

EUR 231.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT – EURATOM

**METHODEN UND ANWENDUNGEN
DER ULTRA-HOCHVAKUUM-TECHNIK**

von

H. ESCHBACH

1963



**Gemeinsame Kernforschungsstelle
Forschungsanstalt Geel – Belgien
Zentralbüro für Kernmessungen**

**TEXT VORGETRAGEN AUF DER
JAHRESTAGUNG DER VERFAHRENS-INGENIEURE
MAINZ (DEUTSCHLAND) 7/10.10.1962**

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, daß die Euratomkommission, ihre Vertragspartner und alle in deren Namen handelnden Personen :

- 1° — keine Gewähr dafür übernehmen, daß die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind oder daß die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt;
- 2° — keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

Dieser Bericht wird zum Preise von 40 brfs. verkauft. Bestellungen sind zu richten an: PRESSES ACADEMIQUES EUROPEENNES - 98, chaussée de Charleroi, Brüssel 6.

Die Zahlung ist zu leisten durch Überweisung

- an die BANQUE DE LA SOCIETE GENERALE (Agence Ma Campagne) - Brüssel - Konto Nr. 964.558;
- an die BELGIAN AMERICAN BANK AND TRUST COMPANY - New York - Konto Nr. 121.86;
- an die LLOYDS BANK (Foreign) Ltd. - 10 Moorgate, London E.C. 2.

als Bezug ist anzugeben: „EUR 231.d - Methoden und Anwendungen der Ultra-Hochvakuum-Technik.“

Gedruckt von Snoeck-Ducaju & Zoon -
Brüssel/Gent, April 1963.

EUR 231.d

METHODEN UND ANWENDUNGEN DER ULTRA-HOCHVAKUUM-TECHNIK
von H. Eschbach.

Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM.

Gemeinsame Kernforschungsstelle.

Forschungsanstalt Geel (Belgien).

Zentralbüro für Kernmessungen.

Text vorgetragen auf der Jahrestagung der Verfahrens-Ingenieure .

Mainz (Deutschland) 7/10.10.1962.

Brüssel, April 1963 - 16 Seiten + 16 Abb.

Obwohl die Ultrahochvakuum-Technik ein verhältnismäßig junger Zweig der Vakuumphysik ist, so hat sie doch schon beträchtliches Interesse sowohl bei der Grundlagenforschung als auch bei verschiedenen technischen Anwendungen gefunden. Hier konnten nur einige wichtige Methoden zur Erzeugung und zur Messung sehr niedriger Drucke beschrieben werden; die Faktoren, die

EUR 231.d

METHODS AND APPLICATIONS OF ULTRA-HIGH VACUUM TECHNIQUES
by H. Eschbach.

European Atomic Energy Community - EURATOM.

Joint Nuclear Research Center.

Geel Establishment (Belgium).

Central Nuclear Measurements Bureau.

Text presented by the Jahrestagung der Verfahrens-Ingenieure -

Mainz (Germany) 7/10.10.1962.

Brussels, April 1963 - pages 16 + figures 16.

Although ultra-high vacuum techniques are rather young a branch of vacuum physics, they have already met with considerable interest in fundamental research as well as several technological applications. Here it was only possible to describe certain important methods of generating and measuring extremely low pressures; the factors which determine the final vacuum were discussed, and it

EUR 231.d

METHODS AND APPLICATIONS OF ULTRA-HIGH VACUUM TECHNIQUES
by H. Eschbach.

European Atomic Energy Community - EURATOM.

Joint Nuclear Research Center.

Geel Establishment (Belgium).

Central Nuclear Measurements Bureau.

Text presented by the Jahrestagung der Verfahrens-Ingenieure -

Mainz (Germany) 7/10.10.1962.

Brussels, April 1963 - pages 16 + figures 16.

Although ultra-high vacuum techniques are rather young a branch of vacuum physics, they have already met with considerable interest in fundamental research as well as several technological applications. Here it was only possible to describe certain important methods of generating and measuring extremely low pressures; the factors which determine the final vacuum were discussed, and it

das Endvakuum bestimmen, wurden diskutiert, und es wurde dargelegt, daß Messungen im UHV — ebenso wie allgemein in der Vakuumphysik — ziemlich schwierig sind. Man kann erwarten, daß der Massenspektrometrie im UHV immer größere Bedeutung zukommen wird. Ebenso wird man von den Untersuchungen der Wechselwirkung von Gasen mit Festkörperoberflächen neue Impulse für die Entwicklung zukünftiger UHV-Methoden erwarten können.

Bei größeren Systemen hat man heute noch technologische Schwierigkeiten bei der Ausführung von lösbaren Metallverbindungen und bei Metallventilen mit sehr großem Leitwert. Hierfür werden einige Beispiele angeführt. Von den verschiedenen erwähnten Anwendungen sind die UHV-Aufdampftechnik und die Erzeugung von Ultrahochvakuum in großen Höhenkammern für den Techniker von besonderem Interesse.

was pointed out that measurements made in an ultra-high vacuum—as well as such in vacuum physics in general—are rather difficult. It may be expected that mass spectrometry in an ultra-high vacuum will be of progressively increasing importance. Likewise, new impulses of development in future ultra-high vacuum methods may be expected from research into interaction between gases and surfaces of solids.

In larger systems technological difficulties still prevail in the execution of releasing metal joints and in metal valves of very high throughput. Certain examples thereof are being quoted. Among the various applications mentioned, ultra-high vacuum evaporating techniques and the generation of an ultra-high vacuum in large-size altitude chambers are of particular interest to technicians.

was pointed out that measurements made in an ultra-high vacuum—as well as such in vacuum physics in general—are rather difficult. It may be expected that mass spectrometry in an ultra-high vacuum will be of progressively increasing importance. Likewise, new impulses of development in future ultra-high vacuum methods may be expected from research into interaction between gases and surfaces of solids.

In larger systems technological difficulties still prevail in the execution of releasing metal joints and in metal valves of very high throughput. Certain examples thereof are being quoted. Among the various applications mentioned, ultra-high vacuum evaporating techniques and the generation of an ultra-high vacuum in large-size altitude chambers are of particular interest to technicians.

EUR 231.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT – EURATOM

**METHODEN UND ANWENDUNGEN
DER ULTRA-HOCHVAKUUM-TECHNIK**

von

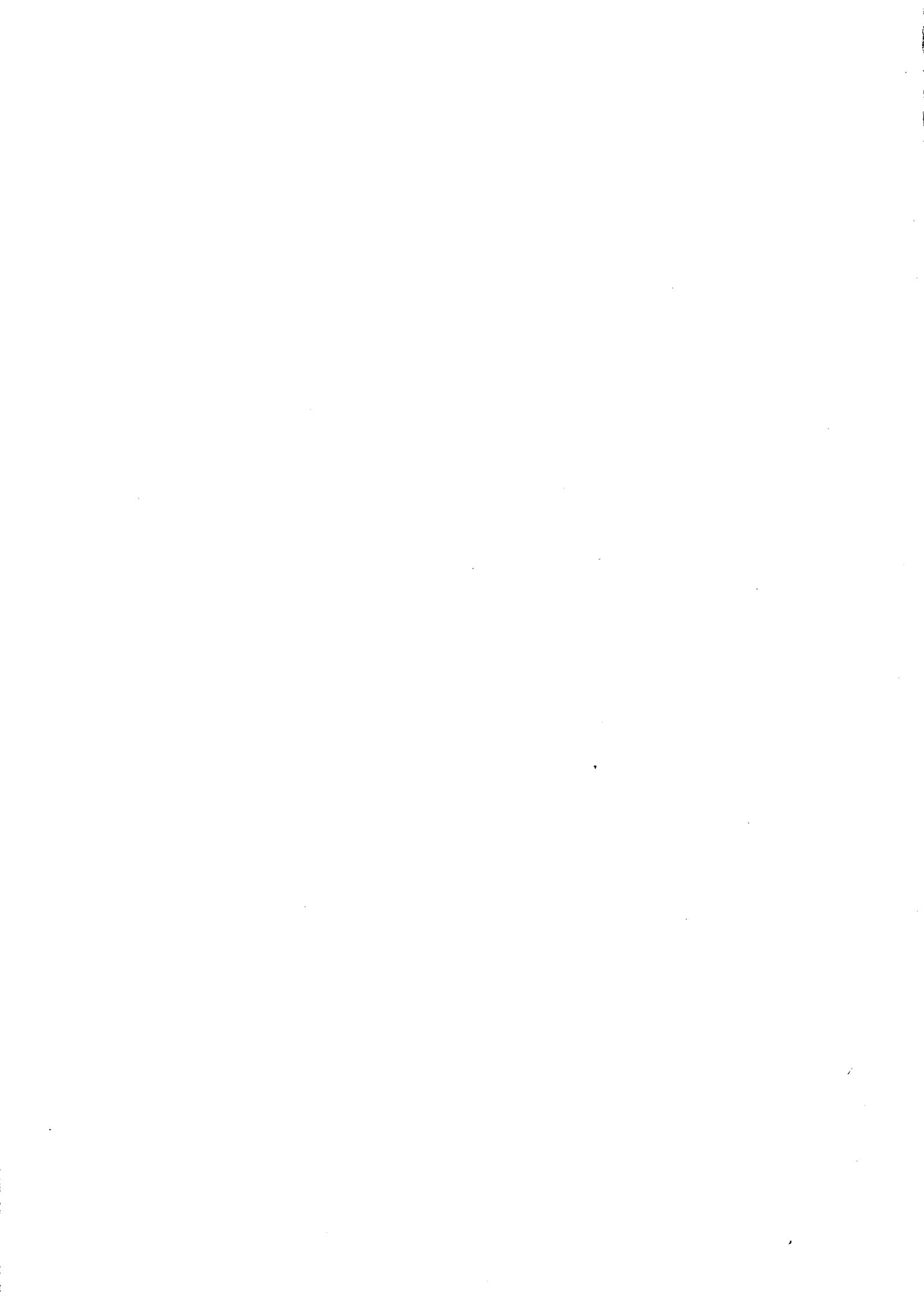
H. ESCHBACH

1963



**Gemeinsame Kernforschungsstelle
Forschungsanstalt Geel – Belgien
Zentralbüro für Kernmessungen**

**TEXT VORGETRAGEN AUF DER
JAHRESTAGUNG DER VERFAHRENS-INGENIEURE
MAINZ (DEUTSCHLAND) 7/10.10.1962**



INHALTSVERZEICHNIS

1 — EINLEITUNG	5
2 — FAKTOREN, DIE DEN ERREICHBAREN ENDDRUCK BESTIMMEN	6
3 — ERZEUGUNG ULTRAHOHER VAKUA	8
4 — MESSUNG ULTRAHOHER VAKUA	11
5 — AUFBAU VON UHV-SYSTEMEN	13
6 — ANWENDUNGEN DER UHV-TECHNIK	14
LITERATUR	15

METHODEN UND ANWENDUNGEN DER ULTRA-HOCHVAKUUM-TECHNIK

ZUSAMMENFASSUNG

Obwohl die Ultrahochvakuum-Technik ein verhältnismäßig junger Zweig der Vakuumphysik ist, so hat sie doch schon beträchtliches Interesse sowohl bei der Grundlagenforschung als auch bei verschiedenen technischen Anwendungen gefunden. Hier konnten nur einige wichtige Methoden zur Erzeugung und zur Messung sehr niedriger Drucke beschrieben werden; die Faktoren, die das Endvakuum bestimmen wurden diskutiert, und es wurde dargelegt, daß Messungen im UHV — ebenso wie allgemein in der Vakuumphysik — ziemlich schwierig sind. Man kann erwarten, daß der Massenspektrometrie im UHV immer größere Bedeutung zukommen wird. Ebenso wird man von den Untersuchungen der Wechselwirkung von Gasen mit Festkörperoberflächen neue Impulse für die Entwicklung zukünftiger UHV-Methoden erwarten können.

