

tungs- und Energiefokussierungskurven am Doppelfokussierungsort^{14, 15}.

Schließlich hat sich jetzt herausgestellt, daß man durch Übergang zu bisher nicht verwendeten Typen von Toroidkondensatoren^{6, 16} mit $R_e' \neq 1$ doch für alle Massen doppelfokussierende Massenspektrographen mit teleskopischem Strahlengang und ohne Zwischenbilder in den Feldern bauen kann, für welche alle Bildfehlerkoeffizienten A_{11} , A_{12} , A_{22} , A_{33} für eine Stelle der quadratischen Massenskala verschwinden¹⁷. Bei diesen kann man entsprechend mit relativ kleinen Ablenkwinkeln in den Feldern auskommen

(Φ_e etwa $= 30^\circ$, Φ_m etwa $= 90^\circ$). Der Differentialquotient $R_e' = (dR/dr)_{r=a_e, z=0}$ gibt an, in welchem Maße sich der axiale Krümmungsradius R der Potentialflächen im Innern des Kondensators ändert, wenn man von der Mittelbahn ausgehend in radialer Richtung fortschreitet. Ein entsprechender Apparat befindet sich im Aufbau.

¹⁵ H. LIEBL, Optik, im Druck. — H. LIEBL, Z. Naturforschg. **13 a**, 490 [1958].

¹⁶ H. EWALD, Z. Naturforschg. **14 a**, 198 [1959].

¹⁷ H. LIEBL u. H. EWALD, Z. Naturforschg. **14 a**, 199 [1959].

Aufbau und Erprobung eines doppelfokussierenden stigmatistisch abbildenden Massenspektrographen

Von G. SAUERMANN* und H. EWALD

Aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule München
(Z. Naturforschg. **14 a**, 137—141 [1959]; eingegangen am 11. Oktober 1958)

Es wurde ein doppelfokussierender Massenspektrograph gebaut, der an Stelle des üblichen Zylinderkondensators mit einem Toroidkondensator ausgerüstet ist, um zusätzlich zur Doppelfokussierung in radialer Richtung stigmatistische Abbildung der Spaltpunkte in die Punkte der Massenlinien zu erhalten. Die Korrektur des zum Quadrat des axialen Öffnungswinkels α_z proportionalen radialen Bildfehlers f_{33} wurde durch eine zusätzliche Zylinderkrümmung der Austrittsirnfläche des Toroidkondensators erreicht. Es konnten damit reproduzierbar scharfe und sehr intensive Massenlinien erhalten werden. Das erreichte Auflösungsvermögen betrug bei einem Ablenkradius von $a_e = 120$ mm im elektrischen Feld etwa 25 000. Infolge der Verkürzung der Massenlinien durch die stigmatistische Abbildung betragen die Belichtungszeiten für die intensivsten Linien der Spektren jetzt weniger als 0,1 sec.

Im vorangehenden Artikel¹ wird über die Berechnung eines doppelfokussierenden stigmatistisch abbildenden Massenspektrographen berichtet, im folgenden über die konstruktive Ausführung des Apparates und seine Erprobung.

I. Aufbau des Apparates

1. Das Vakuumgehäuse

Die Apparatur besteht im wesentlichen aus vier Teilen: einer Ionenquelle, einem Kopfteil mit dem Eintrittsspalt-System, einem Feldteil mit dem elektrischen Feld und schließlich aus einer runden Magnetfeldkassette (Abb. 1). Um eine sichere Evakuierung und gute Justierbarkeit zu gewährleisten, wurden die einzelnen Teile in schon früher² erprobter Weise sehr massiv ausgeführt. Kopfteil und Feldteil sind aus Al-Blöcken herausgearbei-

tet und als oben offene Wannen ausgebildet, die mit Al-Deckeln mit aufgespannten Rundgummidichtungen verschlossen werden können. Alle Hauptteile sind starr miteinander verschraubt, die Dichtung erfolgt durch nahtlose gegossene Rundgummidichtungen. Die Wannen und die Magnetkassette sind möglichst einfach gehalten und ergeben das Vakuumgehäuse der Apparatur. Mit Ausnahme des elektrischen Feldes, das in seiner Wanne fest montiert ist, ragen die Blenden, das Spaltsystem und die Auffänger von der Seite bzw. von unten in den Strahlengang hinein. Genau gearbeitete Paßansätze in den Bohrungen gewährleisten eine gut reproduzierbare Montage, die mit wenigen Handgriffen vorgenommen werden kann. Die einzelnen Bauteile sind durch diese Anordnung leicht zugänglich und lassen sich von oben genau in ihrer Lage zueinander ausmessen.

