

2. *Diamagnetismus bei schwachen Feldstärken; von O. E. Frivold.*

(Vorläufige Mitteilung.)

Es liegt nahe, zu untersuchen, ob schwach magnetisierbare Körper eine Suszeptibilität besitzen, die von der magnetischen Feldstärke abhängig ist.

Diese Verhältnisse sind in neuerer Zeit auch von verschiedenen Forschern untersucht worden, u. a. besonders von K. Honda in der Abhandlung „Über thermomagnetische Eigenschaften der Elemente“.¹⁾ Honda findet hier auch eine Feldabhängigkeit, sowohl für paramagnetische wie diamagnetische Elemente. Für Indium findet er sogar Paramagnetismus bei schwachen Feldstärken und Diamagnetismus bei höheren Feldstärken. Jedoch nähert sich die Suszeptibilität immer einem konstanten Endwerte bei sehr hohen Feldstärken. Honda meint, daß diese Feldabhängigkeit durch ganz kleine Mengen von Eisen, die fast immer vorhanden sind, verursacht wird, und zeigt, wie man die Suszeptibilität des reinen Metalles unter diesen Voraussetzungen berechnen kann.

Vor kurzem haben Overbeck und Weber²⁾ bei Zn-Cu-Legierungen beobachtet, daß einige Proben bei schwachen Feldstärken Paramagnetismus aufweisen, dagegen Diamagnetismus bei stärkeren Feldern. Magnetismus dieser Art wird Metamagnetismus genannt.

Diese Eigentümlichkeiten sind in einer statistischen Theorie des Dia-, Para- und Metamagnetismus von R. Gans³⁾ behandelt worden.

Unter der Annahme, daß ein Magneton aus einem starren Elektronensystem besteht, so zeigt sich, daß die Erregung immer diamagnetisch ist, wenn das Magneton keine Figuren-

1) K. Honda, Ann. d. Phys. **32**, p. 1027. 1910.

2) K. Overbeck, Ann. d. Phys. **46**, 1915. p. 677.

3) R. Gans, Ann. d. Phys. **49**, p. 149. 1916

achse besitzt. Sind die drei Hauptträgheitsmomente des Magnetons einander gleich, so wird die Suszeptibilität völlig unabhängig von der Feldstärke und Temperatur. Sind dagegen die Hauptträgheitsmomente einander nicht gleich, dann ergibt sich eine Feldabhängigkeit (und Temperaturabhängigkeit), und zwar hat die $\chi - H$ -Kurve — wo χ die spezifische Suszeptibilität und H die magnetische Feldstärke bezeichnen — den Verlauf, der auf Fig. 1 dargestellt wird.

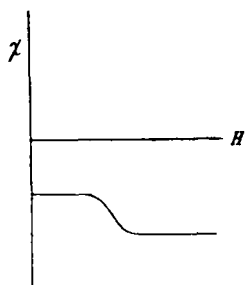


Fig. 1.

Gans meint, daß es nicht ganz sicher erscheine, ob die von Honda festgestellte Feldabhängigkeit sich auf Eisenverunreinigung zurückführen lasse. Es ist deshalb dringend erwünscht, die Messungen für schwache Felder zu ergänzen, um entscheiden zu können, ob die vollständige Kurve der Fig. 1 entspricht.

Ein quantitativer Vergleich der Theorie mit den Messungen wird eine Berechnung der Anzahl von Magnetonen in Kubikzentimetern und der Hauptträgheitsmomente derselben ermöglichen.

Besitzt das Magoneton eine Figurenachse, dann ist die Erregung nach der Theorie paramagnetisch, aber in der Weise, daß auch der paramagnetische Körper diamagnetische Eigenschaften besitzt, die den thermischen Rotationen der Magnetonen um die zwei äquatorialen Hauptträgheitsachsen entsprechen.

Bei niedrigen Temperaturen und kleinen Feldern kann der Paramagnetismus überwiegen; er geht aber bei höheren Temperaturen sowie bei stärkeren Feldern in Diamagnetismus über.

Der Zweck dieser Untersuchungen war, die Feldabhängigkeit bei möglichst schwachen Feldern für reine diamagnetische Elemente nachzuweisen, um, wenn möglich, die erwähnte Theorie nachzuprüfen. Die dabei angewendete Versuchsanordnung, die eine Abänderung des gewöhnlichen Torsionsverfahrens war, ermöglichte quantitative Bestimmungen von $H = \text{ca. } 50$ Gauss und aufwärts (bei dieser vorläufigen Untersuchung bis $H = \text{ca. } 1000$ Gauss).

Gleich an dieser Stelle soll mitgeteilt werden, daß die Messungen zwar eine Feldabhängigkeit bei ganz kleinen Feldstärken für fast alle untersuchten Elemente ergaben, daß aber die erhaltenen Kurven ($\chi - H$) nur bei Gold mit Fig. 1 übereinstimmten (Zn zeigte eine konstante Suszeptibilität zwischen $H = 100$ Gauss und 700 Gauss; eine Feldabhängigkeit konnte hier nicht festgestellt werden). Untersucht wurden die Elemente Sb, Te, S, Zn, Ag und Au, die alle früher als diamagnetisch angesehen worden waren. Ag zeigte Paramagnetismus bei kleinen Feldwerten bis $H = \text{ca. } 800$ Gauss, dagegen Diamagnetismus bei höheren Feldwerten; Metamagnetismus wurde also bei Silber nachgewiesen.

Versuchsmaterial.

Antimon wurde aus Brechweinstein und Zucker mit Zusatz von etwas Soda im Porzellantiegel bei hoher Temperatur hergestellt. Die dabei verwendeten Chemikalien waren von sehr reiner Qualität.

Das Zink war von der Firma Merck geliefert; die Gold- und Silberproben von der Firma Kahlbaum bezogen. Das Tellurium und der Schwefel wurden von einer hiesigen Firma geliefert.

