Ueber die magnetischen Eigenschaften des Hämatits.

Von

Jakob Kunz in Zürich.

Mit 26 Figuren im Text.

Durch die bahnbrechenden Untersuchungen des Herrn Prof. P. Weiss über die magnetischen Eigenschaften des Pyrrhotins wurden zum ersten Male die Gesetze dieser Erscheinungen erkannt und auf den inneren Aufbau der Elementarmagnete zurückgeführt. Die bis dahin gewonnenen empirischen Kenntnisse der magnetischen Eigenschaften der permanenten Magnete treten damit in das Licht tieferer Erkenntnis ein. Es ist eine besonders günstige und deutlich hervortretende Eigenschaft des Pyrrhotins, welche dem Forscher gestattete, in den inneren Bau des kristallinischen Gefüges einzudringen und die Gesetze des Bauplanes aufzufinden, es ist die Existenz einer magnetischen Ebene, der Basisebene des Pyrrhotins, in welcher sämtliche elementaren Magnete liegen.

Nachdem die Gesetze der magnetischen Erscheinungen des Pyrrhotins erkannt sind, empfiehlt es sich, von diesem bekannten Punkte aus weiter in die magnetischen Verhältnisse der übrigen Magnete einzudringen. Vielleicht bietet sich nach dem Pyrrhotin zunächst der Hämatit (Eisenglanz) dem weiteren Studium dar, da aus den bis jetzt über ihn veröffentlichten Abhandlungen hervorgeht, daß die Magnetisierung nach der Hauptachse nur einige Prozente von derjenigen in der Basisebene beträgt, daß also auch der Hämatit mit

großer Annäherung eine magnetische Ebene besitzt[1]. Indem J. Westmann den Eisenglanz von Kragerö magnetischen Feldern von 0—70 absoluter Einheiten aussetzte, fand er, daß dieses Mineral eine bedeutende Koerzitivkraft besitzt, daß die Richtung der Magnetisierung nicht zusammenfällt mit der Richtung der magnetisierenden Kraft, daß die magnetische Suszeptibilität im wesentlichen auf die Basisebene beschränkt ist und nur 1—2 Tausendstel von der Suszeptibilität des gewöhnlichens Eisens beträgt. A. Abt[2] fand, daß in Feldern bis zu 1000 Gauß der Hämatit noch nicht gesättigt zu sein scheint, und daß die Koerzitivkraft bis auf 150 Einheiten ansteigen kann.

Der Pyrrhotin besitzt senkrecht zur magnetischen Ebene eine paramagnetische Suszeptibilität $k = 314 \,.\, 10^{-6}$; schreibt man den Magnetismus des Pyrrhotins einzig seinem Eisengehalt zu, so findet man die spezifische Suszeptibilität des Eisens in dem Pyrrhotin dadurch, daß man k durch die Dichte des Eisens 2,78 in dem Pyrrhotin dividiert: $\frac{314}{2{,}78} 10^{-6} = 112 \,.\, 10^{-6}$. Die atomistische Suszeptibilität ist $56 \,.\, 112 \,.\, 10^{-6} = 0{,}0063$; dieselbe stimmt nahezu überein mit der atomistischen paramagnetischen Suszeptibilität für 9 verschiedene Ferro- und Ferriverbindungen. Senkrecht zur Basisebene ist also nach den Untersuchungen von P. Weiss der Pyrrhotin paramagnetisch.

Den Hämatit nach dieser Richtung zu studieren, war die erste Aufgabe, die ich mir vorlegte. Hämatitkristalle von etwa 20 g befestigte ich an einem Ende eines unmagnetischen Stabes, so daß die Basisebene senkrecht zur Achse des Stabes war. Eine auf ein Glasrohr aufgewundene Spule von dünnem Draht mit 130 Ohm Widerstand stand durch eine Wippe in Verbindung mit einem nach P. Weiss konstruierten sehr empfindlichen Galvanometer. Diese sekundäre Spule befand sich koaxial im Zentrum einer größeren Spule von

---

[1] J. Westmann, Upsala Universitets Årsskrift 1896. Mat. och Naturv. II. 1. 1897 [Eisenglanz von Kragerö]. — B. Bavink, Inaug.-Diss. Göttingen. Dies. Jahrb. Beil.-Bd. XIX. 377. 1904 [Ilmenit von Miask].

[2] A. Abt, Über die magnetischen Eigenschaften des Hämatits. Ann. d. Physik. N. F. 68. 658. 1899 [Hämatit von Dognacska].

etwa 1100 Windungen und einer Länge von 26 cm, welche magnetische Felder bis auf etwa 600 Gauß herzustellen gestattete. Es wurde die Substanz durch die Achse des Glasrohres ins Zentrum der beiden Spulen hinein- und herausgeführt und der im Galvanometer entstehende Ausschlag beobachtet. Derselbe wuchs proportional der Feldstärke und nahm ebenso ab; ein Anzeichen von Hysteresis war nicht zu beobachten. Für die beschriebene Stellung der Substanz war der Ausschlag ein Minimum und es genügte eine recht kleine Verdrehung der Substanz in eine andere Stellung, um 50mal größere Ausschläge hervorzurufen.

Um die Suszeptibilität des Hämatits senkrecht zur Hauptachse in absolutem Maße zu bestimmen, wurde ein bekanntes magnetisches Moment in Form einer kleinen stromdurchflossenen Spule von bekannter Windungsfläche in die beiden ersten Spulen hineingeführt und der Ausschlag beobachtet. Das paramagnetische Moment verhält sich zu dem berechneten elektromagnetischen Momente, wie sich die zugehörigen Ausschläge verhalten. Das paramagnetische Moment des Hämatits, dividiert durch das Volumen, liefert die Intensität der Magnetisierung senkrecht zur Basisebene; dividiert man weiter die Magnetisierung durch die Feldstärke, so findet man die entsprechende Suszeptibilität. Durch Division mit der Dichte des Eisens im Hämatit, 3,56, und Multiplikation mit dem Atomgewichte des Eisens folgt die atomistische paramagnetische Suszeptibilität des Kristalles senkrecht zur Basisebene. Es wurden die folgenden Werte gefunden:

0,0067	0,0123
0,00634	0,00407
0,0231	0,0167
0,178	0,0066
0,0464	0,0068

Die kleinsten Werte dieser Reihe stimmen in auffallender Weise mit den von P. Weiss am Pyrrhotin ermittelten Werten überein. Die größeren Zahlen veranlassen keinen Einwand, denn in den größeren nicht ganz einheitlichen Kristallindividuen brauchen nicht alle Basisebenen zusammenzufallen, außerdem genügen kleine fremde magnetische Beimengungen z. B. von Eisen, um jene größeren Suszeptibilitäten zu erklären. Wie

der Pyrrhotin ist also auch der Hämatit senkrecht zur Basisebene paramagnetisch.

Die Kristalle, von denen mehr als 100 Individuen verschiedener Herkunft untersucht wurden, lassen sich in zwei wesentlich verschiedene Gruppen einteilen, die sich durch die folgenden Merkmale charakterisieren.

Die Kristallplättchen, parallel der Basisebene ausgebildet und häufig zu regelmäßigen tafelförmigen Gruppen verwachsen, die vom Vesuv stammen, zeigen ein regelmäßiges magnetisches Verhalten, sie scheinen aus einer einzigen elementaren Komponente zusammengesetzt zu sein und besitzen sehr geringe Werte der alternativen und der Rotationshysteresis. Durch Erhitzen auf 650° unter der Einwirkung eines magnetischen Feldes verändern sie sich in keiner Weise.

Die andere Gruppe besteht aus Kristallen vom Caveradi in Graubünden, aus den schönen Eisenglanzkristallen von Elba und aus den prachtvollen Tafeln aus Siebenbürgen. Diese Kristalle sind aus mehreren elementaren Magneten zusammengesetzt, die von 60° zu 60° gegeneinander geneigt sind und in außerordentlich mannigfaltigen Verhältnissen auftreten. Sie besitzen so große Hysteresisarbeiten, daß manchmal die Hysteresis über die Intensität der Magnetisierung vorherrscht. Unter dem gleichzeitigen Einflusse höherer Temperatur und magnetischer Felder ändert sich der magnetische Bau der Kristalle. Diese Gruppe erinnert in manchen Beziehungen an die anormalen Kristalle des Pyrrhotins; es soll daher diese Bezeichnung auf den Eisenglanz übertragen werden.