Der etwa 1000 kg schwere Elektromagnet (hergestellt von der Firma W. Binder/Villingen) mit der Magnetfeldkassette ruht auf einem massiven Eichenholztisch. Die anderen Hauptteile sind in einem Aluminiumgestell

* Gekürzte Fassung der Dissertation von G. SAUERMANN, TH München 1958.

¹ H. EWALD, H. LIEBL u. G. SAUERMANN, Z. Naturforschg. **14 a**, 129 [1959].

² H. EWALD, Z. Naturforschg. **1**, 131 [1946].



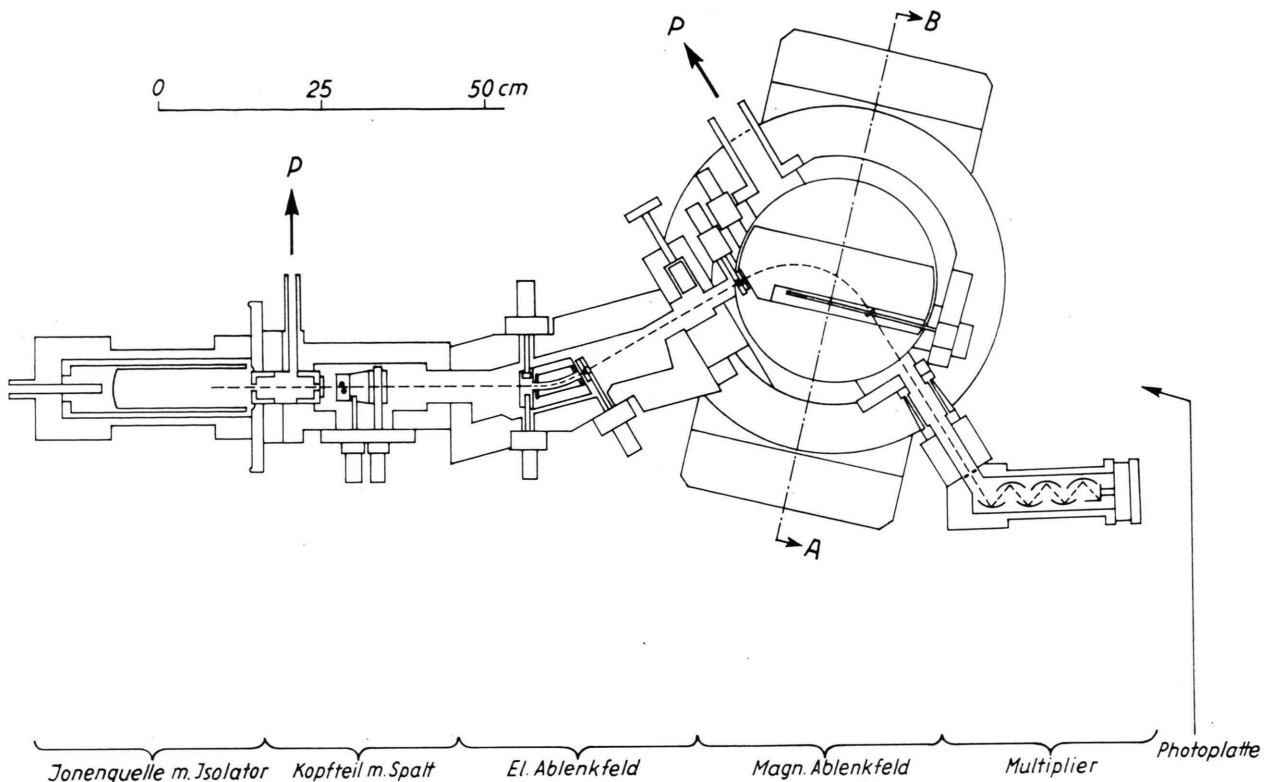


Abb. 1. Aufbau der Apparatur.

mit Stahldrähten möglichst verspannungsfrei aufgehängt. Dies hat den Vorteil, daß jeder Hauptteil für sich einzeln ausgebaut werden kann, ohne andere Teile mit demontieren zu müssen.

Die Evakuierung der Apparatur erfolgt unter Zwischenschaltung von Baffles durch drei Öldiffusionspumpen von je 100 Liter/sec Saugleistung. Die erste Pumpe evakuiert die Ionenquelle und den Raum vor dem Eintrittsspalt, die zweite den elektrischen Feldteil und die dritte die Magnetfeldkassette. Jede Pumpe läßt sich durch ein Flachschieberventil einzeln abtrennen, ebenso der Magnetteil von der übrigen Apparatur.