Jede Probe wurde sorgfältig mit Schmirgelpapier abgerieben, wie auch nachträglich in reiner Salzsäure abgewaschen oder abgekocht, je nach der Löslichkeit.

Der Chemiker Johs. Lindeman des hiesigen Chemischen Laboratoriums der Universität hatte freundlichst die angegebenen Substanzen (mit Ausnahme von Au, da die ganze Probe zu den Messungen verwendet werden mußte und daher erst später analysiert werden konnte) samt einer Probe von dabei verwendetem destillierten Wasser einer kolorimetrischen Eisenbestimmung unterworfen.

Alle Substanzen wurden erst in allerreinsten Salzsäure oder Salpetersäure aufgelöst. Darauf wurde die Lösung vom Hauptelement wieder möglichst befreit, z. B. durch Fällung mit H_2S oder anderen Mitteln, in der Weise, daß dreiwertiges Eisen in Salzsäurer-Lösung zurückblieb. (Was Zink und Wasser betrifft, sind die Bestimmungen ohne vorherige Fällungen vorgenommen worden.)

Das Residuum wird zur Trockene verdampft, in Wasser aufgelöst und ihm darauf ein paar Tropfen Perhydrol zu-

gesetzt, 6 ccm HCl 3 Proz. und 10 ccm NH_4CNS -Lösung 7 Proz. Die Flüssigkeit wurde in einen Hehnerzylinder Nr. I hineingebracht, darauf in den Zylinder Nr. II etwas Wasser zugesetzt, 6 ccm HCl 3 Proz. und 10 ccm NH_4CNS -Lösung 7 Proz. — Eine schwache Fe-Lösung [0,014 mg Fe pro ccm Ursubstanz $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ Merck p. a.] wurde aus einer Bürette hineingetropft, bis fast derselbe Farbenton in beiden Zylindern I und II auftrat.¹⁾ Die Flüssigkeit wurde dann mit Wasser verdünnt, bis in den Zylindern I und II das gleiche Volumen erreicht war, worauf mit dem Hinzutropfen fortgesetzt wurde, bis die gleiche Farbe erzielt war. Vom Eisenverbrauch wurde der Eisengehalt in den Proben berechnet.

Ferner wurde ein Überschuß an Eisenlösung der Flüssigkeit in Zylinder II zugesetzt, beide Flüssigkeiten in den Zylindern I und II darauf auf ein gleiches Volumen gebracht und schließlich aus Zylinder II so viel Flüssigkeit abgezapft, bis wieder in beiden Zylindern die gleiche Farbe erzielt war.²⁾

Von der im ganzen zugesetzten Lösung, dem Volumen vor und nach der Abzapfung, erhält man eine neue Bestimmung für die Eisenmenge in Zylinder I. In dem Mittelwerte der beiden Bestimmungen ist eine etwaige Unsicherheit in der Beurteilung des Farbentons teilweise wenigstens eliminiert. Die Frage nach der Zuverlässigkeit in der Bestimmung von Fe-Mengen mittels der kolorimetrischen Rhodanmethode näher zu behandeln, war leider keine Zeit.³⁾

In jedem Falle wurde eine Blindanalyse mit den angewendeten Reagensen ausgeführt und die erhaltenen Eisenmengen in Rechnung gezogen.

Die Analysen lieferten folgende Ergebnisse:

	Sb Eisengehalt	0,025 Prom.	Honda	0,018 Prom.
Zn	„	0,020	„	
Ag	„	0,008	„	0,006
S	„	0,008	„	0,400
Te	„	0,006	„	0,060
H ₂ O	„	< 7 · 10 ⁻⁶	„	

1) M. O. Mayer, Chem. Zentralbl. 1. p. 1629. 1913.

2) Bei den Farbenvergleichen wurde immer in der Längsrichtung in den Zylinder geblickt.

3) Angaben zur näheren Beleuchtung der Genauigkeit dieser Doppelbestimmung wird Hr. Lindeman bei einer späteren Gelegenheit veröffentlichen.

Die Analysenergebnisse Hondas sind hier ebenfalls angegeben.

Die Reinheit der untersuchten Elemente stimmt, wie man sieht, fast genau mit den Ergebnissen überein, zu denen Honda¹⁾ gelangt ist; nur die von ihm angewendete Schwefelprobe ist wesentlich reicher an Eisen.

Versuchsanordnung.

Die Versuchsanordnung war in der Hauptsache dieselbe wie bei Curie und anderen Forschern, d. h. die zu untersuchenden Körper befanden sich in einem ungleichförmigen Felde, und die auf sie wirkende Kraft wurde mittels einer Torsionswaage gemessen.

Es sei H_x der Feldwert an der betreffenden Stelle des Feldes (die x -Koordinate gibt die magnetische Kraftlinienrichtung an), dH_x/dy deren Gradient in einer Richtung senkrecht zu H_x , M die Masse der Probe und χ die spezifische Suszeptibilität derselben, dann ist bekanntlich die auf die Probe wirkende Kraftkomponente K_y durch die Gleichung

$$K_y = \chi \cdot M \cdot H_x \frac{dH_x}{dy}$$

gegeben.

Wird K_y , M , H_x und dH_x/dy gemessen, so kann χ berechnet werden.

Magnetisches Feld.

Die Bestimmung von H_x und dH_x/dy .

Der zu untersuchende Körper kommt an eine Stelle im Felde, wo

$$H_x \cdot \frac{dH_x}{dy}$$

ein Maximum ist.

Bei der Bestimmung von

$$H_x \text{ und } \frac{dH_x}{dy}$$

wurde das ballistische Verfahren angewendet.

Eine kleine Probespule F , deren Windungsfläche mit dem Mikroskop ausgemessen wurde ($F = 102 \text{ qcm}$), liegt in einem

1) K. Honda, l. c.

