



Physik–Institut der Universität Zürich

Anleitung zum VP–Versuch

Widerstandsmessung an einem Halbleiter

19. August 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Versuches	4
2	Experimenteller Aufbau	5
2.1	Ofen und Probenträger	5
2.2	Regelung der Ofentemperatur	6
2.2.1	Der PID Regler	6
2.3	Widerstandsmessung	9

1 Ziel des Versuches

Im Rahmen dieses VP-Versuches soll der elektrische Widerstand von Silizium temperaturabhängig gemessen werden und dabei u.a. die Energielücke bestimmt werden.

Literatur zum Studium dazu findet man:

- in den entsprechenden Abschnitten des Skripts zur Vorlesung Festkörperphysik I,
- in Ch. Kittel, *Einführung in die Festkörperphysik*, Kapitel *Halbleiterkristalle*, Stichworte (Eigenleitung, Störstellenleitung)
- K. Kopitzki, *Einführung in die Festkörperphysik*, Kapitel *Halbleiter*, Stichworte (Eigenleitung, Störstellenleitung)

Im Experiment lernt man neben der Widerstandsmesstechnik (Vierpunkt-Methode), auch die Funktionsweise von Temperiereinheit, Temperaturregelung und Isolations-Vakuumsystem kennen.

2 Experimenteller Aufbau

Die Versuchsanordnung lässt sich grob aus der Abb. 1 ersehen.

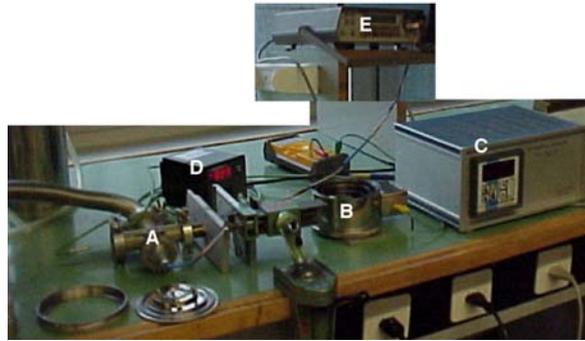


Abbildung 1: Aufbauübersicht des Experiments. A Vakuumananschluss, Elektr. Anschlüsse für Heizung und Proben temperaturmessung, B Ofen, C Ofentemperaturregler, D Anzeige der Proben temperatur, E Widerstandsmessgerät.

2.1 Ofen und Proben träger

Auf dem Proben träger im Heizofen ist die Silizium–Probe montiert (siehe Abb. 2). Die Probe ist für die Vierpunkt–Widerstandsmessung vorbereitet (siehe Abschnitt 2.3). Der zylindrische Proben träger besteht aus isolierendem Keramikmaterial und ist von der Heizung umgeben. Er trägt die 4 Messkontakte, welche durch die Messleitungen mit den Steckeranschlüssen für die Widerstandsmessung verbunden sind. Seine Temperatur, die auch die Temperatur der Probe sein sollte, wird durch ein Thermoelement gemessen. Ein zweites Thermoelement, integriert in der Heizspirale, ist über einen separaten Anschluss mit dem Temperaturregler verbunden. Dieser Regler sorgt durch Steuerung der Heizleistung für eine stabile Temperatur, die nach Wunsch eingestellt wird (siehe Abschnitt 2.2).

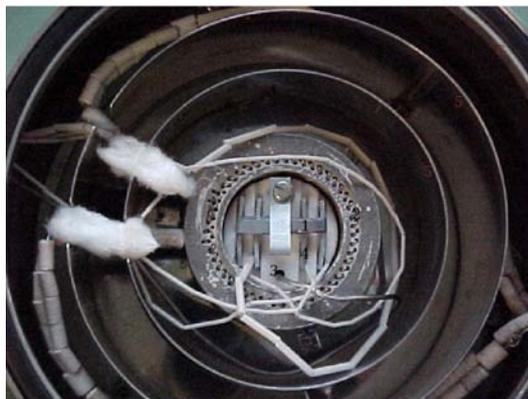


Abbildung 2: Ofen mit montierter Probe. 1: Silizium-Probe, 2: Heizung 3: Proben temperatur-Messthermoelement 4: Messkontakt(1 von 4) 5: Wärmestrahlungsschilder 6: Ofengehäuse

Der innere Teil des Ofens ist gegenüber dem Labor durch eine Vakuumkammer abgeschlossen. Diese Vakuumkammer dient der Isolation. Die Grundidee ist dieselbe wie bei einer Thermosflasche, nämlich daß die Konvektion, welche die primäre Ursache für den Wärmetransport

darstellt, unterdrückt wird. Das Vakuum wird durch eine Turbomolekularpumpe erzeugt (Abb. 3). Dabei wird ein Druck von besser als 10^{-5} mbar erreicht. Die Funktionsprinzipien von Turbomolekularpumpe und Vakuum-Druckmessgeräten sind im Anhang nachzulesen.



Abbildung 3: Das Vakuum-System

2.2 Regelung der Ofentemperatur

Die Regelung der Ofentemperatur wird von einem PID-Regler (PID steht für Proportional Integral Differential) übernommen. Er steuert den Strom durch die Ofen-Heizspule gemäss der Temperatur, welche er mittels des Temperatursensors an der Heizung misst. Der Regler misst die Temperatur indirekt über eine stark temperaturabhängige Thermospannung eines Ni-NiCr-Thermoelements.