Da die Feldlinien des elektrischen und des magnetischen Feldes genau aufeinander senkrecht stehen müssen, ist die Möglichkeit vorgesehen, kleine Justierbewegungen durch eine Drehung des ganzen Feldteiles gegenüber der Magnetkassette um den Ionenstrahl als Achse auch während des Betriebes durchführen zu können. Durch Druckschrauben läßt sich diese Verstellung reproduzierbar betätigen.

Um eine einfache Justierung der Ionenquelle zu ermöglichen, wurde der Kopfteil der Apparatur, der den Walzenspalt enthält, geteilt und die Kathode der Ionenquelle in einem eigenen beweglichen Flansch untergebracht. Dieser Flansch läuft in einer horizontalen Führung und kann von außen bei gelüfteter Apparatur verstellbar werden. Unmittelbar hinter der Kathode ist ein

kleiner mechanischer Verschluss zur Unterbrechung der Ionenstrahlen angebracht, der von außen durch einen Hebel betätigt werden kann.

2. Das elektrische Toroidfeld

2.1. Aufbau des Kondensators

Beim Aufbau des zweiten Toroidkondensators¹ wurden die Abmessungen des von EWALD und LIEBL beschriebenen ersten Kondensators^{3,4} beibehalten, im wesentlichen auch die Konstruktion. Der mittlere Ablenkradius ist $a_e = 120$ mm, das Verhältnis $a_e/R_e = 1,25$, der Plattenabstand 8 mm. Die Platten sind etwa 80 mm lang und 50 mm hoch; der Radius q der Austrittskrümmung ist 123 mm. Den Aufbau und die Abmessungen dieses korrigierten Kondensators zeigt die Abb. 2. Die Grundplatte (1) ist mit den beiden seitlichen Halterungen aus einem Messingblock gefräst. An diesen seitlichen Halterungen sind Isolierplatten (4) aus Trolitul angeschraubt, die die eigentlichen Kondensatorplatten (2), (3) halten. Die Abstände zwischen den geerdeten Halterungen und den Kondensatorplatten betragen einige Millimeter, so daß bei einer Kondensatorspannung von

³ H. EWALD u. H. LIEBL, Z. Naturforschg. **10 a**, 872 [1955].

⁴ H. EWALD u. G. SAUERMANN, Z. Naturforschg. **11 a**, 173 [1956].

rund ± 1000 V gegen Erde keine Überschläge zu befürchten sind. Um eine genaue Justierung zu ermöglichen, ist nur die eine Platte starr verschraubt (6), die andere läßt sich durch vier Justierschrauben (5) bewegen; Druckfedern halten die Platte jeweils im gewünschten Abstand fest. Um eine Dejustierung der Platten durch Nachgeben der Federn sicher zu verhindern, ist eine Sicherungsschraube (7) in der Plattenmitte angebracht, die nach erfolgter Justierung festgezogen wird.

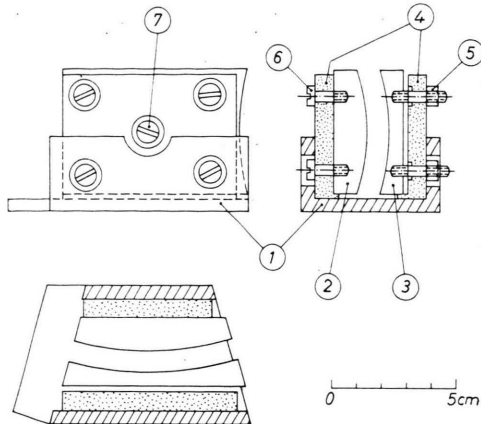


Abb. 2. Aufbau des Toroidkondensators.

Die Justierung erfolgte zunächst durch ein möglichst genaues Ausmessen des Plattenabstandes mit einer Schublehre, besser ist aber die Verwendung eines speziellen Innenmewerkzeuges.

Diese ganze Anordnung ist auf einem Schlitten mit Schwalbenschwanzführung montiert und läßt sich von außen auch während des Betriebes quer zur Strahlrichtung mit einer Mikrometerschraube bewegen. Durch eine weitere Stellschraube, die allerdings nur bei geöffneter Apparatur betätigt werden kann, läßt sich das elektrische Feld in einem kleinen Winkelbereich von etwa $\pm 0,3^\circ$ um eine horizontale Achse quer zur Strahlrichtung verkippen.

