntgeneffekt und Ionendesorption. Der Röntgeneffekt besteht darin daß die Elektronen an der Anode auch Röntgenstrahlung, allerdings sehr weiche

( $E_x < e(U_A - U_K)$ ), auslöst. Die von dieser am Ionenfänger ausgelösten Photoelektronen fließen von dort zur Anode und ergeben einen Strom, der als druckunabhängige Größe dem Ionenstrom in gleicher Richtung überlagert ist und bei niedrigen Drücken einen konstanten Druck vortäuscht. Der Photoelektronenstrom ist um so geringer, je kleiner die von der Röntgenstrahlung getroffene Fläche ist, deshalb ist der Ionenfänger als dünner Draht ausgebildet. Diesem Photoelektronenstrom kann in entgegengesetzter Richtung ein weiterer überlagert sein, der vom Wandpotential abhängig, von der Wand zum Ionenfänger fließt.



**Abb.6** Aufbau des Ionisationsvakuummeters nach Bayard-Alpert

Die an der Anode adsorbierten Gasteilchen (unterhalb  $10^{-4}$  mbar mehr als im gesamten Meßröhrenvolumen) werden durch den Elektronenstrom teilweise als Ionen desorbiert, gelangen zum Ionenfänger und täuschen einen höheren Druck vor. Durch einen größeren Elektronenstrom bei erhöhter Anodenspannung bringt man die Anodentemperatur auf z. B. 1000 K und heizt diese und das gesamte System mit der umgebenden Wand aus. Das führt zur Verarmung der desorbierbaren Ionen an der Anode, so daß nach Reduzierung des Elektronenstromes der Effekt meist vernachlässigbar ist. Als Kontrollmöglichkeit ergibt sich, daß die Druckanzeige bei Umschaltung des Elektronenstromes (Faktor 1, 10, 100) den gleichen Wert ergibt.

### 2.2.5.Meßgenauigkeit

Ohne im Einzelnen auf die Problematik einzugehen, soll folgende für die Meßpraxis zu berücksichtigende Bemerkung gemacht werden: Die Meßfehler für Vakuumdrücke sind relativ hoch. Meßfehler von unter 10 % sind Präzisionsgeräten in engen Druckbereichen vorbehalten. In der Praxis zeigt sich, daß Meßfehler von 100 % und mehr üblich, für die meisten Anwendungen aber auch nicht störend sind.

### 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. Welche für die Druckmessung nutzbaren Größen sind Ihnen bekannt?
- 3.4. Wie kann man den Anzeigebereich von Membranvakuummetern bei kleinen Drücken dehnen? Wodurch ist der Druckbereich von Membranvakuummetern begrenzt?
- 3.5. Wie ist ein Wärmeleitvakuummeter aufgebaut, wie gewinnt man die Meßgröße?
- 3.6. Erläutern Sie das Funktionsprinzip des Ionisationsvakuummeters, welche Effekte begrenzen den Meßbereich?
- 3.7. Durch welche Effekte kann sich der Druck durch die Meßröhre selbst verändern?
- 3.8. Wie würden Sie eine Druckvergleichsmessung zwischen McLeod-Kompressionsvakuummeter und Pirani-Wärmeleitvakuummeter durchführen?
- 3.9. Studieren Sie Aufbau und Funktion des Versuchsstandes nach Abb. 7.