Die Temperatur der Siliziumprobe selbst wird durch Messen der Thermospannung eines zweiten Ni-NiCr-Thermoelements mit Hilfe einer Eich-tabelle oder einer geeichten Temperaturanzeige bestimmt.

2.2.1 Der PID Regler

Im Folgenden soll nun kurz auf die Funktionsweise eines PID-Reglers eingegangen werden. Ganz allgemein basiert eine Regelung auf einem Aufbau, wie er in Abb. 4 dargestellt ist. Es soll

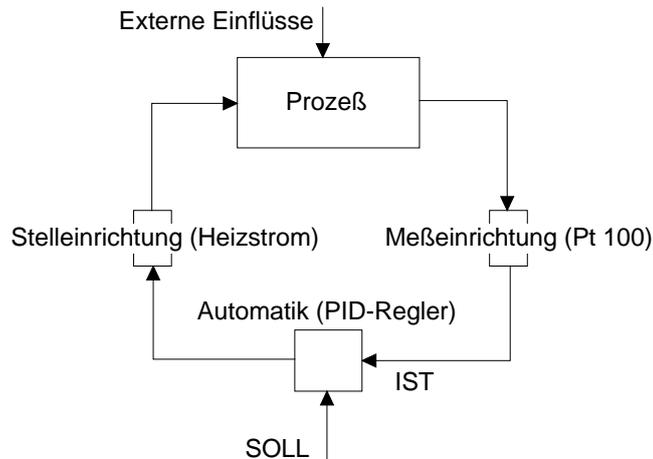


Abbildung 4: Allgemeiner Aufbau eines Reglers

ein Prozess geregelt werden, der durch externe Einflüsse gestört sein kann (z.B. Schwankungen in der Saugleistung der Pumpe, die den Stickstoff zieht.). Eine Größe dieses Prozesses wird mit einer Messeinrichtung ermittelt (in unserem Fall ist das der Widerstand des Pt 100, der proportional zur Temperatur ist). Diese Größe wird IST-Wert genannt. Dann wird in einem automatischen Prozess, auf den wir im Folgenden noch speziell eingehen werden (PID-Regler), der IST-Wert mit dem SOLL-Wert (z.B. die gewünschte Temperatur) verglichen und mit der Automatik eine Stelleinrichtung angesteuert. Diese Stelleinrichtung ist in unserem Fall der Heizstrom durch die Spule. Alle Regler basieren auf dieser Rückkopplungsidee.

Der PID-Regler besteht aus drei Teilkomponenten, nämlich

- dem Proportional-Teil. Dieser reagiert sofort, da die Stellgröße (in unserem Fall der Heizstrom) proportional zur Differenz zwischen SOLL- und IST-Wert ist. (Man kann zeigen, daß für eine reine Proportional-Regelung der SOLL-Wert nie erreicht wird.)
- dem Integral-Teil. Dieser mittelt den IST-Wert über ein gewisses Zeitintervall t_{int} . Die Stellgröße ist zusätzlich noch proportional zur Differenz zwischen **gemitteltem** IST-Wert und SOLL-Wert. Der Integral-Teil korrigiert langsamer als der Proportional-Teil, da er immer über eine gewisse Vorgeschichte mittelt. Er hat den Vorteil, daß der SOLL-Wert tatsächlich erreicht wird. Außerdem werden schnelle Schwankungen des IST-Wertes (z.B. Rauschen) ausgemittelt.
- dem Differential-Teil. Dieser nimmt die lokale Steigung der zeitlichen IST-Wert-Entwicklung und extrapoliert den zukünftigen IST-Wert. Wiederum ist die Stellgröße proportional zur Differenz zwischen diesem extrapolierten IST-Wert und dem SOLL-Wert. Der Differential-Teil reagiert schneller als der Proportional-Teil, hat aber den Nachteil, daß diese Interpolation instabil gegenüber Störungen auf dem IST-Signal ist. Dies ist dann besonders schlimm, wenn die zu regelnde Strecke eine große Trägheit besitzt, so daß die Stellgröße eine stark verzögerte Wirkung auf den Ausgang hat. In einem solchen Fall tendiert der Differential-Teil zur Übersteuerung.

Wie wird dies nun aber technisch umgesetzt? Bei dem für die Heizung verwendeten Regler ist dies folgendermaßen realisiert ¹:

¹Details entnehme man dem Handbuch.

Der Proportional-Teil arbeitet mit einem sogenannten Proportional-Band. Dieses ist nötig, da die Stelleinrichtung nur bis zu einem maximalen Heizstrom belastet werden kann. Der maximale Temperaturbereich ΔT_{\max} , in dem der Regler die Abweichung zwischen SOLL- und IST-Wert $\Delta T = T_{\text{IST}} - T_{\text{SOLL}}$ proportional auszugleichen sucht, ist gegeben durch

$$\Delta T_{\max} = \alpha \frac{P_H^{\max}}{G}$$

wobei α eine Konstante ist. P_H^{\max} ist die maximale Heizleistung und G die Verstärkung (*engl.* gain), die Werte zwischen 1 und 999 annehmen kann. Abb. 5 zeigt eine schematische Darstellung des Proportional-Bandes. Beachte:

1. Je größer G , desto schmaler wird das Proportional-Band.
2. Das Proportional-Band ist *einseitig*, d.h. es wird nur geheizt, falls $T_{\text{IST}} < T_{\text{SOLL}}$.

