

Eine Methode zur Messung geringster Ölbedeckungen in Vakuumsystemen

R. DOBROZEMSKY *, W. K. HUBER ** und F. VIEHBÖCK *

(Z. Naturforschg. 22 a, 549—553 [1967]; eingegangen am 20. Januar 1967)

To get information on extremely small organic deposits in ultra high vacuum systems the sensitivity of most of the conventional methods for thickness measurements is not high enough. On the other hand the radioactive tracer method has shown its high sensitivity and wide versatility in many fields. Tritium with a half life of 12.3 y and a mean β -energy of 5.4 keV was chosen as tracer isotope. A method is described for Tritium-labelling diffusion pump oils with specific activities up to 100 mC/g. Using the liquid scintillation counting technique one can detect deposits down to below 10^{10} molecules/cm². First results with this Tritium labelled pump fluid are given under different operating conditions in an all metal ultra high vacuum system.

Das Verhalten von Diffusionspumpentreibmitteln in Vakuumanlagen ist derzeit noch weitgehend ungeklärt. Einen Einblick in diese Verhältnisse kann man durch die Bestimmung der Ölbedeckung an verschiedenen Stellen in der Vakuumanlage gewinnen. Es werden verschiedene Methoden zur Messung der Ölbedeckung verwendet, z. B. interferometrische Methoden^{1, 2}, die Schwingquarzmethode³, Messung durch Ultraviolettsorptionsspektren des gesammelten Öles⁴ und direkte Wägung⁵. Eine zusammenfassende Darstellung findet sich in⁶. Die Nachweisempfindlichkeit bei all diesen Methoden liegt in der Größenordnung von 10^{-7} g/cm². Sie ist zu gering, um auch Ölbedeckungen von wesentlich weniger als einer Monoschicht zu erfassen. Dagegen lässt sich bei Verwendung von radioaktiv markierten Molekülen die Empfindlichkeit um einige Größenordnungen steigern. Bei Silikonölen kann durch Reaktorbestrahlung eine ausreichend hohe spezifische ³¹Si-Aktivität im Bereich mC/g hergestellt werden, wobei aber Störungen durch Strahlenschädigung und SZILLARD-CHALMERS-Effekt zu berücksichtigen sind. Experimente mit Si-31 markiertem Silikonöl wurden von CARTER et al.⁷ durchgeführt. Da die Halbwertszeit des ³¹Si nur 2,6 h beträgt, sind damit Langzeitversuche nicht möglich. C-14- und tritiummarkiertes

Pumpenöl ist auf synthetischem Wege herstellbar. Tritium kann aber auch direkt in eine vorliegende organische Substanz mittels der sogenannten WILZBACH-Methode⁸ eingebaut werden: Man lagert die zu markierende Substanz in einer Tritiumatmosphäre, wobei, angeregt durch die Zerfallsenergie des Tritiums, eine Austauschreaktion zwischen dem im Molekül gebundenen Wasserstoff und den gasförmigen Tritiumatomen stattfindet. Da die mittlere β -Energie von Tritium nur 5,4 keV beträgt, ist die Eigenstrahlungsdosis sehr klein. Sie beträgt nur 1,1 Mrad/Jahr bei einer spezifischen Aktivität von 10 mC/g. Das Arbeiten mit tritiummarkierten Substanzen erfordert im Vergleich zu mit Si-31 markierten bzw. auch C-14 markierten Substanzen wesentlich geringere Strahlenschutzvorkehrungen.

1. Herstellung des tritiummarkierten Pumpentreibmittels

In Vorexperimenten wurde die Möglichkeit untersucht, Tritium über die Li(n, α)-Reaktion und auch durch Kontakt mit einem Tritiumtitantarget in das Silikon-Diffusionspumpentreibmittel DC 704 (1,1,5,5-Tetraphenyl-1,3,3,5-Tetramethyl-Trisiloxan, Dow Corning) einzubauen. In beiden Fällen waren die erreichbaren spezifischen Aktivitäten zu gering.

⁴ W. M. LANGDON u. E. G. FOCHTMANN, Trans. 10th AVS Vac. Symp., The Macmillan Co., New York 1963, p. 128. — H. J. O'NEILL, W. M. LANGDON, J. FRERICHS u. A. SOMORA, J. Vac. Sci. & Techn. **3**, 273 [1966].