An der Eintritts- und Austrittsseite sind zur Streufeldbegrenzung geerdete Blenden an der Grundplatte angeschraubt, deren Abmessungen und Abstände von den Elektroden so gewählt sind, daß die effektive Länge des Kondensators genau gleich der geometrischen Kondensatorlange ist. Dabei ist die Blende auf der Austrittsseite ebenfalls im gleichen Maß wie die Stirnfläche der Kondensatorplatten zylindrisch gekrümmt. Die Abmessungen dieser Blenden wurden aus den von HERZOG⁵⁻⁷ angegebenen Diagrammen entnommen. Die Längslöcher, die in der Mitte der Blenden zum Durchtritt der Ionen angebracht sind, haben axial keine geraden Kanten, sondern sind den axialen Krümmungen der Elektroden angepaßt.

⁵ R. HERZOG, Arch. Elektrotechnik **29**, 790 [1935].

⁶ R. HERZOG, Z. Phys. **97**, 596 [1935].

⁷ R. HERZOG, Phys. Z. **41**, 18 [1940].

* Abb. 3, 5 und 6 auf Tafel S. 140 a, b.

2.2. Die Herstellung der Kondensatorplatten

Bei der Herstellung und Montage der Toroidkondensatoren mußte sorgfältig darauf geachtet werden, daß die Symmetrieebenen ($z=0$)¹ der beiden Elektroden genau zusammenfallen. Bei der Herstellung des zweiten Kondensators mit zylindrisch gekrummtter Austrittsstirnflache war zudem noch sicherzustellen, daß die Achse der Zylinderkrümmung genau in der Symmetrieebene liegt. Die Messingrohlinge der Elektroden wurden einzeln mittels geeigneter Haltevorrichtungen (Abb. 3*) auf einem horizontalen Drehtisch eingespannt, und zwar mit den ungefähren Entfernungen r_a bzw. r_b (s. Anm.¹) von der vertikalen Drehachse des Drehtisches. Der Drehtisch selber wurde auf dem eigentlichen Arbeitstisch der Frsbank so befestigt, daß seine vertikale Drehachse um den Betrag $r_1=r_a-R_a$ bzw. $r_2=r_b-R_b$ seitlich gegen die horizontale Drehachse des Schlagstahles verschoben war. Dieser Schlagstahl hatte von der horizontalen Drehachse einen Spitzenabstand von $R_a=9,2$ cm (nach innen zeigend) bzw. $R_b=10,0$ cm (nach außen zeigend). Während der Schlagstahl in Richtung der axialen Hauptkrummungskreise umlief, wurde das Werkstück sehr langsam mit Hilfe des Drehtisches horizontal um dessen Achse herumgeführt und so auch die radiale Krümmung der Torusflachen hergestellt. Nach der Fertigstellung der zweiten Torusflache wurde auch die erste Elektrode wieder in die Haltevorrichtung eingesetzt, so daß der genaue Sollabstand von $r_b-r_a=8$ mm der Platten gewährleistet war. Dann wurde der Drehtisch mit der gesamten Haltevorrichtung um einen entsprechenden Winkel um seine vertikale Achse gedreht, um die zylindrische Krümmung der Austrittsstirnflache ausschlagen zu können (Spitzenabstand des Stahles $q=123$ mm). Zwischen der Herstellung der Torusflachen und der Herstellung der Zylinderkrümmung auf der Austrittsseite wurde die Höheneinstellung der gesamten Arbeitsanordnung nicht verändert. Darauf wurden beide Elektroden noch in der Haltevorrichtung gemeinsam oben und unten abgefräst, um für die Montage genaue Bezugsebenen zu haben. Schließlich wurden beide Elektroden um genau 180 Grad verdreht, unter Vermeidung von Relativverschiebungen in ihre Halterungen eingeschraubt und unter dem richtigen Winkel die ebenen Eintrittsstirnflachen gemeinsam angefrast.

Da durch geeignete Dimensionierung der Halterung und der Frsstahle ein Schwingen der ganzen Anordnung vermieden wurde, konnte nach der Fertigstellung eine Genauigkeit der entscheidenden Maße auf 0,05 mm garantiert werden. Bei dem geringen Vorschub beim Vorgang des Ausschlagens und ganz leichter Nachpolitur der Ablenkplatten konnten gut spiegelnde Oberflächen erzielt werden**.