Bei größeren Systemen hat man heute noch technologische Schwierigkeiten bei der Ausführung von lösbaren Metallverbindungen und bei Metallventilen mit sehr großem Leitwert. Hierfür werden einige Beispiele angeführt. Von den verschiedenen erwähnten Anwendungen sind die UHV-Aufdampftechnik und die Erzeugung von Ultrahochvakuum in großen Höhenkammern für den Techniker von besonderem Interesse.

SUMMARY

Although ultra-high vacuum techniques are rather young a branch of vacuum physics, they have already met with considerable interest in fundamental research as well as several technological applications. Here it was only possible to describe certain important methods of generating and measuring extremely low pressures; the factors which determine the final vacuum were discussed, and it was pointed out that measurements made in an ultra-high vacuum—as well as such in vacuum physics in general—are rather difficult. It may be expected that mass spectrometry in an ultra-high vacuum will be of progressively increasing importance. Likewise, new impulses of development in future ultra-high vacuum methods may be expected from research into interaction between gases and surfaces of solids.

In larger systems technological difficulties still prevail in the execution of releasing metal joints and in metal valves of very high throughput. Certain examples thereof are being quoted. Among the various applications mentioned, ultra-high vacuum evaporating techniques and the generation of an ultra-high vacuum in large-size altitude chambers are of particular interest to technicians.

1 — EINLEITUNG

Die Vakuumphysik ist für viele Zweige der Naturwissenschaft und der Technik ein unentbehrliches Hilfsmittel geworden. So wäre zum Beispiel die Entwicklung der Glühlampe oder der Verstärkerröhre ohne geeignete Evakuierungsverfahren nicht möglich gewesen. Aber auch auf anderen Gebieten, die nicht so unmittelbar in unser tägliches Leben eingreifen, hat die Erzeugung niedriger Drucke immer größere Bedeutung erlangt. Es stehen heute durch die Weiterentwicklung der Pumpen und durch die Anwendung neuer Pumpverfahren so hohe Sauggeschwindigkeiten zur Verfügung, daß auch großtechnische Prozesse bei niedrigen Drucken ausgeführt werden können. Es sei hier nur erinnert an das Schmelzen und Gießen von Metallen im Vakuum, die Stahlgasung, die Vakuumtrocknung und -imprägnierung, das Aufdampfen zur Materialvergütung und neuerdings die Werkstoffbearbeitung mit Elektronenstrahlen.

Außer durch die Vergrößerung der erzielbaren Saugleistungen kann man die Entwicklung der Vakuumtechnik auch durch die Erzeugung immer tieferer Drucke charakterisieren. Während man vor etwas mehr als zehn Jahren damit begann, in kleinen Glasrezipienten Drucke unter 10^{-9} Torr reproduzierbar zu erzeugen und zu messen [1], können heute Drucke von 10^{-13} Torr und darunter erzielt werden, und es ist ebenfalls möglich, in Metallgefäßen von mehreren Kubikmetern Inhalt, Drucke von 10^{-10} Torr über lange Zeit aufrechtzuhalten. Auch hier zeichnen sich bereits neue Anwendungsgebiete ab.

Das Druckgebiet, das mit Ultrahochvakuum (UHV) bezeichnet wird, rechnet man meistens von etwa 10^{-7} Torr bis zu den niedrigsten heute erzielbaren Drucken. Während man den Druckbereich zwischen 10^{-3} Torr und 10^{-7} Torr (Hochvakuum) hinreichend durch die mittlere freie Weglänge (d.i. die mittlere Entfernung, die ein Molekül zwischen zwei Stößen mit anderen Molekülen zurücklegt) kennzeichnen kann, ist diese Größe für den Ultrahochvakuumbereich von geringerer Bedeutung. Auch ist eine Kenntnis der Zahl der Moleküle pro Volumeneinheit für die meisten Versuche im UHV nicht wichtig. Dagegen wird hier häufig nach der Zahl (A) der Teilchen gefragt, die pro Zeiteinheit auf die Flächeneinheit auftreffen.

Dies möge durch folgende Überlegung erläutert werden: Wenn keine besonderen Vorkehrungen getroffen werden, sind die Innenwände eines Vakuumbehälters auch bei verhältnismäßig niedrigen Drucken mit einer „Gashaut“ überzogen. Wir denken uns nun eine Fläche von 1 cm^2 , die einem Druck von 10^{-6} Torr ausgesetzt ist, und die durch geeignete Maßnahmen von dieser Gashaut vollkommen befreit wurde. Aus dem Gasraum treffen nun bei dem gegebenen Druck etwa 10^{14} Moleküle pro Sekunde auf die Flächeneinheit. Setzen wir nun voraus, daß jedes einfallende Teilchen festgehalten wird, so kann man sich einfach ausrechnen, daß es unter den gegebenen Bedingungen nur etwas mehr als 2 Sekunden dauert, bis sich wieder eine zusammenhängende Gashaut von monomolekularer Dicke („Monoschicht“) gebildet hat. Die Zeit zur Ausbildung einer Monoschicht („Wiederbedeckungszeit“) wächst nun — da die Stoßzahl A proportional dem Druck p ist — mit abnehmenden Drucken. Infolgedessen hat man bei 10^{-10} Torr mehr als 6 Stunden bis zur vollständigen Wiederbedeckung zur Verfügung. Damit wird eine große Zahl von Untersuchungen an wirklich reinen Oberflächen erstmals möglich.

Es soll Ziel dieser Ausführungen sein, kurz einige der wichtigsten Methoden zur Erzeugung und zur Messung sehr niedriger Drucke zu beschreiben, den Stand der UHV-Physik zu umreißen und dabei ihre Bedeutung für Wissenschaft und Technik aufzuzeigen.

2 -- FAKTOREN, DIE DEN ERREICHBAREN ENDDRUCK BESTIMMEN

Bei der Dimensionierung eines Vakuumsystems muß man versuchen abzuschätzen, welche Teilprozesse den Evakuierungsvorgang beeinflussen. Für eine gegebene Anordnung wird der erreichbare Enddruck p_e [Torr] durch die Beziehung :

$$(1) \quad p_e = Q/S_{\text{eff}}$$

gegeben. Darin bedeutet S_{eff} [l/s] die effektive Saugleistung der Hochvakuumpumpe, d.i. die Saugleistung, die am Rezipientenanschluß wirklich zur Verfügung steht. Die Größe Q [Torr l/s] bezeichnet die Gesamtmenge der in das Vakuumsystem einströmenden Gase. Man kann Q in verschiedene Anteile aufspalten :

$$(2) \quad Q = Q_L + Q_D + Q_R + Q_W + \dots$$

Hierbei bedeuten :

- Q_L die Einströmung durch Undichtigkeiten;
- Q_D die Diffusion durch die Behälterwände;
- Q_R die Rückströmung von der Pumpe;
- Q_W die Desorption von Wänden und Systemteilen.

a) zu Q_L :

Bei größeren Anlagen muß man immer mit dem Vorhandensein von Undichtigkeiten rechnen. Ihr Auffinden bereitet oft große Schwierigkeiten und Kosten. Es soll weiter unten noch kurz auf Lecksuchverfahren, die für UHV-Systeme geeignet sind, eingegangen werden. Für das Folgende sei $Q_L = 0$ vorausgesetzt.

b) zu Q_D :

Die ersten UHV-Experimente [2] zeigten, daß in Hartglassystemen der erreichbare Enddruck u.a. durch die Diffusion von atmosphärischem Helium durch die Behälterwände bestimmt wird. Dieser Vorgang ist mit den Methoden der UHV-Technik weiter untersucht worden [3, 4]. Man fand, daß die Heliumdurchlässigkeit von Gläsern mit wachsendem Alkaligehalt stark abnimmt [3, 5]. Allerdings sind alkalireiche Gläser aus anderen Gründen für UHV-Apparaturen nicht sehr geeignet. Besser bewährt haben sich die Aluminoborosilikatgläser [6], die, obwohl sie zu den Hartgläsern gezählt werden müssen, eine sehr geringe Durchlässigkeit für Helium besitzen. In Verbindung mit UHV-Systemen wird auch der Wasserstoffdurchlässigkeit von Stahl wieder erhöhte Aufmerksamkeit zugewendet [7]. Durch Wahl und Kombination geeigneter Materialien [8] kann aber die Diffusion weitgehend herabgedrückt werden, und wir wollen hier $Q_D = 0$ annehmen.

c) zu Q_R :

Eine Rückströmung von Gasen oder Dämpfen von der Pumpe in den Rezipienten ist bei jeder Pumpe vorhanden. Dies hat bei den einzelnen Pumpentypen physikalisch natürlich verschiedene Ursachen. Es wird bei der Besprechung der Evakuierungsverfahren näher darauf einzugehen sein. Auch Q_R kann durch geeignete Maßnahmen weitgehend reduziert werden. Allerdings ist damit häufig ein erheblicher Verlust an Saugleistung verbunden.

d) zu Q_D :

Die Desorption der Gase von den Behälterwänden (Gasabgabe) ist bei der Erzeugung ultrahoher Vakua von besonderer Bedeutung. Der Atmosphäre ausgesetzte Oberflächen können sehr große Gasmengen mehr oder weniger fest binden, die dann während des Evakuierungsprozesses abgegeben werden. In vielen Fällen ist es im wesentlichen diese Gasabgabe, die das Endvakuum des UHV-Systems bestimmt. Es ist daher wichtig, die Desorptionsraten und ihre Temperaturabhängigkeit für die verschiedenen Materialien zu wissen [9, 10]. Für Metallapparaturen, die mit den herkömmlichen Verfahren gesäubert wurden, erhält man eine Gasabgabe von $Q_D = 10^{-7}$ bis 10^{-8} Torr $l s^{-1} cm^{-2}$. In UHV-Systemen kann man aber nur eine Desorptionsrate von 10^{-13} bis 10^{-15} Torr $l s^{-1} cm^{-2}$ zulassen. Um eine so starke Verringerung der Gasabgabe zu erzielen ist es in den meisten Fällen nötig, den gesamten Rezipienten längere Zeit bei möglichst hohen Temperaturen und bei laufender Pumpe auszuheizen. Dabei sind Temperaturen von 450° C oder

darüber wünschenswert. Dies legt dem Konstrukteur von UHV-Anlagen natürlich erhebliche Beschränkungen hinsichtlich der verwendbaren Materialien auf. Es können nur Werkstoffe benutzt werden, die auch bei diesen hohen Temperaturen noch einen sehr niedrigen Dampfdruck haben und keine merkliche Durchlässigkeit für die atmosphärischen Gase zeigen.

