

4. *Über die Richtungsquantelung im
Magnetfeld II.*
*Experimentelle Untersuchungen
über das Verhalten normaler Atome unter
magnetischer Kraftwirkung;
von Walther Gerlach.*

(Hierzu Tafel IV und V.)

Inhaltsübersicht: § 1. Das Prinzip der neuen Versuchsanordnung. — § 2. Die Einzelteile der Apparatur. — § 3. Das Verdampfungsöfchen. — § 4. Die Apparatur. — § 5. Evakuierung und Vakuumkontrolle — § 6. Die Entwicklung der Niederschläge. — § 7. Beispiel einer Versuchsausführung. — § 8. Absolute Bestimmung des Bohrschen Magnetons. — § 9. Magnetische Atommomentbestimmungen. a) Kupfer, Silber, Gold; b) Thallium; c) Zinn; d) Blei; e) Antimon und Wismut; f) Nickel; g) Eisen. — § 10. Diskussion der Versuchsergebnisse.

Vor einiger Zeit wurde in diesen Annalen über die Messung des magnetischen Moments des normalen Silberatoms berichtet.¹⁾ Es ließ sich ferner zeigen, daß das Verhalten normaler ungestörter Silberatome unter magnetischer Kraftwirkung gerade solcher Art ist, wie es die Quantentheorie in der sogenannten *räumlichen Quantelung* oder *Richtungsquantelung*²⁾ fordert. Im folgenden soll über die Fortführung der Untersuchungen und ihre Ausdehnung auf eine Anzahl

1) W. Gerlach u. O. Stern, Ann. d. Phys. 74. S. 673. 1924; im folg. zit. a. a. O. I.

2) Die Theorie der Richtungsquantelung wurde fast gleichzeitig von P. Debye (Gött. Nachr. Juni 1916 und von A. Sommerfeld (Phys. Zeitschr. 17. S. 491. 1916) zur modellmäßigen quantentheoretischen Deutung des Zeemaneffekts erdacht. A. Sommerfeld führte sie zu einer allgemeinen Theorie der räumlichen Quantelung durch, die er erstmalig Phys. Zeitschr. 17. S. 491. 1916 auch anschaulich darstellte. Für die Realität der Sommerfeldschen Konstruktionen sprechen die bisher vorliegenden experimentellen Untersuchungen.

von anderen Elementen¹⁾ berichtet, sowie eine eingehende Darstellung des Ausbaus der in der ersten Mitteilung beschriebenen Atomstrahlmethodik vorgelegt werden, da der Verfasser glaubt, daß mit der jetzigen Methode unschwer auch von anderer Seite solche Versuche ausgeführt werden können.

° § 1. Das Prinzip der neuen Versuchsanordnung.

Fig. 1 erläutert schematisch die schon a. a. O. I gegebene Versuchsanordnung. Ein Öfchen O mit der Öffnung O' stellt die Strahlungsquelle der Atomstrahlen dar. Von den aus O' infolge der Temperaturbewegung der Atome im Dampfraum innerhalb O herausfliegenden Atomen wird durch zwei Spaltblenden $S_1 S_2$ ein sehr enger Strahl ausgesondert, in welchem

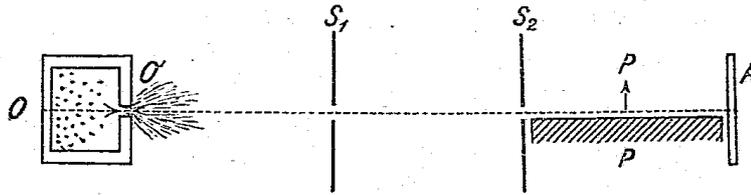


Fig. 1.

also praktisch nur parallel fliegende Atome vorhanden sind. Der Atomstrahl fliegt hinter S_2 durch ein inhomogenes magnetisches Feld zwischen den Polschuhen PP eines Elektromagneten. Die Inhomogenität des Feldes und das Feld selbst sind parallel und beide senkrecht zur Atomstrahlbahn gerichtet. Am Ende des Feldraumes befindet sich ein Plättchen A zum Auffangen des Atomstrahls. Die ganze Anordnung ist in ein evakuierbares Gefäß eingeschlossen.

Wie in der genannten ersten Abhandlung näher ausgeführt, liegen die Einzelschwierigkeiten des Versuchs in der Justierung der geraden Atomstrahlbahn, in der Konstruktion der Öfchen und in der Auffangung, Erhaltung und Sichtbarmachung des sehr dünnen Niederschlags auf dem Auffangplättchen A . Während die erste Schwierigkeit, die Justierung

1) W. Gerlach u. A. C. Gilliers, Zeitschr. f. Phys. 26. S. 126. 1924. In dieser vorläufigen Mitteilung sind einige Resultate kurz mitgeteilt. Sämtliche Versuche wurden neuerlich mit besserer Anordnung wiederholt; hierüber s. u. im Text im folg. zit. a. a. O. II.

des Strahlengangs, durch eine völlige Umkonstruktion der ganzen Versuchsanordnung vollständig beseitigt wurde, wuchsen die beiden anderen Schwierigkeiten bei Übergang zu andern Elementen (als Silber, a. a. O. I) bedeutend an und konnten noch nicht für alle Elemente überwunden werden.

Bei der neuen Apparatur wurde an zwei Punkten, die stets wieder als wesentlich erkannt wurden, festgehalten: Die Polschuhe werden in das Vakuum eingeführt und der Verdampfungs-(Öfchen-)Raum ist vom Laufraum der Atomstrahlen (vom Blendenspalt S_1 gerechnet) vollständig getrennt, bis auf die enge Öffnung des Spaltes S_1 selbst, durch welche der Atomstrahl aus dem Verdampfungsraum in den Laufraum übertritt; beide Räume werden getrennt evakuiert.

Da sich ferner gezeigt hatte, daß Schrauben beliebig kleinen Gewindes und Schlittenführungen auch im Hochvakuum *ohne* besondere Vorsichtsmaßregeln (Evakuierungsschlitze o. dgl.) verwendbar sind, wurde von ihnen jetzt unbedenklich weitgehender Gebrauch gemacht.

Folgende 6 Gesichtspunkte waren für die Neukonstruktion der Apparatur grundlegend:

1. Die Justierung der Spaltblenden und damit der Atomstrahlbahn im Magnetfeld mußte vereinfacht werden, zuverlässig ausführbar sein und beliebig lange Zeit erhalten bleiben.

2. Die Justierung der durch die Spaltblenden gegebenen Bahn auf die Mitte des Loches des Öfchens sollte so möglich sein, daß ohne Änderung am Zusammenbau der wesentlichen Teile Auswechselungen und Neufüllungen des Öfchens möglich sind.

3. Die gerade Laufstrecke des Atomstrahls von O bis A (Fig. 1), darf, einmal justiert, sich nicht mehr ändern, vor allem nicht mit dem die Apparatur zur Evakuierung nach außen abschließenden Glasapparat in Verbindung stehen, da erfahrungsgemäß Verschiebungen dieses Teiles nicht vermeidbar sind.

4. Reinigung der Spalte, Nachmessung ihrer Weite, Auseinandernehmen und Wiederaussetzen der ganzen Apparatur muß möglich sein, ohne daß nachher die Justierung verändert ist.

5. Es soll die Möglichkeit zur Temperaturmessung des Ofchens und einer Kontrolle der Verdampfungsgeschwindigkeit vorhanden sein.

6. Das Auffangeplättchen soll mit flüssiger Luft kühlbar sein, damit auch solche Substanzen, welche nur an gekühlten Flächen haften bleiben, untersucht werden können.

§ 2. Die Einzelteile der Apparatur.

Das Hauptstück ist die *Schneide*. Wie a. a. O. I besteht der eine Polschuh des Magneten aus einer Schneide (Fig. 2).¹⁾ Diese Eisenschneide — bei 2 Apparaten 30 mm bzw. 47 mm lang mit einem Winkel von 90 bzw. 60° — erhält eine Verlängerung aus Messing von der (etwa) 1,6-fachen Länge der Eisenlänge. Beide Teile werden zuerst hart verlötet und

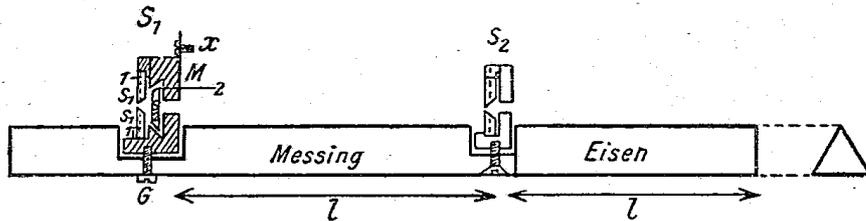


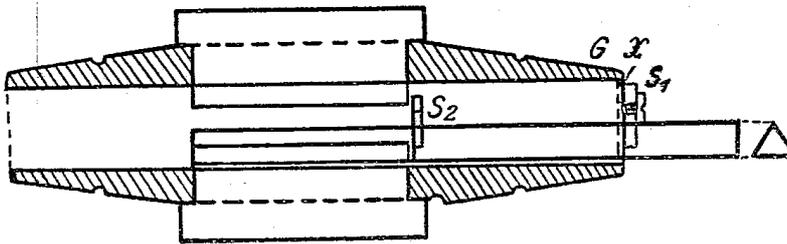
Fig. 2.

dann bearbeitet, schließlich geschliffen, so daß ein vollständig gerades Stück entsteht. Die Schneidhöhe beträgt ungefähr 7 mm. Unmittelbar an der Schweißstelle Eisen-Messing wird eine Vertiefung in die Schneide eingefräst und eine zweite solche im Messingteil, so weit entfernt von der Schweißstelle, als die Eisenschneide lang ist. In diesen Einschnitten werden die Spaltblenden befestigt.

Die *Spalte* sind nach Art der Spektrometerspalte gebaut. Die Messingbacken (etwa $2\frac{1}{2} \times 3\frac{1}{2}$ mm groß) sind scharfkantig abgeschliffen. Der erste Spalt S_1 ist so gestellt, daß die ebene Spaltfläche zum Öfchen zugerichtet ist: ein solcher Spalt wächst durch die sich ansetzenden Metallkriställchen nicht so leicht zu. S_1 besteht aus 2 hintereinander liegenden Spalten, deren einer von oben nach unten bewegliche Backen hat um die Breite des Atomstrahls zu begrenzen, deren anderer (in

1) Photographien der Einzelteile vgl. Fig. Nr. 11.

der Figur) von vorn nach hinten bewegliche Backen hat, um die Ausdehnung des Strahls senkrecht zur Zeichenebene zu begrenzen. Der Messingklotz M , zentrisch durchbohrt, hat hierzu eine Schwalbenschwanzführung 1 mit den Spaltbacken



Natürliche Größe des kleinen Apparates.

Fig. 3.

s_1 s_1 und eine gleichartige 2 mit den Backen s_2 . G ist ein Gewinde, welches M in der Schneide hält (Fig. 2). S_2 ist genau so gebaut, nur fällt für die Längsbegrenzung s_2 weg. Gelegentlich wird sie durch aufgelegte Folie hergestellt.

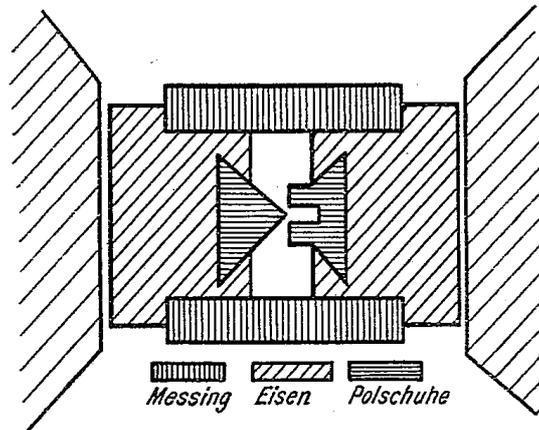


Fig. 4.