Bei der Montage der Kondensatorplatten und der Erdungsblenden wurde Sorgfalt auf genaue Ausrich-

** Die hier beschriebene Herstellung der Kondensatorplatten erfolgte auf Vorschlag von Herrn Oberwerkmeister ZIEGLER, der sie auch in seiner Werkstatt durchführte.

tung der Platten gelegt, um ein Toroidfeld ohne Verzerrungen zu bekommen. Bei der Anbringung der gekrümmten Austrittsblende wurde darauf geachtet, daß die Achse der Blendenkrümmung genau in der Symmetrieebene der Kondensatorplatten liegt. Aus diesem Grunde wurde die Krümmung der Austrittsblende auf der Drehbank hergestellt, die Blende dann bis zur Berührung an die Stirnflächen der Kondensatorplatten herangeschoben und in die Zylinderkrümmung eingepaßt, unter gleichzeitiger ebener Anlage an die seitlichen Halterungen der Grundplatte (1 in Abb. 2). Nachdem die Löcher für die Paß-Stifte gebohrt worden waren, wurden Abstandsstücke von 1,40 mm Dicke zwischen die Halterungen und die Blende eingesetzt.

3. Das magnetische Sektorfeld

Der Aufbau des magnetischen Feldes geht aus Abb. 4 hervor. Es wurde ein Doppeljochmagnet verwendet. Aus Gründen der einfacheren Herstellung wurde bei mög-

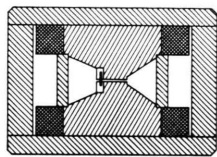


Abb. 4. Schnitt durch den Magneten (Schnitt A—B in Abb. 1).

lichst vielen Bauteilen Rotationssymmetrie angestrebt. Dies machte sich vor allem bei der Herstellung der Polschuhe und der Spulen vorteilhaft bemerkbar.

Die Polschuhe sind in den äußeren Teilen zylindrisch und erst in der Nähe der inneren Polschuhenden auf die eigentliche Sektorform abgeschragt. Die Eintrittsseite und die Austrittsseite des Sektorfeldes sind geradlinig begrenzt. Eine vertikale Ausnehmung auf der Austrittsseite dient zur Aufnahme der Photoplatzenhalterung. Die eigentliche Vakuumkammer wird durch einen Messingring von 380 mm Außendurchmesser, 175 mm Höhe und 40 mm Wandstärke gebildet. Die Polschuhe sind am Übergang vom zylindrischen Teil zum abgeschragten Teil etwas abgesetzt, so daß an dieser Stelle ein genauer Paßsitz auf dem Messingring gewährleistet ist und außerdem der nahtlose Dichtungsring untergebracht werden kann. Polschuhe und Messingring sind so genau gearbeitet, daß bei festem Sitz der Polschuhe auf dem Messingring die beiden Polschuhflächen exakt im Abstand von 5 mm parallel zueinander sind und die senkrechten Ein- und Austrittsflächen jeweils genau in einer Ebene liegen. Oberhalb und unterhalb des Messingringes sind die Erregerspulen von je 8000 Windungen und 400 Ohm Widerstand untergebracht.

Die Wandstärke des Messingringes der Kammer ist so stark gewählt, daß die notwendigen Flansche und Hilfsapparate daran verschraubt werden können. Die Öffnung für einen Pumpenansatz und für den Multiplieransatz sind so groß gehalten, daß man mit der Hand in den Vakuumraum hineinfassen kann, um dort Reparaturen vorzunehmen bzw. die Polschuhflächen zu reinigen, ohne den Magneten demontieren zu müssen. Der

Messingring ist gegen die Polschuhe beliebig verdrehbar; es läßt sich auf diese Weise der Eintrittswinkel der Strahlen in das Magnetfeld schon bei der Montage genau einstellen.

Im Pumpenansatz seitlich an der Magnetkammer ist in der Mittelebene eine kleine 6 V-Glühlampe untergebracht, mit der die Photoplatte durch den Polschuhspalt hindurch belichtet werden kann. Bei geeigneter Belichtungszeit erscheint der Luftspalt des Magneten als ein 5 mm breiter grauer Streifen auf der Photoplatte, auf dem sich die stärksten Linien eines gegebenenfalls aufgenommenen Massenspektrums gut abheben. So kann auf einfache Weise die richtige Lage der kurzen Linien in bezug auf die Mittelebene zwischen den Polschuhen kontrolliert werden.

4. Eintrittsspalt, Blenden und Kontrollauffänger

Der Eintrittsspalt des Apparates wurde ähnlich wie früher⁸ als verkipptbarer Walzenspalt ausgebildet. Die ganze Spaltanordnung, die Öffnen und Schließen, horizontale Verschiebung und Verdrehung des Spaltes während des Betriebes erlaubt, ist auf einen Flansch montiert, der seitlich am Kopfteil angeschraubt ist (Abb. 1). Jede Blende kann während des Betriebes aus dem Strahlengang herausgezogen werden, um den Einfluß der betreffenden Blende auf die Güte der Abbildung festzustellen.