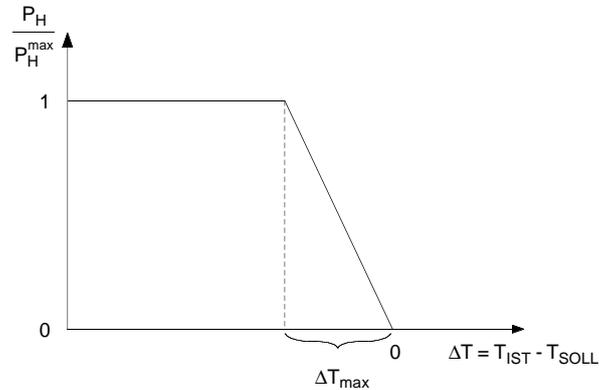


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Proportional-Bandes.

Der Integral-Teil mittelt den IST-Wert über ein gewisses Zeitintervall

$$\bar{T}_{\text{IST}} = \frac{1}{t_{\text{int}}} \int_0^{t_{\text{int}}} d\tau T_{\text{IST}}(\tau),$$

wobei hier das Integrations-Intervall gegeben ist durch $t_{\text{int}} = \frac{999 \text{ s}}{R}$ und R die sog. *Reset-Rate* ist, die Werte zwischen 1 und 999 annehmen kann (z.B. $R = 100 \Rightarrow t_{\text{int}} \simeq 10 \text{ s}$).

Die Zeitkonstante für den Differential-Teil t_{diff} ist gegeben durch $t_{\text{diff}} = (1/4) \beta t_{\text{int}}$. β wird in Prozenten angegeben und kann Werte von 0 bis 200 annehmen. In unserem Experiment bleibt der Differential-Teil üblicherweise ausgeschaltet.

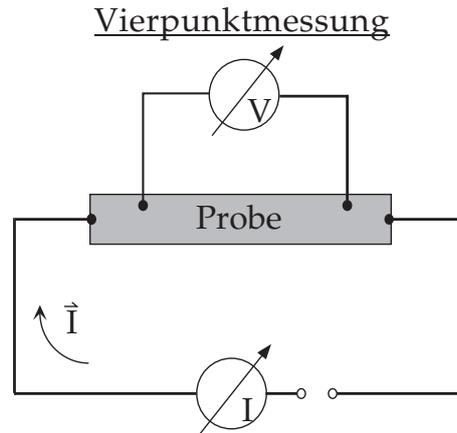


Abbildung 6: Die Vierpunkt-Widerstandsmessung

2.3 Widerstandsmessung

Der Widerstand der Probe wird mit einer **Vierpunktmessung** bestimmt. Um eine hohe Genauigkeit zu erzielen, wird der Widerstand **vierdrähtig** gemessen. Stromzuführung und Spannungsmessung erfolgen dabei über jeweils zwei separate Zuleitungen zu den vier Probenkontakten. Dadurch, daß der Spannungsabgriff hochohmig unmittelbar auf dem Proben-Widerstand erfolgt, verhindert man systematische Verfälschungen der Messung, insbesondere durch Übergangswiderstände an den Proben-Kontakten und Widerstände der Zuleitungen.

Thermoelemente - Spannungstabellen

Allgemeine Hinweise:

Die Temperaturmessung mit Thermoelementen basiert auf dem Seebeck-Effekt, bei dem sich, in einem aus zwei unterschiedlichen homogenen und isotropen Metallen bestehenden Leiterkreis, durch Zuführung von Wärmeenergie an der einen Lötstelle und Abführung von Wärmeenergie an der anderen Lötstelle ein temperaturbeeinflusster Stromkreis bildet.

Das Thermoelement ist im Prinzip nichts anderes als ein solcher aufgetrennter Leiterkreis, bestehend aus dem Messpunkt T_1 (Lötstelle der beiden Metalle), bei dem die Wärmeenergie zugeführt wird und den beiden offenen "kalten Enden" T_0 (Vergleichsstelle), an denen die Thermospannung abgegriffen wird. Für messtechnische Zwecke muss darauf geachtet werden, dass die beiden Enden T_0 der Vergleichsstelle immer derselben Umgebungstemperatur ausgesetzt sind. Die Vergleichsstellenspannung (Spannungsabgriff) U_0 beträgt immer NULL.



Jede Thermopaarart hat selbst bei gleicher Leiterkombination eine andere Signalcharakteristik. Diese Charakteristik ist genormt und in sogenannten Spannungstabellen festgehalten, wobei jedem Temperaturpunkt T_1 (in 1 K Schritten) ein bestimmter Spannungswert U_1 zugeordnet ist. Als Vergleichstellentemperatur T_0 wird in den Tabellen 0 °C als Bezugstemperatur ausgewiesen.

Beim Gebrauch der Spannungstabellen zur Bestimmung oder Überprüfen eines Thermoelements ist deshalb die Vergleichstellentemperatur T_0 unbedingt zu beachten und kompensieren, da die Thermospannung U_{th} um den Spannungswert U_V der effektiven Vergleichstellentemperatur T_0 kleiner ausfällt, als der in der Tabelle beim entsprechenden Temperaturwert T_1 ausgewiesene Wert U_1 .