3 — ERZEUGUNG ULTRAHOHER VAKUA

Die Methoden, mit denen heute ultrahohe Vakua erzeugt werden, sind, etwas vereinfachend gesagt, dieselben, die schon jahrzehntelang zur Erzeugung von Hochvakuum zur Verfügung stehen. Allerdings bedurfte es häufig vertiefter Kenntnis der physikalischen Grundlagen und damit verbunden wesentlicher Verbesserungen der technischen Ausführungen, um die bekannten Evakuierungsverfahren bis in den UHV-Bereich nutzen zu können. Dies gilt vor allem auch für die Diffusionspumpe [11], von der man lange Zeit annahm, daß ihr Endvakuum bei etwa 10^{-7} Torr liegen sollte. Inzwischen haben die Arbeiten von Alpert [1] und Venema [12] gezeigt, daß man sowohl mit Öl- als auch mit Quecksilberdiffusionspumpen bis zu den kleinsten heute meßbaren Drucken gelangen kann. Die Verbesserung der Öldiffusionspumpe geschah einmal dadurch, daß man selbstfraktionierende Systeme einführte, die den Einfluß der Zersetzungsprodukte und der leichtsiedenden Treibmittelkomponenten auf das Endvakuum herabsetzten. Zum anderen wurden, angeregt durch das Studium der Treibmittelrückströmung [13], die ihren Ursprung im wesentlichen am Düsenrand und im Dampfsaum der obersten Stufe hat, die Ölfänger (Baffles) und Kühlfallen stark verbessert [14]. Schließlich wurden neue Öle entwickelt [15, 16], die den gestiegenen Anforderungen besser angepaßt sind.

Mit Hg-Diffusionspumpen wurden die sehr niedrigen Drucke durch eine ausgefeilte Ausheiztechnik und durch die Verwendung sehr wirksamer Kühlfallen erzielt [12].

Bei der Konstruktion von Kühlfallen für UHV-Apparaturen kommt es in erhöhtem Maße darauf an, daß die von der Pumpe in den Rezipienten zurückströmenden Moleküle möglichst viele Stöße mit gekühlten Flächen erleiden müssen, und daß es keine direkte Verbindung zwischen Pumpe und Rezipient gibt, die sich auf höherer Temperatur befindet. Auf solchen Flächen kann sich nämlich im Laufe der Zeit ein Ölfilm ausbilden und es können Ölmoleküle darauf ins Vakuum „wandern“. Die Konstruktion in Abb. 1 [17] erfüllt diese Anforderungen. Jedes Molekül, das von der Pumpe kommt, muß mindestens vier Wandstöße ausführen, um in den Hochvakuumbehälter zu gelangen; alle inneren Oberflächen zwischen Pumpe und Rezipient sind gekühlt. Natürlich bedeutet ein solches Leitungselement eine beträchtliche Drosselung der Sauggeschwindigkeit.

Eine andere, sehr wirksame Methode, zurückströmende Öldämpfe vom Rezipienten fernzuhalten fand Alpert [18] darin, daß er statt einer Kühlfalle eine saubere Kupferfolie in die Verbindungsleitung brachte. In kleineren Pumpsystemen kann man so für lange Zeit die Ölrückströmung unterdrücken [19]. Biondi [20] hat durch die Verwendung besonderer Absorbentien (Zeolithe, aktiviertes Aluminiumoxyd) auch bei sehr großen Öldiffusionspumpen gute Erfolge erzielt. Abb. 2 zeigt schematisch den Aufbau einer solchen Sorptionsfalle und zugleich die damit erhaltenen Resultate. Zwischen Pumpe und Vakuumbehälter befand sich außer der Falle nur ein wassergekühltes Baffle. Obwohl der Dampfdruck des verwendeten Treibmittels über 10^{-8} Torr lag, konnte nach gründ-

lichem Ausheizen der Druck im Rezipienten über eine Periode von mehr als 70 Tagen unter 10^{-9} Torr gehalten werden.

In den letzten Jahren konnte weiter gezeigt werden, daß sich auch die Molekularpumpe zur Erzeugung ultrahoher Vakua eignet. Becker [21] hat eine Konstruktion angegeben, deren Schema aus Abb. 3 zu ersehen ist. Die Pumpe hat einen turbinenartigen Aufbau: In einem Gehäuse B befinden sich fest mit der Innenwand verbunden die Statorscheiben C , denen die auf der Läuferachse a angeordneten Rotorscheiben A gegenüberstehen. Alle Scheiben tragen schräge, radial eingeprägte Nuten, die so angeordnet sind, daß bei schneller Läuferumdrehung die bei n eintretenden Moleküle eine zusätzliche Impulskomponente in Richtung der Läuferachse zur Vorvakuumseite hin erhalten. Bei dieser Ausführung konnte trotz relativ großer Abstände zwischen den Scheiben und der Gehäusewand (1 mm) ein großes Gesamtdruckverhältnis erzielt werden. Für Luft wurde bei einer Drehzahl von 16.000 U/min. im Bereich zwischen 10^{-2} Torr und 10^{-8} Torr eine Sauggeschwindigkeit von 140 l/s gemessen. Das Endvakuum von $5 \cdot 10^{-10}$ Torr wird durch Undichtigkeiten und durch Gasabgabe der großen inneren Metalloberflächen begrenzt [22].

Bei einer kleineren Molekularpumpe, die kürzlich von Beams [23, 24] angegeben wurde, geschieht die Aufhängung des Läufers und die Bewegungsübertragung auf elektromagnetische Weise. Es konnte so eine Pumpe gebaut werden, die bis 450° C ausheizbar ist.

In den von Herb [25] erstmals angegebenen Getter-Ionenpumpen [26] werden zwei seit langem bekannte physikalische Erscheinungen zur Vakuumerzeugung ausgenutzt: die Gasauflagerung in einer elektrischen Entladung und die Pumpwirkung frisch verdampfter Metallfilme (Getter). Der Aufbau einer Getter-Ionenpumpe ist schematisch in Abb. 4 dargestellt [27]. In einem Verdampfer, der hier durch ein von außen beheiztes Schiffchen angedeutet ist, wird das Gettermaterial verdampft. Der Getterdampf kondensiert an den kalten Wänden der Pumpe und bildet dort einen festhaftenden aktiven Getterspiegel aus. Gasmoleküle, die aus dem Gasraum auf diese Schicht treffen, werden festgehalten und von den nachfolgenden Getterschichten „begraben“. Für einige Gase, besonders für Edelgase, ist dieser Prozess recht unwirksam. Um auch diese Gase zu entfernen, und um insgesamt die Sauggeschwindigkeit der Pumpe zu erhöhen, wird mit Hilfe der Kathode und des Anodengitters eine elektrische Entladung aufrechterhalten. Die gebildeten Gasionen werden durch das elektrische Feld auf die Gefäßwand hingetrieben, dort festgehalten und von den nachfolgenden Getterschichten überdeckt. Die Rückströmung bei Getter-Ionenpumpen besteht darin, daß besonders bei einer Erhitzung des Getterspiegels, dieser vorher gepumptes Gas wieder abgeben kann. Eine solche „Erinnerung an die Vorgeschichte“ kann natürlich vor allem dann sehr stören, wenn hintereinander mit verschiedenen sehr sauberen Gasen gearbeitet werden soll.

Die einzelnen Getter-Ionenpumpen unterscheiden sich in der Hauptsache in der Art wie das Gettermaterial (es wird hierfür meist Titan genommen) verdampft wird. Der Aufbau einer technischen Getter-Ionenpumpe ist aus Abb. 5 ersichtlich [28]. Von einer Spule S , die den Titanvorrat trägt, wird der Draht durch ein Führungsrohr F und durch ein Loch im Reflektor R auf einen Metallstempel T gerichtet. Dieser Stempel wird mit Hilfe der Kathode E_1 durch Elektronenbombardement so hoch erhitzt, daß der auf ihn stoßende Titandraht schmilzt und verdampft. Der Reflektor R bewirkt, daß der aufsteigende Titandampf nach unten abgelenkt wird, so daß er an den wassergekühlten Wänden kondensieren kann. Die Ionisierungseinrichtung besteht aus der Glühkathode E_2 und aus den Beschleunigungsgittern G_1 und G_2 .

Eine sehr einfache und wirksame Getter-Ionenpumpe macht von der Kathodenzerstäubung in einer selbständigen Gasentladung Gebrauch [29]. Das System ist nach Art eines Penning-Vakuummeters konstruiert (Abb. 6). Einer plattenförmigen Kathode, die hier aus Titanblech besteht, steht eine wabenförmige Anode A gegenüber. Legt man zwischen beide eine genügend hohe Gleichspannung, so zündet eine Entladung, die man nach sehr niedrigen Drucken hin mit Hilfe eines überlagerten Magnetfeldes B aufrechterhalten kann. Durch das Ionenbombardement auf die Kathode wird Titan zerstäubt, das sich auf der Anode und auf den Pumpenwänden als Getterspiegel niederschlägt. Wie in einem Penning-Vakuummeter findet in diesem System zusätzlich noch eine starke elektrische Gasauflagerung statt. Da diese Konstruktion keine beweglichen oder glühenden Teile enthält, ist sie unempfindlich gegen mechanische Beanspruchung oder plötzliche Lufteinbrüche. Ein weiterer Vorzug besteht darin, daß der Entladungsstrom proportional zum Druck ist und daher eine Abschätzung des Druckes ermöglicht. Die Sauggeschwindigkeit für Edelgase konnte bei diesen Getter-Ionenpumpen durch besondere Formung der Kathodenbleche wesentlich verbessert werden [31]. Dies ist vor allem für Argon, das zu etwa 1 % in der Atmosphäre enthalten ist von Bedeutung.