I. Gruppe. Anormale Kristalle.

Der um eine vertikale Achse drehbare Elektromagnet, in dessen Feld die parallel der magnetischen Ebene kristallisierten Hämatitscheibchen untersucht wurden, ist von P. Weiss[1] konstruiert und beschrieben worden. Die Kristallplatte wird in horizontaler Stellung auf dem zentralen Kupferstabe befestigt, der Elektromagnet um diesen Stab als Achse gedreht und von 10 zu 10° der Ausschlag abgelesen, welcher die zu dem magnetischen Felde senkrechte Komponente der in der

[1] P. Weiss, Journ. de phys. 1905. (4.) 4. 469.

Basisebene gelegenen Magnetisierung mißt. Die Beobachtungen sind graphisch wiedergegeben. Die Grade auf der Teilscheibe, welche mit dem magnetischen Felde sich dreht, bilden die Abszissen, die zugehörigen Ausschläge, die mit Hilfe eines

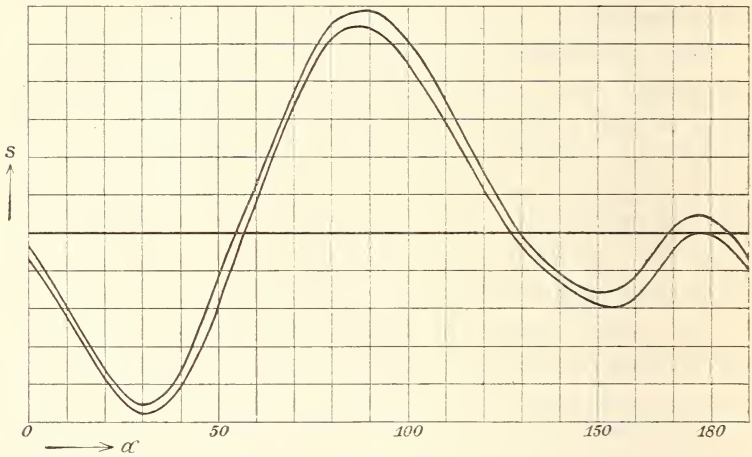

Fig. 1.

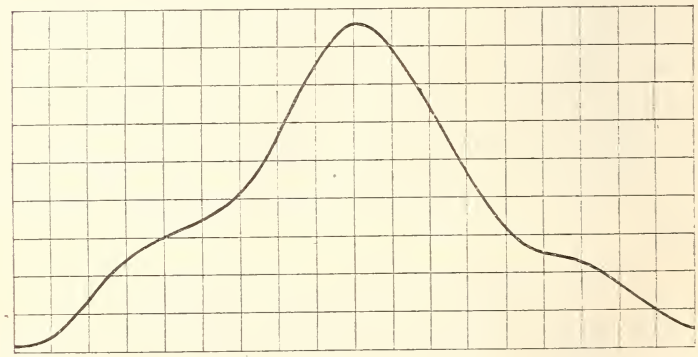

Fig. 2.

glühenden geradlinigen Fadens, eines Hohlspiegels und einer durchsichtigen Skala abgelesen wurden, die Ordinaten. Der Nullpunkt der Skala ist mit 250 bezeichnet.

Die Kurven der Fig. 1—3 geben ein Bild von der großen Mannigfaltigkeit der Erscheinungen. Dieselben können in derselben Weise wie die entsprechenden Erscheinungen des

Pyrrhotins durch die Annahme dreier Gruppen von elementaren Magneten gedeutet werden, die von 60 zu 60° gegeneinander geneigt und quantitativ sehr verschieden vertreten sind. In der Kurve der Fig. 1 kommt neben der Hauptkomponente nur eine Nebenkomponente zum Vorschein, in der folgenden Fig. 2 haben die beiden Nebenkomponenten ungefähr dieselbe Stärke. In der Fig. 3 spielen die drei elementaren Komponenten eine gleichmäßige Rolle, die eine wiegt nur wenig über die beiden anderen vor. Die Kurven ac und ad entsprechen den beiden entgegengesetzten Drehungen des Magnetfeldes um den Kristall herum; der

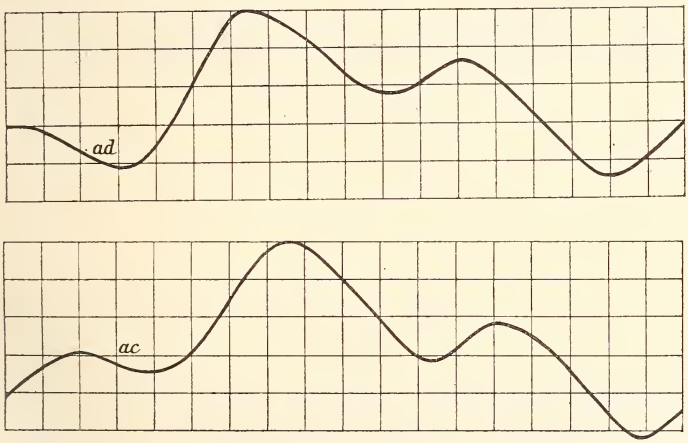

Fig. 3.

Abstand zwischen den beiden Kurven bringt die sogenannte Rotationshysteresis zum Ausdruck. Diese Rotationshysteresis überwiegt bei weitem die kleinen Änderungen, die von der Verteilung der drei elementaren Komponenten herrühren. Während beim Pyrrhotin, wenigstens bei den normalen Exemplaren, die Rotationshysteresis nur eine leicht verzierende Begleiterscheinung der Magnetisierung bildet, wird in diesen Beispielen des Hämatits der Wandel der von den elementaren Magneten erzeugten Ausschläge beinahe verdeckt durch die Rotationshysteresis. Es ist Herrn P. Weiss gelungen, das Verhältnis der drei Gruppen der elementaren Magnete des Pyrrhotins zu bestimmen auf Grund

der außerordentlich raschen Variation, welche die zu dem Felde vertikale Komponente der Magnetisierung in der Nähe des Minimums der magnetischen Intensität erfährt. Diese raschen Variationen treten insbesondere unter dem Einflusse einer Feldstärke von etwa 3000 Gauß auf. Beim Hämatit dagegen wurden bei keinen, weder bei schwachen noch bei starken Feldern, weder bei der normalen noch bei der anormalen Gruppe, auch nur angenähert ebenso rasche Änderungen der Ausschläge beobachtet wie beim Pyrrhotin; daher können beim Hämatit die Verhältnisse der drei elementaren Komponenten untereinander mit graphischen Methoden nur unsicher bestimmt werden.

Dreht sich, ausgehend von der Richtung der leichten Magnetisierung des Kristalles das magnetische Feld in der

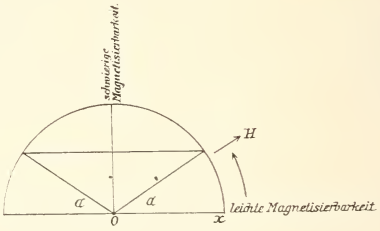

Fig. 4.

magnetischen Ebene des Pyrrhotins von 0 bis 90°, so dreht sich die Richtung der Magnetisierung zunächst sehr langsam und wenn das Feld einen Winkel von 90° zurückgelegt hat und somit mit der Richtung der schwierigen Magnetisierbarkeit übereinstimmt, so hat die Magnetisierung erst einen Winkel α zurückgelegt (Fig. 4). Wenn jetzt die Richtung des Feldes sich nur wenig dreht, so daß der Winkel etwas über 90° steigt, so geht die Magnetisierung sehr rasch über in eine andere Richtung, die mit der negativen Richtung o x denselben Winkel α einschließt. Die Rotationsgeschwindigkeit der Intensität der Magnetisierung des Pyrrhotins ist also in der Richtung der schwierigen Magnetisierbarkeit außerordentlich viel größer als die Rotationsgeschwindigkeit des Feldes. Dreht sich das Feld in der magnetischen Ebene von o x an, so drehen sich auch zunächst langsam die elementaren Magnete aus ihrer natürlichen Gleichgewichtslage heraus, nach der Drehung um

einen Winkel α wird das Gleichgewicht zwischen dem äußeren und dem inneren Felde labil und die molekularen Magnete kippen um in eine Stellung, welche zu der vorhergehenden symmetrisch liegt in bezug auf die Achse der schwierigen Magnetisierbarkeit.