Die Schneide paßt in eine eiserne Schwalbenschwanzführung, welche in dem die ganze Apparatur zusammenhaltenden Mittelstück eingelötet¹⁾ ist. Dieses Mittelstück ist aus einem 22mm Vierkantmessing gearbeitet, Längsschnitt Fig. 3,

1) Zinn-Bleilot mit 70 Proz. Zinn, sorgfältige Reinigung des Eisens, vorherige Verzinnung und sehr gutes Lötwasser erforderlich. Einlöten unter starkem mechanischem Druck. Sonst halten die großen Lötungen nicht dicht.

Querschnitt Fig. 4. Es ist auf der ganzen Länge mit einer rechtwinkligen Durchbohrung versehen. Die beiden Eisenführungen sind entweder rechtwinklig (wie in der Figur gezeichnet) oder abgeschrägt eingesetzt. Die Enden des Vierkantmessing sind zu Schliffen abgedreht, man versieht sie mit je einer Unterdrehung in der Mitte, damit etwaige Längskratzer in dem weichen Material keine Einlaßbahn für Luft bilden. In die eine Eisenführung paßt die Schneide, in die zweite ein

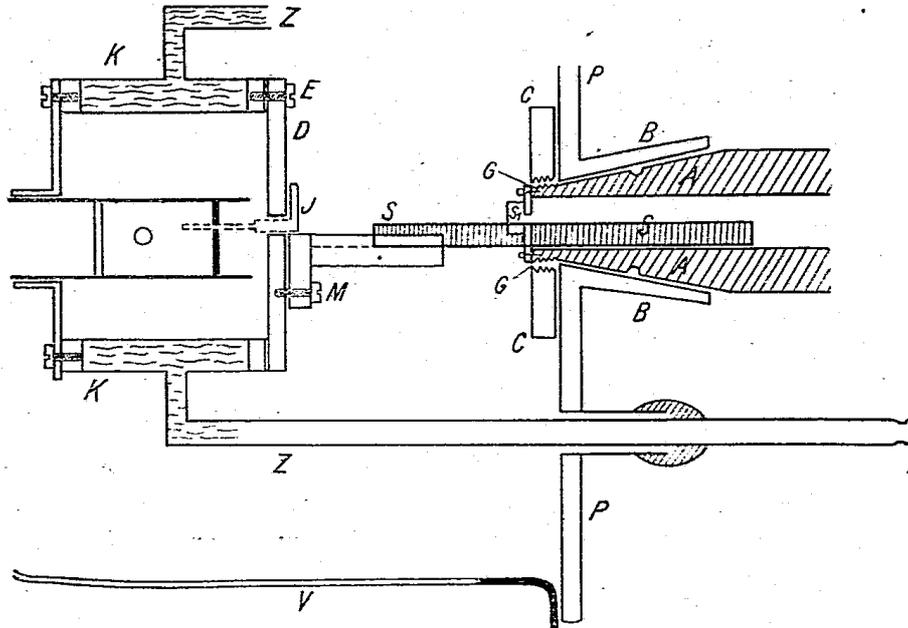


Fig. 5.

spaltförmiger Polschuh, in denen mehrere mit verschiedener Höhe existieren, so daß der Abstand Schneide—Spalt und damit das Feldgefälle variiert werden kann. Die Führungen gehen ziemlich streng. In Fig. 3 ist gezeichnet, wie die Schneide mit den Spalten in dem Mittelstück sitzt. Bei x (vgl. auch Fig. 2) ist der erste Spalt und damit die ganze Schneide durch eine Schraube am Mittelstück angeschraubt, und damit alles starr verbunden.

Die starre Verbindung wird nun auch auf die Verbindung von Schneide und Ofenloch übertragen. Das Öfchen sitzt selbst in einem Kühler, an dem es auch befestigt ist; es ge-

nügt also, die Schneide mit dem Deckel des Kühlers zu verbinden, so daß die durch die beiden Blenden gegebene Gerade durch die Mitte eines Loches im Kühlerdeckel hindurchgeht und dann besonders Kühlerdeckelloch und Öfchenloch auf einmal zu justieren. Dies empfiehlt sich auch schon deshalb, daß ohne Eingriff in die Justierung der anderen Teile die Öfchen ausgewechselt werden können.

Nach mehreren Zwischenstufen gelangte man zu folgender einfacher Konstruktion Fig. 5. An dem 5 mm dicken Kühlerdeckel wird eine stabile Messingschwabenschwanzführung *M* genau rechtwinklig zur Deckelebene befestigt¹⁾, in welche das über den ersten Spalt s_1 der Schneide *S* hinausstehende Stück (Fig. 2) paßt, derart, daß die Kante der Schneide auf die

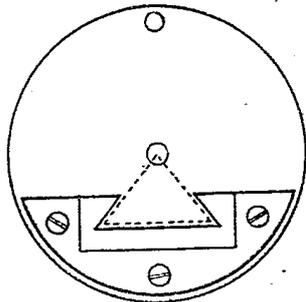


Fig. 6.

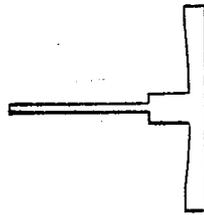


Fig. 7.

Mitte des Kühlerloches zeigt (Fig. 6). Der Kühler *K* ist mit seinen Zuleitungen $z z$ in eine 6 mm dicke große Messingscheibe *P* ebenfalls rechtwinklig eingekittet, die Messingscheibe trägt zentrisch einen Metallkonus *B*, welcher auf den Schliff *A* des Mittelstückes paßt. Es wird zur Erhöhung der Festigkeit über das schon in Fig. 3 gezeichnete Gewinde *G* eine Mutter *C* geschraubt, welche Mittelstück und Messingscheibe zusammenhalten und mit einer Schraube *E* der Kühlerdeckel *D* an dem Kühler selbst befestigt, so daß auch eine Drehung des Konus nicht mehr möglich ist.

Das Öfchen *O* (vgl. § 3) wird auf der andern Seite des Kühlers so angeschraubt, daß seine 1,2-mm-Öffnung konzen-

1) Nicht zu kleine Gewinde nehmen, weil der unvermeidliche Quecksilberdampf das Messing angreift. Die Schrauben müssen gelegentlich erneuert werden.

trisch zur 2,4-mm-Öffnung im Kühlerdeckel liegt. Das erreicht man leicht durch einen Justierstift der Form Fig. 7, welcher in das Öfchenloch eingreift und durch das Kühlerloch gesteckt wird (in Fig. 5 punktiert gezeichnet *J*).

Es seien noch einige Maße gegeben: *Kühler*, Länge 40 mm, innere Weite 24, äußere Weite 32 mm. *P* Durchmesser 95 mm. Entfernung *CD* 25–30 mm. Glasglocke innen etwa 75 mm.

Die große Metallplatte *P* stellt den einen Teil eines *Planschliffs* dar, über ihn wird eine mit Ansätzen versehene

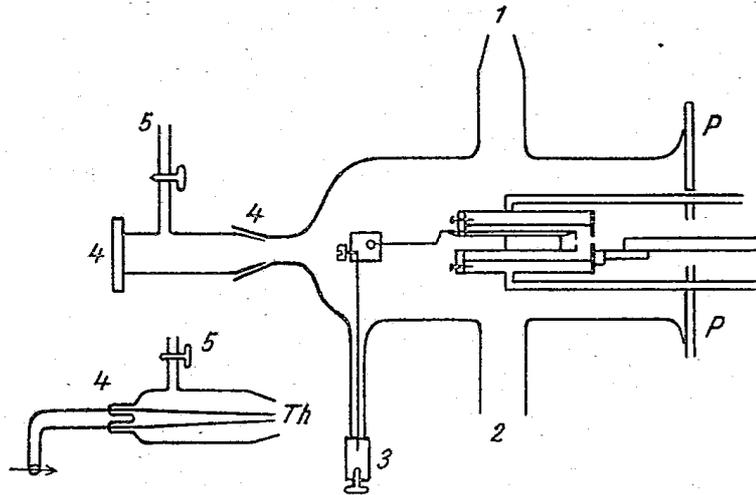


Fig. 8.

Glasglocke gesetzt. Die Messingplatte ist fein gedreht, *nicht* geschliffen, die Fettdichtung hält so besser. Der Abschluß dieses Planschliffs hielt, obwohl die Auflageflächen stellenweise nur 2 mm breit waren, immer — oft tagelang — vollkommen dicht. Allerdings muß man ein gutes, sehr zähes Gummifett verwenden, von dem man verschiedene Sorten mit verschiedener Zähigkeit (variiert durch Paraffinzusatz) für die verschiedenen Jahreszeiten hat. Die Glasglocke, Fig. 8, hat Ansätze für Pumpe (1), Kühlgefäß (2) (evtl. mit Kohle beschickt), Zuleitung zur Ofenheizung (3) und Thermoelement (4), bzw. Planplatte zur optischen Temperaturmessung der Öfchentemperatur, und zum Einlassen von trockener Luft oder Stickstoff (5). In Fig. 8 setzt sich bei *PP* Fig. 5 an, es ist in 8 zur schnelleren Über-

sicht der Einbau des Kühlers und Ofchens eingezeichnet. Der Anschluß der Heizstromleitung geschieht durch den Schliff 4 mit einem Schraubenzieher.

Man sieht, daß somit alle in § 1 genannten Wünsche erfüllt sind: alle Teile sind starr verbunden, sind genau justierbar.

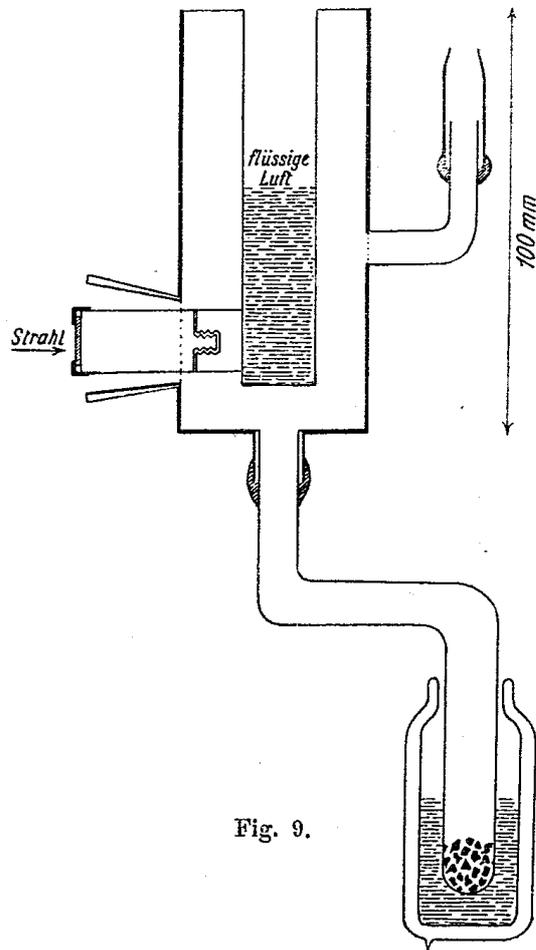


Fig. 9.

Die Einstellung der Spaltmitten auf eine bestimmte Höhe über der Schneide geschieht leicht mit einem kurzbrennweitigen Fernrohr mit Okularskala, in welchem man die Ecken der Schneide und die Spaltbacken gleichzeitig scharf sieht; man erhält eine Genauigkeit von etwa 5μ , welche bei Breiten der Spaltblenden von $30-60 \mu$ vollkommen ausreicht.