Messingrohre eingebettet. Dieses Messingrohr mit der Spule F ist um eine horizontale Achse AA drehbar, und der Drehungswinkel wird mittels des Zeigers G , der an einem eingeteilten Zirkel liegt, gemessen. Die Spule F , eine gegenseitige Induktion, der ballistische Drehspulengalvanometer, der die Induktionsstöße mißt, sowie ein Widerstandskasten blieben immer im Kreise. Das System wurde mittels der bekannten gegenseitigen Induktion justiert. Die Spule wurde mit ihrer Windungsfläche senkrecht zu den magnetischen Kraftlinien eingestellt, und zwar an der Stelle des Feldes, wo sich das Probestück bei den Torsionsmessungen befand. Die Spule wurde

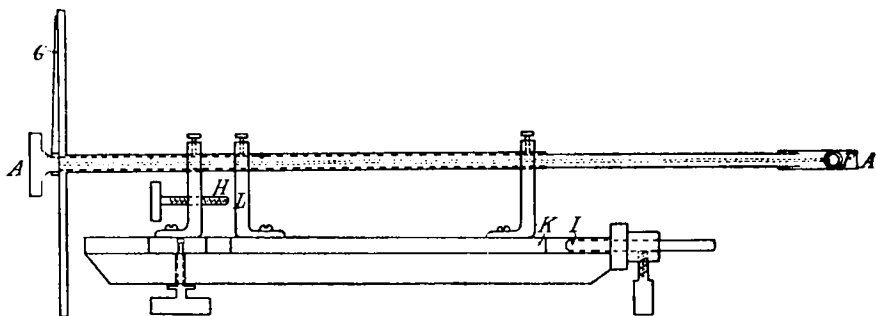


Fig. 2.

im Felde um einen Winkel gedreht und die Induktionsstöße mittels des ballistischen Galvanometers gemessen. Durch eine Verschiebung in der horizontalen y -Richtung zwischen den Anschlägen J und H konnte ΔH_x durch den ballistischen Ausschlag ermittelt werden. Die Größe Δy wurde auf folgende Weise sehr genau bestimmt. Ein Stückchen Draht, dessen Durchmesser mit einer Mikrometerschraube ausgemessen war, wurde zwischen K und J angebracht. Die Schraube H wurde gegen den Anschlag L so eingestellt, daß der Draht genau zwischen den Flächen J und K steckte. Da das ballistische Drehspulengalvanometer verhältnismäßig kleine Ausschläge für kleine Feldwerte gab, wurden auch einige Kontrollmessungen mit einem gewöhnlichen Drehspulengalvanometer von größerer Empfindlichkeit vorgenommen. Um ein solches Galvanometer in diesem Falle verwenden zu können, mußte er mittels einer geeigneten gegenseitigen Induktion für jeden gemessenen Aus-

schlag justiert werden. Beobachtet man z. B. einen Ausschlag u , wenn man die Spule um eine Strecke Δy im Felde verschiebt, so schaltet man nachher einen Strom von einer solchen Größe in der Primärwicklung der gegenseitigen Induktion ein, daß das Galvanometer bei Kommutieren des Stromes im Primärkreise einen gleich großen Ausschlag gibt. — Kennt man die gegenseitige Induktion, die Windungsfläche der Probepule und mißt dann den Strom im Primärkreise, so läßt sich die Variation ΔH leicht berechnen. Die Übereinstimmung der beiden Verfahren war ganz befriedigend.

Diese Kontrollmessungen wurden hauptsächlich deshalb vorgenommen, um den leniären Verlauf zwischen dH_x/dy und H bei den schwachen Feldwerten festzustellen.

Die Drehwage.

Die Kraft, die das inhomogene Magnetfeld auf das Probestück ausübt, ist mittels einer Kompensationswage ermittelt worden. Die Grundsätze, die der Konstruktion dieser Wage zugrunde liegen, sind dieselben, die Hr. A. W. Marke¹⁾ angewendet hat. Bei dieser Versuchsanordnung wird die Kraft, die das Magnetfeld auf das Probestück ausübt, mittels zwei Stromspulen kompensiert. Die Wage ist schematisch auf den Figg. 3 und 4 dargestellt.

$CHDSM_1$ bezeichnen das drehbare System. Dieses ist möglichst leicht verfertigt, um einen dünnen Draht zum Aufhängen verwenden zu können (ca. 0,05 mm im Durchmesser und ca. 40 cm lang). Der Teil $HDKS$ besteht aus Aluminium. Der Arm HK ist ca. 50 cm lang. D ist ein verstellbares Gegengewicht. C und C^1 sind zwei Kapseln aus Papier; die eine (C) befindet sich in dem inhomogenen Magnetfelde, die andere, wie ersichtlich, ist an einem dünnen Kupferdrahte ca. 40 cm. unterhalb der Polstücken aufgehängt. Die eine Spule M_1 (ca. 2000 Windungen) ist am oberen Ende des drehbaren Systemes befestigt. Diese Spule steht in Verbindung mit dem übrigen Stromkreise durch den Aufhängungsdraht E und eine kleine Spirale aus dünnem Platindraht (F).

1) A. W. Marke, Sur les propriétés thermomagnétiques de l'eau: Oversigt over det Kgl. danske Videnskabernes Selskab Forhandlinger 1916. Nr. 5 u. 6.

Zwei feste Spulen M_2 (ca. 1400 Windungen) sind an den Wänden des Zinkkastens angebracht. GG ist die Dämpfungsvorrichtung und besteht aus Glimmerblättchen.