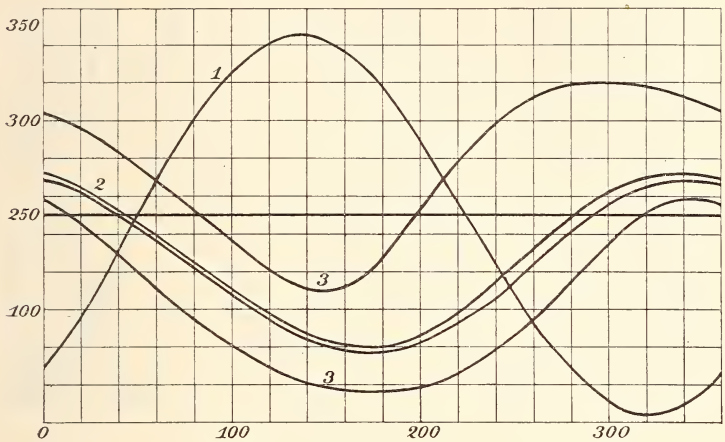

Fig. 5.

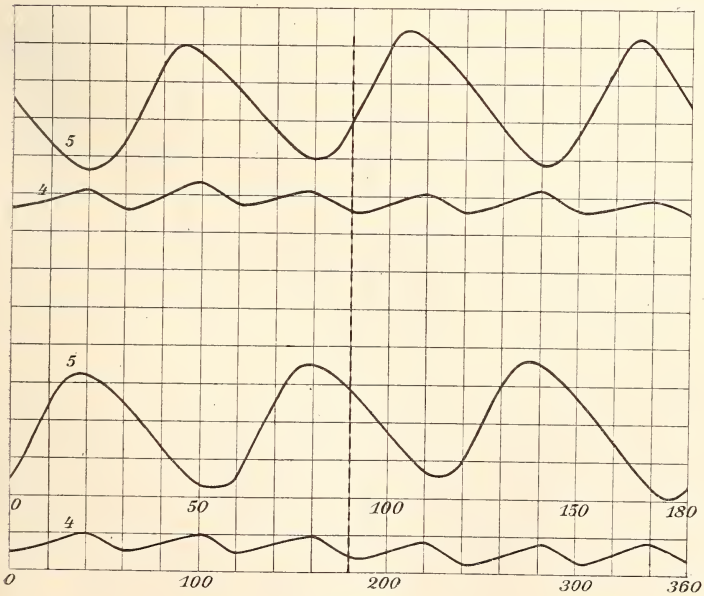

Fig. 6.

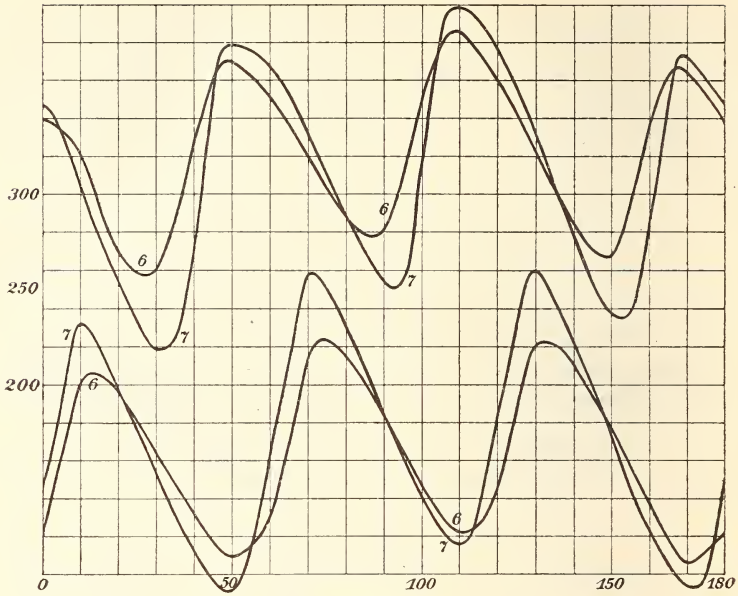
300
250
200
0
50
100
150
180
6
7

Fig. 7.

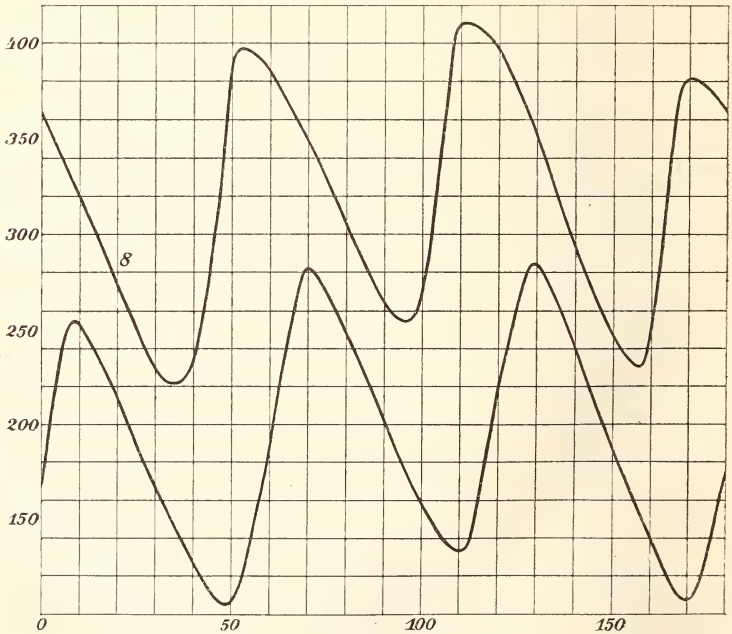
400
350
300
250
200
150
0
50
100
150
8

Fig. 8.

Unter den Kristallen des Hämatits von Siebenbürgen und vom Caveradi finden sich solche, in denen die drei nach den drei Richtungen verteilten Gruppen der elementaren Magnete die gleiche Stärke haben. Die entsprechenden Beobachtungen sind in den Kurven der Fig. 5 und 6 wiedergegeben. Die den

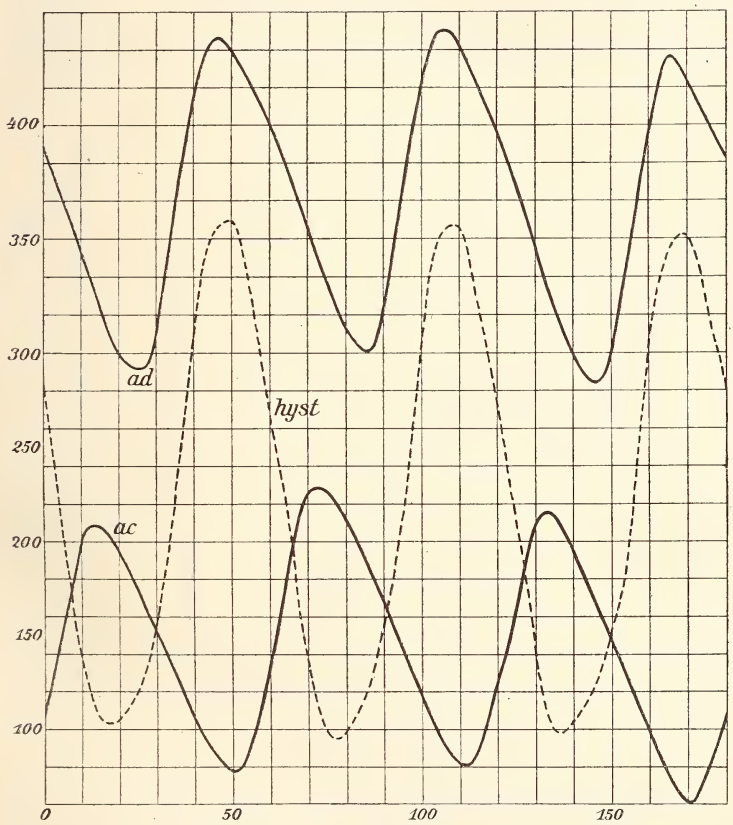

Fig. 9.