Die Reinigung des ersten Spaltes geschieht durch Durchschieben von Stanniol, was nach Abnahme der Glocke ohne weiteres möglich ist. Bemerkt sei noch, daß über dem Messingstück *M* des ersten Spaltes ein größeres Blech federnd geschoben wird, welches die Ofenstrahlung von dem Metallschliff abhält. An diesem Blech kann eine polierte Metallplatte angeschraubt werden, so daß sie von außen durch die Glocke sichtbar ist: sie steht so, daß sie dem Spalt keine Atome wegnimmt, selbst aber doch bestrahlt wird. Man kann an dem Metallniederschlag auf ihr das Beginnen und den Fortgang der Verdampfung verfolgen.

Der Plättchenhalter, mit flüssiger Luft kühlbar, ist ganz aus Metall und paßt auf den andern Schliff des Mittelstücks. Aus Fig. 9 ist alles zu ersehen. Der Verbrauch von flüssiger Luft ist nicht sehr groß, alle 15 Minuten ist das Innengefäß zu füllen.

§ 3. Das Verdampfungsöfchen.

Wesentlich geändert gegen früher wurde die Konstruktion der kleinen Ofen. Da hierin einerseits ein wesentlicher Bestandteil des Fortschritts der Methodik liegt, der nicht nur eine Abkürzung der Auspump- und Bestrahlungszeiten auf $\frac{1}{5}$ — $\frac{1}{10}$ der früheren Versuchsdauer brachte, sondern auch die Untersuchung der hochschmelzenden Elemente Eisen, Kobalt, Nickel, Chrom mühelos ermöglicht, da andererseits aber beim Bau des Öfchens scheinbare Nebensächlichkeiten von ausschlaggebender Wichtigkeit sind, sei dieser etwas eingehender beschrieben.

Zunächst sei bemerkt, daß von einem Einsatz zur Aufnahme des Schmelzguts in den Heizkörper ganz abgesehen wurde. Das Öfchen besteht aus einem Rohr hochfeuerfester Marquardtscher Masse von der Berliner Porzellanmanufaktur (Form 0,6042); es ist 50 mm lang, etwa 7 mm weit bei einer Wandstärke von etwa 1 mm. Das Röhrchen *r* wird mit einer Schraube in einer Messingfassung *gab* gehalten, die in der schematischen Zeichnung Fig. 10 und der Photographie Fig. 13 zu sehen ist; für Aufnahme der Heizwicklung steht eine Länge von 35—36 mm zur Verfügung. Es werden nun am oberen und unteren Ende dieses Teiles 2 Windungen *ll* von

0,2 mm Molybdändraht um das Röhrchen gewickelt und verdrillt. Sodann wird 0,2-mm-Molybdändraht zwischen diesen beiden Abschlußwindungen um das Röhrchen gewickelt und zwar zwischen 50 und 65 Windungen auf 34 mm (mehr oder weniger, je nachdem, ob hohe oder niedrigere Temperaturen erreicht werden sollen). Anfang und Ende der Heizwicklung werden fest an die genannten Doppelwindungen angedrillt. Das hintere, der Messingbrücke zunächst liegende Ende wird mit Kupfer oder Eisendraht an diese angebunden, die andern, drei oder vierfach genommen, durch ein durch die Messingbrücke führendes Isolieröhrchen *i* an einen dicken Kupferdraht *e* angebunden.

Der Molybdändraht, bezogen vom Wolframlaboratorium Dr.-Ing. Schwarzkopf in Berlin hat sich sehr gut bewährt; er ist mechanisch leicht zu behandeln und eignet sich besser als Wolframdraht, welcher viel stärker mit dem Öfchenmaterial reagiert.

Das gewickelte Öfchen wird mit einem ganz dünnen Brei von in Wasser angeschlämmter „calciniertes Tonerde“ (reines Al_2O_3) mit einen Pinsel mehrfach bestrichen, bis die Windungen gut bedeckt sind (etwa 1 mm Schichtdicke). *Es darf keine Spur von Wasserglas hierbei verwendet werden*, sowohl die Schnelligkeit des Auspumpens als auch die Haltbarkeit der Öfchen leidet sehr durch die Verwendung von Wasserglas. Nachdem das so isolierte Öfchen einen oder mehrere Tage an der Luft getrocknet hat, bringt man es sehr vorsichtig — denn der Al_2O_3 -Belag bröckelt schon bei Erschütterungen ab — in eine Hilfsapparatur, wo es im Hochvakuum langsam erhitzt und bei etwa 1600° ungefähr 1 Stde. gebrannt wird. War der Belag stellenweise abgefallen, so bestreicht man da neu und brennt nochmals.

Jetzt setzt man Boden und Deckel ein: rundgefeilte oder geschliffene, gut passende Plättchen von 1—2 mm Dicke aus Marquardtscher Masse oder Al_2O_3 , welche ebenfalls mit Al_2O_3 -Brei eingekittet werden. Auch wird vor dem Einsetzen des Deckels nochmals das Innere des Öfchens mit Al_2O_3 -Brei ausgestrichen. Dieser nach dem Brennen harte Überzug verhindert die Reaktion zwischen Schmelzgut und Marquardt-

röhr, die z. B. bei Eisen und Zinn¹⁾ recht merklich ist. Der Deckel hat exzentrisch ein Loch von 1,2 mm Durchmesser, aus welchem der Atomstrahl austritt. Das Loch muß in der oberen Hälfte sitzen, damit kein flüssiges Metall herausfließt; auch das Ausspritzen kommt seltener vor. Soll das Öfchen bei sehr hoher Temperatur verwendet werden, so brennt man es nun noch einmal, weil das Material „arbeitet“; dennoch traten auch bei Versuchen manchmal solche Deformationen noch ein, daß die Justierung des Öfchenloches vollständig zerstört war.

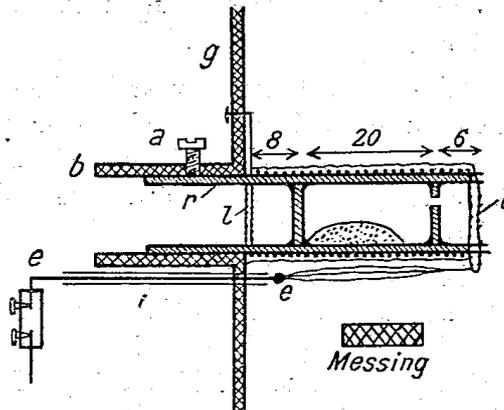


Fig. 10.

Die Dimensionen sind in der Fig. 10 in mm angegeben. Fig. 13 gibt eine Photographie eines Öfchens, in der man seinen Bau und (am liegenden Öfchen) den Deckel mit den Loch sieht. Die Öfchen für die höchsten Temperaturen hatten einen kurzen Innenraum (10—15 mm lang) zwischen Deckel und Boden, und noch einen zweiten Boden zur Herabsetzung der Ausstrahlung.

Über das fertige Öfchen wird ganz lose ein weiteres Rohr geschoben (innerer Durchmesser 14—16 mm, 2 mm Wandstärke) aus Marquardtscher Masse o. dgl., so daß zwischen Öfchen und dem Rohr überall einige Millimeter Abstand sind. Eine dickere innere Isolierschicht ist schlecht.

1) Geschmolzenes Zinn frißt im Hochvakuum bei 1100—1200° ein Quarzrohr von 1 mm Wand in kurzer Zeit durch, offenbar durch Bildung von SnO_2 und Si. Eisen diffundiert durch das Marquardtrohr hindurch und zerstört die Heizwicklung.

Geheizt wird mit Wechselstrom: Gleichstromheizung verdirbt bei 1100—1200° in kurzer Zeit das Öfchen, weil die Isoliermasse leitend wird und offenbar die elektrolytischen Zersetzungsprodukte mit dem Heizdraht chemisch reagieren. Spektroskopisch ließ sich dabei stets entweichender Sauerstoff nachweisen. Für die höchste Temperatur ($\sim 1700^\circ \text{C}$) waren 2,3—2,5 Amp. (bis zu 200 Watt) erforderlich. Diese Belastung

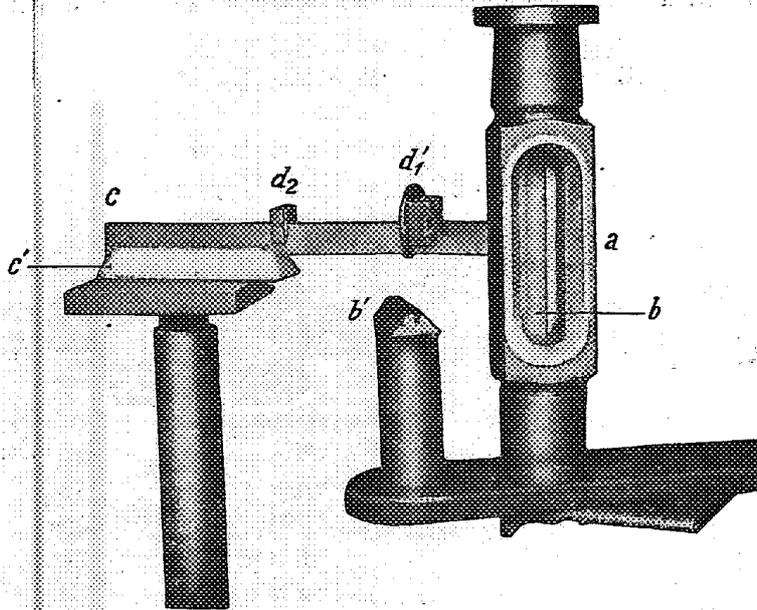


Fig. 11.

hält das Öfchen einige Versuche lang aus, wenn langsam erhitzt und abgekühlt wird.

Die Temperatur wird entweder optisch durch Anvisieren des Bodens oder — unter 1000° — thermoelektrisch während des Versuchs gemessen. Die höchste Temperatur ermittelt man durch besonderen Versuch, es ist nicht möglich und auch nicht wichtig, sie während der Verdampfung zu messen.

§ 4. Die Apparatur.

Die beiden Photographien Fig. 11 und 12 zeigen die einzelnen Teile und ihre Zusammensetzung. In Fig. 11 bedeuten: *a* ist das mittlere Messingstück, welches die beiden Polschuhe enthält, mit den Schliffen und (oben) der auf-

geschraubten Mutter zum Gegenhalten der großen Metallschliffplatte. b ist der eine Eisenschlitten, in welchem der Spaltpolschuh b' durch einen der Schliffe hineingeschoben wird. c ist die lange Schneide, welche im zweiten Eisenschlitten c' gehalten ist, welcher aus dem Mittelstück a ausgelötet ist. d_1 und d_2 sind die beiden Spalte, bei d_1 sieht man die runde Messingscheibe, mittels welcher die Schneide an die Stirnfläche des Messingmittelstückes angeschraubt wird.

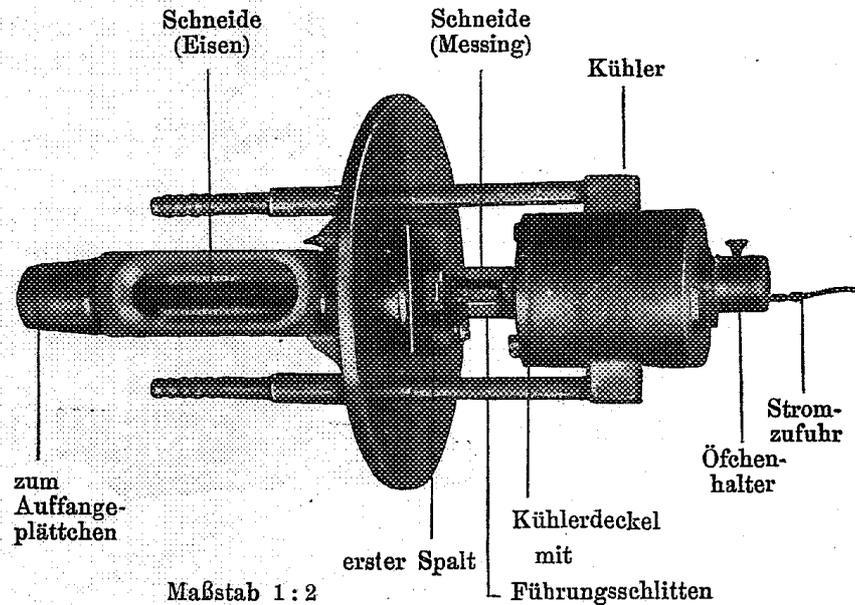


Fig. 12.