Thermospannung:
$$U_{th} = U_1 - U_V$$

Der zur Berechnung notwendige Spannungswert U_V wird mit dem zur Vergleichstellentemperatur T_0 in der Spannungstabelle nächst höheren angegebenen Wert T_1 wie folgt ermittelt:

Vergleichsstellenkompensation:
$$U_V = \frac{U_1 \times T_0}{T_1}$$

Beispiel:

Thermoelement: Typ K (NiCr-Ni)

Vergleichstemperatur T_0 : 26 °C

Nächster Bezugswert gem. Tabelle: 30 °C ($U_1 = 1.203$ mV)

Ermittlung U_V :
$$U_V = \frac{U_1 \times T_0}{T_1} = \frac{1.203 \text{ mV} \times 26^\circ}{30^\circ} = 1.043 \text{ mV}$$

Temperaturwert T_1 :	0 °C	30 °C	1000 °C	-20 °C
U_1 gem. Tabelle :	0 mV	1.043 mV	41.269 mV	-0.777 mV
U_{th} :	-1.043 mV	0 mV	40.226 mV	-1.820 mV
Differenz = U_V :	1.043 mV	1.043 mV	1.043 mV	1.043 mV

Thermoelemente - Spannungstabellen

Konstantan Typ E, Ag-CuNi / Nickel Typ K, N (Vergleichsstellentemp.= 0°C, kursiv gedruckte Zahlen= Mathematische Richtwerte)

Temp °C	NiCr-CuNi Typ E DINIEC			Ag-CuNi			Temp °C
	Tol. K11 1.5 K o. 0.004t +/-K	Tol. K12 2.5 K o. 0.0075t +/-K	mV	Tol. +/-K	mV	Abweichung in K zu TypU	
-270	1.5	2.5	-9.835				95
-250	1.5	2.5	-9.797				100
-200	1.5	2.5	-8.824				110
-150	1.5	2.5	-7.279				120
-120	1.5	2.5	-6.107				130
-100	1.5	2.5	-5.237				140
-50	1.5	2.5	-2.787				150
-40	1.5	2.5	-2.254				160
-30	1.5	2.5	-1.709				170
-25	1.5	2.5	-1.430				180
-20	1.5	2.5	-1.151				190
-15	1.5	2.5	-0.866				200
-10	1.5	2.5	-0.581				220
-5	1.5	2.5	-0.291				240
0°	1.5	2.5	0.000		0.00	0.00	250
5	1.5	2.5	0.296				260
10	1.5	2.5	0.591		0.40	0.0	280
15	1.5	2.5	0.892				300
20	1.5	2.5	1.192		0.81	0.2	350
25	1.5	2.5	1.497				400
30	1.5	2.5	1.801		1.23	0.5	450
35	1.5	2.5	2.110				500
40	1.5	2.5	2.419		1.65	0.5	550
45	1.5	2.5	2.733				600
50	1.5	2.5	3.047		2.07	0.5	650
60	1.5	2.5	3.683		2.49	0.2	700
70	1.5	2.5	4.329		2.92	0.2	750
75	1.5	2.5	4.656				800
80	1.5	2.5	4.983		3.36	0.2	900
90	1.5	2.5	5.646		3.81	0.2	1000

Temp °C	NiCr-Ni Typ K DINIEC			NiCroSi-NiSi Typ N DIN43722			Diff. Typ N in K zu Typ K	Temp °C
	Tol. K11 1.5 K o. 0.004t +/-K	Tol. K12 2.5 K o. 0.0075t +/-K	mV	Tol. K1 1.5 K o. 0.004t +/-K	Tol. K12 2.5 K o. 0.0075t +/-K	mV		
-270	1.5	2.5	-6.458	1.5	2.5			150
-100	1.5	2.5	-3.553	1.5	2.5	-2.407	38.20	160
-50	1.5	2.5	-1.889	1.5	2.5	-1.268	17.25	180
-40	1.5	2.5	-1.527	1.5	2.5			200
-30	1.5	2.5	-1.156	1.5	2.5			220
-25	1.5	2.5	-0.968	1.5	2.5			240
-20	1.5	2.5	-0.777	1.5	2.5			250
-15	1.5	2.5	-0.585	1.5	2.5			260
-10	1.5	2.5	-0.392	1.5	2.5			280
-5	1.5	2.5	-0.197	1.5	2.5			300
0°	1.5	2.5	0.000	1.5	2.5	0.000	0.00	325
5	1.5	2.5	0.198	1.5	2.5			350
10	1.5	2.5	0.397	1.5	2.5			375
15	1.5	2.5	0.597	1.5	2.5			400
20	1.5	2.5	0.798	1.5	2.5			450
25	1.5	2.5	1.000	1.5	2.5			500
30	1.5	2.5	1.203	1.5	2.5			550
35	1.5	2.5	1.407	1.5	2.5			600
40	1.5	2.5	1.611	1.5	2.5			650
45	1.5	2.5	1.817	1.5	2.5			700
50	1.5	2.5	2.022	1.5	2.5	1.339	16.66	750
60	1.5	2.5	2.436	1.5	2.5			800
70	1.5	2.5	2.850	1.5	2.5			850
75	1.5	2.5	3.058	1.5	2.5			900
80	1.5	2.5	3.266	1.5	2.5			950
90	1.5	2.5	3.681	1.5	2.5			1000
95	1.5	2.5	3.888	1.5	2.5			1100
100	1.5	2.5	4.095	1.5	2.5	2.774	32.22	1200
120	1.5	2.5	4.919	1.5	2.5			1300
140	1.5	2.5	5.733	1.5	2.5			1370

ab 700°C ist auf genügende Drahtstärke zu achten, da sonst Spannungssignal zur Temperatur zu niedrig ist!)