Kurven der Fig. 5 zugrunde liegenden Beobachtungen wurden bei wachsenden Feldern aufgenommen. Bei dem schwächsten Felde von 138 Gauß ist die Kurve 1 eine Sinuslinie. Die Magnetisierung verhält sich wie diejenige eines absolut permanenten Magneten; von Rotationshysteresis ist noch keine Spur zu beobachten. Bei 339 Gauß in der zweiten Kurve der Fig. 5 tritt eine Abweichung von der Sinuslinie ein unter

gleichzeitigem Beginn der Rotationshysteresis, welche unter dem Einflusse des Feldes von 700 Einheiten schon einen bedeutenden Betrag erreicht, während die Kurve 3 der Magnetisierung in dem Winkelraum von 0 bis 360° immer noch denselben einheitlichen Charakter bewahrt wie in den schwächeren Feldern. Bei 1400 Gauß — Kurve 4, Fig. 6 — treten in dem Winkelraum von 0—180° drei gleich starke Maxima und Minima ein; gleichzeitig ist die Hysteresis so stark angestiegen, daß

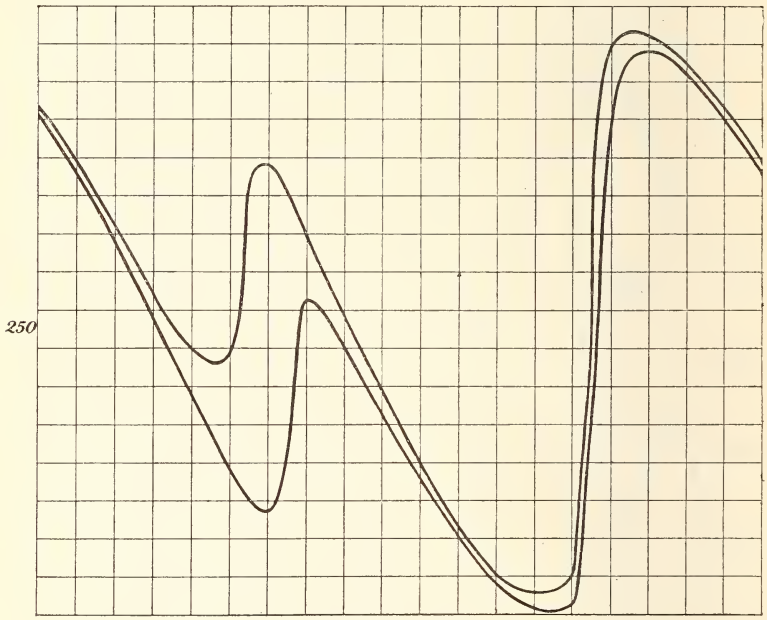

Fig. 10. Elba.

sie jetzt als Haupterscheinung auftritt, die durch die Variationen der Magnetisierung nur wenig beeinflußt wird. Der der Hysteresis entsprechende Ausschlag beträgt 92 Skalenteile, der Unterschied der Ausschläge zwischen einem Maximum und einem Minimum der Magnetisierung nur 5 Skalenteile. Bei H = 3600 Gauß werden die Einbuchtungen der beiden Kurven 5 stärker, sie wachsen noch bei H = 5625 der Kurve 6, Fig. 7 bei H = 8900 der Kurve 7 und bei H = 11 300 Gauß in der Kurve 8 der Fig. 8. Die Variationen werden mit zunehmender Feldstärke immer rascher; trotzdem

kann man nicht mehr von einem eigentlichen Maximum und Minimum der Magnetisierung sprechen; denn die Maxima sind bis 19° gegeneinander verschoben bei der Drehung des Feldes im Sinne der zu- und abnehmenden Winkel des Teilkreises. Die gestichelte Kurve der Fig. 9, welche sich auf eine andere Substanz bezieht als die vorhergehende Kurvenschar, zeigt, daß auch die Rotationshysteresis sich im Gebiete von 0 bis 180° dreimal in gleicher Weise wiederholt wie die drei Komponenten der Magnetisierung.

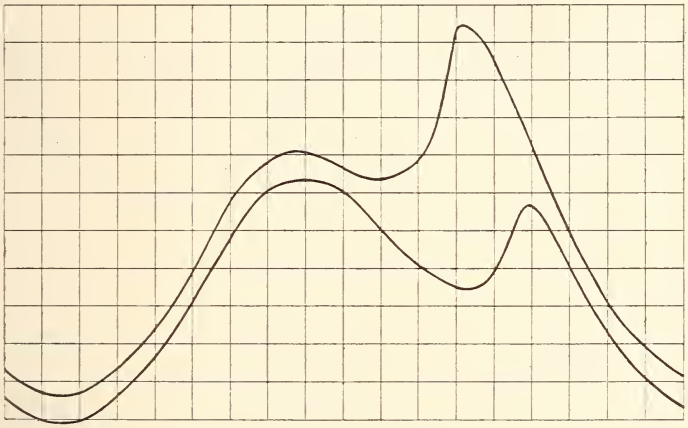

Fig. 11. Elba.

Noch komplizierter werden die Erscheinungen bei einem aus Elba stammenden Kristall. Wird die Basisebene vertikal gelegt und das Magnetfeld in beiden Richtungen gedreht, so resultiert das Kurvenpaar der Fig. 10, wird dagegen die Basisebene horizontal auf der Achse des Apparates angebracht, so entsteht bei etwa 7000 Gauß das Bild der Fig. 11.

II. Gruppe. Scheinbar einfache Kristalle.

Diese Kristalle sind kleine schwarze dünne stark glänzende Blättchen, die häufig parallel der Basisebene zu Kristallaggregaten höherer Ordnung verwachsen sind. Sie entstammen dem Vesuv. Wird die Basisebene horizontal auf der Achse des Apparates befestigt, so ist der Ausschlag ein Maß für die zur Richtung der magnetischen Kraftlinien senkrechte

Komponente der Magnetisierung. Wird diese Komponente als Funktion des auf der Drehscheibe abgelesenen Azimutes abgebildet, so entsteht in magnetischen Feldern von etwa 6000 Einheiten eine fast ganz regelmäßige Kurve wie z. B. diejenige der Fig. 12; es treten nur ganz kleine Abweichungen

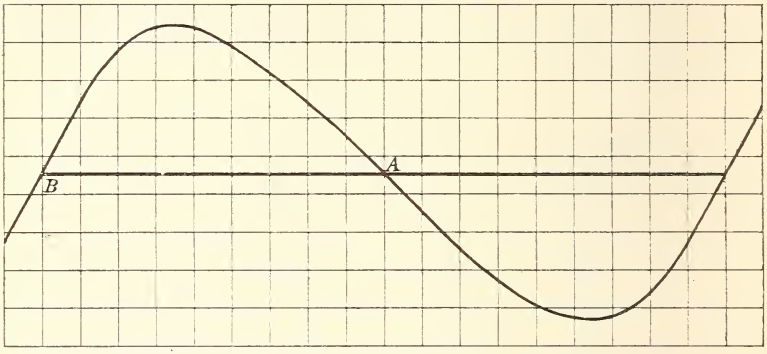

Fig. 12. Vesuv.