⁵ L. MAURICE, H. MOZIAN u. P. DUVAL, Le Vide **20**, 205 [1965]. — R. D. OSWALD u. D. J. CRAWLEY, Vacuum **16**, 623 [1966].

⁶ M. H. HABLANIAN u. A. A. LANDFORS, Trans. 9th AVS Vac. Symp., The Macmillan Co., New York 1962, p. 384.

⁷ J. G. CARTER, J. A. ELDER, R. D. BIRKHOFF u. A. K. ROECKLEIN, J. Vac. Sci. & Tech. **2**, 59 [1965].

⁸ K. E. WILZBACH, J. Amer. Chem. Soc. **79**, 1013 [1957].

* Physik-Institut, Reaktorzentrum Seibersdorf der Österreichischen Studiengesellschaft für Atomenergie GmbH, Seibersdorf, N.O.

** Balzers AG für Hochvakuumtechnik und Dünne Schichten, Balzers, Fürstentum Liechtenstein.

¹ J. RUE u. O. WINKLER, in M. AUWÄRTER, Ergebnisse der Hochvakuumtechnik, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart 1957.

² L. HOLLAND, L. LAURENSEN u. C. PRIESTLAND, Rev. Sci. Instrum. **34**, 377 [1963].

³ M. BAKER u. L. LAURENSEN, Vacuum **16**, 633 [1966]. — G. DÖRING, G. MARX u. G. SAUERBREY, Vakuum-Technik **15**, 245 [1966].



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

In einem weiteren Experiment wurden daher 50 g DC 704 mit 3 C gasförmigem Tritium in einem evakuierten Glasgefäß bei Raumtemperatur zur Reaktion gebracht. Die WILZBACH-Tritierung erfolgte dabei nur in einer dünnen Grenzschicht der am Boden des Gefäßes befindlichen Ölmenge, da infolge des kleinen Dampfdruckes des DC 704 keine nennenswerte Ölmenge in Dampfphase vorlag. Nach einer Reaktionszeit von 1500 h wurde eine spezifische Tritium-Aktivität von $1,33 \text{ mC/g}$ im Öl vorgefunden. Es konnte festgestellt werden, daß bei dieser Art der Tritierung die Austauschrate der eingesetzten Tritiummenge und der Reaktionszeit proportional ist.

Das tritierte Silikonöl war von gelöstem Tritium und flüchtigen Crackprodukten zu befreien. Diese Prozedur wurde in einer Diffusionspumpe ausgeführt. Da die Menge des markierten Öls zum Betrieb der Diffusionspumpe nicht genügte, wurde die Probe mit inaktivem DC 704 verdünnt. Der zeitliche Verlauf der spezifischen Aktivität während dieses Reinigungsprozesses wurde verfolgt und ist in Abb. 1 wiedergegeben. Man erkennt, daß sich nach einem starken Aktivitätsabfall in der ersten Stunde ein stationärer Zustand über sehr lange Zeiten einstellt. Das auf diese Weise tritierte Öl ist also nach dem Reinigungsprozeß auch für Langzeitversuche geeignet.

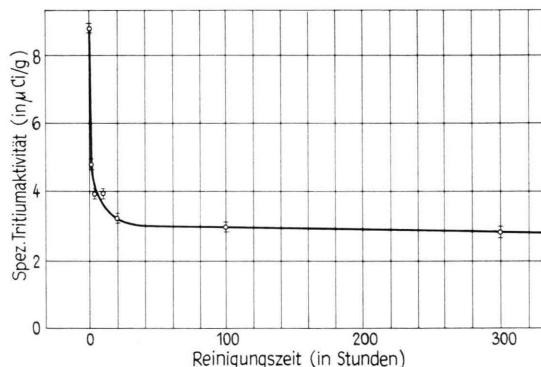


Abb. 1. Zeitlicher Verlauf der spezifischen Aktivität des Öls während des Reinigungsprozesses.

Bei dem eben beschriebenen Experiment konnte sich nur ein geringer Teil des Öls an der WILZBACH-Reaktion beteiligen, daher wurde erwartet, daß bei Erhöhung der Reaktionstemperatur und der damit verbundenen besseren Durchmischung des Tritiums mit dem Silikonöl die Austauschrate wesentlich gesteigert werden kann. Es wurde die folgende Austauschreaktion durchgeführt: 90 °C Tritium und eine Ölmenge von 400 g wurden bei ca. 280 °C eingesetzt. Als Reaktionsgefäß diente eine UHV-Diffusionspumpe, um die oben beschriebene Reinigung des Öls nach der Tritierung ohne Umfüllen des Öls durchführen zu können.