Turbo-Molekularpumpen

Das bereits seit 1913 bekannte Prinzip der Molekularpumpe beruht darauf, dass die einzelnen, abzupumpenden Gasteilchen durch Zusammenstösse mit schnell bewegten Flächen eines Rotors einen Impuls in Förderrichtung erhalten. Die meist als Scheiben ausgebildeten Flächen des Rotors bilden mit den ruhenden Flächen eines Stators Zwischenräume, in denen das Gas in Richtung des Vorvakuums gefördert wird. Bei der ursprünglichen Gaede'schen Molekularpumpe und deren Abwandlungen waren die Zwischenräume (Förderkanäle) sehr eng, was zu baulichen Schwierigkeiten und zu einer hohen Anfälligkeit gegenüber mechanischen Verunreinigungen führte.

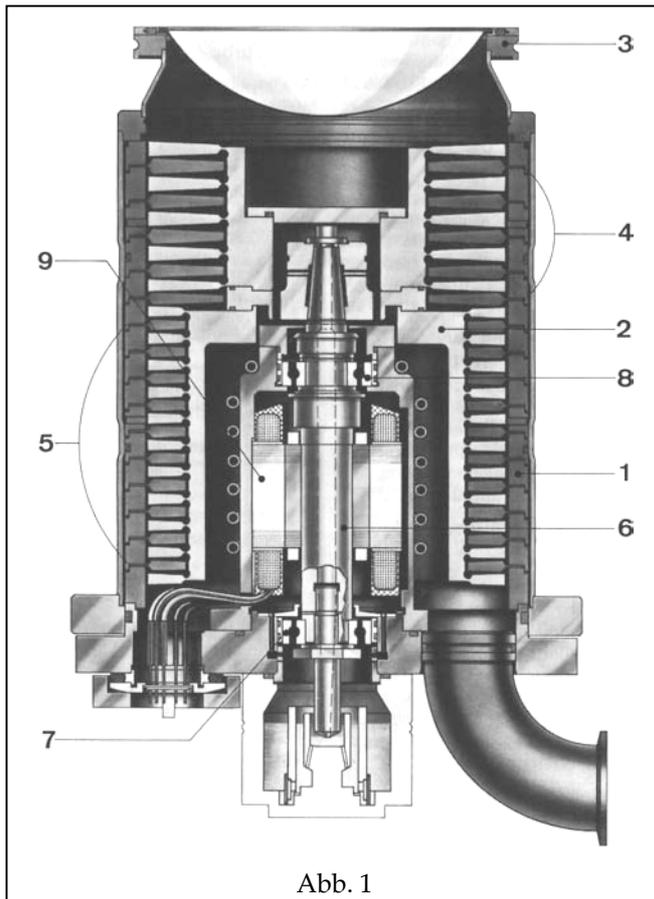


Abb. 1

Erst vor einigen Jahren gelang es, mit einer turbinenartigen Beschauflung des Rotors diesen Typ als sog. Turbo-Molekularpumpe technisch nutzbar anzuwenden. Die Abstände zwischen den Stator- und Rotorscheiben wurden auf die Grössenordnung von Millimetern gebracht, wodurch die einzuhaltenden Toleranzen wesentlich grösser sein können. Dadurch wurde eine höhere Betriebssicherheit erreicht. Der typische Aufbau einer Turbo-Molekularpumpe ist der schematischen Darstellung der Abb. 1 zu entnehmen:

Die Pumpe ist ein vertikaler Axialkompressor, dessen aktiver, d. h. pumpender Teil aus einem Stator (1) und einem Rotor (2) gebildet wird. Stator und Rotor sind auf ihrem Umfang mit Schaufeln bestückt. Jedes Schaufelringpaar bildet eine Stufe, so dass die gesamte Pumpe aus einer Vielzahl hintereinander geschalteter Stufen besteht. Das abzupumpende Gas gelangt durch die Öffnung des Ansaugflansches (3) direkt, d. h. ohne Ansaugverluste in die obersten Stufen, die als sog. Saugstufen (4) mit langen Schaufeln ausgerüstet sind, um so eine möglichst grosse aktive Fläche zu bilden. Das in diesen Stufen eingefangene Gas wird in den etwas weiter unten liegenden, mit

kürzeren Schaufeln (5) versehenen Kompressionsstufen auf den Vorvakuumdruck verdichtet. Der Turbinenrotor ist an einer Antriebswelle (6) befestigt. Diese Welle ist in zwei Schulter-Kugellagern (7) und (8) gelagert, die sich im Raum des Antriebsmotors befinden. Die Welle wird direkt durch einen Mittelfrequenz-Motor (9) angetrieben. Der Motorraum befindet sich im Vorvakuum, so dass eine Durchführung der rotierenden Welle zur äusseren Atmosphäre entfallen kann. Der Elektromotor wird extern von einem Frequenzwandler gesteuert. In der Regel wird dazu ein elektronischer Wandler verwendet, der einen besonders geräuscharmen Betrieb gewährleistet. Die vertikale Anordnung ist durch eine strömungstechnisch besonders günstige Ansaugung des Gases am Pumpeneingang gekennzeichnet. Um bei diesen Drehzahlen einen vibrationsfreien Lauf zu erzielen, wird die Turbine beim Zusammenbau in zwei Ebenen ausgewuchtet.