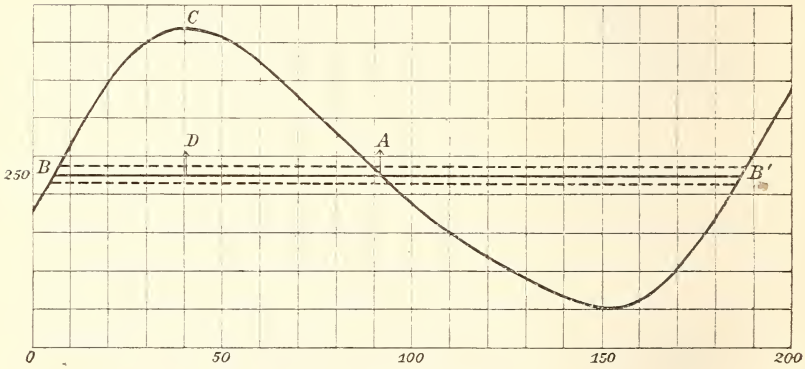

Fig. 13. Vesuv.

auf, merkwürdigerweise in Form von Unsymmetrien insofern, als bei 0° und 180° oder überhaupt in zwei Punkten, deren Abszissen um 180° von einander entfernt sind, die Ordinaten, d. h. die Ausschläge nicht miteinander übereinstimmen. Die Abweichungen sind, wie die Fig. 13 lehrt, bei den verschiedenen Kristallproben verschieden stark. Sie kommen auch dadurch zur Geltung, daß in bezug auf die Abszissen-

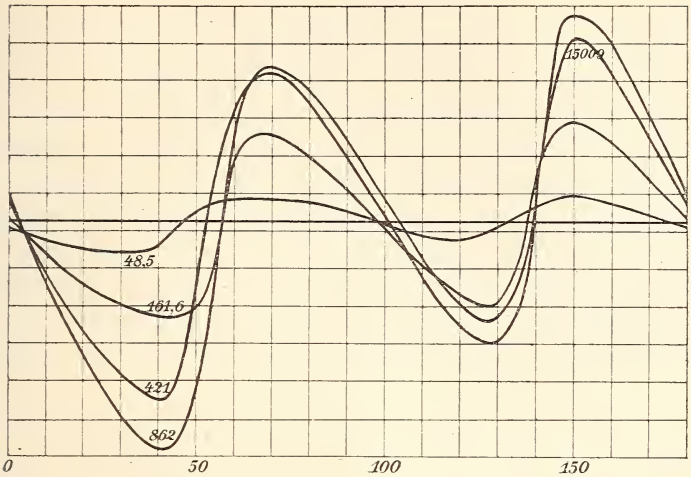

Fig. 14. Vesuv.

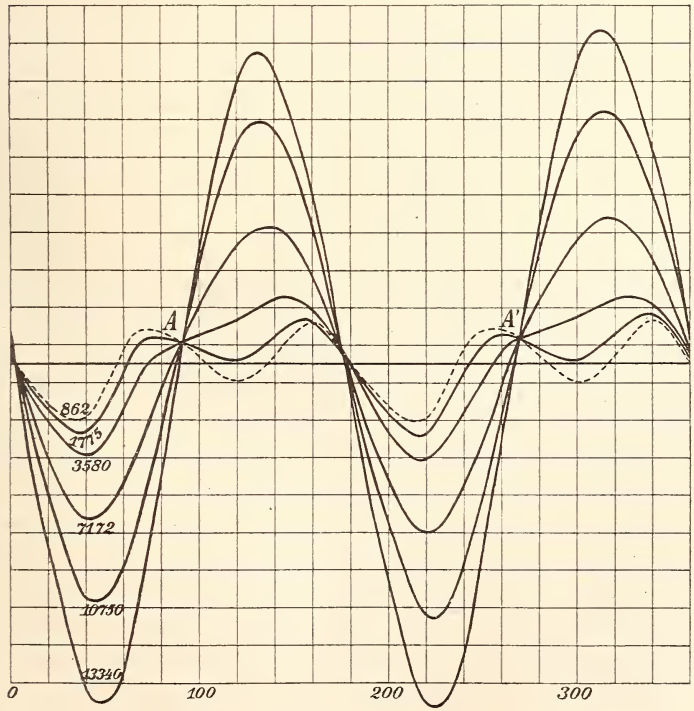

Fig. 15. Vesuv.

achse — 250° ist der Nullpunkt der Skala — die positive Amplitude von der negativen Amplitude verschieden ist und daß ferner die Abschnitte BA und AB′ von einander verschieden sind. Dagegen sind die von der Abszissenachse und der Kurve eingeschlossenen Flächenstücke oberhalb und unterhalb der Achse einander gleich. Wird das Verfahren der Aufnahme dieser Kurve bei steigenden Feldstärken wiederholt, so findet man einen Verlauf der Erscheinungen der durch die Kurvenscharen der Fig. 14, 15 zur Anschauung gebracht wird. Die hinzugefügten Zahlen bedeuten die Feldstärken. Von 48,5 Gauß bis hinauf zu 3500 Gauß wiederholt sich die Er-

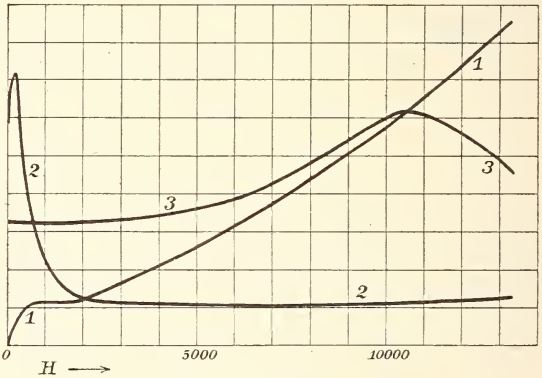

Fig. 16. Vesuv.

scheinung von 180° zu 180° in derselben Weise. In dem Intervalle von 180° treten zwei Maxima und zwei Minima auf, die bei etwa 862 Gauß am schärfsten ausgeprägt sind. Von 6000 Gauß an verschwindet auffallenderweise das eine der beiden Maxima und ebenso ein Minimum. Jetzt aber treten die erwähnten Unsymmetrien auf. Merkwürdig sind ferner die Schnittpunkte der Kurven in den Punkten A und A′, die um 180° von einander entfernt und oberhalb der Abszissenachse gelegen sind. Vielleicht kann die Erscheinung erklärt werden durch die Annahme der Übereinanderlagerung der Eigenschaften eines absolut permanenten Magneten und eines induzierten Magneten. Trägt man die Amplituden der Kurven als Funktion der Feldstärke ab, so findet man die Kurve 1 der Fig. 16. Von 7000 bis 13000 Gauß ist die Kurve nur

sehr schwach gekrümmt, nachdem sie vorher 2 Wendepunkte durchlaufen hat. Dividiert man die Ordinaten dieser Kurve durch die zugehörige Feldstärke H, so findet man die Kurve 2 der Fig. 16, aus welcher unzweifelhaft hervorgeht, daß es sich um zwei verschiedene Phänomene handelt.

Denselben eigentümlichen Verlauf wie die Ausschläge selbst weist auch die in allen diesen scheinbar regelmäßigen Kristallen, verglichen mit den anormalen, geringere Beträge erreichende Rotationshysteresis auf, die bei den raschen Variationen in der Gegend der Punkte A A′ je ein Maximum erreicht. Solange in dem Intervalle von 0 bis 180° zwei Maxima der Ausschläge auftreten, erscheinen auch zwei Maxima in der Kurve der Rotationshysteresis. Wird die Fläche der Rotationshysteresis, d. h. die Arbeit der letzteren, als Funktion des Feldes ausgedrückt, so resultiert der durch die Kurve 3 der Fig. 16 dargestellte Zusammenhang. Von 50 bis 3000 Gauß ändert sich die Arbeit der Rotationshysteresis nicht merkbar, sie verdeckt am Anfange sogar die Änderungen des magnetischen Momentes, nimmt alsdann mit zunehmendem Felde zu, um bei 10700 Gauß ein Maximum zu erreichen.

Vergleicht man die Kurvenscharen der Fig. 14, 15 mit den entsprechenden Kurven des Pyrrhotins, so findet man abgesehen von den erwähnten Unsymmetrien die folgenden charakteristischen Unterschiede: Bei 2000 bis 3000 Gauß ändert sich der Ausschlag des Pyrrhotins in der Gegend des Minimums der Magnetisierung sehr rasch, so daß auf Grund dieser Eigenschaft eine Bestimmung des Verhältnisses der drei Gruppen der elementaren Magnete auf graphischem Wege möglich war. Eine derartige rasche Änderung ist beim Hämatit in keinem Felde zu finden. Beim Pyrrhotin erreichen die Ausschläge infolge der Sättigung mit steigenden Feldern ein Maximum, d. h. die Kurven erreichen einen höchsten Wert, während beim Hämatit diese Amplituden in dem ganzen Intervalle des magnetischen Feldes von 50 bis 25000 Gauß immerfort zunehmen. Wenn also die magnetischen Erscheinungen des Hämatits und des Pyrrhotins manchen gemeinschaftlichen Zug besitzen, so müssen die Gesetze doch wesentlich voneinander verschieden sein.