Vermittelt meßbarer Ströme im M_1 und M_2 ist es möglich, die Wirkung des magnetischen Feldes zu kompensieren. Die Stellung des Systemes wurde mit Hilfe einer empfind-

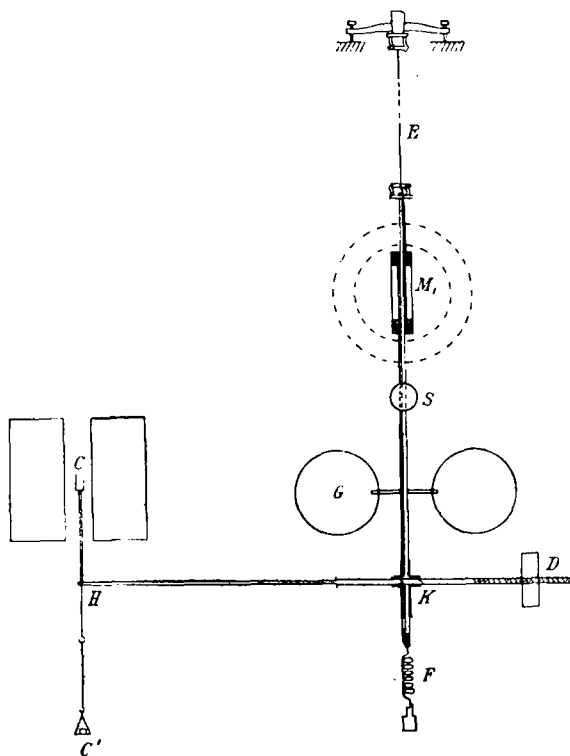


Fig. 3.

lichen Spiegelablesung bestimmt. Da der Skalaabstand ca. 400 cm, der Arm HK ca. 50 cm lang ist, ergibt eine Ablesungsgenauigkeit von ca. 0,5 mm an der Skala eine Einstellungsgenauigkeit im Felde von ca. 0,03 mm. Um auch bei den verschiedenen Messungen eine bestimmte Einstellung der Kapsel C in der Vertikalebene EKC zu ermöglichen, wurde durch Gewichte (aus Zink) auf C' immer das gleiche

Drehmoment an den Arm HK hervorgerufen. Im voraus wurde festgestellt, daß das Magnetfeld keine Wirkung auf die Gewichte C^1 ausübte.

Während der Kompensation wurde der Strom in der Drehspule M_1 durch den Kompensationskreis konstant gehalten. e_1 und e seien beziehungsweise eine Akkumulatorbatterie und ein Normalelement, R_1 sei der Regulierungswiderstand, R_2 ein Normalwiderstand, G ein empfindliches Galvanometer, R_3 ein Widerstand, parallel zur Spule M_1 eingeschaltet. Zeigt das Galvanometer keinen Ausschlag, so ist der Strom in dem Hauptkreise $i = \frac{e}{R_2}$. Kennt man gleichzeitig die Widerstände R_3 und M_1 , so ist der Strom A_1 in M_1 damit bestimmt. Der Strom A_2 wurde mit einem Präzisionszeigegalvanometer von Siemens & Halske gemessen.

Messungen.

Eine Messung wurde in dieser Weise vorgenommen. Zuerst kompensiert man mittels der Ströme A_1 und A_2 (in M_1 und M_2) die Torsionskraft im Aufhängungsdraht, bis der Lichtstreifen an der Skala im Gleichgewichte auf dem gewählten Index ist.

Die Kompensation wird dann auch vorgenommen, nachdem die Ströme in A_1 und A_2 kommentiert sind. Die Ablesungen am Amperemeter A_2 seien a und a^1 . Das Magnetfeld wird nunmehr erregt und die zwei Kompensationen werden aufs neue vorgenommen. Die Ablesungen seien nun b und b^1 . Die Kommentierung der Ströme wird vorgenommen, um den Einfluß fremder magnetischer Kräfte zu eliminieren (z. B. die Wirkung des Erdmagnetismus, und im zweiten Falle besonders die Wirkung des Elektromagneten).

Der Magnet wird dann sorgfältig entmagnetisiert und dieselben Kompensationen mit entgegengesetzter Stromrichtung im Magnet aufs neue wiederholt. Schließlich wird die Kompensation im Felde Null vorgenommen.

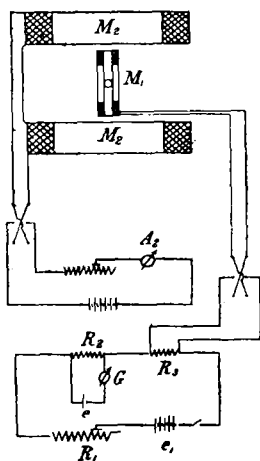


Fig. 4.

Tabelle I.

Tellur.

 $M = 2,0670 \text{ g. } A_1 = 24,04 \cdot 10^{-6} \text{ Amp.}$

Leere Kapsel.