Höchsten Anforderungen hinsichtlich Vibrationsfreiheit und Freisein von Kohlenwasserstoffen wird durch die magnetgelagerten Turbo-Molekularpumpen erreicht. In diesen ist der Turbinenmotor in allen fünf Freiheitsgraden durch im Pumpeninneren angebrachte Elektromagnete aktiv gelagert. Ein Axiallager am oberen Ende des Stators hebt den Rotor und hält ihn berührungslos in der Schwebe zwei Radiallager übernehmen die seitliche Führung und Stabilisierung des Rotors. Jedes Lager wird getrennt für sich über hochempfindliche Mehrfachsensoren kontrolliert und gesteuert. Die magnetische Aufhängung benötigt prinzipiell keine Schmiermittel, so dass die Pumpe frei von Kohlenwasserstoffen ist.

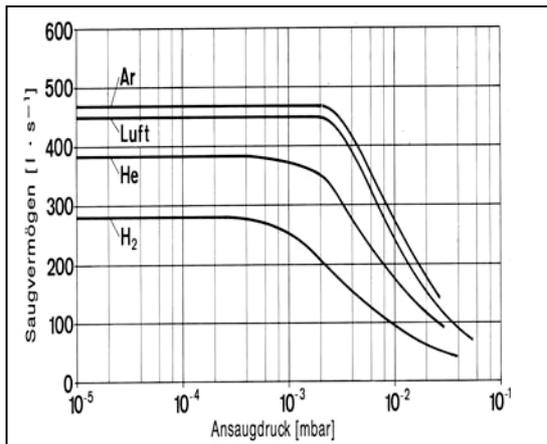


Abb. 2

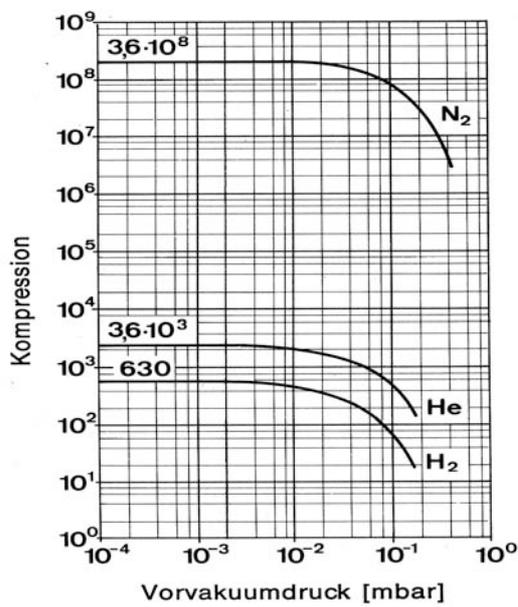


Abb. 3

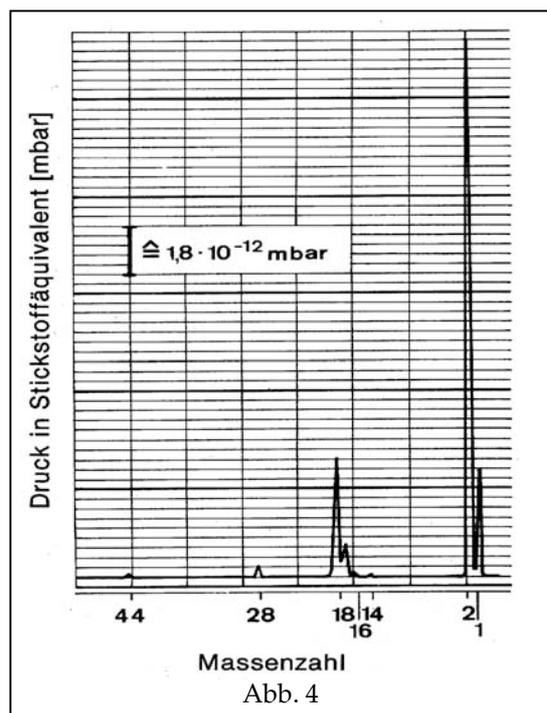


Abb. 4

Die Saugvermögenscharakteristik der Turbo-Molekularpumpe ist in Abb. 2 gezeigt. Das Saugvermögen ist über den ganzen Druckarbeitsbereich konstant. Es nimmt bei Ansaugdrücken, die höher sind als 10^{-2} mbar ab, da in diesem Druckbereich die Pumpe nicht mehr im molekularen, sondern im viskosen Strömungsbereich arbeitet.—Abb. 2 zeigt auch, dass das Saugvermögen etwas von der Gasart abhängt. Die Kompression der Turbo-Molekularpumpe—s. Abb. 3—ist aus physikalischen Gründen für schwere Moleküle besonders hoch, für leichte Moleküle dagegen erheblich niedriger. Die hohe Kompression für die schweren Kohlenwasserstoff-Moleküle hat zur Folge, dass die Turbo-Molekularpumpe ohne Zwischenschalten einer oder gar mehrerer Dampfsperren direkt an den Vakuumbehälter angeschlossen werden kann, ohne dass ein messbaren Kohlenwasserstoff Partialdruck im Behälter zu befürchten ist (kohlenwasserstoff-freies Vakuum—s. auch Abb. 4). Da der Wasserstoffpartialdruck, der von der Rotations-Vakuum-pumpe als Vorpumpe erzeugt wird, sehr gering ist, kann man mit der Kompression einer Turbo-Molekularpumpe in relativ einfacher Weise Enddrücke von 10^{-11} mbar erzeugen. Natürlich müssen zum Erzielen dieser extrem niedrigen Drücke die üblichen Regeln der Ultra-Hochvakuumtechnik befolgt werden; Vakuumbehälter und der obere Teil der Turbo-Molekularpumpe müssen ausgeheizt, als Dichtungen müssen an den erforderlichen Stellen Metaldichtungen verwendet werden.