Fig. 12 ist nach den Bezeichnungen ohne weiteres zu verstehen. Auch hier ist der eine Eisenschlitten aus dem Mittelstück ausgelötet, so daß man die innere Schneide sieht. Man sieht besonders den am Kühlerdeckel befestigten Führungsschlitten, welcher automatisch für die Justierung der Schneide auf das Loch im Kühlerdeckel sorgt. Hinter dem ersten Spalt ist das Schutzblech für den Schliff zu sehen, mit der daran befindlichen Schraube werden die Kontrollplättchen angeschraubt.

Fig. 14 gibt ein Bild des Zusammenbaus der Apparatur mit dem Magneten, von welchem ein Schenkel weggenommen ist (Hartmann und Brauns kleines Modell des Du Bois

Elektromagneten). Schließlich gibt Fig. 13 eine Ansicht des Ofchens mit dem Messinghalter, und zwar seitlich und von vorn; auf letzterem sieht man das exzentrisch nach oben sitzende Verdampfungsloch.

§ 5. Evakuierung und Vakuumkontrolle.

Das Auspumpen der Apparatur erfolgte mit Wasserstrahlpumpe als erste Vorpumpe, einer Hanff-Buestschen Quarz-

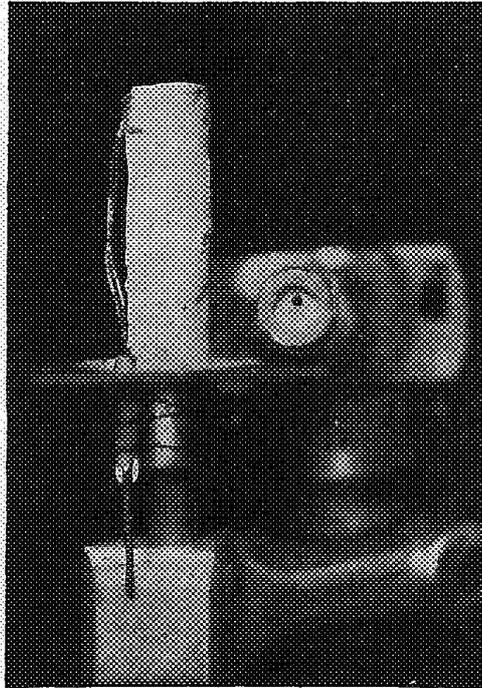


Fig. 13.

stufenpumpe für das Hauptvorvakuum und zwei parallel geschalteten Volmerschen *K*-Pumpen mit besonders weiten Spalten für das Hochvakuum. Die von Hanff und Buest gelieferten Pumpen haben sich ausgezeichnet bewährt¹⁾; die eine *K*-Pumpe (mit elektrischer Heizung) ist seit 3 Jahren

1) Als Kuriosum sei erwähnt, daß der zum Vorvakuum führende, normalerweise schwach *aufwärts* führende Ansatz der einen *K*-Pumpe durch den Druck der Glasleitung sich allmählich zu einem Winkel von 10° *abwärts* durchgebogen hat.

dauernd im Betrieb, die zweite (mit Gasflammenheizung) in der gleichen Zeit einmal durch Ungeschicklichkeit gebrochen. Wichtig ist eine gleichmäßige Durchwärmung der Pumpe, welche durch einen bis zur Höhe des Spaltes reichenden Asbestmantel und langsames Anheizen erzielt wird. Beide *K*-Pumpen sind so in Stativen gehalten, daß sie selbst, sowie die Glasleitung zum Vorvakuum beträchtliche Bewegungsfreiheit

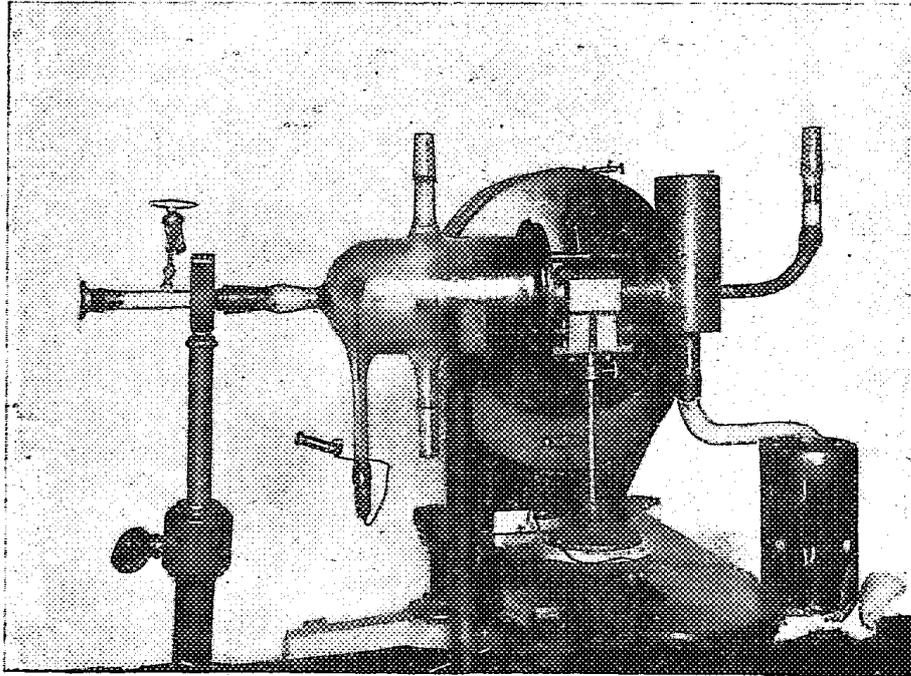


Fig. 14.

haben. Das ist nötig, weil die etwa 1 m langen Leitungen von den *K*-Pumpen zur Apparatur von 25 mm Weite ganz starr sind, und etwaiger Zwang sich durch Nachgeben der Pumpen ausgleichen muß. Gedichtet wird überall mit selbst hergestelltem Gummifett, dessen Paraffinzusatz so gewählt wird, daß die Zähigkeit der jeweils herrschenden Temperatur entspricht; das ist besonders wichtig für die Dichtung des Planschliffes, welcher tagelang vollkommen dicht hält. Zur Kontrolle des Vakuums sind auf beiden Seiten der Apparatur — an der Glocke und am Auffangerraum — Geißlerröhren

angebracht, welche bei einer Induktorentladung bei 8 cm Parallelfunken vollkommen dunkel bleiben. An den Pumpen — zur Abhaltung von Hg-Dampf — und an der Glocke und dem Auffangerraum sind Kühlgefäße, welche mit flüssiger Luft beschickt werden, sobald der Wasserdampf aus der Apparatur fortgepumpt ist.

§ 6. Die Entwicklung der Niederschläge.

Bereits in der ersten Mitteilung wurde eine Methode beschrieben, mit der es gelingt, unsichtbare Niederschläge von Silber auf Glas so zu verdicken, daß sie sichtbar werden. Diese Methode ist mittlerweile von Estermann und Stern näher untersucht und auch zur Entwicklung von Kupferniederschlägen brauchbar befunden worden. Es wurde nun ermittelt, wieweit die gleiche Methode auch Niederschläge anderer, weniger edler und weniger luft- und wasserbeständiger Metalle zu entwickeln gestattet. Hierzu wurden zunächst von den zu untersuchenden Metallen *sichtbare Spiegel verschiedener Ausdehnung* hergestellt und diese in den Entwickler gebracht. Erst dann ging man zu noch sichtbaren Niederschlägen immer kleinerer Dimension und schließlich unsichtbaren Niederschlägen über. Die bis jetzt gemachten Erfahrungen seien im folgenden der Reihenfolge nach besprochen:

Silber, Kupfer, Gold. Die Entwicklung dieser Elemente ist in gleicher Weise leicht möglich und gelingt immer. Es erwies sich als vorteilhaft, die Entwicklerzusammensetzung so zu verändern, daß möglichst wenig AgNO_3 verwendet wird. Es wird gewöhnlich auf 60—80 ccm 1proz. Hydrochinonlösung, welche nicht zu frisch sein soll, nach reichlichem Zusatz von Gummiarabikum etwa 1 ccm einer 1proz. AgNO_3 -Lösung genommen. Die Lösungen werden mit destilliertem Wasser hergestellt und peinlich sauber gehalten. Einmal (unter mehr als 100 Fällen) kam es vor, daß die Entwicklung versagte: Das destillierte Wasser war der Grund, jedoch konnte Näheres nicht aufgeklärt werden.

Zinn und Nickel lassen sich ebenfalls sehr leicht in normaler Weise entwickeln. Der entwickelte Zinnniederschlag hat einen ganz charakteristischen bräunlichen Glanz, wesentlich verschieden von anderen Metallen.

Wismut, Antimon, Eisen, Blei, Thallium lassen sich in der beschriebenen Art ebenfalls entwickeln, jedoch mit in der vorstehenden Reihenfolge wachsenden Schwierigkeiten. Diese beruhen zum Teil darauf, daß die Atomstrahlen dieser Elemente (mit Ausnahme von Eisen) auf stark gekühlten Flächen aufgefangen werden müssen; hierbei schlagen sich alle möglichen anderen Atome, besonders Hg und Fett- und Wasserdampfreste, mit auf dem Plättchen nieder, so daß dieses mit einem wenn auch dünnen, so doch zur Entwickelbarkeit reichenden Niederschlag über die ganze Fläche bedeckt ist. Besonders in Betracht kommt aber die leichte Oxydier- und Hydroxydierbarkeit der Niederschläge in dünnster Schicht. Man brachte deshalb die Niederschlagsplättchen aus dem Vakuum so schnell als möglich in fertigen Entwickler, aus dem schon Silber sich auszuscheiden begann. Unsichtbare Wismutniederschläge lassen sich noch ganz gut entwickeln, bei Antimon gelingt es meistens. Bei Eisen und Blei manchmal, bei Thallium nie. Man erhält zwar auch hier eine „Entwicklung“, d. h. einen Silberniederschlag, aber dieser hat nicht mehr die Form des ursprünglichen Niederschlags, sondern ist zackig und verwaschen. Charakteristisch ist, daß sich bei den letztgenannten Metallen ein dünner Fadenkreuzschatten *nicht* hält, sondern bei der Entwicklung mit bedeckt wird. Auch zeigt der entwickelte Niederschlag stets mehr oder weniger fleckige Struktur.¹⁾

Man muß also die Niederschläge dieser Elemente so dick werden lassen, daß sie ohne Entwicklung sichtbar sind; zur Herstellung einer Photographie mit stärkerer Vergrößerung lassen sie sich dann stets mit der Entwicklerlösung verdicken („versilbern“). Sehr auffällig war, daß bei Antimon und vor allem bei Blei aus gut sichtbaren Niederschlägen im Entwickler einzelne Stellen langsam verschwanden, während andere dicker wurden. Daß sich Eisenniederschläge so schlecht entwickeln, liegt offenbar an der außerordentlich gesteigerten Oxydierbarkeit der dünnen Niederschläge. Dickere, auf Metall aufgefangene Eisenspiegel, im Vakuum glänzend, verwandeln sich an der Luft fast momentan in rostbraunes Pulver.

1) Vgl. z. B. den Sb-Niederschlag auf Taf. V, Fig. 24.