a	a^1	$a + a^1$	$i_1 \cdot 10^8$ Amp.	J Amp.	b	b^1	$b + b^1$	$i_2 \cdot 10^8$ Amp.	$A_2 = (i_2 - i_1)$ 10^8 Amp.	$A_1 A_2 10^7$ Amp. ²
-70,5	-72,5	-143,0	-142,25	0,1004	$\uparrow - 67,9$ $\downarrow - 64,7$	-70,5 -65,9	-138,4 -130,6	-134,5	+	1,86
-69,8	-71,7	-141,5	-142,3	0,3005	-31,6	-33,6	-65,2	-56,92	+	20,52
-69,9	-71,7	-141,6	-143,0	0,602	-23,6	-25,05	-48,65	-244,1	+	385,87
-70,5	-72,5	-143,0	-141,75	1,003	+58,7 +62,8	+59,7 +62,9	+118,4 +125,7	+934,8	+	260
-70,2	-71,7	-141,9	-148,95	1,407	+92,3 +93,8	+94,2 +93,6	+186,5 +187,4	+194,6	+	506
-69,9	-71,7	-141,6	-145,5		+98,5 +95,2	+98,9 +96,6	+197,4 +191,8			
-73,8	-75,15	-148,95	-147,2							
-71,9	-73,6	-145,5	-163,4							
-71,9	-73,6	-145,5	-163,4							
-87,9	-93,4	-181,3								
Kapsel und Tellur.										
-67,05	-69,1	-136,15	-136,48	0,1004	$\uparrow - 66,6$ $\downarrow - 71,2$	-69,1 -72,9	-135,7 -144,1	-139,9	-	3,4
-67,4	-69,4	-136,8	-135,3	0,3018	-96,8	-98,7	-195,5	-180,1	-	44,37
-67,0	-68,3	-135,3	-136,15	0,6014	-81,4	-83,3	-164,7	-335,6	-	10,67
-67,05	-69,1	-136,15	-129,1	1,0012	-76,0	-77,9	-153,9	-167,8	-	48,8
-63,4	-65,7	-129,1	-132,2		-90,7	-91,0	-181,7	-831,8	-	164,9
-67,0	-68,3	-135,3	-147,7		-81,7	-83,4	-165,5	-173,55	-	379
-72,9	-74,8	-147,7	-144,8		-83,9	-83,7	-167,6			
-72,1	-72,7	-144,8	-157,65		-86,2	-85,9	-172,1			
-81,9	-88,6	-170,5			-88,1	-86,9	-175,0			

Tabelle I. (Fortsetzung.)
Leere Kapsel.

a	a^1	$a + a^1$	$i_1 \cdot 10^3$ Amp.	J Amp.	b_{-}	b^1	b	b^1	$i_2 \cdot 10^3$ Amp.	$A_2 = (i_2 - i_1)$ 10^3 Amp.	$A_1, A_2 \cdot 10^7$ Amp. ²
-72,9	-76,0	-148,9	-150,05	0,1003	↑ -70,1	-73,0	-143,1	-143,45	-143,45	+	1,59
-74,6	-76,6	-151,2	-	-	↓ -71,1	-72,7	-143,8	-	-	+	20,76
-72,0	-73,6	-145,6	-147,25	0,3011	-28,5	-30,9	-59,4	-60,8	60,8	+	+
-72,9	-76,0	-148,9	-	-	-30,4	-31,8	-62,2	-	-	+	+
-71,4	-73,5	-144,9	-145,25	0,6026	↑ 63,1	64,0	↑ 127,1	122,05	244,1	+	93,5
-72,0	-73,6	-145,6	-	-	↑ 58,2	58,8	↑ 117,0	+	+	+	+
-68,9	-71,5	-140,4	-140,8	1,0002	↑ 91,9	93,6	↑ 185,5	185,95	929,8	+	257,2
-70,6	-70,6	-141,2	-	-	↑ 93,8	92,6	↑ 186,4	192,4	+	+	+
-70,6	-70,6	-141,2	-151,2	1,407	↑ 98,4	96,4	↑ 194,8	+	1924	+	498
-78,3	-82,9	-161,2	-	-	↑ 94,1	95,9	↑ 190,0	+	+	+	+

Die Differenz ($b + b^1$) — ($a + a^1$) ergibt dann ein Maß für das Drehungsmoment, mit dem das Magnetfeld auf das drehbare System einwirkt.

Auf Tab. I sind die Angaben einer willkürlich herausgegriffenen Messung wiedergegeben. Die Pfeile geben die Richtung des Stromes in dem erregten Magnet an. $a + a^1$ zeigen den mittleren Kompensationsstrom, doppelt genommen und in Graden ausgedrückt, ohne Einwirkung des Magnetfeldes; $b + b^1$ sind der doppelte Kompensationsstrom, wenn der Magnet erregt wird. i_1 und i_2 sind die bezüglichen Ströme in Ampere ausgedrückt. Das Zeichen + gibt ein in die Drehrichtung des Uhrzeigers ausgeübtes Drehmoment an (ausgeübt durch die Torsion des Aufhängungsdrahtes oder von diesem im Verein mit dem Magnetfelde). — ein Drehmoment im entgegengesetzten Sinne. Das Drehmoment, das auf die Kapsel und etwaigenfalls auch auf den in ihr enthaltenen Stoff ausgeübt wird, wird durch den Ausdruck $A_2 = i_2 - i_1$ gemessen.

Das Zeichen + für A_2 und $A_1 A_2$ gibt Paramagnetismus, — Diamagnetismus an. Das gleiche gilt auch in den Tabellen II bis VIII.

Das Produkt $A_1 \cdot A_2$ ist dann der Kraft F_v proportional. $F_v = k \cdot A_1 \cdot A_2$, wobei k eine Konstante ist.

Um quantitative Messungen ausführen zu können, wurde die Drehwaage geeicht. Kennt man nämlich die Suszeptibilität eines Stoffes, so kann die Konstante k berechnet werden, wenn man die Größen $A_1 \cdot A_2$, M , H_x und dH_x/dy mißt. Ganz naturgemäß wurde hier als Eichungsmaterial vielfach destilliertes Wasser verwendet, sowohl weil dieser Stoff in reinem Zustande verhältnismäßig leicht erhaltbar ist, wie auch, weil seine Suszeptibilität sehr genau nach verschiedenen Meßverfahren gemessen ist. Bei 20° können wir $\chi = -(0,720 \pm 0,001) \cdot 10^{-6}$ für Wasser im Vakuum setzen. Das Ergebnis dieser Messungen findet man in Tab. II.

Tabelle II.

Wasser.