Bei niedrigen Drücken besteht das Restgas in der Hauptsache aus H_2 , der von den metallischen Behälterwänden stammt. Das in Abb. 4 gezeigte Spektrum ist die Restgaszusammensetzung über einer Turbo-Molekularpumpe bei einem Enddruck von 5×10^{-11} mbar Stickstoff-Äquivalent. Als Vorpumpe diente in diesem Fall eine zweistufige Drehschieberpumpe mit einem Nennsaugvermögen von $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Man erkennt, dass der H_2 -Anteil ca. 80-90% der gesamten Gasmenge ausmacht. Der geringe Anteil schwerer Moleküle nimmt sehr stark ab.

Wärmeleitungs-Vakuummeter

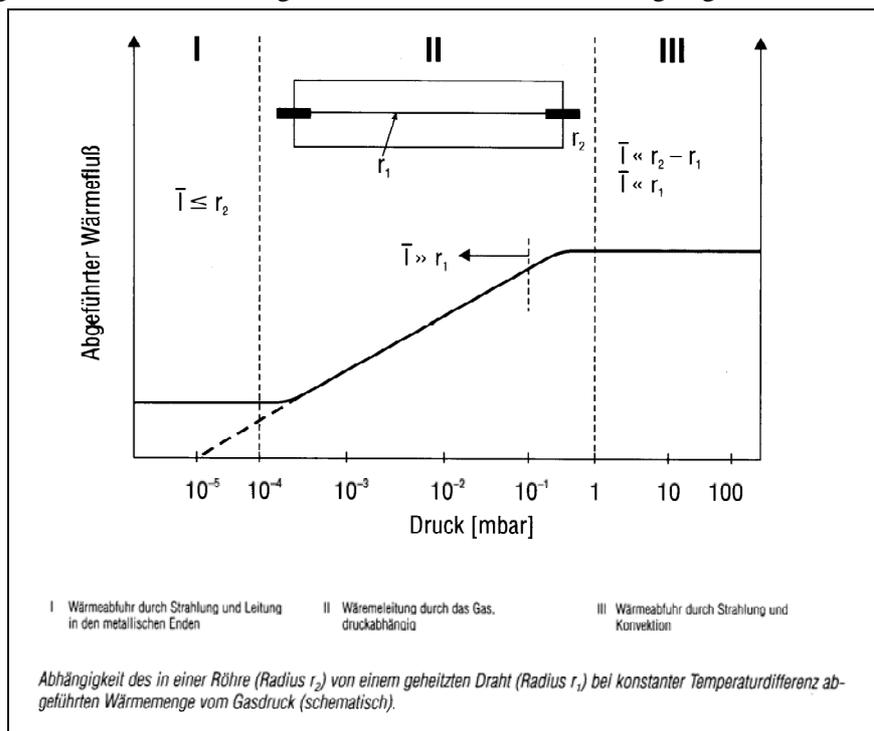
Die klassische Physik lehrt und bestätigt experimentell, dass die Wärmeleitfähigkeit eines ruhenden Gases bei höheren Drücken (Teilchenanzahldichten) $p > 1\text{ mbar}$ unabhängig vom Druck ist. Bei niedrigeren Drücken $p < 1\text{ mbar}$ ist die Wärmeleitfähigkeit aber druckabhängig (ungefähr proportional $1/\sqrt{M}$); sie nimmt im Druckgebiet des Feinvakuums von ca. 1 mbar ausgehend druckproportional ab und erreicht im Hochvakuum den Wert Null. Diese Druckabhängigkeit wird im Wärmeleitungsvakuummeter genutzt und ermöglicht das genaue, allerdings gasartabhängige Messen von Drücken im Feinvakuum.

Das meistverbreitete Messgerät dieser Art ist das Vakuummeter nach Pirani. Ein stromdurchflossener, auf etwa 100 bis 150°C erhitzter, sehr dünner Draht mit dem Radius r_1 , gibt die in ihm erzeugte Wärme durch Strahlung und durch Wärmeleitung an das den Draht umgebende Gas ab (ausserdem natürlich auch an die Befestigungsvorrichtungen an den Drahtenden). Im Grobvakuum ist die Wärmeleitung durch die Gaskonvektion nahe zu druckunabhängig. Kommt aber bei einigen mbar die mittlere freie Weglänge des Gases in

die Grössenordnung des Drahtdurchmessers, geht diese Art der Wärmeabfuhr mehr und mehr, und zwar dichte- und damit druckabhängig, zurück. Unterhalb 10^{-3} mbar liegt die mittlere freie Weglänge eines Gases bereits in der Grösse des Radius r_2 der Messröhre. Der Messdraht in der Messzelle bildet den Zweig einer Wheatstoneschen Brücke. Bei den älteren unregulierten Wärmeleitungs-Vakuummetern wurde der Messdraht mit konstantem Strom geheizt. Mit zunehmendem Gasdruck nimmt die Temperatur des Messdrahtes infolge der höheren Wärmeableitung durch das Gas ab, so dass die Brücke nicht mehr abgeglichen bleibt,