Befestigt man auf der unmagnetischen Achse in dem drehbaren Magnetfelde die Kristallplatte vertikal und zwar so, daß die Richtung der leichten Magnetisierbarkeit mit der Richtung der Kraftlinien zusammenfällt, und dreht von dieser Nullstellung an das Feld nach beiden Seiten um je 5^0, so dreht sich auch die Platte, etwa um einen Winkel $\frac{x}{2}$ (Fig. 17). Der Winkel zwischen den neuen Richtungen des Feldes und der Magnetisierung beträgt $\frac{\alpha}{2} = 5 - \frac{x}{2}$ und der doppelte Ausschlag d. h. die Differenz der Ablesungen links und rechts vom Nullpunkt der Skale ist s. Ist M das magnetische Moment, H die Feldstärke, C die Konstante der Feder, V das Volumen der Kristallplatte und J die Intensität der Magnetisierung, so gilt die folgende Bedingung des Gleichgewichtes:

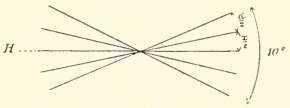

Fig. 17.

$$M\,H \sin\frac{\alpha}{2} = C\frac{x}{2}$$

$$J\,V\,H \sin\frac{\alpha}{2} = C\frac{x}{2}$$

$$J = \frac{C\frac{x}{2}}{H\,V \sin\frac{\alpha}{2}} = \frac{C\frac{s}{4\,d}\,\frac{180}{\pi}}{H\,V\frac{\alpha}{2}}$$

d bedeutet den Abstand zwischen Spiegel und Skale. Die Torsionskonstante C der Feder wurde durch Bestimmung der Schwingungsdauern unter dem Einflusse mehrerer Belastungsgewichte von bekanntem Trägheitsmoment bestimmt. Die folgende Tabelle enthält die Resultate dieser Methode:

s	H	J
26,14	430	3,365
54,56	900	3,510
103,8	1800	3,615
181,2	3630	3,624
239,1	5490	3,580
282,5	7210	3,562
169,7	7210	3,562
189,6	8810	3,554
211,2	11010	3,520
231,2	13610	3,464
238,1	14560	3,455

Die Kurve 1 der Fig. 18 stellt die absolut gemessene Intensität der Magnetisierung als Funktion des Feldes dar. Die Magnetisierung nimmt zunächst mit dem Felde rasch zu, erreicht bei 3600 Gauß ein Maximum, um nachher wieder abzunehmen. Vergleicht man diesen Verlauf der Erscheinungen mit dem entsprechenden Gange beim Pyrrhotin, so findet man, daß die Kurve der Magnetisierung in der Richtung der leichten Magnetisierbarkeit beim Pyrrhotin sehr viel rascher zum höchsten Werte ansteigt als beim Hämatit, indem der höchste

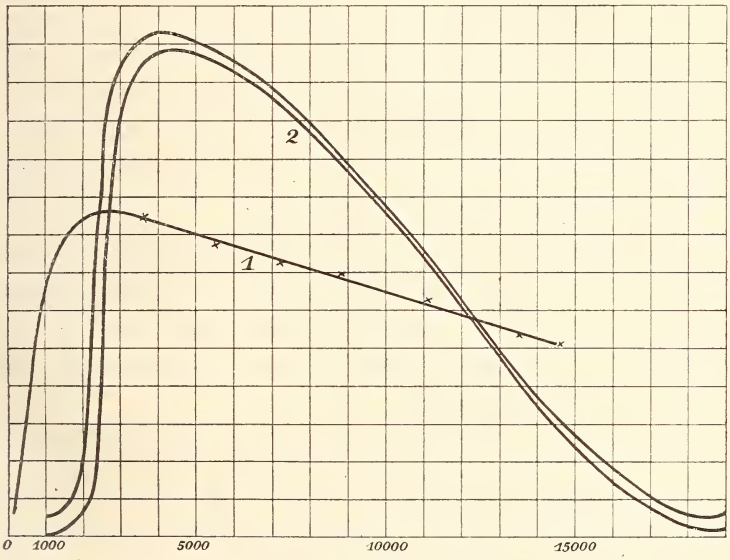

Fig. 18.

Wert der Magnetisierung in der angegebenen Richtung beim Pyrrhotin schon bei etwa 700 Gauß eintritt, so daß P. Weiss in Übereinstimmung mit allen übrigen Erscheinungen die Annahme machen durfte, daß für eine unendlich ausgedehnte Pyrrhotinplatte in der Richtung der leichten Magnetisierbarkeit schon von den schwächsten Feldern an die Sättigung auftritt, und zwar mit einer Konstanz, wie sie noch bei keinem anderen magnetischen Materiale beobachtet worden war. Um die experimentellen Ergebnisse in der Richtung der leichten Magnetisierbarkeit in schwachen Feldern zu erklären, braucht man beim Pyrrhotin nur zu berücksichtigen, daß infolge der

endlichen Gestalt der Scheiben stets ein entmagnetisierendes Feld auftritt, daß die Kristallproben nie vollkommen frei von magnetischen Verunreinigungen und nie völlig homogen und kontinuierlich sind. Würde man die letztere Betrachtungsweise auf den Hämatit übertragen, so kommt man zu der Vermutung, daß die eigentlichen ferromagnetischen Grundelemente voneinander bis zu großen Entfernungen getrennt sind durch eine Grundmasse von anderen magnetischen Eigenschaften.

Zwei verschiedene Ursachen können bewirken, daß die Intensität der Magnetisierung beim Maximum angekommen unter dem Einflusse zunehmender magnetischer Felder nicht konstant bleibt. Wenn nämlich erstens der Kristall aus 3 von 60 zu 60° gegeneinander geneigten Gruppen von elementaren Magneten besteht, so fällt nur die vorwiegende Gruppe in die Richtung des Feldes, wenn diese mit der Richtung der sogen. leichten Magnetisierbarkeit übereinstimmt, während die beiden anderen Gruppen gegen die Feldrichtung geneigt sind. Die diese Gruppen bildenden elementaren Magnete treten daher erst in sehr starken Feldern in den Zustand der Sättigung ein.

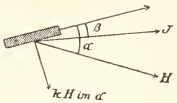

Fig. 19.

Nehmen wir zweitens an, daß senkrecht zur magnetischen Ebene, welche vertikal in dem horizontalen magnetischen Felde steht, eine schwache Suszeptibilität k besteht, so entfernt sich die resultierende Intensität der Magnetisierung von der Basisebene und es gilt (Fig. 19):

$$J \sin \beta = k H \sin \alpha$$

$$C \alpha = H J \sin (\alpha - \beta) = H J \sin \alpha - H J \cos \alpha \sin \beta$$

Da cos β mit großer Annäherung gleich 1 ist.

$$C \alpha = H J \sin \alpha - k H^2 \sin \alpha \cos \alpha$$

$$C \alpha = H \sin \alpha (J - k H \cos \alpha)$$

Da aber α nur 5° beträgt, so darf man weiter schreiben:

$$C \alpha = H \sin \alpha (J - k H)$$

An Stelle der wirklichen Intensität der Magnetisierung mißt man daher eine scheinbare Magnetisierung, die mit wachsendem Felde abnehmem muß. Bestimmt man mit Hilfe

der letzten Kurve die atomistische paramagnetische Suszeptibilität, so findet man 0,000193, einen Wert, der etwa 30mal kleiner ist als der frühere Wert 0,006. Dieses Resultat darf aber deswegen nicht überraschen, weil die scheinbare Magnetisierung wegen der zunehmenden Sättigung der beiden anderen Gruppen von elementaren Magneten nicht korrigiert werden konnte. Ebensowenig wie den Einfluß dieser elementaren Komponenten zu berücksichtigen, gelang es, mit Hilfe des ballistischen Galvanometers die zur magnetischen Ebene senkrechte Komponente zu bestimmen, und zwar deswegen nicht, weil die untersuchten Blättchen eine sehr geringe Masse hatten und weil ferner das magnetische Feld infolge der kleinen Schwankungen der elektromotorischen Kraft der Akkumulatoren so stark variiert, daß die dadurch induzierte elektromotorische Kraft bedeutend größer wird, als die elektromotorische Kraft, erzeugt durch die Bewegung des kleinen Kristallplättchens längs der Kraftlinien des magnetischen Feldes. In einem sehr starken, von P. Weiss konstruierten Elektromagneten wurde die scheinbare Intensität der Magnetisierung in bis zu 25000 Gauß ansteigenden Feldern bestimmt. Fast in demselben Maße, wie in der letzten Kurve von 4000 bis zu 14000 Gauß, nahm die Intensität der Magnetisierung auch in den höchsten Feldern nahezu geradlinig ab. Die sehr starken magnetischen Felder wurden mit Hilfe des ballistischen Galvanometers und mit einer Induktionsspule von genau bekannter Windungsfläche gemessen.