Diese Tritierapparatur, welche aus einem modifizierten UHV-Pumpstand (Balzers PST 650 UHV) besteht, wird in Abb. 2 schematisch wiedergegeben. Sie setzt sich wie folgt zusammen: Metalldiffusionspumpe

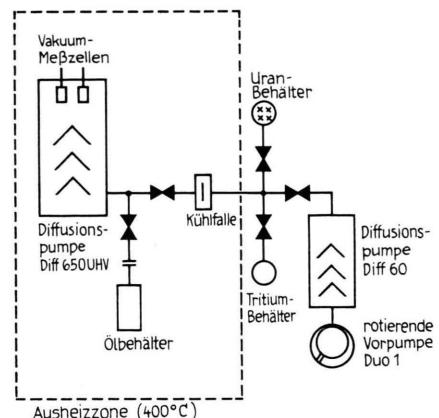


Abb. 2. Experimentelle Anordnung zur Markierung von Diffusionspumpenöl mit Tritium.

(650 l/sec) als Reaktionsgefäß, die über eine Boosterpumpe (60 l/sec) und eine Vorpumpe evakuierbar ist. Das Reaktionsgefäß enthält ein Piraninanometer und ein Ionisationsmanometer. Auf der Vorpumpe Seite der Diffusionspumpe ist eine Einrichtung, bestehend aus einem UHV-Ventil und einem Vorratsgefäß, zum Eindestillieren und Rückgewinnen der Ölprobe vorgesehen. Das Reaktionsgefäß ist durch ein UHV-Ventil gegenüber der übrigen Apparatur abzuschließen. Das Gaseinlaßsystem ermöglicht das Einlases von Tritium aus dem Vorratsbehälter bzw. die Tritiumrückgewinnung in den Uranbehälter. Zum Festhalten der Crack-Produkte bei der Tritiumrückgewinnung ist die Kühlfaile vorgesehen. Die für den Prozeß wichtigen Teile der Anlage sind ausheizbar (400 °C). Zur Durchführung der Reaktion wurden die 400 g DC 704 in das Reaktionsgefäß eindestilliert, danach wurden 90 C Tritium ($35 \text{ cm}^3 \text{ NDT}$) durch das Gaseinlaßsystem eingebracht und das Ventil geschlossen. Sodann wurde durch Einschalten der Heizung die WILZBACH-Tritierung begonnen und 500 h lang durchgeführt. Druck und Temperatur wurden hierbei überwacht. Ein Anstieg des Druckes infolge der Bildung von Crack-Produkten konnte während der Tritierung nicht festgestellt werden. Nach Ende der Tritierung wurde das in der Apparatur vorhandene Wasserstoffisotopengemisch in Uran gespeichert.

Anschließend wurde die Reinigung der Ölprobe durchgeführt, indem die 650 l/sec Diffusionspumpe nicht mehr als Reaktionsgefäß, sondern als Diffusionspumpe mit der tritierten Ölprobe als Treibmittel 400 h lang betrieben wurde. Nach dieser Reinigung wurde das Silikonöl herausdestilliert und die Aktivität dieser Probe zu

$$68 \pm 3 \text{ mC/g}$$

bestimmt. Das bedeutet, daß 32% des eingesetzten Tritiums nach der Reinigung im DC 704 gebunden sind. Durch Erhöhung der Reaktionstemperatur von 25 °C auf 280 °C konnte somit die Tritierungsrate um mehr als 2 Größenordnungen gesteigert werden. Bei der er-

reichten spezifischen Aktivität beträgt die Eigenstrahlungsdosis dieser Probe 7 Mrad pro Jahr.