Sehr wichtig ist, eine besondere Eigenart des Aussehens des entwickelten Metallbeschlags zu kennen, welche leicht eine falsche Deutung eines Magnetversuchs herbeiführen kann. Es sei ein Beispiel angeführt. Ein Wismutniederschlag von 0,15 mm Breite war ohne Entwicklung als feiner grauer Strich auf dem Plättchen sichtbar. Er wurde nun in den Entwickler gebracht. Er verstärkte sich schnell und verbreiterte sich etwas, da ja auch über die Mitte hinaus immer noch eine schwächer bestrahlte Randzone liegt. Betrachtet man nun diesen Niederschlag im durchfallenden Licht, so ist seine Mitte, die ursprünglich ohne Entwicklung sichtbar war, durchsichtig, während die bei der Entwicklung erst erscheinenden Randpartien vollkommen undurchsichtig sind; im reflektierten Licht dagegen erscheint die Mitte silberglänzend und die Ränder mattschwarz oder grau. Man hat es hier offensichtlich mit einem Diffraktionsphänomen zu tun: Die dicht belegte Mitte entwickelt sich zu einer zusammenhängenden Schicht, welche eben so dünn ist, daß sie noch reichlich hindurchläßt. Die schwach mit Atomen besetzten Randpartien entwickeln sich dagegen nicht mehr zusammenhängend, sondern zu separaten Anhäufungen, an denen das durchfallende Licht abgelenkt wird. Man erkennt das Analogon: Ein Nebel ist undurchsichtig, wird er dagegen zu einer Wasserschicht verdichtet, so ist er lichtdurchlässig. Fig. 25 zeigt eine Mikrophotographie eines Teils dieses Niederschlags im durchscheinenden Licht. Die Erscheinung ist in gleicher Weise bei anderen Metallen, auch (nur seltener) bei den gut entwickelbaren Ag, Cu, Sn und Ni beobachtet worden.

Sichtbare unentwickelte und entwickelte Niederschläge von Antimon, Wismut, Blei, Thallium verändern sich an der Luft mit der Zeit sehr stark: sie teilen sich auf, erhalten fleckige Struktur, meist kreisförmige Ansammlungen getrennt voneinander. Auf diese Fragen, zu denen mancherlei Material gesammelt ist, soll an anderer Stelle später näher eingegangen werden.

§ 7. Beispiel einer Versuchsausführung.

Zur Bestimmung der richtigen Verdampfungstemperatur und Verdampfungszeit sind einige Vorversuche zu machen. Zu hohe Strahldichte gibt unscharfe Niederschläge, weil die

mit verschiedener Geschwindigkeit (entsprechend der Maxwell'schen Geschwindigkeitsverteilung) hintereinander fliegender Atome sich aus ihrer Bahn herausstoßen. S. 190 wird ein solches Beispiel besprochen werden; zu niedrige Dampfdichte verlangt zu lange Versuchszeiten. Die endgültigen Versuche werden jetzt alle (mit der Apparatur mit 30 mm Schneidelänge) mit Verdampfungszeiten von rund 45 Minuten gemacht; für zweifache Aufspaltung genügt dies; früher waren hierzu 8 Stunden erforderlich. Die Entgasung der Apparatur und die Anheizung des Öfchens verlangt bei den höchsten Temperaturen etwa $1\frac{1}{2}$ Stunde (früher 4—6 Stunden).

Dimensionen und Justierung der Apparatur:

- Magnetschneide 30 mm Länge;
 Abstand Ofenloch—erster Spalt 30 mm;
 „ erster Spalt—zweiter Spalt 30 mm;
 Erster Spalt: Breite 0,06 mm;
 Länge 0,28 mm;
 Höhe der Spaltmitte über der Schneide
 0,24₀ mm;
 Zweiter Spalt: Breite 0,036 mm;
 Länge etwa 2 mm;
 Höhe der Spaltmitte über der Schneide
 0,24₇ mm.

Der Austritt der Mitte des Atomstrahls erfolgt nach dem Ergebnis des Justierungsversuchs in einem Abstand von 0,25₂ über der Schneide; also sind die gemessenen Höhen der Spaltmitten über der Schneide auf wenige μ richtig und die Bahn des Strahls hinreichend parallel zur Schneide.

Versuch 25. 8. 1924. Zinn mit Magnetfeld.

Zeit	Heizstrom	Magnetfeld $\frac{\partial \xi}{\partial s}$	Bemerkungen
7 ¹⁵	1 Amp.	0	Dauernd gepumpt. Heizstrom langsam gesteigert bis
7 ⁴⁰	bis 1,3 „	0	das Vakuum gut ist. Der Ofen glüht schwach rot. Die Pumpen und Kühlsätze werden mit flüssiger Luft beschickt.

Versuch 25. 8. 1924. (Fortsetzung.)

Zeit	Heizstrom	Magnetfeld	$\frac{\partial \xi}{\partial s}$	Bemerkungen
7 ⁴⁵	1,5 "	200 000	}	Sodann wird die Stromstärke immer erst weiter gesteigert, wenn etwa abgegebenes Gas fortgepumpt ist. Beginn der Verdampfung. Wasserstrahlpumpe abgestellt.
7 ⁵⁵	1,7 "	200 000		
8 ⁰⁰	1,7 "	200 000		
8 ⁰⁵	1,8 "	200 000		
8 ³⁵	1,85 Amp. 50 Volt	200 000		
9 ⁰⁰	1,85 " 50 "	200 000		Schluß.

Das Öfchen erkaltet langsam bei Aufrechterhaltung des Vakuums. Der Apparat wird 9¹⁵ mit trockener Luft gefüllt, das Plättchen herausgenommen und entwickelt. *Es ist keinerlei magnetische Beeinflussung zu erkennen.* Sodann wird ein neues Plättchen eingesetzt und — ohne den Ofenraum zu öffnen — wieder neu ausgepumpt und ein Kontrollversuch mit

Zinn ohne Magnetfeld

genau nach der gleichen Zeiteinteilung gemacht: 12¹⁰—1⁵⁰. Nachdem auch dieser Versuch entwickelt — *man erhält einen ganz geraden Strich gleicher Form wie beim ersten Versuch* — ist, wird das Zinnöfchen gegen das Kupferöfchen vertauscht und ein weiterer Kontrollversuch gemacht mit

Kupfer mit Magnetfeld.

Zeit	Heizstrom	Magnetfeld	Bemerkungen
5 ¹⁵	1,0 Amp.	0	Dauernd gepumpt.
5 ⁵⁵	1,3 "	0	Wie vorstehend bei Zinn. Kühlung mit flüssiger Luft. Vakuum sehr gut.
6 ⁰⁵	1,5 "	0	
6 ¹⁵	1,7 "	200 000	
6 ²⁷			Starke Sauerstoffabgabe. Vakuum sehr gut.
6 ²⁵	1,8 "	200 000	Beginn der Verdampfung.
6 ³⁰	1,9 "	200 000	
6 ³⁵	2,1 "	200 000	
6 ⁵⁵	2,15 "	200 000	
7 ⁰⁰	2,20 Amp., 52 Volt	200 000	
7 ³⁰	2,20 " 52 "	200 000	Schluß.

Das Plättchen wird entwickelt, der Niederschlag erscheint sofort bei ganz schwacher Entwicklung dick, *und zeigt an der regelmäßigen Aufspaltung, daß die Apparatur in Ordnung war.*

§ 8. Absolute Bestimmung des Bohrschen Magnetons.

Bereits früher wurden zwei Bestimmungen des Magnetonwertes mitgeteilt, welchen eine Genauigkeit von ± 10 Proz. zuerkannt wurde. Diese weite Fehlergrenze ist erst in zweiter Linie durch die kleine Aufspaltung bedingt, in erster Linie aber durch die Auseinanderziehung, Verbreiterung des Atomstrahls im magnetischen Kraftfeld, welche auf der verschiedenen Geschwindigkeit der Atome im Atomstrahl (Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung) beruht. Eine Homogenisierung ist ebensowenig möglich wie — wenigstens vorerst — eine *genaue* experimentelle Messung der Geschwindigkeiten oder Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung. Doch scheint diese Frage jetzt der experimentellen Behandlung zugänglich.

Es wurden in der ersten Abhandlung die Gründe angegeben, welche berechtigen, für die Geschwindigkeit der Atome mittlerer Ablenkung den Wert

$$v = \sqrt{\frac{3,5 R T}{M}}$$

einzusetzen, worin R die absolute Gaskonstante $8,3 \times 10^7$, T die absolute Temperatur des strahlenden Dampfraumes und M das Molekulargewicht der Atomstrahlsubstanz bedeutet.

Da es nun gelang, gegen die früheren Versuche eine Aufspaltung von doppelter Größe auf eine viel größere Länge gleichmäßig stark zu erreichen, bei etwa gleicher Breite des Niederschlags, wurde ein solcher Versuch zum Zwecke einer neuen Magnetonmessung ausgeführt. Die Dicke des *abgestoßenen* Streifens (nur dieser kann, wie früher schon bemerkt, aus Gründen der mit der Verlagerung des Streifens sich ändernden Inhomogenität des Feldes zur Auswertung herangezogen werden) als Funktion der Entfernung von dem Niederschlag des — ohne Feld — unabgelenkten Streifens ist von der Art der Fig. 15. Es wurde als mittlere Ablenkung die beim Anblick im Mikroskop als natürlich und leicht einzustellen sich ergebende Strecke s in die Rechnung eingesetzt. Es ergibt sich dann aus der Sternschen Theorie des Versuchs für das magnetische Moment M

$$M^{-1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{s} \left(\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial s} \right)_0 \frac{l^2}{3,5 R \cdot T} \left[1 + \frac{1}{12} \frac{\left(\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial s} \right)_l - \left(\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial s} \right)_0}{s} \frac{M \cdot l^2}{3,5 R T} \right],$$

worin $\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial s}$ die Inhomogenität des Feldes in Gauss·cm⁻¹ bei Eintritt (Index 0) des Atomstrahls in das Feld und Austritt (Index 1) nach Durchlaufen der Länge l des Feldes aus dem Feld und s die in vorstehendem Sinne gemessene Ablenkung bedeuten.

Es folgen die Daten des Versuchs.

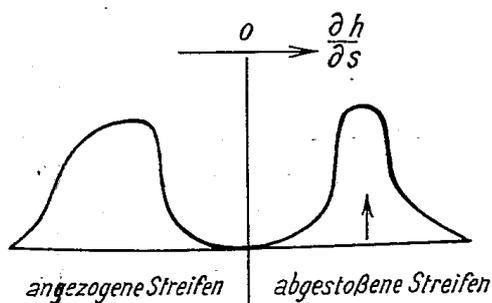


Fig. 15.

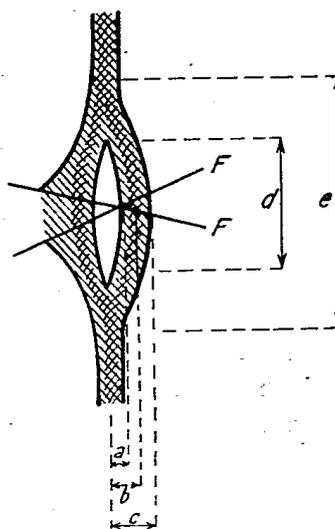


Fig. 16.

Silber. 5. XII. 1923.

Verdampfung 7^h bei 1020° ± 10° C., thermoelektrisch gemessene Temperatur, Schneidenlänge 47 mm, Schneidenwinkel 60°, auf 0,3 mm Breite abgeflacht.

	Abstand der Spaltmitten von der Schneide	Breite der Spalte
I. Spalt	0,32 mm	0,10 × 0,2 mm ²
II. „	0,31 „	0,063 × 1,2 „

Fadenkreuzjustierung: Der Strahl läuft bis auf 0,03 mm Gesamtabweichung parallel zur Schneide.

$$\left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial s}\right)_0 = 13,4 \times 10^4 \text{ Gauss} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial s}\right)_1 = 8 \times 10^4 \text{ Gauss} \cdot \text{cm}^{-1}.$$

Dimensionen des Niederschlags (vgl. die obenstehende schematische Zeichnung Fig. 16¹⁾ und die Mikrophotographie Fig. 17, Taf. IV).