Mit Getter-Ionenpumpen kann man Drucke von 10^{-10} Torr erzielen und über lange Zeit aufrechterhalten. Unter sehr sauberen Laboratoriumsbedingungen wurden $5 \cdot 10^{-12}$ Torr erreicht [32]. Kleinere Getter-Ionenpumpen werden heute als feste Konstruktionselemente bei großen Senderöhren verwendet. Sie dienen dazu Gasausbrüche, die während des Betriebes vorkommen können, wieder abzupumpen. So kann die Lebensdauer dieser teuren Senderöhren beträchtlich vergrößert werden. Über die Erfahrungen mit 70 größeren Getter-Ionenpumpen, die zur Evakuierung eines Teilchenbeschleunigers eingesetzt werden, berichtet Gould [33].

Auch das bekannte Prinzip, schädliche Dämpfe und kondensierbare Gase in Kühlfallen aufzufangen, ist in den letzten Jahren zur Erzeugung ultrahoher Vakua benutzt worden [34, 35]. Bei den sog. Kryopumpen handelt es sich im wesentlichen um tiefgekühlte Flächen im Rezipienten, die auf so niedrige Temperatur gebracht werden, daß auch die meisten Permanentgase kondensieren. Als Kühlmittel werden flüssiger Wasserstoff, flüssiges Helium oder tiefgekühltes Heliumgas [36] gebraucht. Daß sich auf diese Weise sehr niedrige Drucke erzeugen lassen, geht aus den Dampfdruckkurven der Abb. 7 hervor. Man ersieht, daß bei der Siedetemperatur des flüssigen Wasserstoffs (20,4 °K) nur He, H₂ und Ne noch einen ziemlich hohen Dampfdruck besitzen, während bei der Siedetemperatur des flüssigen Heliums (4,2 °K) allein die Dampfdrucke von H₂ und He nicht zu vernachlässigen sind. Dies muß allerdings berücksichtigt werden, da in der Atmosphäre die genannten Gase noch mit folgenden Partialdrucken vorhanden sind :

$$p_{\text{He}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Torr}, \quad p_{\text{H}_2} = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ Torr} \quad \text{und} \quad p_{\text{Ne}} = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}.$$

Die mit Kryopumpen erreichbaren Sauggeschwindigkeiten können beträchtliche Werte annehmen. Setzen wir voraus, daß jedes die tiefgekühlte Fläche treffende Molekül festgehalten wird (d.h. Kondensationskoeffizient = 1) und daß der Dampfdruck der kondensierten Phase klein ist gegen den Partialdruck in der Gasphase, so beträgt die theoretisch erzielbare Sauggeschwindigkeit für Luft $S_L = 11 \text{ l/s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ und für Wasserstoff $S_{\text{H}_2} = 44 \text{ l/s}^{-1} \text{cm}^{-2}$. In der Praxis werden jedoch kleinere Sauggeschwindigkeiten gemessen, weil die erste Voraussetzung nicht streng erfüllt ist. Außerdem bildet sich, besonders wenn die Pumpe große Gasmengen absaugen muß, in zunehmendem Maße eine feste kondensierte Phase aus, die sowohl den Wärmeübergang als auch die Kondensationsverhältnisse ändert. Bei den Kryopumpen besteht die Rückströmung in der Desorption schon gepumpter Gase.

Aus den oben genannten Gründen werden Kryopumpen meistens in Verbindung mit einer Hilfspumpe (Diffusionspumpe, Getter-Ionenpumpe) verwendet. Eine Ausführungsform, die von Mascher und Klipping [37] angegeben wurde, zeigt Abb. 8. Das Kältemittel wird von einer Förderpumpe über einen Heber in den Kondensator gesaugt, der hier aus einer Kupferrohrschlange besteht. Das Regelventil steuert den Kältemitteldurchsatz; die Temperatur wird mit einem Dampfdruckthermometer gemessen. Temperaturen unter $4,2^{\circ}\text{K}$ kann man mit dieser Anordnung erzielen, wenn man das Helium unter vermindertem Druck sieden läßt. Bei der Verwendung von Helium wird wegen seiner verhältnismäßig hohen Kosten an die Pumpe eine Rückgewinnung angeschlossen. Für die Kühlmittel werden als Verflüssigungskosten pro Liter Flüssigkeit für Wasserstoff 1 DM und für Helium etwa 20 DM angegeben.

4 — MESSUNG ULTRAHOHER VAKUA

Die meisten Vakuummeter für niedrige Drucke messen auf dem Umweg über die Gasionisation. Werden Elektronen genügend hoher Energie durch den Gasraum geschickt, so ionisieren sie auf ihrem Weg einen Teil der vorhandenen Moleküle. Die Zahl der gebildeten Ionen ist ein Maß für die Teilchendichte und damit für den Druck im Gasraum. Auf diesem Prinzip basiert das häufig benutzte Ionisationsvakuummeter. In einer Ausführung, die bis 1950 fast ausschließlich verwendet wurde, ist dieses wie eine gewöhnliche Triode aufgebaut: Eine zentrale Glühkathode wird von einem schraubenförmig gewundenen Elektronenfänger (ca. $+180\text{ V}$) umgeben, der seinerseits von einem zylinderförmigen Ionenkollektor (ca. -50 V) umschlossen wird. Der Elektronenfänger besteht häufig aus dünnem Molybdändraht, während der Ionenkollektor oft aus einer Nickelfolie hergestellt wird.

Mit solchen Ionisationsvakuummetern wurden bei einer Reihe von Untersuchungen stets kleinste Drucke von einigen 10^{-8} Torr gemessen, obwohl man aus anderen Anzeichen darauf schließen konnte, daß der tatsächlich herrschende Druck sehr viel niedriger sein mußte. Nottingham [38] hat 1947 die Erklärung für diese untere Meßgrenze der normalen Ionisationsvakuummeter gegeben. Danach lösen Elektronen, die auf den Elektronenfänger prallen, dort eine weiche Röntgenstrahlung aus. Die Röntgenquanten können ihrerseits am Ionenfänger Sekundärelektronen freisetzen, die vom elektrischen Feld zum Elektronenfänger getrieben werden. Von einem äußeren am Ionenkollektor angeschlossenen Meßkreis kann zwischen diesem störenden Elektronenstrom und dem interessierenden Ionenstrom nicht unterschieden werden. Der „Röntgeneffekt“ bewirkt also einen konstanten Störstrom, der, wie auch experimentell nachgewiesen werden konnte, die Meßgrenze der normalen Ionisationsvakuummeter auf etwa 10^{-8} Torr festlegt.

Eine einfache und wirksame Verbesserung dieser Vakuummeter wurde 1950 von Bayard und Alpert [39] angegeben. Sie schlugen ein invertiertes Triodensystem vor (Abb. 9). Der Ionenfänger befindet sich hier als dünner Draht in der Achse des schraubenförmig gewundenen Elektronenfängers, während die Kathode außerhalb angebracht ist. Die Potentiale an den einzelnen Elektroden sind dieselben wie bei der normalen Anordnung. Durch die Verkleinerung des Ionenfängers wird dieser von entsprechend weniger Röntgenquanten getroffen und der Störstrom wird in gleichem Maße reduziert. Die Empfindlichkeit der Röhre ist trotz der veränderten Geometrie ebenso groß wie bei der alten Anordnung. Infolgedessen ist es mit Bayard-Alpert-Röhren möglich, Drucke bis etwa 10^{-11} Torr zu messen.

Auch diese Grenze konnte in letzter Zeit weiter herabgedrückt werden. Durch zusätzliche Verwendung eines Magnetfeldes können die Elektronenbahnen in einer Bayard-Alpert-Röhre verlängert, und damit die Empfindlichkeit wesentlich vergrößert werden [40].

Genaue Messungen mit Ionisationsvakuummetern verlangen große Sorgfalt. Je nach Sauberkeit des Systems, d.h. je nach Entgasungszustand der Meßröhre, kann diese nämlich entweder Gase abgeben (Druckerhöhung im System) oder der Meßprozeß entfernt Gasmoleküle aus dem Meßraum (Druckerniedrigung). Besonders wenn das Meßsystem nicht unmittelbar an der Stelle angebracht ist, an welcher der Druck gemessen werden soll (lange Leitungen mit entsprechend hohem Strömungswiderstand), können so Fehlmessungen resultieren, die um mehr als eine Größenordnung vom wahren Druck abweichen. Wo man es verwirklichen kann, sollte man das Elektrodensystem unmittelbar im Rezipienten anbringen (Einbausystem [41]).

Alle Ionisationsvakuummeter haben den Nachteil, daß ihre Anzeige von der Gasart abhängt. Um also mit ihnen den Totaldruck genau messen zu können, müßte man zuerst die Gaszusammensetzung ermitteln. Aber auch bei anderen Vakuumproblemen kann es oft notwendig sein, die Gaskomponenten einzeln zu erfassen. Zu diesem Zweck sind eine Reihe von Partialdruckvakuummetern [42] entwickelt worden, die meist von dem Prinzip der Ionentrennung in elektrischen und magnetischen Feldern Gebrauch machen. Als Beispiel sei hier das von Paul und Steinwedel [43] zuerst angegebene Massenfilter, das in neuerer Zeit auch zu Partialdruckanalysen im Ultrahochvakuum benutzt wurde, beschrieben [44] (Abb. 10). Die in einer Quelle Q gebildeten Ionen treten durch eine Blende B_1 in den Analysatorraum A ein. Hier wird durch vier parallele Stäbe S ein elektrisches Quadrupolfeld erzeugt, indem man an zwei gegenüberliegende Stäbe eine positive und an die beiden anderen eine negative Gleichspannung anlegt. Überlagert man dieser eine Hochfrequenzspannung, so werden die eingeschossenen Ionen zu Schwingungen angeregt, deren Amplituden im allgemeinen so lange anwachsen, bis die Ionen auf die Feldstäbe treffen. Sie werden dort entladen und gehen dem Ionenstrahl verloren. Man kann aber die Betriebsbedingungen so wählen, daß die Ionen einer bestimmten Masse stabile Schwingungen um die Systemachse ausführen mit einer Amplitude, die kleiner als der Abstand der Feldstäbe ist. Nur diese Ionensorte kann durch die Blende B_2 den Analysatorraum verlassen und über den Ionenkollektor nachgewiesen werden. Durch Variation der Hochfrequenz- und der Gleichspannung kann ein ganzes Spektrum durchfahren werden. Ohne großen Aufwand lassen sich mit dem Massenfilter Partialdrücke von 10^{-10} Torr messen.