Es erhebt sich die Frage, wie fest das Tritium im DC 704-Molekül eingebaut ist. Daher wurde ein Teil der tritiierten Ölprobe in organischen Lösungsmitteln bei hohem Verdünnungsgrad aufgelöst und das Lösungsmittel im Vakuum eingedampft. Als Lösungsmittel wurden Toluol, Cyclohexan, Dioxan, Äther und Benzol gewählt, wobei eine Probenserie bei 20 °C, eine weitere bei 50 °C gelagert wurde. Die Lösungen wurden zum Teil sofort, zum Teil erst nach einer bestimmten Lagerzeit (1 Woche bzw. 2 Monate) eingedampft. Die Aktivität der zurückbleibenden Ölproben wurde mit der eingesetzten Aktivität verglichen. Innerhalb der erreichbaren Fehlergrenze von 1% stimmen die nach dieser Behandlung im Öl vorgefundenen Aktivitäten mit den eingesetzten überein. Aus diesem Ergebnis kann geschlossen werden, daß die Tritiumaktivität fest im DC 704 gebunden ist. Das praktische Arbeiten mit flüssigem Szintillator wird dadurch sehr vereinfacht. Man hat z. B. von der Verdampfung des Szintillators her keine zusätzlichen Fehlerquellen zu erwarten. Diese Eigenschaften machen es ferner möglich, das tritierte DC 704 zur Reduzierung der Eigenstrahlungsdosis mit großen Mengen eines geeigneten Lösungsmittels verdünnt zu lagern und vor Gebrauch durch Abdampfen des Lösungsmittels zurückzugewinnen.

2. Meßverfahren

An den zu untersuchenden Stellen werden in der Vakuumapparatur Targetplättchen angebracht. Diese werden nach der Expositionszeit aus der Vakuumkammer entnommen und direkt in ein mit Szintillatorflüssigkeit gefülltes Meßfläschchen eingebracht. Löst sich die Ölschicht dabei vollständig vom Targetplättchen ab, so ergibt sich eine echte 4π -Meßgeometrie.

Mit dem gleichen Meßgerät kann auch die spezifische Aktivität des markierten Öls bestimmt werden. Hierzu ist allerdings notwendig, das markierte Öl entsprechend stark zu verdünnen, um in einen günstigen Zählratenbereich zu kommen.

Die Messung der Aktivität der tritiierten Ölproben erfolgte mit einem kommerziellen Flüssigszintillatorspektrometer (Tricarb-Liquid-Scintillation Spectrometer: Firma Packard Instr. International

S.A.) in den zugehörigen Standardmeßfläschchen aus Glas. Wir verwendeten einen Szintillator auf Toluobasis (4 g p-Terphenyl und 0,2 g POPOP auf 1 Liter Toluol). In Abb. 3 ist die Ansprechwahrscheinlichkeit dieses Szintillators als Funktion der eingebrachten Menge DC 704 für eine Szintillatormenge von 10 ml dargestellt. Daraus ist ersichtlich, daß auch bei großen Ölmengen, wie sie bei den Messungen gelegentlich notwendig waren, noch eine ausreichend hohe Ansprechwahrscheinlichkeit vorhanden ist.

Für die Bestimmung der spezifischen Aktivität des markierten Silikonöls erwies es sich als günstig, dieses mit inaktivem DC 704 durch Wägung zu verdünnen und die in 1 oder 2 Stufen verdünnten Proben direkt in die Meßfläschchen einzuhängen. Auf diese Weise durchgeführte Aktivitätsbestimmungen sind auf 2% reproduzierbar.

Die Messung der Tritiumaktivität auf den Targetplättchen ging, wie bereits erwähnt, so vor sich, daß die Targetplättchen unmittelbar nach Belüften der Vakuumapparatur in separate Meßfläschchen, die bereits mit Szintillatorflüssigkeit gefüllt waren, eingegeben wurden.

Findet im Toluol-Szintillator an den Targetplättchen bzw. an der Glaswand der Meßfläschchen oder am Deckel, der mit einer Aluminiumschicht bedeckt ist, eine Adsorption der Öl moleküle statt, so wird die 4π -Meßgeometrie teilweise oder vollständig gestört und es treten unreproduzierbare Zählratenverluste auf. Zur Untersuchung, ob sich ein solcher Effekt bei geringen Mengen von DC 704 im Szintillator ausbildet, wurden einige Kupferprobenplättchen in einer Aufdampfanlage mit Ölschichten von 10^{12} bis 10^{14} Molekülen/cm² be-dampft und im flüssigen Szintillator gemessen. Nach dieser Messung wurden die Kupferplättchen aus den Meßfläschchen herausgenommen und die im Szintillator zurückbleibende Aktivität bestimmt. Es ergab sich hierbei keine merkbare Abnahme der Aktivität. Die herausgenommenen Kupferplättchen wurden in neue Meßfläschchen eingebracht, wo sie nur eine geringe Restaktivität von ca. 1% der ursprünglichen Aktivität zeigten. Diese kann qualitativ durch die beim Manipulieren mitgeführte Flüssigkeitsmenge erklärt werden. Es ist somit erwiesen, daß die ursprünglich auf den Probenplättchen adsorbierten Öl moleküle im flüssigen Szintillator vollständig in Lösung gehen, und zwar auch bei der relativ niedrigen Temperatur von 10 °C, wie sie im Betrieb des Flüssig-Szintillator-Spektrometers vorliegt.