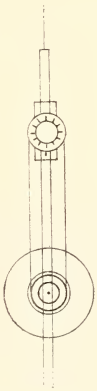

Fig. 20.

Wird das Kristallplättchen auf der Achse des Apparates vertikal befestigt und das Feld von 0 bis 180° gedreht, so resultiert bei zu- und abnehmenden Winkeln des Teilkreises das Kurvenpaar 2 der Fig. 18. Die von diesen Kurven und den Ordinaten bei 0° und 180° eingeschlossene Fläche ist ein Maß für die gewöhnliche alternierende Hysteresis.

Wird die zu untersuchende Kristallplatte auf einem um eine horizontale Achse drehbaren mit einer Kreisteilung versehenen Scheibchen aus Kupfer befestigt, das in vertikaler Lage auf der Achse des Apparates ruht (Fig. 20), so kann man

zunächst die scheinbare Intensität der Magnetisierung in der Richtung der leichten Magnetisierbarkeit messen, dreht man darauf die kleine Kupferscheibe mit dem Kristall um 10°, so findet man für die neue Richtung die den Kraftlinien parallele Komponente der Magnetisierung usw. Die Ausschläge, die in dieser Weise unter Anwendung eines Feldes von 13 600 Gauß gefunden wurden, sind die folgenden:

Stellung	Lesung
0	118,7
20	117,5
40	118,1
60	118,6
80	119,3
100	119,5
120	119,2
140	119,3
160	118,9
180	118,5

Es bleibt somit die dem Felde parallele Komponente der Magnetisierung nahezu konstant. Merkwürdigerweise verschob sich der Nullpunkt der Ablesungsskale regelmäßig so, daß für die verschiedenen Stellungen des Blättchens auf der Kupferscheibe verschiedene Stellungen des großen Teilkreises, nämlich

211 und 221 einerseits und
207 und 217 anderseits

gewählt werden mußten, um auf der Skale symmetrische Ausschläge nach beiden Seiten zu erhalten.

Setzt man ausgehend von der Richtung der leichten Magnetisierbarkeit die dem Felde parallele mit der zu dem Felde senkrechten Komponente zusammen, so findet man auch hier wie beim Pyrrhotin, daß die Intensität der Magnetisierung nur langsam sich dreht, wenn sich das Feld aus der Richtung der leichten Magnetisierbarkeit herausdreht, daß dagegen in der Gegend der schweren Magnetisierbarkeit die magnetische Intensität sich viel rascher dreht als das magnetische Feld. Da aber in der Kurve, welche die senkrechte Komponente der Magnetisierung darstellt, Unsymmetrien auftreten, so ist die Zusammensetzung der beiden Komponenten der Magnetisierung nicht einwandfrei.

Hysteresis.

Die Energie E der Rotationshysteresis pro Zyklus läßt sich nach P. Weiss folgendermaßen darstellen:

$$E = 4 H_c J_m \left(1 - \frac{H}{N J_m}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{H}{N J_m}\right)^2}$$

wo H die magnetische Feldstärke, N eine Konstante, H_c das Koerzitivfeld und J_m die Sättigungsintensität der Magnetisierung bedeutet.

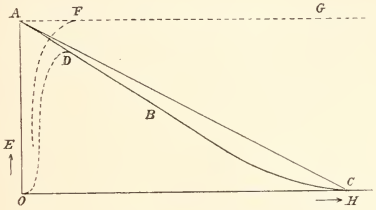

Fig. 21.

Die Kurve A B C (Fig. 21) ist die graphische Darstellung dieses Gesetzes. Die Arbeit der Rotationshysteresis wäre demnach im Felde O am größten. Sie nimmt mit zunehmender Feldstärke ab, um bei 7300 Gauß zu verschwinden. Diese Größe ist das von dem kristallmagnetischen Bau herrührende entmagnetisierende Feld; die experimentellen Ergebnisse stimmen mit der theoretischen Kurve sehr gut überein, wie namentlich eine spezielle noch nicht veröffentlichte Untersuchung des Herrn Planer lehrt. In den schwachen Feldern indessen ist die Abhängigkeit der Rotationshysteresis von dem Felde von der theoretisch geforderten verschieden; die Rotationshysteresis macht sich nämlich erst bei etwa 4 oder 5 Gauß bemerkbar, steigt alsdann wahrscheinlich in einer exponentiellen Kurve O D zum höchsten Werte an, um nachher dem oben angegebenen Gesetze zu folgen. Wäre die Platte unendlich ausgedehnt und vollkommen homogen und kontinuierlich, so würde von den schwächsten Feldern an der Verlauf genau dem einfachen Gesetze gehorchen. Die Kurve in den schwachen Feldern weist durch ihren exponentiellen Charakter darauf hin, daß nach dem Gesetze der Wahrscheinlichkeit die Moleküle erst nach und nach in den gesetzmäßigen allen gemeinschaftlichen Gang eintreten.

Wenn man die magnetische Ebene des Pyrrhotins in dem horizontalen Felde des Elektromagneten senkrecht stellt, und das Feld um 360° dreht, so beschreibt die Magnetisierung in beiden Richtungen den Durchmesser der leichten Magnetisierbarkeit A D und zwei Bögen A B und C D des Kreises der Sättigung (Fig. 22). Die Rotationshysteresis ist in diesem Falle also gleich der alternativen Hysteresis längs des Durchmessers der leichten Magnetisierbarkeit. Die Arbeit der alternativen Hysteresis ist also unabhängig vom Felde und gleich der Arbeit der Rotationshysteresis im Anfangspunkte. In der Tat bleibt die Arbeit der alternativen Hysteresis in derjenigen Richtung, in welcher von den schwächsten Feldern an die Sättigung besteht, konstant. Die der H-Achse parallele Linie F G in Fig. 21 drückt die Abhängigkeit der alternativen Hysteresisarbeit von dem Felde in der Richtung der leichten Magnetisierbarkeit aus. Tatsächlich steigt auch hier wie bei der Rotationshysteresis die Arbeit der alternativen Hysteresis in einer kontinuierlichen Kurve von Null an zum konstanten Werte an.

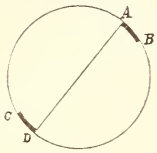

Fig. 22.

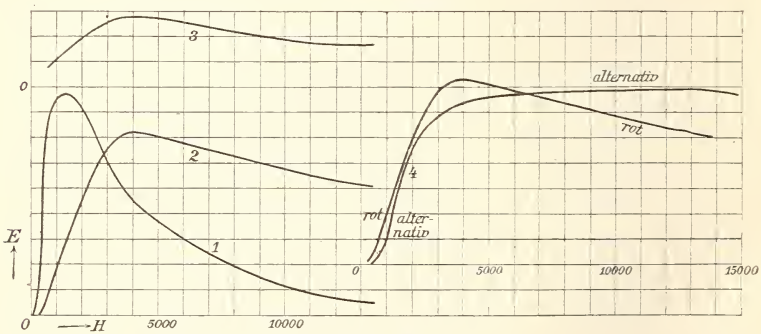

Fig. 23.