 $M = 1,1252 \text{ g.}$

H_x	$\frac{dH_x}{dy}$	$A_1 A_2 \cdot 10^7$		$A_1 A_2 \cdot 10^7$ H_2O	$\frac{A_1 \cdot A_2}{M} \cdot \frac{1}{H_x \cdot \frac{dH_x}{dy}}$
		Glasgefäß	H ₂ O und Glasgefäß		
1630	451	+ 4265	+ 373,5	— 3891,5	$4,71 \cdot 10^{-10}$
3084	852	+ 12400	— 1598	— 13998	$4,74 \cdot 10^{-10}$

$$\chi_{H_2O} = K \cdot \frac{A_1 A_2}{M} \cdot \frac{1}{H_x \cdot \frac{dH_x}{dy}}. \quad \text{Hieraus } K = 1580.$$

Da die Messungen hier in Luft ausgeführt wurden, muß man dieses Verhältnis in Rechnung ziehen. Für die Suszeptibilität der Luft wurde $\pm 0,027 \cdot 10^{-6}$ gesetzt. Die scheinbare Suszeptibilität des Wassers in Luft wird demnach $-0,747 \cdot 10^{-6}$. Dieser Wert wurde bei der Bestimmung von k benutzt. Die Konstante k ist aus der Tab. II ermittelt worden.

In den folgenden Tabellen bezieht sich χ auf Messungen im Vakuum — $\Delta\chi$ — wahrscheinliche Fehler (Sicherungs-

faktor = 2 angesetzt) sind in gewöhnlicher Weise aus den Fehlern in H_x , dH_x/dy usw. berechnet.

Tabelle III.

Tellur.

 $M = 2,0670 \text{ g.}$

H_x	$\frac{dH_x}{dy}$	$A_1 A_2 \cdot 10^7$		$A_1 A_2 \cdot 10^7$ Te	$-\chi \cdot 10^6$	$\Delta\chi \cdot 10^6$
		Kapsel	Te und Kapsel			
55	15	+ 1,72	- 0,82	- 2,54	0,233	0,02
171,6	46	+ 20,64	- 10,67	- 31,31	0,299	0,006
366,5	96,5	+ 93,1	- 48,8	- 141,9	0,302	0,002
631	170,5	+ 258,6	- 164,9	- 423,5	0,296	0,002
894	247,4	+ 502,0	- 379,0	- 881,0	0,304	0,001

Tabelle IV.

Schwefel.

 $M = 1,2125 \text{ g.}$

H_x	$\frac{dH_x}{dy}$	$A_1 A_2 \cdot 10^7$		$A_1 A_2 \cdot 10^7$ S	$-\chi \cdot 10^6$	$\Delta\chi \cdot 10^6$
		Kapsel	S und Kapsel			
84,2	22,8	+ 4,52	- 0,83	- 5,35	0,35	0,02
113,5	30,5	+ 9,48	- 1,75	- 11,23	0,408	0,02
203,5	54,3	+ 31,8	- 6,25	- 38,05	0,435	0,007
365,0	96,0	+ 100,8	- 23,7	- 124,5	0,443	0,004
566	152,0	+ 230,3	- 68,5	- 298,8	0,439	0,002
762	209,6	+ 394,0	- 154,0	- 548,0	0,434	0,002

Tabelle V.

Antimon.

 $M = 2,0765 \text{ g.}$

H_x	$\frac{dH_x}{dy}$	$A_1 A_2 \cdot 10^7$		$A_1 A_2 \cdot 10^7$ Sb	$-\chi \cdot 10^6$	$\Delta\chi \cdot 10^6$
		Kapsel	Sb und Kapsel			
55,3	15,0	+ 1,94	- 5,08	- 7,02	0,64	0,04
113,5	30,5	+ 8,56	- 23,59	- 32,15	0,704	0,018
235,0	62,5	+ 39,0	- 106,6	- 145,6	0,750	0,009
366,0	96,5	+ 92,05	- 255,0	- 347,05	0,745	0,005
462,0	123,2	+ 142,5	- 415,0	- 557,5	0,741	0,004

Tabelle VI.

Zink.

 $M = 2,0005 \text{ g.}$

H_x	$\frac{d H_x}{d y}$	$A_1 A_2 \cdot 10^7$		$A_1 A_2 \cdot 10^7$ Zn	$-\chi \cdot 10^6$	$d\chi \cdot 10^6$
		Kapsel	Zn und Kapsel			
113,5	30,5	+ 9,48	+ 3,92	- 5,56	0,126	0,006
234,0	62,4	+ 43,6	+ 16,43	- 27,17	0,143	0,002
364,2	95,9	+ 100,8	+ 38,54	- 62,26	0,137	0,001
565	151,6	+ 230,3	+ 78,4	- 151,9	0,1362	0,0007
761	209,4	+ 398,0	+ 113,7	- 284,3	0,1371	0,0005

Tabelle VII.

Gold.

 $M = 1,2599 \text{ g.}$

H_x	$\frac{d H_x}{d y}$	$A_1 A_2 \cdot 10^7$		$A_1 A_2 \cdot 10^7$ Au	$-\chi \cdot 10^6$	$d\chi \cdot 10^6$
		Kapsel	Au und Kapsel			
55,3	15,0	+ 2,11	+ 1,28	- 0,83	0,124	0,02
84,0	22,8	+ 4,52	+ 2,84	- 1,68	0,110	0,01
171,3	45,8	+ 21,12	+ 13,41	- 7,71	0,122	0,005
266,0	70,5	+ 33,0	+ 51,0	- 18,00	0,119	0,003
365,0	96,0	+ 93,5	+ 58,45	- 35,05	0,124	0,002
565	151,6	+ 220,5	+ 124,4	- 96,1	0,139	0,001
761	209,2	+ 385,8	+ 207,2	- 178,6	0,139	0,0006

Tabelle VIII.

Silber.