Ferner konnte festgestellt werden, daß die Ansprechwahrscheinlichkeit des Flüssig-Szintillator-Spektrometers durch die eingebrachten Targetplättchen nur um ca. 10% vermindert wird. Es ist daher nicht notwendig, die Probenplättchen vor der Tritium-Bestimmung wieder aus den Meßfläschchen herauszunehmen.

Bei einem Leerwert von weniger als 20 cpm, wie er mit Meßfläschchen aus Glas ohne Schwierigkeit erreichbar ist, können nach Meßzeiten von einigen Minuten Ölbedeckungen von einigen 10^{10} Molekülen DC 704 pro cm² gemessen werden.

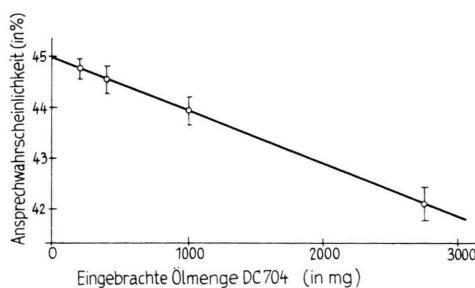


Abb. 3. Ansprechwahrscheinlichkeit des Szintillators (10 cm³) in Abhängigkeit der eingebrachten Ölmenge.

3. Erste Meßergebnisse

Die ersten Versuche mit dem so tritierten Diffusionspumpentreibmittel DC 704 wurden an einer Ganzmetall-Ultrahochvakuumapparatur (Balzers PST 650 UHV) durchgeführt. Die Versuchsanordnung ist in Abb. 4 gezeigt. Es werden zwei Diffusionspumpen in Serie verwendet, das markierte Pumpenöl aber nur in die eigentliche Ultrahoch-

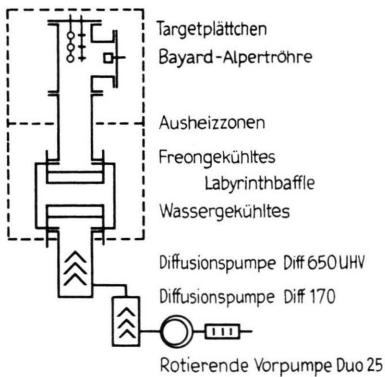


Abb. 4. Ultrahochvakuumsystem zur Messung der Oberflächenkontaminierung mit Diffusionspumpenöl.

vakuumdiffusionspumpe eingefüllt. Die Targetplättchen aus rostfreiem Stahl waren an verschiedenen Stellen im Rezipienten angeordnet. Anfangs wurde ein Rezipient mit einem Volumen von ca. 5 l benutzt und später wurde zwischen dem Baffle und dem Rezipienten ein Rohrstück mit dem Durchmesser des Rezipienten eingefügt. Dieses Verbindungsstück war notwendig, um den Rezipienten ausheizen zu können, während der obere Teil des Baffles gekühlt wurde. Die Ultrahochvakuumdiffusionspumpe Diff 650 UHV wurde mit der normalen Menge DC 704 mit einer spezifischen Aktivität von 3,5 mC/g gefüllt. Die Nachweisgrenze war dabei noch hoch genug, um Ölbedeckungen von weniger als $5 \cdot 10^{11}$ Moleküle/cm² bzw. $4 \cdot 10^{-10}$ g/cm² nachweisen zu können. Einzelne Probenplättchen konnten unabhängig vom normalen Ausheizzyklus durch Erhitzen entgast werden. Die Ultrahochvakumanlage wurde unter den im folgenden Abschnitt beschriebenen Ausheiz- und Arbeitsbedingungen betrieben. Nach jedem Pumpzyklus wurden die Targetplättchen entfernt und ihre Aktivität wie oben beschrieben gemessen.