Die Kurven 1, 2 und 3 der Fig. 23 zeigen die Erscheinung der Rotationshysteresis als Funktion der magnetischen Feldstärke beim Hämatit. Bei den anormalen Kristallen — Kurve 1 und 2 — erreicht die Arbeit der Rotationshysteresis viel höhere Beträge als bei den scheinbar einfachen Individuen, deren Rotationshysteresis durch die dritte Kurve

dargestellt ist. Die Rotationshysteresis beginnt bei den anormalen Hämatiten erst oberhalb 135 Gauß, erreicht das Maximum bei 1500, in anderen Fällen sogar erst bei 4000 Gauß und nimmt nachher mehr oder weniger rasch ab. Sie konnte selbst bei 25000 Gauß noch ganz deutlich nachgewiesen werden. Es bleibt unentschieden, ob sie unter dem Einflusse noch stärkerer Felder endlich verschwindet, oder die Magnetisierung immerfort begleitet. Die Kurven 4 der Fig. 23 stellen das Verhältnis der alternativen zu der Rotationshysteresis dar. Die alternative Hysteresis, genommen in der Richtung der leichten Magnetisierbarkeit, scheint von 15000 Gauß an wieder allmählich zu sinken, während sie von 7000 bis 14000 Gauß

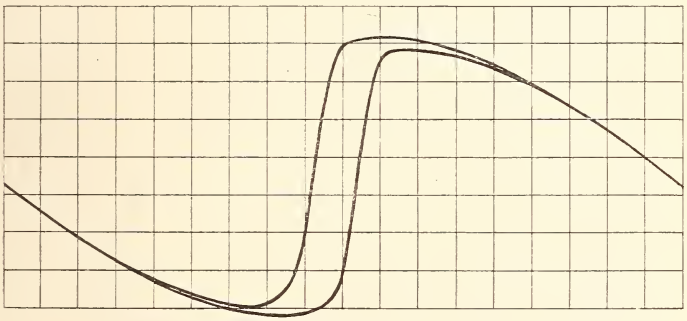

Fig. 24.

konstant bleibt. Jener für den Pyrrhotin so charakteristische Zusammenhang zwischen den Arbeiten der Rotations- und der alternativen Hysteresis existiert hier nicht, indessen ist die Abweichung nicht sehr bedeutend. Merkwürdig ist ferner, daß die Maxima der beiden Arbeiten fast gleich groß sind. Die rotierende Hysteresis beginnt bei etwas schwächeren Feldern als die alternative. Die Kurve der Fig. 24 zeigt eine Schleife der alternativen Hysteresis unter dem Einflusse von 7210 Gauß.

Einfluss der Temperatur.

Die Versuchsanordnung war die, welche in der gemeinschaftlichen Untersuchung von P. Weiss und mir für das Studium der thermischen Variation der magnetischen Eigen-

schaften des Pyrrhotins verwendet wurde[1]. Eine Fehlerquelle, die darin besteht, daß der zentrale Kupferstab die Wärme fortleitet, daß also die am Thermoelement abgelesene Temperatur höher ist als die Temperatur der Substanz, wurde dadurch zu vermeiden gesucht, daß die Kristalle in möglichst unmagnetische Asbestblättchen eingehüllt und dadurch von dem Wärme leitenden Kupferstabe isoliert wurden. Trotzdem können die nachfolgenden Zahlenangaben noch nicht als völlig fehlerfrei angesehen werden. Die Feldstärke betrug 7000 Gauß.

Die beiden Gruppen der Hämatitkristalle unterscheiden sich in thermischer Beziehung deutlich von einander.

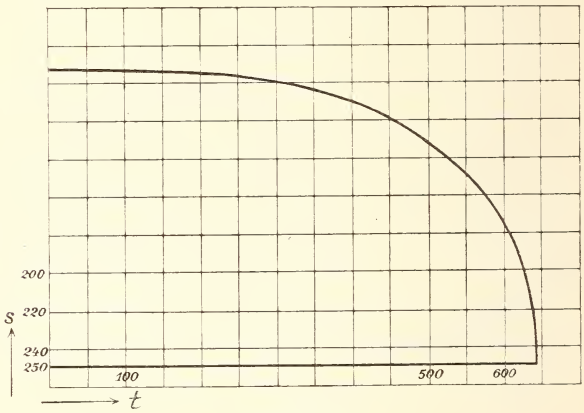

Fig. 25.

Bei den scheinbar einfachen, dem Vesuv entstammenden Exemplaren nimmt die Intensität der Magnetisierung mit zunehmender Temperatur in einer regelmäßigen Kurve ab, welche der entsprechenden Kurve des Pyrrhotins und des Eisens sehr ähnlich sieht. Die magnetischen Eigenschaften verschwinden bei 645°. Nimmt jetzt die Temperatur wieder ab, so durchläuft die zunehmende Intensität der Magnetisierung die ursprüngliche Temperaturkurve und bei gewöhnlicher Temperatur angekommen, besitzen die Kristalle dieser Gruppe wieder die ursprünglichen magnetischen Eigenschaften. Die Kurve der Fig. 25 bringt die thermische Variation der Magnetisierung zur Darstellung.

[1] P. Weiss et J. Kunz, Journ. de phys. 1905. (4.) 4.

Ganz anders verhalten sich die anormalen Kristalle unter dem gleichzeitigen Einflusse des magnetischen Feldes und variabler Temperatur, wie die Kurve der Fig. 26 lehrt.

Zunächst nimmt von 0° an mit steigender Temperatur die Intensität der Magnetisierung zu, um bei 200° den höchsten Wert zu erreichen, von da an nimmt der Ausschlag ab, zuerst langsam, beinahe geradlinig, bis gegen 500° hin, nachher rascher. Der Magnetismus verschwindet sehr rasch bei etwa 660°. Bei abnehmender Temperatur nimmt der Magne-

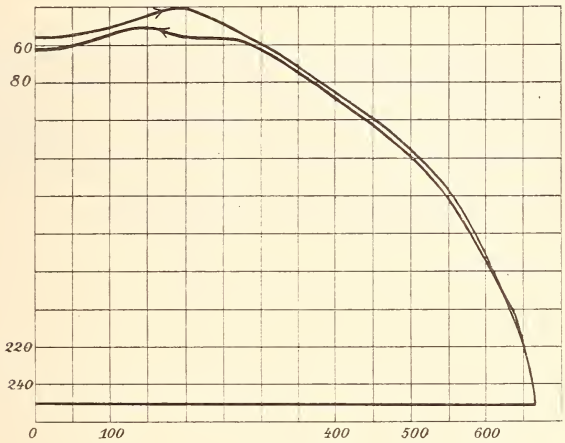

Fig. 26.

tismus wieder zu, zunächst in derselben Weise, wie er vorher abgenommen hat, bleibt aber von 600° an hinter dem ursprünglichen Werte zurück. Die der abnehmenden Temperatur entsprechende Kurve weist andere Unregelmäßigkeiten auf als diejenige zunehmender Temperatur. Das Maximum der Intensität der Magnetisierung tritt erst wieder bei 150° ein. Von da an sinkt mit sinkender Temperatur auch die magnetische Kraft. Das von den beiden Temperaturkurven und einem Teil der Ordinatenachse — unterhalb 20° wurde die Erscheinung nicht studiert — eingeschlossene Flächenstück ist bei den einzelnen Kristallen sehr verschieden nach Größe und Form. Die Erscheinung ist derjenigen des anormalen Pyrrhotins ganz analog.

Beim anormalen Pyrrhotin wie beim anormalen Hämatit verändern sich die magnetischen Eigenschaften der Kristalle infolge der erhöhten Temperatur und des magnetischen Feldes gründlich. Es verändert sich die Intensität der Magnetisierung, das Verhältnis der drei den Kristall aufbauenden Elementarmagnete und die Hysteresis. Die Kristalle werden magnetisch härter. Der komplizierte Verlauf der thermischen Veränderungen läßt sich durch dieselben Überlegungen erklären wie beim Pyrrhotin: d. h. durch die Annahme einer Veränderung der Verteilung und der Eigenschaften der Elementarmagnete.

Es sei mir zum Schlusse gestattet, meinen hochverehrten Lehrern, den Herren Professoren P. Weiss und U. Grubenmann für die freundliche Darbietung der Kristalle und Apparate sowie für die wertvollen Ratschläge bei der vorliegenden Untersuchung den herzlichsten Dank auszusprechen.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie

Jahr/Year: 1907

Band/Volume: 1907

Autor(en)/Author(s): Kunz Jakob

Artikel/Article: Ueber die magnetischen Eigenschaften des Hämatits. 62-88