Es wurden eingebaut:

- Die *Horizontalblende*, vor dem Eintrittsspalt (begrenzt die Spalthöhe);
- die *Vorfelddblende*, vor dem elektrischen Feld (begrenzt die räumliche Divergenz des Strahles);
- die *Felddblende*, nach dem elektrischen Feld (begrenzt die Breite des austretenden Strahles bzw. ist zur Abdeckung von Streustrahlung notwendig und erlaubt außerdem den genauen Austrittsort der Strahlen aus dem elektrischen Feld zu kontrollieren);
- die *Magnetfelddblende*, vor dem Magnetfeld (begrenzt die Energiebreite der zur Abbildung benutzten Strahlen).

Außerdem sind zwei Kontrollauffänger für den Ionenstrom im Strahlengang vorhanden, einer vor dem elektrischen Feld und einer hinter der Magnetfelddblende.

5. Die Photoplatzenhalterung

Die Photoplatte (Ilford Q 1) mit den Abmessungen $30 \times 125 \text{ mm}^2$ wird durch Federn fest an den Rand eines Halterrahmens gepreßt, so daß die Plattenlage immer genau festgelegt ist. Dieser Plattenrahmen kann über zwei Zahnstangen in vertikaler Richtung bewegt werden, um mehrere Aufnahmen übereinander auf die Platte zu bekommen. Außerdem läßt sich der Rahmen mit der Photoplatte während des Betriebes so weit nach oben verschieben, daß der Strahl unter der Platte hindurch, durch einen feinen Austrittsspalt in den Sekundärelektronenvervielfacher gelangen kann. Durch einen weiteren Mechanismus kann die Platte in jeder Stellung

⁸ H. EWALD, Z. Naturforschg. 5 a, 229 [1950].

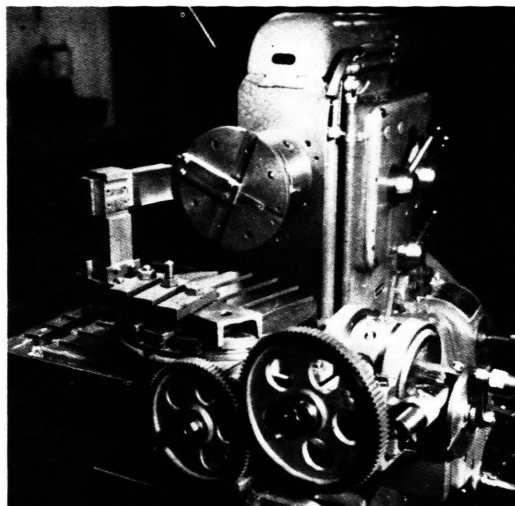


Abb. 3. Herstellung der Kondensatorplatten.