1) Die beiden Schatten des Fadenkreuzes F sind in der schematischen Figur als dunkle Striche gezeichnet.

Volle Öffnung der Aufspaltung	$2a = 0,1 \text{ mm,}$
mittlere Ablenkung des abgesto- benen Strahles	$b = 0,21 \pm 0,01 \text{ mm,}$
weiteste Ablenkung	$c \sim 0,4 \text{ mm,}$
Länge der vollkommenen Auf- spaltung	$d = 1,2 \text{ ,,}$
Gesamtlänge der magnetischen Be- einflussung	$e = 2,3 \text{ ,,}$

Hieraus folgt für

$$\underline{M = 5690 \text{ Gauss} \cdot \text{cm.}}$$

Hiermit wird das frühere Ergebnis, daß aus dem Silberversuch der theoretisch aus der Bohrschen Theorie folgende Magnetonwert $M = 5600$ aus dem Experiment erhalten wird, bestätigt.

Über zwei weitere Messungen mit Kupferatomstrahlen, welche zu dem gleichen Magnetonwerte führen, wird im folgenden Paragraphen berichtet werden.

§ 9. Magnetische Atommomentbestimmungen.

a) Kupfer, Silber, Gold.

Silber. Nachdem die soeben mitgeteilten Untersuchungen das frühere Ergebnis vollkommen bestätigt hatten, wurde von nun an Silber als Kontrollsubstanz genommen, um die Apparatur zu prüfen und vor allem um das inhomogene Magnetfeld auszumessen. Es liegen 12 Aufspaltungsmessungen von Silber vor, von welchen keine auch nur durch die geringste Besonderheit sich von den früheren veröffentlichten Bildern unterscheidet. Vor allem war bei einer Aufnahme so viel Silber verdampft worden, daß der aufgespaltene Niederschlag schon ohne Entwicklung sichtbar war; trotz starker Entwicklung kam nicht der geringste Niederschlag in der Mitte zum Vorschein, so daß man nun *mit großer Sicherheit* das *Fehlen* von solchen Stellungen der Momentachse im Magnetfeld behaupten darf, in denen diese senkrecht zu der magnetischen Kraft steht. Von diesen Silberversuchen seien noch zwei hier veröffentlicht (Fig. 18 und 28c auf Taf. IV), weil sie mit ganz verschiedenen Feldverteilungen gewonnen sind. Die Mitte des Feldes ist

durch einen sehr dünnen Quarzfaden markiert, welcher an der Schneide angebracht war. Nachdem einmal mit Fadenkreuz justiert ist, ersetzt man dieses besser durch den dünnen Faden, welcher das Bild weniger stört und dessen Zweck nur ist, die Mitte des Feldes automatisch zu registrieren.

Beide Versuche sind mit dem kleinen Apparat von 30 mm Schneidelänge gemacht. Aus der Größe der Aufspaltung ergeben sich die Inhomogenitäten. Die Daten der Versuche sind die folgenden:

Versuch 11. 8. 1924, Fig. 18: Scharfe Schneide, Spalt im Spaltpol 1,2 mm breit, Abstand Schneide—Ebene des Spaltpols 1,2 mm. Abstand des unabgelenkten Strahls von der Schneide 0,26 mm. Mittlere Ablenkung des abgestoßenen Strahls 0,075 mm. *Niederschlag nicht entwickelt*. Inhomogenität $120\,000 \text{ Gauss} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Versuch 14. 8. 1924, Fig. 20c: Schwach (etwa 0,15 mm) abgeflachte Schneide, Spalt im Spaltpol 1,2 mm breit. Abstand Schneide—Ebene des Spaltpols 0,6 mm. Abstand des unabgelenkten Strahls von der Schneide 0,26 mm. Verdampfungstemperatur 1400° absolut. Mittlere Ablenkung des abgestoßenen Strahls 0,12 mm. Inhomogenität $200\,000 \text{ Gauss} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Die letzte Figur zeigt, daß die Aufspaltung sich auf eine viel größere Länge (0,8 mm) erstreckt und auf ihr merklich gleichmäßig groß ist. Diese günstige Anordnung wurde daher für fast alle folgenden Versuche beibehalten.

Kupfer. Reines Elektrolytkupfer wurde zunächst im Vakuum geschmolzen und erstarren gelassen. Sodann wurde das Ofchen zertrümmert, das Metall in kleine Stückchen zerschnitten und etwa 0,5 g in ein Öfchen gebracht. Diese Füllung reicht für vier Versuche. Wenn bei schwacher Rotglut kein Wasserdampf mehr abgegeben wurde, wurden Kühlgefäße mit flüssiger Luft beschickt. Über etwa 650° erfolgte dann eine mehr oder weniger starke Sauerstoffabgabe, indem das beim Lagern des Kupfers sich bildende Oxyd reduziert wird. Etwa beim Schmelzpunkt beginnt schwächste Verdampfung; es wurde bei rund 1700° absolut etwa eine halbe bis eine Stunde lang verdampft. Verdampfte man in 20 Minuten die gleiche Menge (also bei höheren Temperaturen), so wurde der Niederschlag unscharf.

Fig. 19 zeigt einen Versuch, welcher ganz schwach mit Silber entwickelt wurde, um eine bessere Mikrophotographie davon herstellen zu können. Im ganzen sind 5 Kupferversuche gemacht, davon zwei im direkten Wechsel mit Silberversuchen, so daß diese zu einer relativen Messung des magnetischen Moments des Kupferatoms verwendet werden können. Nach der obenstehenden Formel (S. 184) müssen bei gleichen geometrischen Abmessungen und Feldwerten ($\partial \xi / \partial s = 200000 \text{ Gauss}\cdot\text{cm}^{-1}$) die Ablenkungen sich umgekehrt wie die Verdampfungstemperaturen verhalten. Das Verhältnis der letzteren war

$$\frac{T_{\text{Kupfer}}}{T_{\text{Silber}}} = 1,2.$$

Die Daten der Kupferversuche sind

	Versuch 25. 8. 1924	Versuch 16. 8. 1924
Aufspaltungsstrecke breit . . .	$\pm 0,013 \text{ mm}$	$\pm 0,02 \text{ mm}$
„ lang . . .	0,75 „	0,75 „
Mittlere Ablenkung des abgestoßenen Strahls . . .	0,092 „	0,10 „

Zum Vergleich wurde der beste Silberversuch herangezogen, der eine Ablenkung von 0,12 mm ergeben hatte.

Das Verhältnis der gemessenen Ablenkungen bei den zwei Versuchen

$$\frac{s_{\text{Silber}}}{s_{\text{Kupfer}}} = 1,2 \text{ bzw. } 1,3, \text{ Mittel } 1,25.$$

Berücksichtigte man die für Kupfer geringere Korrektur wegen der kleinen Veränderung der Inhomogenität bei der kleineren Ablenkung längs des Weges im Feld, so wurde die Übereinstimmung besser. Doch führte man die Rechnung nicht aus, um keine nicht vorhandene Genauigkeit des Experiments vorzutäuschen. Die übrigen drei, mit anderen Anordnungen ausgeführten Versuche ergaben stets eine ganz gleichartige Aufspaltung.

Gold. (Fig. 20, Taf. IV.) Es sind 3 Versuche mit Magnetfeld ausgeführt, davon einer mit einer früheren Apparatur und zwei wechselweise mit einem Silberversuch. Die Aufspaltung dieser beiden Versuche wurde zu 0,09—0,10 mm, also im Mittel 0,095 mm gemessen. Die Verdampfungstemperatur

wurde nicht bestimmt. Jedoch ist diese zu schätzen als nur wenig höher als die Kupferverdampfungstemperatur, da beide Metalle in ganz gleichen Öfchen verdampft wurden, Gold mit 142, Kupfer mit 139 Watt Öfchenbelastung. Die 25 Proz. geringere Aufspaltung als Silber entspricht also dem reziproken Verhalten der Verdampfungstemperatur. Das normale Goldatom hat ebenfalls ein Bohrsches Magneton. Hiermit ist bewiesen, daß die in der ersten Spalte des periodischen Systems stehenden Elemente Kupfer, Silber, Gold, ein magnetisches Moment haben, welches für alle den von der Quantentheorie geforderten Wert hat. Die Einstellung der Atome im Feld erfolgt gemäß der Richtungsquantelungstheorie.

b) Thallium.

Mit Thallium sind bisher nur die schon a. a. O. II. mitgeteilten Versuche ausgeführt. Das Ergebnis, eine schwache Verbreiterung im Felde, läßt auf eine geringe magnetische Beeinflussung schließen. Die Verbreiterung und das Fehlen nicht abgelenkter Atome ist leicht sicher zu stellen, weil hiermit eine sofort in die Augen fallende Intensitätsverminderung des unentwickelten Bildes im Inhomogenitätsbereich einhergeht.

c) Zinn.

Mit Zinn waren früher (a. a. O. II.) zwei Versuche gemacht, welche eine sichere Entscheidung nicht gestatteten. Nun sind sieben weitere Versuche, darunter einer ohne Feld, abwechselnd mit Kontrollmessungen mit Silber und Kupfer ausgeführt worden. Wie in der vorläufigen Notiz mitgeteilt, verbreiterten sich die Sn-Niederschläge mit längerer Entwicklung recht beträchtlich. Dies kam, wie sicher aufgeklärt ist, durch zu hohe Strahldichte. Zinn ist zunächst mit einer Oxydschicht bedeckt, welche die Atome nicht hindurch läßt. Man muß auf über 1200° erhitzen, bis merkliche Verdampfung eintritt. Dann nimmt die Verdampfung plötzlich ganz außerordentlich zu, man muß die Temperatur des Öfchens um 200—300° erniedrigen. Offenbar wird das Oxyd im Hochvakuum reduziert oder durch das Hin- und Herlaufen des geschmolzenen Zinns im Öfchen¹⁾ mechanisch entfernt. Bei schnell hintereinander

1) Vgl. E. Tiede u. E. Birnbräuer, Ztschr. f. anorgan. Chem. 87. S. 129. 1914.

folgenden Versuchen ohne neue Beschickung des Öfchens fällt die anfängliche Überhitzung fort, die Oberfläche oxydiert sich an der Luft nur langsam. Alle Versuche ergaben nun eindeutig *keine* Beeinflussung des Atomstrahls durch das Magnetfeld: Fig. 21 auf Taf. V gibt einen Versuch mit Feld.

Überraschende Bilder ergaben sich bei Verdampfung mit sehr hoher Strahldichte (Fig. 22, Taf. V). Bei der Entwicklung des unsichtbaren Niederschlags erschien fast momentan ein Profil des ganzen Feldraumes; die hintereinander herlaufenden Atome stören sich, der Atomstrahl verbreitert sich und „photographiert“ so als Schattenbild das Profil der Polschuhe. Der eigentliche Strich, das Spaltbild selbst, erscheint dabei als Negativ, es entwickelt sich nicht. Gleichzeitig sieht man auch aus dieser Photographie — die mit Magnetfeld $200\,000\text{ Gauß cm}^{-1}$ aufgenommen —, daß das Spaltbild vollkommen glatt an der Schneide vorbeiläuft, also keine Beeinflussung vorhanden ist.

d) Blei.