Ein Beispiel für ein Restgasspektrum gibt Abb. 11. Hier wurde mit einem Omega-tron, ein Partialdruckvakuummeter, das nach dem Prinzip eines Zyklotrons arbeitet, die Gaszusammensetzung über einer Öldiffusionspumpe, die mit einer Zeolithfalle versehen war, gemessen. Nach dem Ausheizen betrug der Totaldruck $8,3 \cdot 10^{-8}$ Torr. Zusätzliches Kühlen mit flüssigem Stickstoff reduzierte den Totaldruck auf $4,7 \cdot 10^{-8}$ Torr. In den beiden Spektren ist deutlich der Anteil der einzelnen Gaskomponenten zu erkennen.

In Abb. 12 wird ein weiteres Beispiel für die Anwendung eines Partialdruckvakuummeters gegeben, das zeigen soll, welche detaillierten Aussagen möglich sind, wenn man Massenspektrometer verwendet [48]. Im vorliegenden Fall wurde der Rezipient aus Edelstahl drei Stunden lang belüftet und dann von einer Öldiffusionspumpe über eine mit CO_2 beschickte Kühlfalle evakuiert. Man erkennt, daß der Wasserdampf den größten Anteil der Restgase ausmacht (etwa 70 %). Die Summe aller Kohlenwasserstoffe bildet den zweiten Anteil, erst dann folgen CO und CO_2 . Es ist ebenfalls ersichtlich, daß der Anteil von O_2 praktisch vernachlässigt werden kann. Weiter zeigt das Beispiel, daß die Reduzierung der Partialdrücke in der ersten Zeit gleichmäßig verläuft. Längere Pumpversuche

zeigen, daß die Kohlenwasserstoffdrucke einem Grenzwert zustreben, während der Wasserdampfgehalt im Restgas immer weiter abnimmt.

Alle Vakuummeter, deren Anzeige von der Gasart abhängt, sind im Prinzip auch für die Lecksuche [42, 45] geeignet. Man geht meist so vor, daß man den Prüfling soweit wie möglich evakuiert und ihn außen mit einem feinen Testgasstrahl (z.B. Helium) absprüht. Eine Änderung des Ausschlages des Vakuummeters zeigt die Undichtigkeit an. Für diese Art der Lecksuche sind Massenspektrometer natürlich besonders geeignet, da man sie speziell für das Testgas hochempfindlich machen kann. Die Nachweisempfindlichkeit der handelsüblichen Geräte liegt heute bei etwa 10^{-11} Torr l/s.

5 — AUFBAU VON UHV-SYSTEMEN

Es wurde oben schon darauf hingewiesen, daß man an die Werkstoffe, die für UHV-Apparaturen verwendet werden, besondere Anforderungen stellen muß. Vor allem die Forderung nach Ausheizbarkeit bei hohen Temperaturen beschränkt die Zahl der verwendbaren Materialien. Für kleine Laborsysteme empfiehlt sich der Aufbau aus Hartglas, wobei alle Verbindungen fest verblasen werden. Bei großen Systemen wird fast ausschließlich Edelstahl für Behälterwände und Leitungen verwendet. Ein besonders schwieriges Problem stellen hier die lösbaren Verbindungen dar. Da es bis heute keine Gummi- oder Kunststoffsorten gibt, die bei den hohen Temperaturen beständig sind und hinreichend niedrigen Dampfdruck besitzen, verwendet man meistens Dichtungsringe aus duktilen Metallen (Ag, Au, Al, Cu), die zwischen geeignet geformten Edelstahlflanschen plastisch verformt werden, und so die Abdichtung bewirken. Abb. 13 zeigt einige der gebräuchlichen Flanschformen [46]. Schwierigkeiten bei den lösbaren Metallverbindungen können vor allem durch die verschiedenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien entstehen.

Auch UHV-Ventile müssen, wenn sie ausheizbar sein sollen, ganz aus Metall bestehen. Alpert [47] hat zuerst eine geeignete Konstruktion angegeben, die etwa dem Ventil in Abb. 14 entspricht. Die Dichtung geschieht dadurch, daß ein Kovarkegel in die Öffnung einer Kupferplatte gepreßt wird und sich dort seinen eigenen Sitz formt. Die Bewegungsübertragung erfolgt über eine hart eingelötete Kovarmembran. Es sind mehrere Vorschläge für UHV-Ventile mit großen Öffnungsquerschnitten gemacht worden [49]. Eine Konstruktion nach Lange [50] zeigt Abb. 15. Hier bestehen Flansche und Ventilkörper aus Edelstahl, während der auswechselbare Ventilteller aus Kupfer gefertigt ist. Die Bewegungsübertragung geschieht durch einen Federungskörper aus Edelstahl. Gleichzeitig gibt Abb. 15 noch ein Beispiel für die Verwendung von Golddrahtdichtungen.

Wegen der Schwierigkeiten mit lösbaren Metallverbindungen wurden doppelwandige Anlagen konstruiert, bei denen das eigentliche UHV-System von einem Hochvakuummantel umgeben ist (Abb. 16) [51, 52]. Der Vorteil hierbei ist, daß an die Dichtungen für das UHV-System nicht mehr so hohe Anforderungen gestellt werden müssen, da durch die Druckverminderung auf der Außenwand auch die Gaseinströmung durch Undichtigkeiten entsprechend reduziert wird. Es kann sogar genügen, daß die sehr gut bearbeiteten dichtenden Flächen ohne besonderen Dichtungsring aufeinander gelegt werden. Die entstehenden engen Diffusionsspalten bieten der Molekularströmung einen so großen Widerstand, daß die Leckrate genügend klein bleibt. Da ferner über der Wand des UHV-Systems praktisch kein Druckgefälle besteht, kann diese sehr dünn ausgeführt werden. Es ist daher möglich, den UHV-Rezipienten durch direkten Stromdurchgang auszuheizen; die Aufheiz-

und Abkühlzeiten bleiben dabei kurz. Das äußere System der doppelwandigen Anlage kann als normales Hochvakuumssystem mit bekannten Gummidichtungen aufgebaut werden.

6 — ANWENDUNGEN DER UHV-TECHNIK

Wie aus den oben gemachten Bemerkungen zur Wiederbedeckungszeit hervorgeht, ist die Erzeugung ultrahoher Vakua eine Vorbedingung dafür, daß Untersuchungen an wirklich sauberen gasfreien Oberflächen vorgenommen werden können. So ist es zunächst auch die physikalische Grundlagenforschung, die von den neuen Methoden Gebrauch macht. Für die Vielzahl der Untersuchungen, die durch die UHV-Technik möglich wurden oder die unter verbesserten Bedingungen wiederholt werden, seien einige Beispiele genannt.

Einen großen Komplex bildet das Studium der Wechselwirkung von neutralen, angeregten oder ionisierten Atomen und Molekülen mit Festkörperoberflächen (physikalische Adsorption, Chemisorption) [53].

Hierzu gehören auch die Bemühungen zum Verständnis der Katalysatoren. Weiterhin werden die Elektronenemission von Metallen und Halbleitern, die Feldemission, die Änderung von Kontaktpotentialen mit unterschiedlicher Gasbeladung wieder eingehender untersucht [54].

Eine andere Gruppe von Anwendungen bilden die Experimente mit extrem reinen Gasen. Einmal benötigt die Gasreinigung selbst die Methoden der UHV-Technik. So wird z.B. die selektive Durchlässigkeit von Quarz für die Herstellung sehr reinen Heliums benutzt [55]. Zum anderen ergeben die Gasentladungsversuche ein großes Anwendungsgebiet. Hier seien nur die im Augenblick intensiv betriebenen Experimente zur kontrollierten Thermofusion genannt.

Von großem physikalischem und technischem Interesse sind die Untersuchungen an dünnen im UHV aufgedampften Schichten. Hier haben sich schon sehr wichtige praktische Anwendungen ergeben. Das Aufdampfen kompletter Schaltungen (Mikroschaltungen) ist für große Rechenanlagen und für elektronische Geräte in Satelliten und Raketen von erheblicher Bedeutung. Man kann dadurch nicht nur das Ausmaß und das Gewicht solcher Schaltungen wesentlich reduzieren, sondern auch ihre Zuverlässigkeit erhöhen. Sowohl bei der Herstellung als auch bei der Bearbeitung von Mikroschaltungen hat sich das Arbeiten mit Elektronenstrahlen als sehr vorteilhaft erwiesen [56, 57, 58].

Schließlich seien noch die UHV-Systeme mit großen Ausmaßen erwähnt. Es werden heute Überlegungen angestellt bestimmte Teilchenbeschleuniger zu bauen, in deren Kammern UHV erzeugt werden kann. Wenn sich dies verwirklichen läßt, kann man z.B. einen Ionenstrahl für sehr lange Zeit in der Kammer kreisen lassen, ohne befürchten zu müssen, daß er infolge von Stößen mit den Restgasmolekülen zerstreut wird.

Noch größere Unternehmungen stellen die Höhenkammern [59, 60] dar, in denen die Bedingungen des Weltraumes simuliert werden sollen. Es existieren schon Kammern mit mehreren Kubikmetern Inhalt, in denen Drucke von 10^{-10} Torr erreicht werden können. Darüberhinaus sind riesige Anlagen in der Planung; sie sollen ganze Flugobjekte aufnehmen können. Das Evakuieren solcher Kammern geschieht durch Parallelschaltung vieler großer Diffusionspumpen oder Ionen-Getterpumpen in Verbindung mit ausgedehnten Kryopumpen.