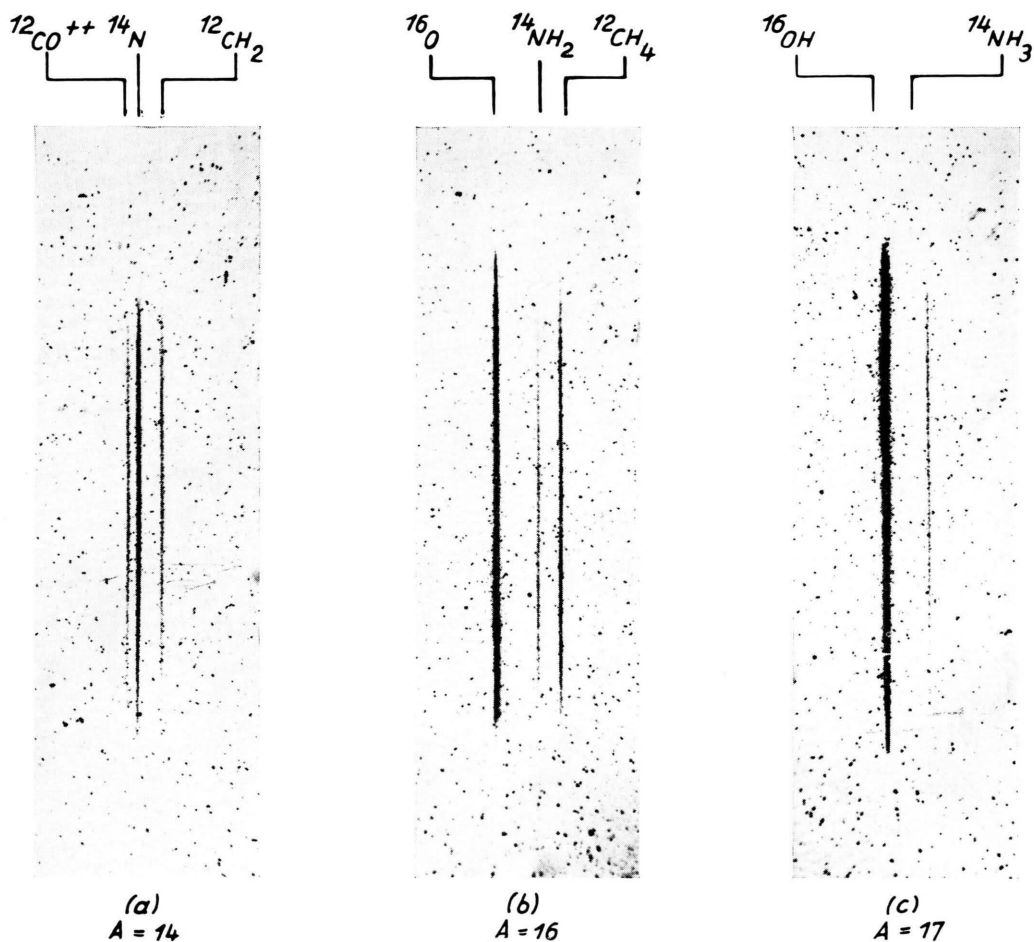
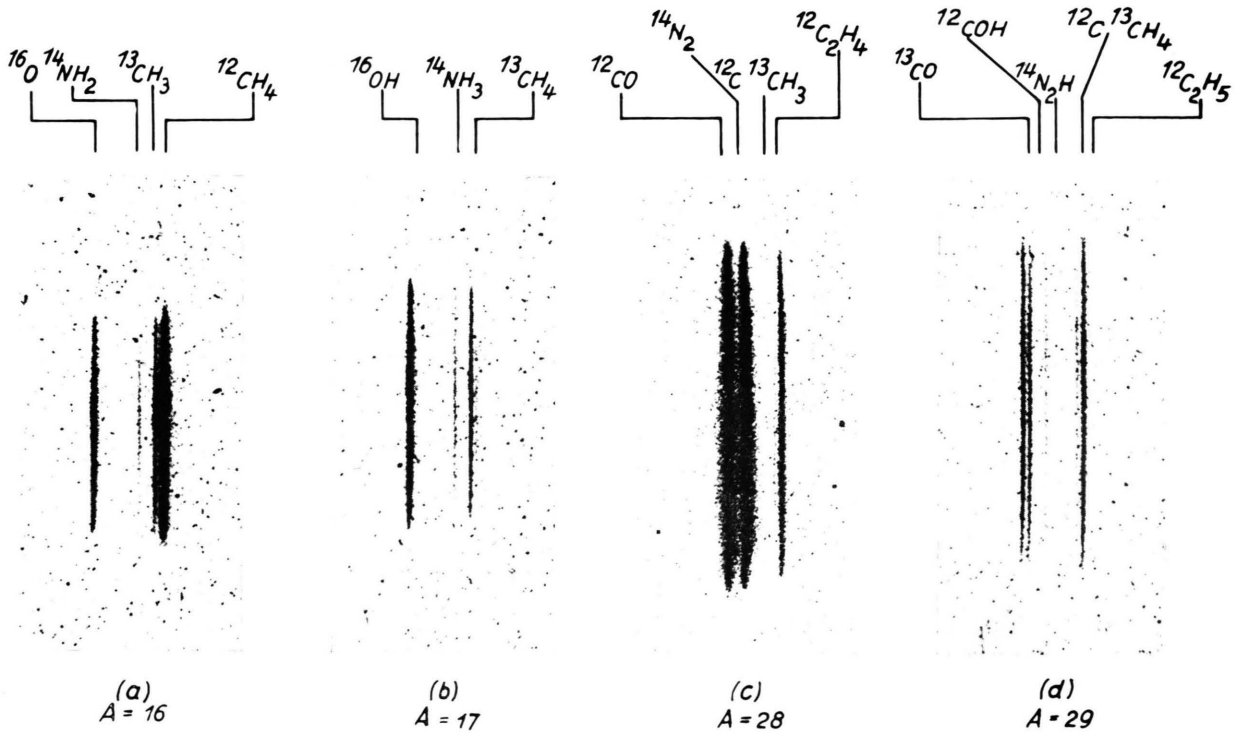


Abb. 5. Mit dem neuen Massenspektrographen aufgenommene Multipletts bei den Massenzahlen 14, 16 und 17. Belichtungszeit 15 sec.



0 0,5 mm

Abb. 6. Mit dem neuen Massenspektrographen aufgenommene Multipletts bei den Massenzahlen 16, 17, 28 und 29. Belichtungszeit 30 sec.