Bei den ersten Versuchen unmittelbar nach Einfüllen des DC 704 Pumpentreibmittels wurden Ölbedeckungen von etwa $2 \cdot 10^{15}$ Molekülen/cm² festgestellt. Nach einigen Tagen Konditionierungszeit

reduzierte sich dieser Wert auf $5 \cdot 10^{14}$ Moleküle/cm². Ein solcher Pumpzyklus dauert durchschnittlich 12 h, wobei Rezipient und Baffle 6 bis 8 Stunden lang bei 200 °C ausgeheizt wurden. Eine Erhöhung der Ausheiztemperatur auf 300 °C bewirkte eine Verringerung der Ölbedeckung auf 10^{14} Moleküle/cm².

Wurden nach Abkühlen des Rezipienten die Targetplättchen bei etwa 400 °C entgast, betrug der Ölbedeckungsgrad $5 \cdot 10^{12}$ Moleküle/cm². Daran anschließend wurde das zeitliche Verhalten der Wiederbedeckung gemessen, die Resultate sind in Abb. 5 wiedergegeben. Die Wiederbedeckungsrate des Targets bei Raumtemperatur beträgt $1 \cdot 10^{13}$ Moleküle

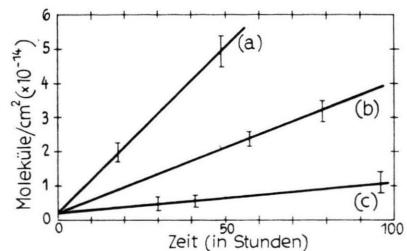


Abb. 5. Zeitabhängigkeit der Oberflächenbedeckung mit DC 704. a) Testrezipient direkt über dem Baffle, b) Testrezipient über ein Rohrstück mit dem Baffle verbunden, c) wie b) aber oberes Baffle auf -10 °C gekühlt.

pro cm²/h (Kurve a, Abb. 5), wenn der Rezipient direkt über dem Baffle angebracht ist. Durch Zwischen schaltung eines 20 cm langen Rohrstückes zwischen Baffle und Rezipient konnte die Bedeckungsrate auf kleiner als $5 \cdot 10^{12}$ Moleküle/cm²/h reduziert werden (Kurve b, Abb. 5). Wenn man den Rezipienten ausheizt und gleichzeitig das Baffle auf Temperaturen zwischen -10 °C bis -20 °C kühlte, erreicht man Wiederbedeckungsraten von weniger als 10^{12} Molekülen/cm²/h. Wie man aus dem Diagramm (Kurve c, Abb. 5) ersehen kann, genügt bereits eine Baffle-Temperatur von -10 °C, um die Ölbedeckung über Zeiträume von 100 Stunden unter 10^{14} Molekülen pro cm² zu halten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß diese ersten Meßergebnisse bereits die erwartete Empfindlichkeit dieser Methode bestätigt und die großen Anwendungsmöglichkeiten gezeigt haben. Die Methode ist hierbei natürlich nicht auf das Silikon-Pumpentreibmittel DC 704 beschränkt, sondern kann auch auf andere Diffusions- und auch Vorpumpenöle angewendet werden. Infolge ihrer hohen Empfindlichkeit lassen sich mit dieser Methode auch experimentelle Daten über Vakuumgrundlagenprobleme er-

halten, wie z. B. Transportvorgänge kondensierbarer Gase und Wirksamkeit von Baffle-Anordnungen.

Ein Teil der Untersuchungen wurde im Rahmen eines Balzers-Forschungsauftrages im Physikinstitut des Reaktorzentrums Seibersdorf durchgeführt.

Die Autoren möchten Herrn Dr. E. A. TRENDELENBURG für die anregenden Diskussionen und den Herren Dipl.-Ing. H. MANDL und E. BÜCHEL für ihre Hilfe bei der Durchführung der Experimente danken.