L I T E R A T U R

- [1] ALPERT, D. — *J. Appl. Phys.* **24** (1953), 860.
- [2] ROGERS, W.A., BURITZ, R.S. und ALPERT, D. — *J. Appl. Phys.* **25** (1954), 868.
- [3] NORTON, F.J. — *Vac. Symp. Trans.* **8** (1961), 8.
- [4] ESCHBACH, H.L. — *Advances in Vac. Sci. and Technology*, Bd. I (1960), 373.
- [5] ESCHBACH, H.L. — *Glas u. Instr. Techn.* **5** (1961), 181 u. 257.
- [6] GARBE, S. und CHRISTIANS, K. — *Vak. Techn.* **11** (1962), 9.
- [7] GORMAN, J.K. und NARDELLA, W.R. — *Vacuum* **12** (1962), 19.
- [8] ESCHBACH, H.L. und JAECKEL, R. — *Z. Naturforsch.* **15a** (1960), 268.
- [9] JAECKEL, R. und SCHITTKO, F.J. — *Gasabgabe von Werkstoffen ins Vakuum. Forschungsberichte des Wirtsch. u. Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen*, Nr. 369, Köln 1957.
- [10] DAYTON, B.B. — *Vac. Symp. Trans.* **8** (1961), 42.
- [11] JAECKEL, R. — *Handbuch der Physik*, Bd. XII, Berlin 1958, p. 515.
- [12] VENEMA, A. und BANDRINGA, M. — *Philips techn. Rdsch.* **20** (1959), 153.
- [13] RUF, J. und WINKLER, O. — in: M. Auwärter, *Ergebnisse der Hochvakuumtechnik und der Physik dünner Schichten*, Stuttgart 1957, p. 207.
- [14] ZINSMEISTER, G. — *Advances in Vac. Sci. and Technology*, Bd. I (1960), 335.
- [15] SIMMLER, W. und BÄCHLER, W. — *Vak. Techn.* **8** (1959), 155.
- [16] HICKMAN, K.C.D. — *Vac. Symp. Trans.* **8** (1961), 307.
- [17] ELSÄSSER, F. und KIENEL, G. — *Vak. Techn.* **9** (1960), 119.
- [18] ALPERT, D. — *Rev. Sci. Instr.* **24** (1953), 1004.
- [19] CARMICHAEL, J.H. und LANGE, W. — *Vac. Symp. Trans.* **5** (1958), 137.
- [20] BIONDI, M.A. — *Rev. Sci. Instr.* **30** (1959), 831.
- [21] BECKER, W. — *Vak. Techn.* **7** (1958), 149.
- [22] PUPP, W. — *Vak. Techn.* **8** (1959), 158.
- [23] BEAMS, J.W. — *Science* **130** (1959), 1406.
- [24] BEAMS, J.W. — *Vac. Symp. Trans.* **7** (1960), 1.
- [25] HERB, R.G. — *Vac. Sci. and Technology* (1960), Bd. I, p. 45.
- [26] KIENEL, G. — *Chemie Ing. Techn.* **34** (1962), 95.
- [27] KLOPFER, A. und ERMERICH, W. — *Vak. Techn.* **8** (1959), 162.
- [28] ALEXEFF, J. und PETERSEN, E.C. — *Vak. Techn.* **5** (1956), 61.
- [29] HALL, L.D. — *Rev. Sci. Instr.* **29** (1958), 367.
- [30] JEPSEN, R.L. — *Le Vide* **14** (1959), 80.
- [31] JEPSEN, R.L., FRANCIS, A.B., RUTHERFORD, S.L. und KIETZMANN, B.E. — *Vac. Symp. Trans.* **7** (1960), 45.
- [32] KLOPFER, A. — *Vak. Techn.* **10** (1961), 113.
- [33] GOULD, C.L. und DRYDEN, R.A. — *Vac. Symp. Trans.* **8** (1961), 369.
- [34] BAILEY, B.M. und LITTLE, A.D. — *Chem. Engng* **65** (1958), 30.
- [35] FORTH, H.J. — *Vak. Techn.* **10** (1961), 227.
- [36] BAILEY, B.M. und CHUAN, R.L. — *Vac. Symp. Trans.* **5** (1958), 262.
- [37] KLIPPING, G. und MASCHER, W. — *Vak. Techn.* **11** (1962), 81.
- [38] NOTTINGHAM, W.B. — Mündliche Mitteilung auf der M.I.T. Conf. Phys. Electr. (1947).
- [39] BAYARD, R.T. und ALPERT, D. — *Rev. Sci. Instr.* **21** (1950), 571.
- [40] LAFFERTY, J.M. — *Vac. Symp. Trans.* **8** (1961), 460.
- [41] ADAM, H. — *Z. Instrumentenkunde* **69** (1961) 309.
- [42] HINTENBERGER, H. und DÖRNENBURG, E. — *Vak. Techn.* **7** (1958), 121 und 159.
- [43] PAUL, W. und STEINWEDEL, H. — *Z. Naturforschung* **8a** (1953), 448.
- [44] GÜNTHER, K.G. und HÄNLEIN, W. — *Vac. Symp. Trans.* **8** (1961), 573.
- [45] THIEL, A. — *Atomkernenergie* **4** (1959), 75.

- [46] WHEELER, W.R. und CARLSON, M. — *Vac. Symp. Trans.* **8** (1961), 1309.
- [47] ALPERT, D. — *Rev. Sci. Instr.* **22** (1951), 536.
- [48] BLEARS, J. — *J. Sci. Instr.* **28**, Suppl. Nr. 1 (1951), 36.
- [49] ESCHBACH, H.L. und PEPPERLE, W. — *Vak. Techn.* **10** (1961), 210.
- [50] LANGE, W. — *Rev. Sci. Instr.* **30** (1959), 602.
- [51] KIENEL, G. und LORENZ, A. — *Vak. Techn.* **9** (1961) 217.
- [52] EHLERS, H. und MOLL, J. — *Z. angew. Phys.* **12** (1960), 324.
- [53] EHRLICH, G. — in : *Structure and Properties of Thin Films*, New York (1959), p. 423.
- [54] EBERHAGEN, A. — *Fortschritte d. Phys.* **8** (1960), 245.
- [55] LEIBY, C.C. und CHEN, C.L. — *J. Appl. Phys.* **31** (1960) 268.
- [56] RIDDLE, G.C. — *Fourth Symp. on Electron Beam Techn.* (1962), p. 340.
- [57] McDONALD, W.J. — *Fourth Symp. on Electron Beam Techn.* (1962), p. 372.
- [58] MOORE, D.W. — *Vac. Symp. Trans.* **8** (1961), 976.
- [59] FARKASS, I. und VANDERSCHMIDT, G.F. — *Vac. Symp. Trans.* **6** (1959), 42.
- [60] CAMACK, W.G. und ELLIS, C.A. — *Vac. Symp. Trans.* **8** (1961), 1260.

ZUSAMMENFASSEND E DARSTELLUNGEN DER UHV-TECHNIK

- [I] ALPERT, D. — in : *Handbuch der Physik*, Bd. XII, Berlin 1958, p. 609.
- [II] BAKER, F.A. und YARWOOD, J. — *Vak. Techn.* **6** (1957), 147 und 186.
- [III] ESCHBACH, H.L. — *Praktikum der Hochvakuumtechnik*, Leipzig 1962.
- [IV] KIRCHNER, F. — in : *Physikertagung München 1956*, Mosbach (1957), p. 97.
- [V] MUNDAY, G.L. — *Nuclear Sci. and Methods* **4** (1959), 367.
- [VI] REDHEAD, P.A. und KORNELSEN, E.V. — *Vak. Techn.* **10** (1961), 31.
- [VII] TREND ELENBURG, E.A. — in : *Physikertagung Wiesbaden 1960*, Mosbach (1961), p. 164.

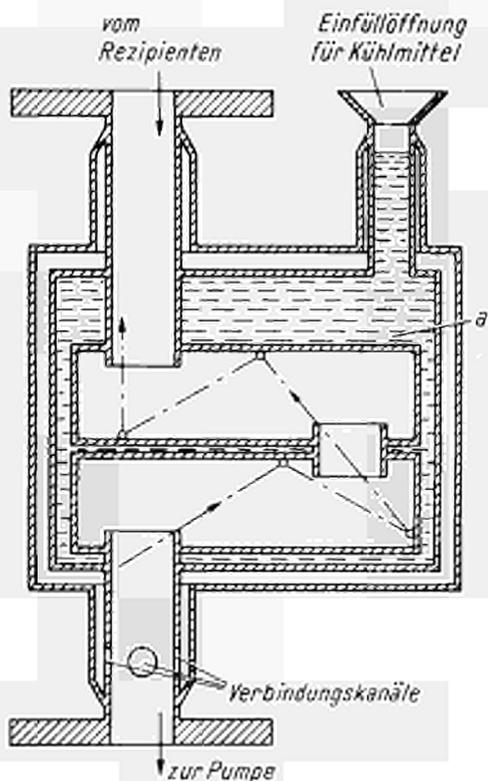


Abb. 1
Metallkühlfalle für UHV-Apparaturen [17].

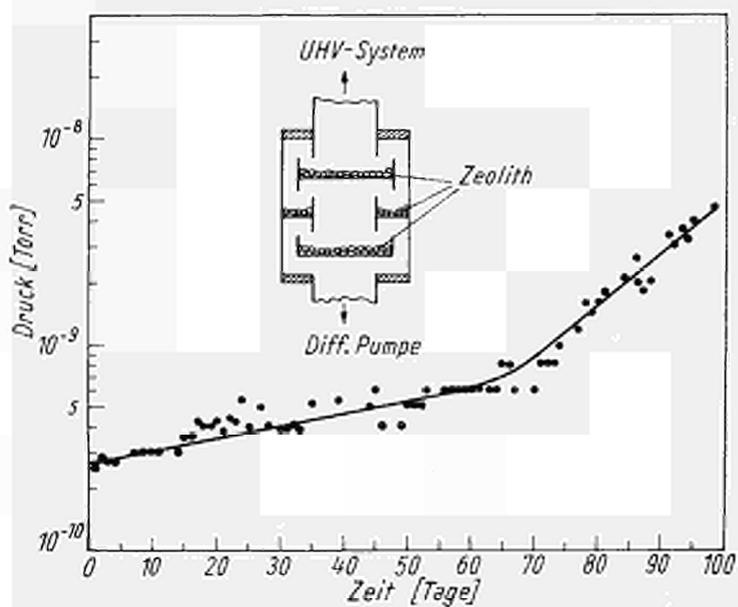


Abb. 2
Schema einer Sorptionsfalle nach Biondi [20]; Druckanstieg über einer Öldiffusionspumpe bei Verwendung dieser Falle.