 $M = 1,7112 \text{ g.}$

H_x	$\frac{d H_x}{d y}$	$A_1 A_2 \cdot 10^7$		$A_1 A_2 \cdot 10^7$ Ag	$-\chi \cdot 10^6$	$d\chi \cdot 10^6$
		Kapsel	Ag und Kapsel			
55,3	15,0	+ 1,99	+ 2,55	+ 0,56	+ 0,07	0,02
84,0	22,8	+ 4,40	+ 5,69	+ 1,29	+ 0,07	0,01
141,6	38,5	+ 13,85	+ 19,13	+ 5,28	+ 0,092	0,004
171,3	45,8	+ 20,52	+ 28,5	+ 7,98	+ 0,096	0,003
235,0	62,6	+ 39,68	+ 54,5	+ 14,82	+ 0,096	0,002
366,0	96,5	+ 92,7	+ 120,3	- 27,6	+ 0,075	0,001
500,0	133,6	+ 169,4	+ 204,0	+ 34,6	+ 0,0504	0,0005
564,0	151,6	+ 215,0	+ 249,6	+ 34,6	- 0,0401	0,0003
630,0	170,5	+ 268,0	+ 295,5	+ 27,5	+ 0,0262	0,0002
762,0	209,6	+ 382,8	+ 388,0	+ 5,2	+ 0,0055	0,0000
895,0	247,5	+ 506,0	+ 486,0	+ 20,0	+ 0,0058	0,0008

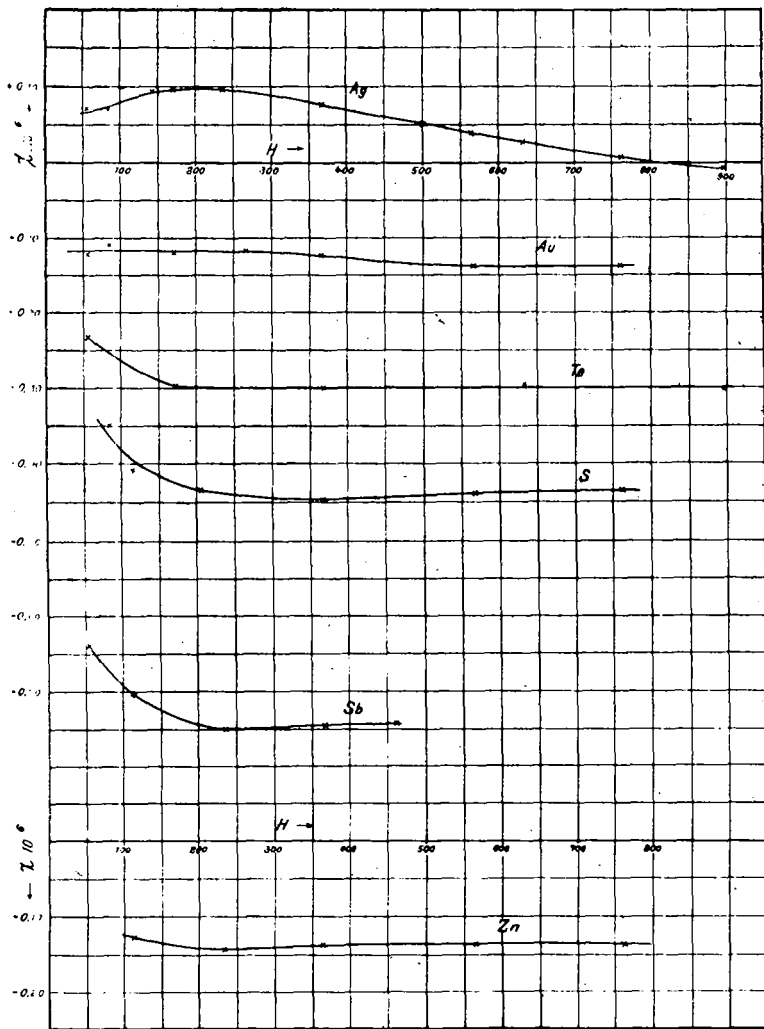


Fig. 5.

Ergebnisse.

Die Suszeptibilität der untersuchten Elemente, mit Ausnahme des Zinks, zeigt eine Feldabhängigkeit bei schwachen Feldwerten. Die Suszeptibilität bei höheren Feldwerten ist durch eine merkliche Konstanz gekennzeichnet, Silber aus-

genommen. Die Suszeptibilität der verschiedenen Elemente scheint konstant bis zu folgenden Feldwerten hinab zu sein:

Für Zink	bis H	100 Gauss
„ Gold	„ H	600 „
„ Antimon	„ H	250 „
„ Tellurium	„ H	200 „
„ Schwefel	wahrscheinlich oberhalb H 600 Gauss.	

Das Silber ist paramagnetisch bei schwachen Feldwerten, wird aber diamagnetisch bei Feldwerten oberhalb 800 Gauss. Reines Silber ist gewöhnlich als diamagnetisch angesehen¹⁾, obwohl auch Paramagnetismus bei Silberproben beobachtet worden ist. Es kann in dieser Verbindung auf Arbeiten von Shaw und Heapes²⁾ sowie von Königsberger³⁾ hingewiesen werden. Diese Forscher haben jedoch keinen Übergang von Para- zu Diamagnetismus beobachtet. Shaw und Heapes haben überhaupt nur mit äußerst kleinen Feldwerten gearbeitet (H zwischen ~ 2 und ~ 12 Gauss).

In diesem Falle liegt es nahe, die Aufmerksamkeit auf das Vorhandensein fremder Stoffe zu richten, besonders des Eisens. Bei Silber-Eisen-Legierungen werden nämlich diese beiden Metalle nicht miteinander vermischt, und man sollte erwarten, daß das Eisen in ferromagnetischem Zustande auf-trete, besonders wenn letzterer Stoff nur in minimalen Mengen vorhanden ist (hier 0,008 Prom.). Ein Maximum der Suszeptibilität sollte man dann, wie Shaw und Heapes be-merken, bei H ca. = 2 Gauss erwarten. Dies ist aber keineswegs der Fall. Die hier angewendete Probe zeigt ein Maxi-mum der Suszeptibilität bei $H = 200$ Gauss.⁴⁾

Es scheint dann nur die Annahme übrig zu bleiben, daß Eisen in paramagnetischem Zustande vorhanden sein müßte, wenn Eisenverunreinigungen die Ursache des Überganges von Para- zu Diamagnetismus sein sollten. Gegen diese Annahme spricht jedoch das Verhältnis, daß keines der chemisch ana-lysierten Elemente sich eisenärmer als Silber erweist, und dennoch zeigen die anderen Elemente nur Diamagnetismus. Weitere Versuche, im besonderen Untersuchungen bei Proben, die minimale zugesetzten Mengen Eisen enthalten, werden

1) K. Honda, l. c.