Die Ionenbahnen dritter Näherung in magnetischen Sektorfeldern einschließlich ihrer Streufelder *

RAINER LUDWIG

II. Physikalisches Institut der Universität Gießen

(Z. Naturforschg. **22 a**, 553—565 [1967]; eingegangen am 25. November 1966)

Für das homogene magnetische Sektorfeld mit gekrümmten Feldbegrenzungen und schrägem Ein- und Austritt wird die Gleichung des Nebenstrahls eines Ionenbündels mit radialem und axialer Öffnung relativ zu dessen Mittelstrahl in dritter Näherung bestimmt. Damit werden die Bildfehlerkoeffizienten 3. Ordnung gewonnen. Die Streufelddeiwirkungen werden ebenfalls in dritter Näherung behandelt, wobei die im Streufeldbereich stattfindende Gesamttablenkung durch das Modell eines „Ersatzstrahlenganges“ mit Knickung und Versetzung des Strahls an einer zu bestimmenden „Ersatzfeldgrenze“ beschrieben wird. Numerische Beispiele werden angegeben. Bisher^{1—12} waren entsprechende Rechnungen nur bis in 2. Näherung durchgeführt.

Fliegt ein Ion durch ein magnetisches Sektorfeld mit ebenen Polschuhen, so daß sein Geschwindigkeitsvektor v mit der Mittelebene des Magnetfeldes einen kleinen Winkel β einschließt (Abb. 1), dann erfährt seine im feldfreien Raum zunächst geradlinige Bahn schon vor der geometrischen Polschuhgrenze durch das Streufeld eine stetig zunehmende Krümmung, die im homogenen Teil des Feldes einen konstanten Wert erreicht. Auf der Austrittsseite nimmt die Krümmung wieder stetig bis auf den Wert Null ab. Für eine Bahnberechnung muß die Feldstärke als Funktion des Ortes in der Umgebung der Bahn bekannt sein. Für die Streufeldbereiche ist eine entsprechende Feldverteilung zunächst nicht bekannt und kann rechnerisch nur in Sonderfällen ermittelt werden. Man wird daher versuchen, mit experimentell gemessenen Streufeldverteilungen das Problem zu lösen. Die Bahnberechnung erfolgt daher zweckmäßig getrennt, zunächst für den homogenen Feldbereich (bekannte Feldverteilung), dann für den Streufeldbereich.

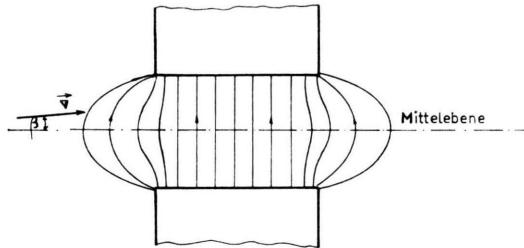


Abb. 1. Verlauf der Feldlinien bei ebenen Polschuhen.

1. Die Nebenstrahlgleichung des homogenen Sektorfeldes

Unter Vernachlässigung des Streufeldes eines magnetischen Sektorfeldes entsteht ein idealisiertes, an den Grenzen der Magnetpolshuhe scharf abgeschnittenes Magnetfeld. Außerhalb der geometrischen Grenzen der Polshuhe herrscht dann kein Feld, innerhalb die konstante Feldstärke $B_z = B_0$ und $B_x = B_y = 0$. Die geometrische Begrenzung der

* Auszug aus D 26.

¹ L. A. KÖNIG u. H. HINTERBERGER, Z. Naturforschg. **10 a**, 877 [1955] u. **12 a**, 377 [1957].

² L. A. KÖNIG, Z. Naturforschg. **10 a**, 652 [1955].

³ M. COTTE, Ann. Phys. **10**, 333 [1938].

⁴ R. HERZOG, Z. Naturforschg. **10 a**, 887 [1955].

⁵ R. HERZOG, Z. Phys. **97**, 596 [1935].

⁶ R. HERZOG, Acta Phys. Austr. **4**, 431 [1950].

⁷ A. J. DEMPSTER, Phys. Rev. **11**, 316 [1918].

⁸ H. WOLLMAN u. H. EWALD, Nucl. Instr. & Meth. **36**, 93 [1965].

⁹ W. PLOCH u. W. WALCHER, Z. Phys. **127**, 274 [1950].

¹⁰ N. D. COGGESHALL, J. Appl. Phys. **18**, 855 [1947].

¹¹ C. E. BERRY, Rev. Sci. Instrum. **27**, 849 [1956].

¹² H. A. ENGE, Rev. Sci. Instrum. **35**, 278 [1964].