Zu den 5 Versuchen mit $100\,000\text{ Gauß cm}^{-1}$ der a. a. O. II Mitteilung wurden zwei weitere mit starkem Feldgefälle hinzugefügt. Die Fig. 23 auf Taf. V gibt einen *ohne Entwicklung* erhaltenen Niederschlag; um ihn genügend dick zu bekommen, mußten 2 Verdampfungsversuche auf dasselbe Plättchen ausgeführt werden. Dies ist mit der Anordnung ohne irgendwelche Bedenken möglich, da das Plättchen relativ zum Feld starr gehalten ist. Man kann aber die erforderliche Menge nicht in einem Versuch verdampfen, da der Spalt völlig zuwachsen würde. Das Niederschlagsplättchen aus $0,2\text{ mm}$ dickem Spiegelglas ist mit flüssiger Luft gekühlt. Das frühere Ergebnis: *Keine Einwirkung des Magnetfeldes* ist also völlig bestätigt.

e) Antimon und Wismut.

Es wurden 5 Versuche mit *Antimon* ausgeführt, davon drei mit Magnetfeld $200\,000\text{ Gauß cm}^{-1}$. Die Verdampfungstemperatur lag zwischen 400 und 500° C , das Auffangplättchen war mit flüssiger Luft gekühlt. Fig. 27 zeigt einen Versuch mit Feld. Der Niederschlag war ohne Entwicklung gut sichtbar als gerader Strich. Während der ohne Feld aufgenommene

Niederschlag nicht verdickt wurde, entwickelte man den mit Feld, um eine eventuelle schwache Beeinflussung doch sichtbar zu machen: Der Strich blieb absolut gerade: es tritt keinerlei Beeinflussung des Strahls durch das Feld ein. Bezüglich der Frage, ob der Strahl aus Atomen oder Molekülen besteht, siehe das folgende Kapitel.

Auch *Wismut* wurde auf gekühlten Plättchen aufgefangen. Es ergab sich stets — 7 Versuche mit Feld und Kontrollversuch mit Silber — außer dem unabgelenkten Strahl ein außerordentlich stark angezogener Strahl. Fig. 25, 26 auf Taf. V zeigt zwei Bilder. Eine nähere Diskussion sei zurückgestellt, bis weitere Versuche vorliegen. Auch hier sei nochmals auf die äußerst auffallende Entwicklungsanomalie hingewiesen: im durchfallenden Licht ist die Mitte des unabgelenkten Strahles hell, begrenzt von dunklen Rändern: *sicherlich keine Aufspaltung!* Und weiterhin sieht man sehr deutlich das Herauslaufen des abgelenkten Strahls aus dem unabgelenkten an der Verminderung der Niederschlagsdichte.

f) Nickel.

Mit Nickel (chemisch reinstes Metall von W. C. Heraeus, Hanau, vakuumgeschmolzen) wurden 11 Versuche gemacht, darunter zwei ohne Magnetfeld. Verdampft wurde $1\frac{1}{4}$ bis 2 Stunden bei einer Heizung von etwa 130 Watt; das entspricht einer Temperatur von rund 1400—1500°; gemessen wurde die Temperatur nicht. Die Inhomogenität bei 2 Versuchen war 100000, bei den übrigen 200000 Gauß cm^{-1} . Sämtliche Niederschläge mußten entwickelt werden, jedoch kam das Bild stets nach sekundenlanger Entwicklung schon ganz stark heraus. *Alle mit Magnetfeld gemachten Aufnahmen zeigten eine außerordentlich starke Beeinflussung des Atomstrahls durch das Feld:* Der Niederschlag war zunächst nach beiden Seiten sehr stark verbreitert, so daß sich stets die Konturen der Magnetpole abzeichneten. Da die Verteilung der Inhomogenität bei dem weiten (1,1 mm) Abstand der Polschuhe zu ungünstig ist, ergab sich in der Mitte nur ein kurzer dicker verwaschener Klecks. Es wurden daher die neun übrigen Versuche mit dem engen Abstand gemacht, wo sich eine starke Beeinflussung des Silberatomstrahls auf über 1 mm Länge

ergeben hatte. Schon der erste Versuch mit dieser Anordnung zeigte deutliche Struktur: der mittlere verbreiterte Teil ließ deutlich 3 Intensitätsmaxima erkennen, die bei einem Versuch, Fig. 28a auf Taf. IV, sich auch recht gut entwickelten. Es sei dieser Versuch besprochen an Hand eines stark schematisierten Bildes, Fig. 27. Man erkennt zunächst die beiden Polschuhe mit dem Quarzfaden.

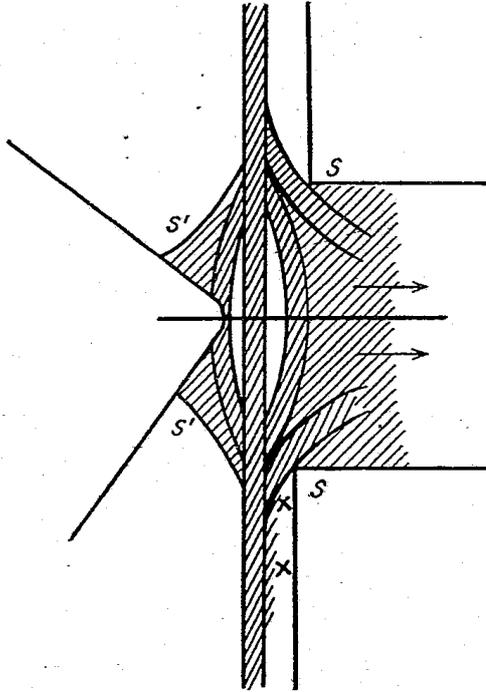


Fig. 27.

Der eine Teil des Spaltpol-schuhes war etwa 0,25, der andere etwa 0,17 mm von der Mitte des Strahls entfernt. Bei der Entwicklung des Niederschlags erscheinen zuerst die beiden Enden und sofort darauf drei diskrete Striche in der Mitte, davon einer an Stelle des unabgelenkten Strahles. Bei stärkerer Entwicklung *verbreitern* sich die beiden Enden und die beiden abgelenkten Strahlen, während der mittlere Streifen scharf bleibt. Es entstehen dann erst die beiden breiten Schwänze *ss* gegenüber den Ecken des Spalt-poles, welche sich nun aber sehr schnell dick ent-

wickeln, sowie die ausgezogenen Verbreiterungen am Schneiden-pol *s's'*.

Die Mikrophotographie zeigt außer dem Schatten des Fadens in der Mitte noch einen Schattenstrich gerade an der Grenze der Aufspaltung, welcher von einem kleinen Faden an der einen Ecke des Spalt-pols herrührt (zu dessen Markierung) und einem breiteren Schatteneinschnitt; letzterer rührt von einer Unebenheit des einen Teils des Spalt-pols her; und sein Auftreten zeigt, daß auch der Teil des Strahls, welcher in 0,15 mm Entfernung von dem flachen Polschuhteil entfernt

vorbei ging ($\times \times$ in der schemat. Fig. 27) schon durch das Feld ganz beträchtlich verbreitert ist. Das ohne Feld aufgenommene, gleichfalls sehr starke — wohl sogar stärker als der Magnetversuch — entwickelte Bild der Fig. 28 b der Tafel zeigt die wahre Breite des unbeeinflussten Strahls und die Fig. 28 c der Tafel gibt einen unmittelbar anschließend an die beiden Nickelversuche ausgeführten Silberversuch mit Feld, bei welchem höchstens eine nur sehr geringe Verbreiterung der beiden Enden vorhanden ist.

Werden die Niederschläge noch stärker entwickelt, so verbreitert sich der *abgestoßene Strahl* zu einem fast 3 mm breiten Schwanz (\approx der schematischen Figur), in dem aber bis jetzt keine Struktur mit Sicherheit nachgewiesen werden konnte. Die beiden Schwänze (schematische Fig. s, s) gegenüber den Ecken des Spalt Pols müssen wohl als Ablenkung in der da recht beträchtlichen Inhomogenität angesehen werden, man möchte in ihnen also vorerst nicht eine Andeutung eines weiteren Aufspaltungsgliedes sehen; für dieses scheinen aber die in ihrer Ausdehnung durch die Schneide begrenzten Schwänze $s' s'$ der schematischen Figur zu sprechen.

Die Verbreiterung \rightarrow *des Atomstrahls spricht ebenfalls für die Anwesenheit von Atomen mit sehr starkem Moment.* Solche Atome werden schon nach kurzer Laufstrecke im Magnetfeld so stark abgelenkt sein, daß sie in den Ausschnitt des Spalt Pols kommen und in dem da herrschenden sehr schwachen Feldgradienten tangential weiter fliegen. Da sich über diese die Atome lagern, welche mit etwas schwächerem Moment erst nach größerer Laufstrecke so stark abgelenkt ist, ist klar, daß eine quantenmäßige Struktur verwischt sein muß. Die den abgestoßenen Atomen korrespondierenden angezogenen fallen auf die Schneide und gehen somit verloren. Man hat, bis jetzt leider ohne Erfolg, Aufspaltungsbilder mit klareren Einzelheiten zu bekommen; doch ist von weiteren etwas modifizierten Versuchen Aufklärung zu erhoffen.

Von den 9 Versuchen zeigen drei sehr deutlich die drei diskreten Strahlen, andere nur die ganz starke Verbreiterung; ein gutes Bild zu erhalten, hängt vom Zufall ab, es muß gerade eine bestimmte Niederschlagsdicke erreicht sein; die Entwicklung eines feines Striches hängt nämlich stark davon

ab, ob in seiner Nähe auch Kristallisationskerne liegen: hat man — wie bei Nickel — schmale und breite belegte Flächen nebeneinander, so entwickeln sich letztere viel schneller, auch wenn erstere dicker belegt sind.

Die Ausmessung des abgelenkten Streifens, unter dem Mikroskop an dem Originalplättchen gut möglich, ergibt eine Verlagerung desselben um etwa 0,18 mm, gegen 0,12 mm bei dem Silberversuch.

g) Eisen.

Die Verdampfung von Eisen in genügender Strahldichte verlangt Temperaturen solcher Höhe, welche ein Öfchen nur einmal aushält. Das Öfchen muß immer mit Al_2O_3 dick ausgestrichen sein, da die Marquardtsche Masse durchfressen wird. Die Verdampfungstemperatur lag wesentlich über dem Schmelzpunkt des reinsten, vakuumgeschmolzenen Elektrolyt-eisens (von Herrn Dr. F. Specketer von Griesheim-Elektron freundlichst zur Verfügung gestellt); die Marquardtsche Masse selbst wurde so weich, daß das Öfchen sich deformierte (Energiezufuhr 190—200 Watt); es hielt meist 2 Stunden. Der Niederschlag war bei allen 4 Versuchen zunächst unsichtbar, erschien aber im Entwickler *schnell zunächst als feiner gerader Strich gleichmäßiger Stärke*, zu dünn, um photographisch aufgenommen werden zu können; mit fortgesetzter Entwicklung zerriß der anfänglich zusammenhängende Strich in einzelne Flecken, welche sich nur schwach verstärken. Fig. 29 auf Taf. V zeigt ein solches Bild.¹⁾ Es ist so lange weiter entwickelt worden, bis das Plättchen stark verschleierte. Man erkennt aber doch deutlich an der mit dem Pfeil bezeichneten Stelle das gerade Durchlaufen des Strichs durch den Inhomogenitätsbereich. Es wurde niemals weder eine Verbreiterung, noch eine Intensitätsverminderung an dieser Stelle beobachtet, so daß eine *magnetische Beeinflussbarkeit des Eisenatoms bisher nicht festgestellt werden konnte*.

§ 10. Diskussion der Versuchsergebnisse.