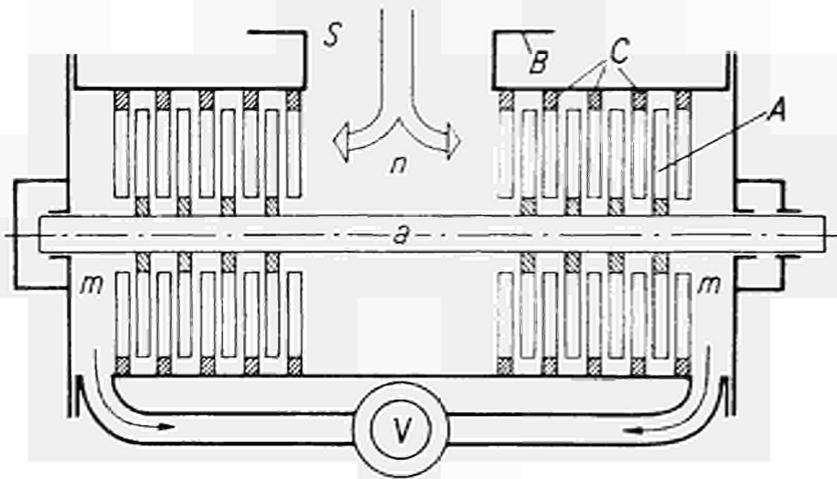


Abb. 3
Molekularpumpe nach Becker [21] (schematisch).
A Rotorscheiben, B Gehäuse, C Statorscheiben, S Hochvakuumanschluß,
V Vorvakuumanschluß, a Läuferachse.

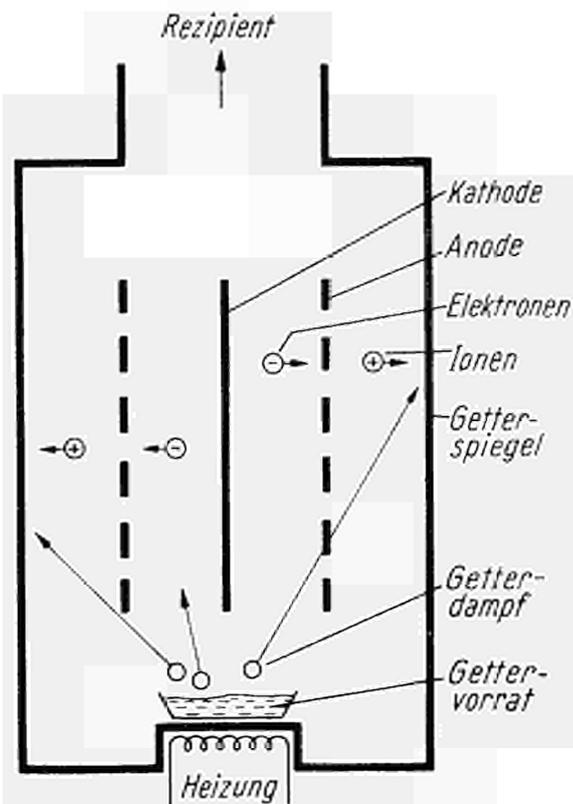


Abb. 4
Schema einer Getter-Ionenpumpe [27].

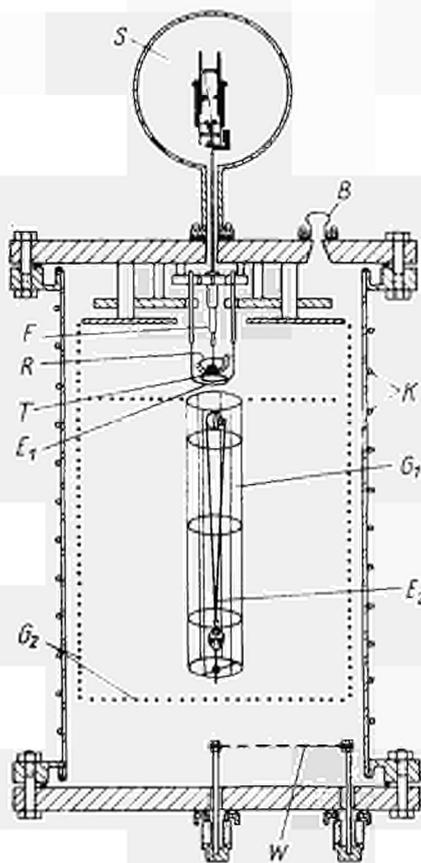


Abb. 5
 Getter-Ionenpumpe nach Alexeff und Petersen [28].
B Beobachtungsfenster, *E₁* und *E₂* Glühkathoden, *F* Führungsrohr, *G₁* und *G₂* Gitter, *K* Wasserkühlung, *R* Reflektor, *S* Spule mit Titanvorrat, *T* Verdampfertiegel, *W* Vorverdampfer.

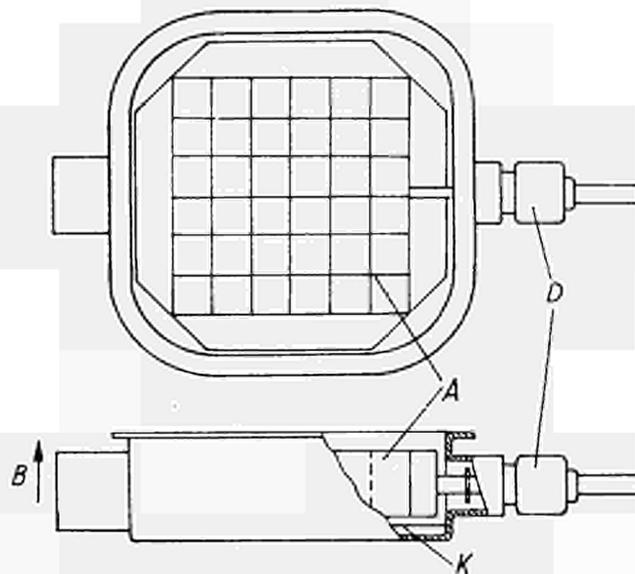


Abb. 6
 Getter-Ionenpumpe nach Hall [29]
A Anode, *B* Magnetfeld, *D* Hochspannungsdurchführung, *K* Kathode.

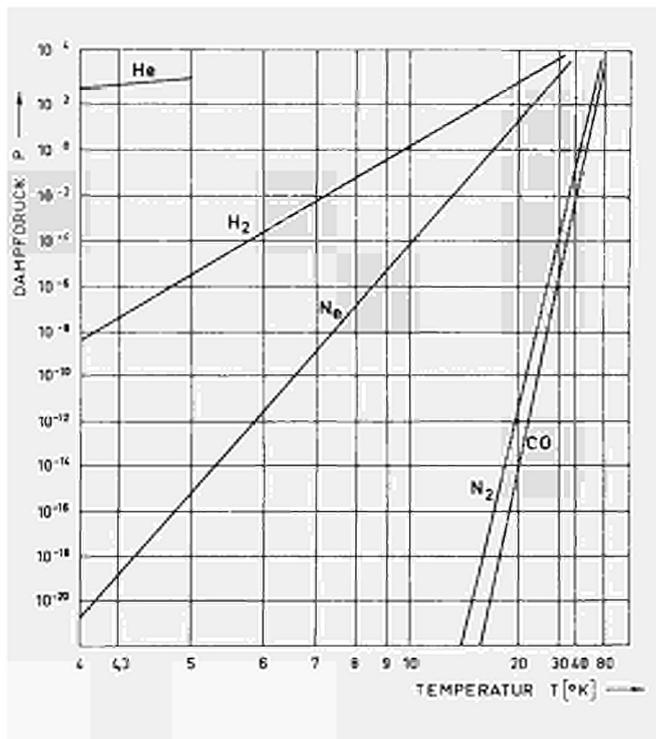


Abb. 7
Dampfdruckkurven einiger Gase unter
80 °K

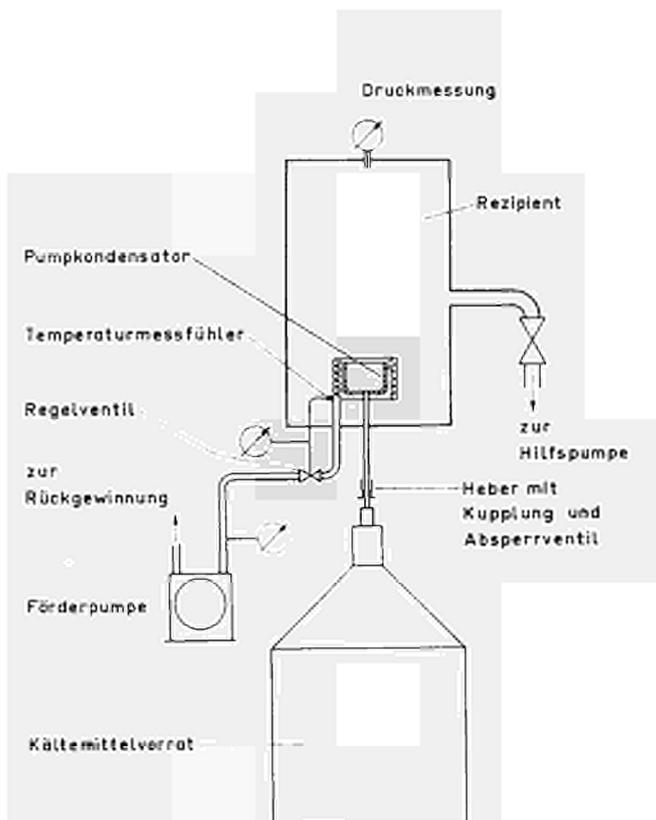


Abb. 8
Aufbau einer Kryopumpe nach Klipping
und Mascher [37]

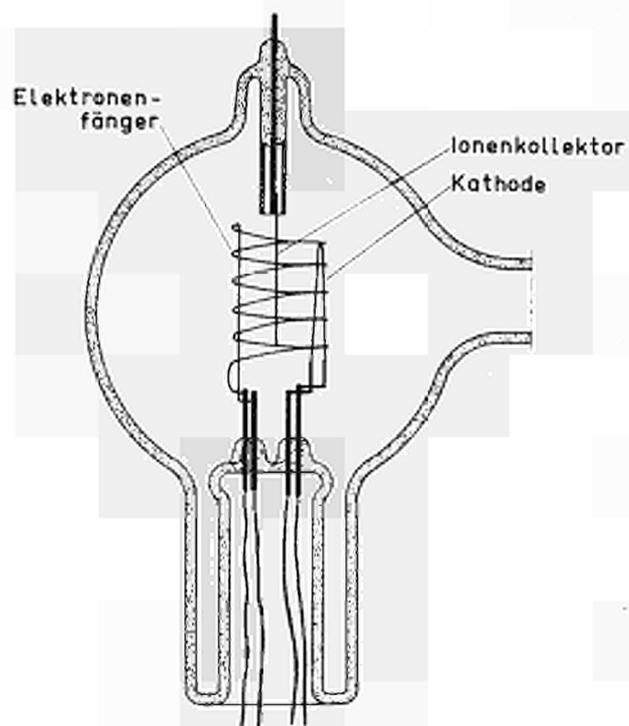


Abb. 9
Ionisationsvakuummeter nach Bayard
und Alpert [39].