2) P. E. Shaw and C. Heapes, *The Electrician* 77. p. 708. 1916.

3) J. Königsberger, *Ann. d. Phys.* 66. p. 698. 1898.

4) Auch Shaw u. Heapes, l. c.

vielleicht über dieses Verhältnis Aufschluß geben. Solche Untersuchungen habe ich zurzeit vorgenommen. Nach der Theorie von Gans sind jedenfalls die metamagnetischen Erscheinungen theoretisch begründet. Durch Steigerung der Temperatur und des Feldwertes muß es nach dieser Theorie stets möglich sein, die paramagnetischen Körper diamagnetisch zu machen.

Die Suszeptibilität von Sb, Te und S zeigt eine starke Feldabhängigkeit bei schwachen Feldwerten. Eine Konstanz aber bei den kleinsten Feldwerten ließ sich jedoch nicht erkennen. Weitere Versuche, die ich auch mit einer noch empfindlicheren Kraftwaage in Angriff genommen habe, werden dieses Verhältnis vielleicht aufklären. Es ist auch meine Absicht, diese Messungen auf möglichst viele Körper (besonders chemische Elemente) auszudehnen.

Die Suszeptibilität des Goldes zeigt eine Feldabhängigkeit, die mit der Theorie von Gans in Übereinstimmung steht (vgl. p. 472). Obgleich der Unterschied zwischen $\chi_{\max.}$ und $\chi_{\min.}$ zwar gar nicht groß ist, kann der Unterschied sich kaum durch die Ungenauigkeit der Messungen erklären lassen.

Der Theorie nach können in diesem Falle die Hauptträgheitsmomente des Magnetons und die Anzahl der Magnetonen pro Kubikzentimeter berechnet werden.

Sind A und C die beiden Hauptträgheitsmomente des Magnetons, N die Anzahl Magnetone pro Kubikzentimeter, b und h zwei Konstanten ($b = \frac{e}{2m}$, wo e/m das Verhältnis der Ladung zu der Masse des Elektrons $h = \frac{3}{2} \frac{1 - C/A}{2 + C/A}$), so ergibt die Theorie für die spezifische Suszeptibilität

$$(1) \quad \chi = -Nb^2 \frac{2A + C}{3} [1 + h \Omega(\gamma)],$$

wo

$$(2) \quad \Omega(\gamma) = \frac{2}{\sqrt{\pi} \gamma e^{\gamma^2} \Phi(\gamma)} \div \frac{1}{\gamma^2} + \frac{2}{3}$$

ist. Hier gibt $\Phi(\gamma)$ das Fehlerintegral

$$(2') \quad \Phi(\gamma) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\gamma e^{-\gamma^2} d\gamma$$

an.

$$(3) \quad \gamma^2 = \frac{H^2 b^2 (A - C)}{2 K T},$$

wo T die absolute Temperatur, H der Feldwert und K eine Konstante ($k = 1,35 \cdot 10^{-16}$ in C. G. S.) angeben.

Bezeichnen wir die spezifische Suszeptibilität für unendlich kleine Feldwerte χ_0 , also

$$(4) \quad \chi_0 = N b^2 \frac{2A + C}{3}$$

(weil $\Phi(\gamma) = 0$, wenn $\gamma = 0$ ist), so wird

$$(5) \quad \frac{\chi - \chi_0}{\chi_0 h} = \Omega(\gamma).$$

Ferner ist nach (5) und (2)

$$(6) \quad \frac{\chi_\infty - \chi_0}{\chi_0} = h \Omega(\infty) = \frac{2}{3} h = \frac{1 - C/A}{2 + C/A}.$$

Aus

$$(7) \quad \frac{2}{3} h = \frac{\chi_\infty - \chi_0}{\chi_0},$$

kann h berechnet werden.

Man berechnet A und C aus den Ausdrücken (3), (5) und (6). Die den verschiedenen Werten von H zugehörigen Werte von γ können mit Hilfe der experimentell gefundenen Kurve $\chi - H$ bestimmt werden.

In der Formel (5) sind χ_0 und h bekannt. $\Phi(\gamma)$ kann aus (2) und (2') für verschiedene Werte von γ berechnet werden.

Die Suszeptibilität χ_1 für $\gamma = \gamma_1$ kann dann ebenfalls aus (5) berechnet werden und die entsprechenden Werte von H_1 der experimentell bestimmten Kurve H entnommen werden.

$A - C$ wird dann aus (3), C/A aus (6) berechnet. Hieraus A und C . Wenn A und C bekannt sind, ergibt sich N aus (4). Im vorliegenden Falle ergab sich für Gold $A = 3,1 \cdot 10^{-32}$, $C = 1,7 \cdot 10^{-32}$ C. G. S. und $N = 4,5 \cdot 10^{10}$, also per Gramm-molekül

$$N^1 = 4,5 \cdot 10^{10} \cdot 19,2 \cdot 197,2 = 1,7 \cdot 10^{14}.$$

Wird die Loschmidtsche Zahl $6,13 \cdot 10^{23}$ gesetzt, so will das sagen, daß ein Magneton im Golde aus $3,65 \cdot 10^9$ Atomen besteht.

Kristiania, Physik. Inst. d. Univ., Mai 1918.

(Eingegangen 31. Juli 1918.)