– ebenfalls während des Betriebes – gegen die Polschuhe hin horizontal geschwenkt werden. Die ganze Plattenhalterung ist, wie der Eintrittsspalt, auf einen einzigen Flansch montiert und kann bei gelüfteter Apparatur parallel zu den Polschuhen verschoben werden (Abb. 1).

Der Plattenwechsel geschieht in sehr einfacher Weise durch eine im oberen Teil des Flansches angebrachte Öffnung, die mit einem Schnellverschluß vakuumdicht gemacht werden kann.

II. Justierung und Ergebnisse

Die Justierung der Apparatur ging in ähnlicher Weise wie bei den mit Zylinderkondensatoren ausgerüsteten Apparaten vor sich. Die zusätzliche Forderung, daß bei stigmatisch abbildenden Systemen der Kondensator, alle Blenden, Auffänger usw. genau symmetrisch zu der horizontalen Ebene liegen müssen, die durch die Mittelebene zwischen den beiden Polschuhen des Magneten bestimmt ist, wurde bei der beschriebenen Apparatur durch Bezug sämtlicher Einstellungen auf die sehr genau gearbeiteten und polierten Oberflächen der Vakuummannen mit der notwendigen Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm erfüllt.

Die Justierung der Elektroden des Toroidkondensators erfolgte zunächst mechanisch mit Feinmeßgeräten. Da sich jedoch während des Betriebes bei weit geöffnetem Spalt und aus dem Strahlengang entfernten Blenden eine Schrägstellung der in diesem Falle breiten Massenlinien auf der Photoplatte ergab, wurde eine der beiden Kondensatorplatten systematisch gegen die andere um eine horizontale Achse verkippt, bis auf der Photoplatte senkrechte Massenlinien erhalten wurden. Diese Einstellung der Elektroden zeigte sich sehr empfindlich; eine Verkipfung um nur $0,1$ Grad lieferte bereits eine deutliche Schrägstellung der Massenlinien. Im Laufe der weiteren Untersuchungen zeigte sich, daß diese empirische Art der Justierung des Toroidkondensators ausreichend war.

Nach sorgfältiger Justierung konnten Aufnahmen der in Abb. 5 und 6 wiedergegebenen Güte reproduzierbar erhalten werden. Bei den Abbildungen handelt es sich um die Multipletts bei den Massenzahlen 16,

17, 18, bzw. 28 und 29. Es wurde als Untersuchungssubstanz Leuchtgas in einer Elektronenstoßionenquelle verwendet. Auf Grund der Schärfe der nicht überbelichteten Linien läßt sich ein Auflösungsvermögen von etwa 25 000 ermitteln. Dies ist in Anbetracht der Kleinheit des verwendeten Kondensators ($a_c = 120$ mm) ein sehr befriedigendes Ergebnis.

Durch die jetzt regelmäßig erhaltene große Intensität der Linien und durch besondere Versuche konnte gezeigt werden, daß die zur Verfügung stehenden axialen und radialen Divergenzwinkel durch den Ionenstrahl in der Regel voll ausgeleuchtet werden. Eine Abschätzung der für die intensivsten Linien der Spektren benötigten Belichtungszeiten kann auf folgende Weise erhalten werden. In Abb. 6 c und 6 d sind die stark überbelichteten Multipletts bei den Massenzahlen 28 und 29 wiedergegeben. Die Belichtungszeit betrug 30 sec. Die Linie ^{13}CO bei der Massenzahl 29 (Abb. 6 d) ist etwa um den Faktor 3 bis 5 überbelichtet. Daraus und aus dem bekannten Häufigkeitsverhältnis der beiden Kohlenstoffisotope ^{12}C und ^{13}C kann man folgern, daß die Linie ^{12}CO bei der Massenzahl 28 etwa um den Faktor 300 bis 500 überbelichtet ist. Diese starke Linie würde also mit einer Belichtungszeit von weniger als $0,1$ sec richtig belichtet worden sein.

Da bei mit einem Zylinderkondensator ausgerüsteten Apparaten für die intensivsten Linien Belichtungszeiten von mehr als einer Sekunde benötigt werden, ist der bei stigmatischer Abbildung erhaltene Intensitätsgewinn offensichtlich.

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Zurverfügungstellung erheblicher Mittel und der Firma W. B i n d e r (Villingen/Schwarzwald) für die sehr sorgfältige Ausführung des Magneten. Weiterhin danken wir den Herren Oberwerkmeistern EBELING † und ZIEGLER, sowie den übrigen Herren unserer Werkstatt für die Durchführung der zum Teil sehr schwierigen mechanischen Arbeiten.