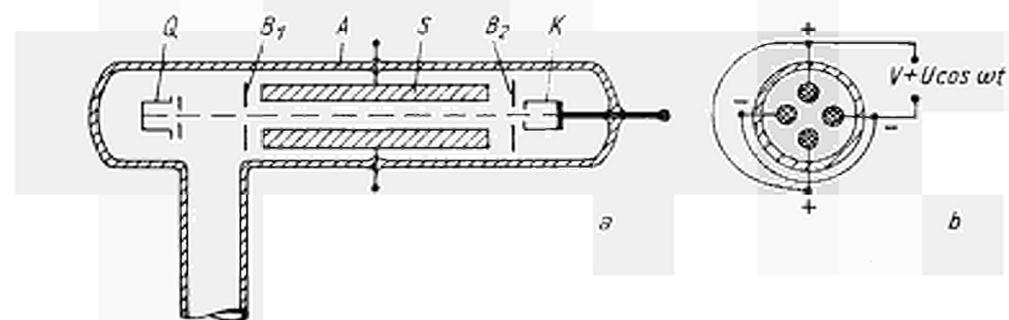


Abb. 10
Massenfilter nach Paul und Steinwedel [43]
A Analysatorraum, B₁ und B₂ Blenden zur Begrenzung des Ionenstrahls,
K Ionenkolektor, Q Ionenquelle, S Feldstäbe.

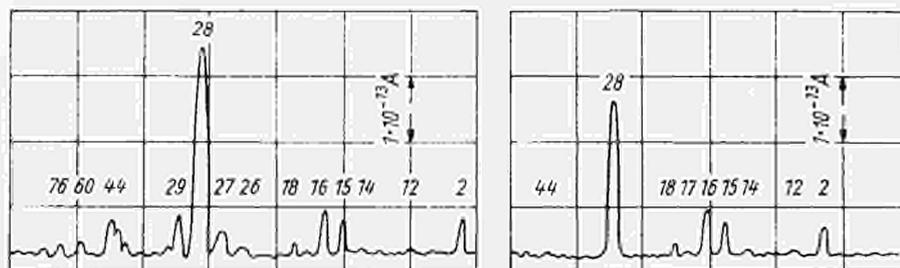


Abb. 11

Beispiel für ein Restgasspektrum in einem Glasrezipienten, mit einem Omegatron aufgenommen.

Zwischen Öldiffusionspumpe und Rezipient befand sich eine Sorptionsfalle nach Biondi. Nach dem Ausheizen betrug der Totaldruck $3,3 \cdot 10^{-5}$ Torr (linkes Spektrum); bei zusätzlicher Kühlung mit flüssigem Stickstoff sank der Totaldruck auf $4,7 \cdot 10^{-6}$ Torr (rechtes Spektrum).

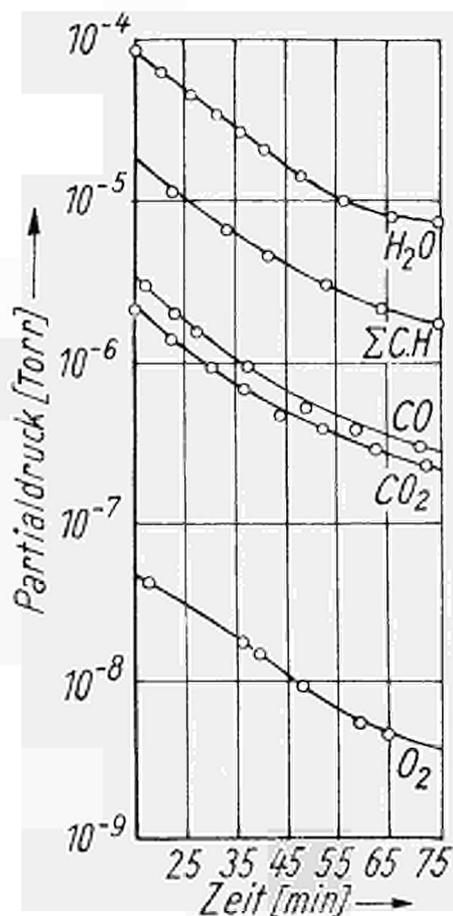


Abb. 12

Partialdrucke der wichtigsten Restgaskomponenten über einer Öldiffusionspumpe. Zeitlicher Druckverlauf in einem nicht ausgeheizten Edelstahlgefäß.

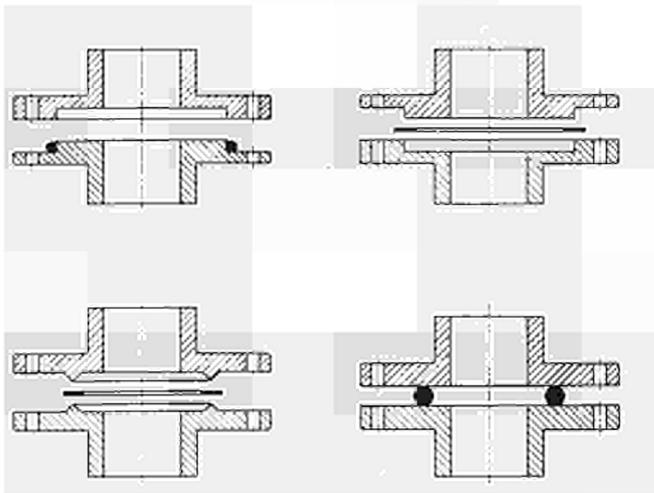


Abb. 13
Einige Flanschformen für lösbare Metall-
verbindungen.

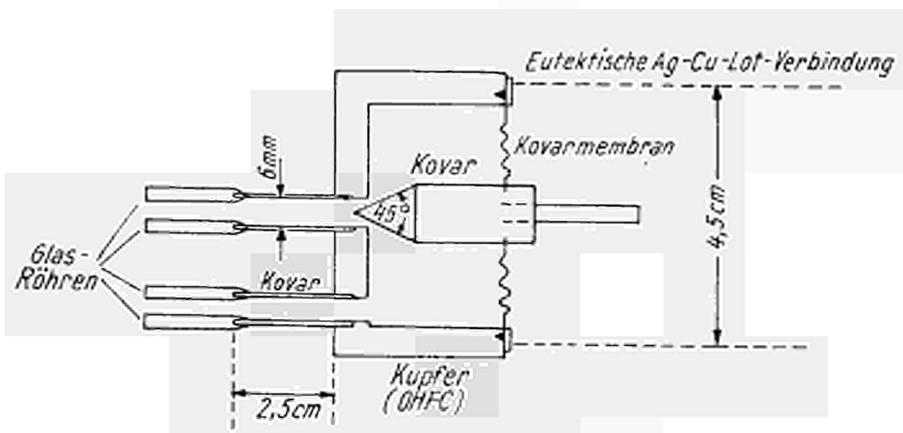


Abb. 14
Schema eines Alpert-Ventils

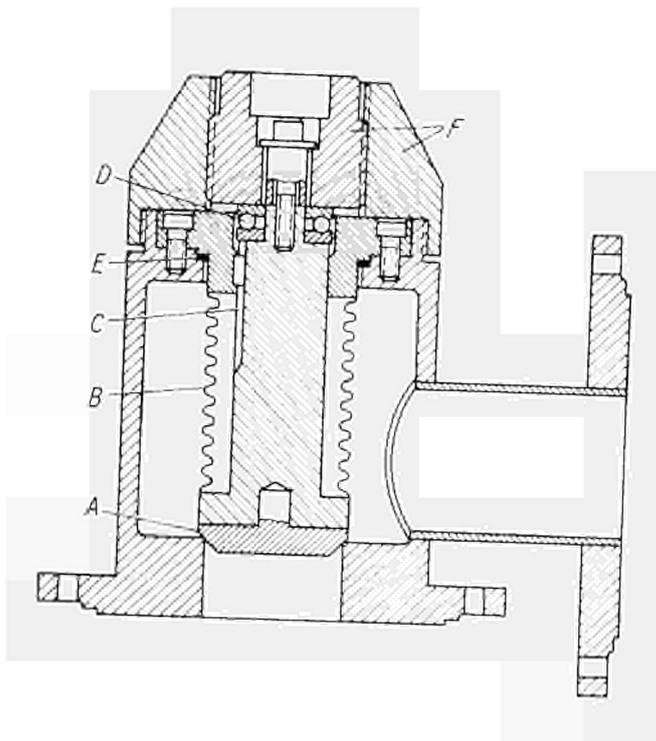


Abb. 15
 UHV-Ventil nach Lange [50]
 A Ventilteller, B Federungskörper aus
 Edelstahl, C Führungsnut, D Kugellager,
 E Golddrahtdichtung, F abnehmbare
 Ventilkappe.

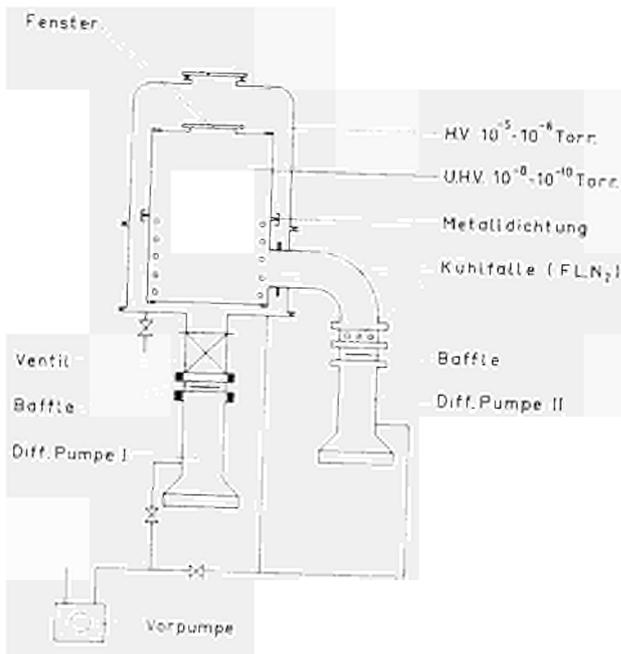


Abb. 16
 Beispiel für eine doppelwandige UHV-
 Anlage (schematisch).

CDNA00231DEC