Wir besprechen zunächst die Versuche, welche ein eindeutiges und endgültiges Ergebnis geliefert haben. Das sind

1) Sämtliche Originale sind natürlich viel deutlicher!

zunächst die Metalle *Kupfer*, *Silber*, *Gold*, deren vollständig übereinstimmendes Verhalten oben bereits diskutiert wurde: nicht nur *qualitativ* ergibt sich eine Aufspaltung des Atomstrahls in zwei Strahlen, deren einer im Sinn der Kraftlinien, deren anderer im Gegensinn der Kraftlinien abgelenkt wird. Auch *quantitativ* folgt aus der Größe der Aufspaltung ein gleiches wirkendes magnetisches Moment der Atome. Da an der Einatomigkeit¹⁾ des Dampfes nicht gezweifelt werden kann (durch Dampfdichtemessungen scheint diese allerdings nur für Silber nachgewiesen), gehört das Moment zum Normalzustand. Die Aufspaltung in gleich große Anzahl angezogener und abgelenkter Atome war bereits a. a. O. II nachgewiesen. Diese Atome zeigen also ganz das Verhalten, welches die Richtungsquantelungstheorie von einquantigen Atomen oder allgemeiner solchen Atomen mit einem scheinbaren (effektiven) Moment von einem Magneton verlangt.

Thallium verdampft gleichfalls einatomig. Wenn auch vorerst davon abgesehen wurde, quantitative Messungen auszuführen, so steht doch qualitativ die geringe magnetische Beeinflussung mit den Aussagen der erweiterten Richtungsquantelungstheorie und dem spektroskopisch bekannten Normalzustand in Übereinstimmung.

Bleidampf ist gleichfalls einatomig und von *Zinndampf* kann dasselbe angenommen werden. Beide erleiden mit Sicherheit keine Beeinflussung durch das Magnetfeld. Die Blei- und Zinnatome im Normalzustand sind also unmagnetisch. Auch bei stark exponierten Aufnahmen, besonders mit Zinn ausgeführt, sind keine abgelenkten Atome zu sehen, die Konturen des Niederschlags sind im Bereich stärkster Inhomogenität vollkommen glatt ohne eine Andeutung eines Auslaufens oder einer *Intensitätsverminderung* oder einer Verbreiterung. Der Nachweis der Unbeeinflusstheit der Pb-Atome ist besonders dadurch recht sicher, daß die Atome bei viel niedriger Temperatur als Silber und Kupferatome verdampft werden. Die Größe der Ablenkung ist nämlich *cet. par.* der Verdampfungstemperatur umgekehrt proportional. Bei Sn hätte $\pm \frac{1}{2}$ Magneton

1) Zur Diskussion der Einatomigkeit im folgenden siehe H. v. Wartenberg, Zeitschr. f. anorgan. Chem. 56. S. 320. 1908.

sicher nachgewiesen werden können, dagegen würde $\pm \frac{1}{3} M$ wohl vorläufig der Wahrnehmung entzogen.

Wismut- und Antimondampf enthält zweifellos auch Moleküle. Dies folgt aus Messungen der Dampfdichte (Molekulargewichtsbestimmungen) von Biltz und von v. Wartenberg¹⁾ mit Antimon und von Crafts und von v. Wartenberg mit Wismut. Wismutdampf enthält neben Mehrfachmolekülen²⁾ auch Atome, während Antimondampf offenbar keine oder nur wenige Atome und kompliziertere Moleküle als Doppelmoleküle enthält. Das ist in Übereinstimmung mit Grotrians³⁾ Untersuchungen über die Linien- und Bandenabsorption von Wismut und Antimon. Aus diesen Gründen ist eine endgültige theoretische Deutung der Bi- und Sb-Versuche unmöglich. Man muß versuchen, überhitzten Wismut- und Antimondampf herzustellen, da oberhalb 2000° C. die Dämpfe einatomig sind. Bei Antimon ist wieder auf die Sicherheit des Ergebnisses hinzuweisen, da es bei sehr niedriger Temperatur verdampft.

Nickeldampf wird ebenfalls als einatomig angesehen. Das Nickelatom im Normalzustand hat ein magnetisches Moment von mehreren Einheiten. Sicher nachgewiesen sind Einstellungen, welchen 0 und $\pm i$ Magnetonen (i etwa gleich 2) entsprechen, wahrscheinlich — wie oben schon an Hand der Aufnahmen diskutiert — ist das Gesamtmoment des Nickelatoms größer als 2 oder sind auch Atome noch höheren Moments da. Dieses Ergebnis bringt zwei neue Bestätigungen der Richtungsquantelungstheorie: Einmal ist auch hier eine Aufspaltung in einen angezogenen und einen abgelenkten Teil vorhanden und zweitens ist die bei geradzahligen Momentzahlen verlangte „Nullstellung“ vorhanden. Außerdem ist das Auftreten der Nulllinie aus den Aussagen des spektroskopischen Wechselsatzes zu erwarten. Nickel ist das erste Beispiel, in dem ein „Multiplett“ direkt durch den Atomstrahlversuch nach-

1) Lit. und Näheres s. H. v. Wartenberg, a. a. O. Molekulargewicht des Antimon bei 1640° C. 284 (statt 120), des Wismuts bei 1650° C. 350 (statt 208).

2) Man kann schätzen, daß etwa 20 Moleküle im Atomdampf (oder umgekehrt) sich in unserem Bild noch *nicht* als Niederschlag bemerkbar machen würden.

3) W. Grotrian, Zeitschr. f. Physik 18. S. 169. 1923.

Alle Figuren sind etwa 9fach vergrößert

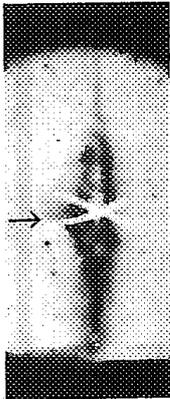


Fig. 17.
Silber

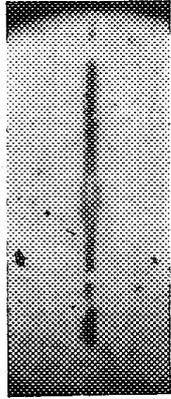


Fig. 18.
Silber

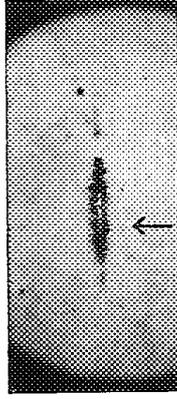


Fig. 19.
Kupfer

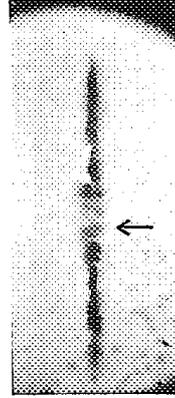


Fig. 20.
Gold

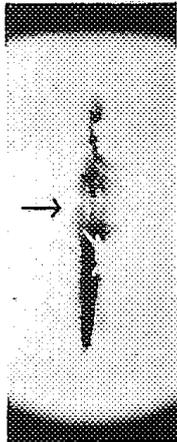


Fig. 28a.
Nickel
200000 Gauss·cm⁻²

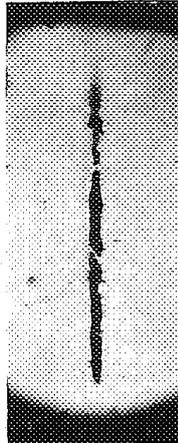


Fig. 28b.
Nickel
ohne Feld

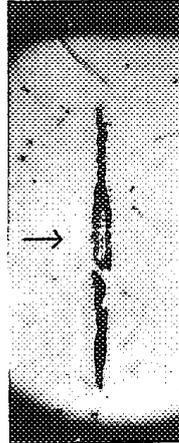


Fig. 28c.
Silber
200000 Gauss·cm⁻²

W. Gerlach.

THE
JOHN GRERAK
LIBRARY

Alle Figuren sind etwa 9fach vergrößert

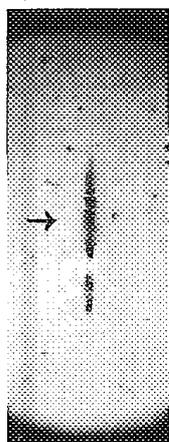


Fig. 21.
Zinn

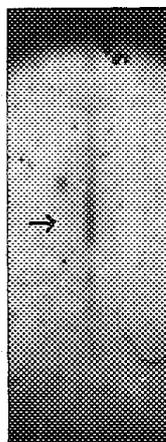


Fig. 23.
Blei
200000 Gauss.cm⁻¹

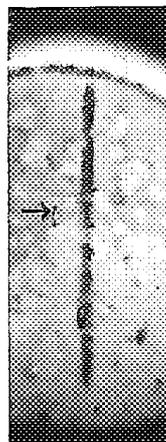


Fig. 24.
Antimon
200000 Gauss.cm⁻¹

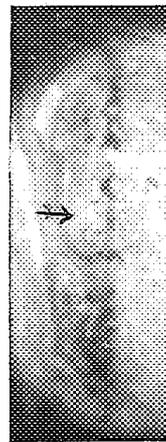


Fig. 29.
Eisen
200000 Gauss.cm⁻¹

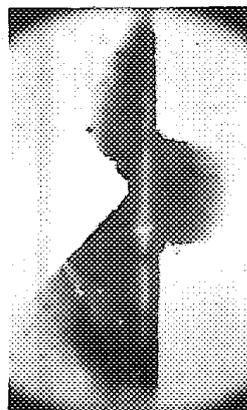


Fig. 22.
Zinn
Dampfstrahl

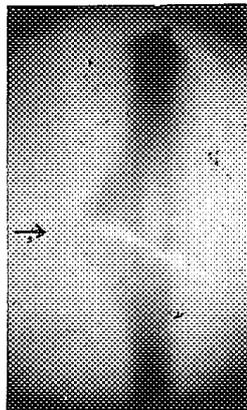


Fig. 25.
Wismut
mit Feld

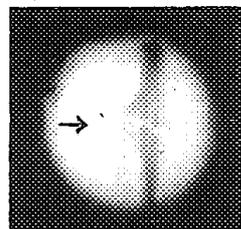


Fig. 26
Wismut
mit Feld

W. Gerlach.

THE
JOHN CRERAR
LIBRARY,

gewiesen ist. Es ist zu hoffen, mit etwas geänderter Methodik ein vollständigeres Aufspaltungsbild zu erhalten.

Eisendampf wird als einatomig angesehen. Da eine Beeinflussung durch das Magnetfeld nicht gefunden werden konnte, ist das Eisenatom im Normalzustand unmagnetisch. Besonders auffallend scheint, daß von den nach der optischen Analyse des Spektrums¹⁾ zu erwartenden magnetischen Zuständen, welche dem Normalzustand energisch außerordentlich nahe benachbart sind, im Atomstrahlversuch nichts wahrgenommen wird. Wenn auch diese Versuche noch weiterer Vervollkommnung bedürfen, so scheint doch auch der Hinweis erlaubt, daß die Spektrumanalyse und die Absorptionsmessungen deshalb einstweilen unvollkommen sind, weil sich letztere Messungen nur bis etwa 2500° A. erstrecken, bedeutend stärkere Absorptionen aber unterhalb 2200° A. liegen.²⁾

Verfasser möchte auch an dieser Stelle in aufrichtiger Dankbarkeit der Stifter gedenken, welche die Ausführung dieser Untersuchung ermöglichten: Der Notgemeinschaft Deutscher Wissenschaft und ihrer beiden Ausschüsse, dem Hoshi- und dem Elektrophysikausschuß, dem K-W-Institut für Physik, Hrn. Kommerzienrat E. Zentz in München, der Firma Messer & Co. in Frankfurt a. M.

Besonderer Dank gebührt Hrn. A. C. Cilliers aus Stellenbosch (Südafrika) für seine erfolgreiche Mitarbeit bei den Vorversuchen und dem Institutsmechanikermeister Hrn. Adolf Schmidt für seine stete Hilfe.

Frankfurt a. M., Physikal. Institut, September 1924.

1) W. Grotrian, H. Gieseler u. W. Grotrian, O. Laporte.

2) Noch unveröffentlichte Untersuchungen des Verfassers.

(Eingegangen 7. Oktober 1924.)