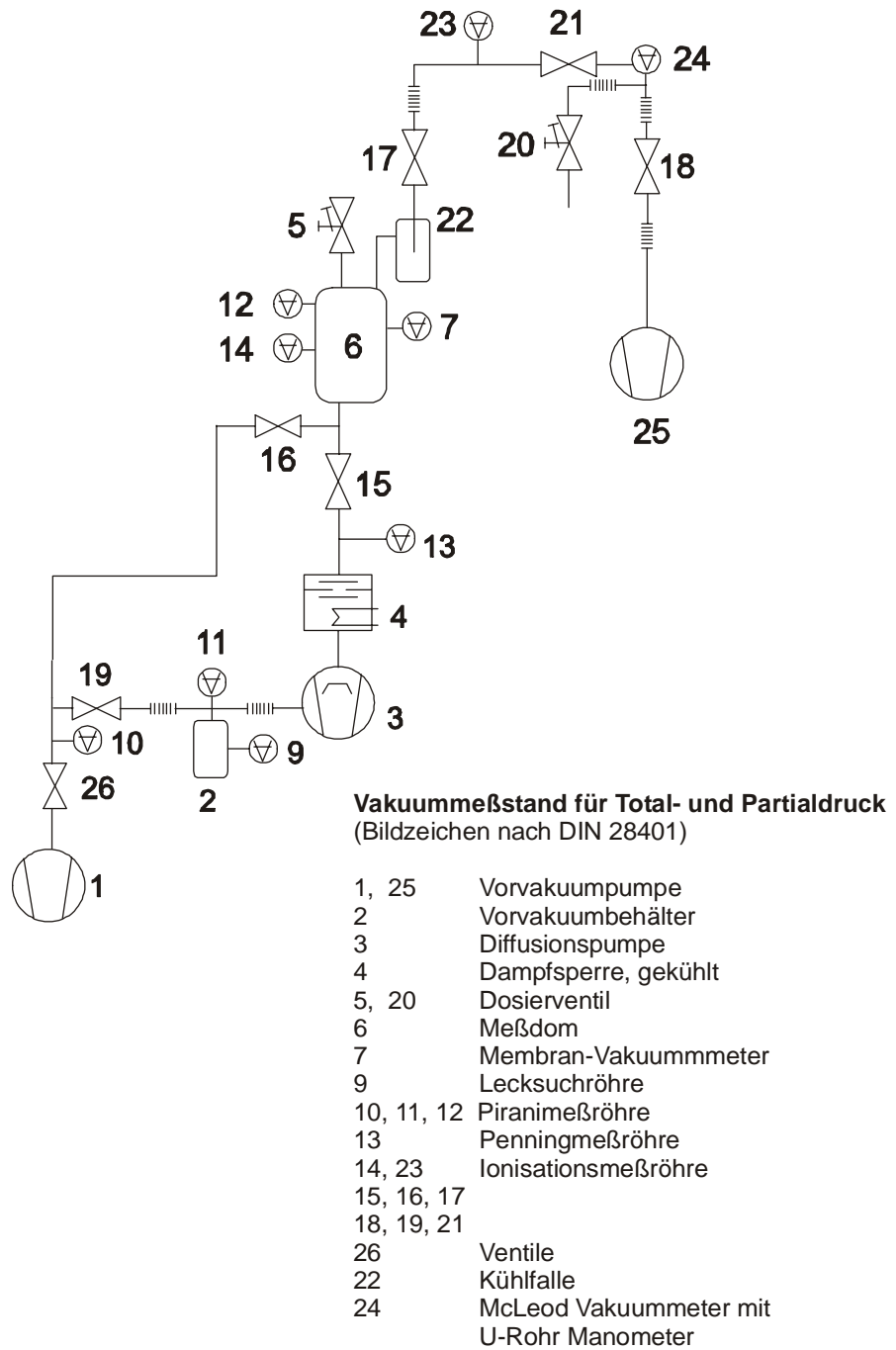


#### 4. Meßaufgaben

- 4.1. Aufnahme einer Druck-Zeit-Kurve  $p = f(t)$  vom Beginn des Evakuierens bis zum Enddruck. Druckmessung mit (a) Membranvakuummeter, (b) Piranivakuummeter, (c) Ionisationsvakuummeter.
  
- 4.2. Eichen eines Pirani-Vakuummeters im Druckbereich von  $5 \cdot 10^{-4}$  mbar bis 1000mbar mit einem McLeod-Vakuummeter und U-Rohr-Vakuummeter für Luft und Darstellen der Meßwertergebnisse.

#### 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. 7** Messstand für Total- und Partialdruck (Bildzeichen nach DIN 28401)

Erstellt von Dr. Ing. G. Ecke