sondern verstimmt wird. Der Brückenstrom dient als Mass für den Gasdruck, der auf einer Messskala angezeigt wird. Auch bei den heute fast ausschliesslich gebauten geregelten Wärmeleitungs-Vakuummetern ist der Messdraht ein Zweig einer Wheatstoneschen Brücke. Die an dieser Brücke liegende Heizspannung aber wird so geregelt, dass der Widerstand und damit die Temperatur des Messdrahtes unabhängig von der Wärmeabgabe konstant bleibt. Das bedeutet, dass die Brücke immer abgeglichen ist. Diese Regelung hat eine Zeitkonstante von wenigen Millisekunden, so dass die Geräte - im Gegensatz zu den unregulierten - sehr schnell auf Druckänderungen reagieren. Die an der Brücke anliegende Spannung ist ein Mass für den Druck. Die Messspannung wird elektronisch so korrigiert, dass sich eine annähernd logarithmische Skala über den ganzen Messbereich ergibt. Geregelte Wärmeleitungs-Vakuummeter haben einen Anzeigebereich von 10^{-4} bis 1013 mbar . Durch die sehr kleine Einstellzeit eignen sie sich besonders zur Steuerung und für Drucküberwachungsaufgaben. Die Messgenauigkeit ist in den verschiedenen Druckbereichen unterschiedlich. Der maximale Fehler beträgt, bezogen auf den Vollausschlag des Gerätes, etwa 1 bis 2% . Das entspricht im empfindlichsten Anzeigebereich, also zwischen 10^{-3} und 1 mbar etwa $\pm 10\%$ der Druckanzeige. Ausserhalb dieses Bereiches ist die Messunsicherheit deutlich grösser.

Wie bei allen gasartabhängigen Vakuummetern gelten auch bei Wärmeleitungs-Vakuummetern die Skalenangaben der Anzeigeeinstrumente und Digitalanzeigen für Stickstoff und für Luft. Innerhalb der Fehlergrenzen kann bei der Druckmessung von Gasen mit ähnlicher molarer Masse, d. h. also von O_2 , CO oder anderen, direkt abgelesen werden. Korrekturkurven für eine Reihe von anderen Gasen sind verfügbar.



Ionisations-Vakuummeter

Ionisations-Vakuummeter sind die wichtigsten Geräte zum Messen von Gasdrücken in den Bereichen Hoch- und Ultrahochvakuum. Sie messen den Druck über die druckproportionale Teilchenanzahldichte. In den Messköpfen der Geräte wird das darin befindliche Gas, dessen Druck gemessen werden soll, mit Hilfe eines elektrischen Feldes teilweise ionisiert. Die Ionisation erfolgt durch Elektronen, die im elektrischen Feld beschleunigt werden und dabei genügend Energie erreichen, um bei einem Zusammenstoß mit Gasmolekülen positive Ionen zu bilden. Diese Ionen geben ihre Ladung an einer Messelektrode (Ionenfänger, Kollektor) des Messsystems wieder ab. Der so erzeugte Ionenstrom (genauer: der zur Neutralisierung dieser Ionen nötige Elektronenstrom in der Zuleitung der Messelektrode) ist ein Mass für den Druck, denn die Ionenausbeute ist proportional zur Teilchenanzahldichte und damit zum Druck.

Die Bildung der Ionen erfolgt entweder in einer Entladung bei hoher elektrischer Feldstärke (sogenannte Kaltkathoden-Entladung oder Penning-Entladung) oder durch Stoß mit Elektronen, die von einer Glühkathode emittiert werden.

Bei sonst gleichbleibenden Bedingungen hängt die Ionenausbeute und damit der Ionenstrom von der Gasart ab, da sich manche Gase leichter ionisieren lassen als andere. Wie alle Vakuummeter mit gasartabhängiger Anzeige werden auch Ionisations-Vakuummeter mit Stickstoff als Referenzgas kalibriert. Um den wahren Druck für andere Gase als Stickstoff zu erhalten, muss der abgelesene Druck mit dem für das betreffende Gas angegebenen Korrekturfaktor multipliziert werden.

Ionisations-Vakuummeter mit kalter Kathode (Penning-Vakuummeter)

Ionisations-Vakuummeter, die mit kalter Entladung arbeiten, nennt man Kaltkathoden- oder Penning-Vakuummeter. Allen Ausführungsformen der Kaltkathoden-Ionisations-Vakuummeter ist gemeinsam, dass diese lediglich zwei nicht beheizte Elektroden, Kathode und Anode, enthalten, zwischen denen mittels einer Gleichspannung (Größenordnung 2kV) eine sogenannte kalte Entladung gezündet und aufrecht erhalten wird, die auch noch bei sehr niedrigen Drücken stationär brennt. Dies wird dadurch erreicht, dass mit Hilfe eines Magnetfeldes der Weg der Elektronen so lang gemacht wird, dass ihre Stossrate mit Gasmolekülen hinreichend gross wird, um die zur Aufrechterhaltung der Entladung erforderliche Anzahl von Ladungsträgern zu bilden. Das Magnetfeld ist so angeordnet, dass die magnetischen Kraftlinien den elektrischen Kraftlinien überlagert sind. Dadurch werden die Elektronen auf ihrem Weg zur Kathode auf eine schraubenförmige Bahn gezwungen. Die hierbei durch Stoß erzeugten positiven und negativen Ladungsträger wandern zu den entsprechenden Elektroden und bilden den druckabhängigen Entladungsstrom, der auf einer Messskala angezeigt wird. Die Anzeige (in mbar) ist von der Gasart abhängig. Die obere Grenze des Messbereiches ist dadurch gegeben, dass bei Drücken oberhalb von einigen 10^{-2} mbar die Penning-Entladung in eine mit intensivem Leuchten verbundene Glimmentladung übergeht, deren Stromstärke - bei konstant gehaltener Spannung - vom Druck nur in geringem Masse abhängt und daher messtechnisch nicht ausnutzbar ist.

