

DER PHYSIK UND CHEMIE.

NEUE FOLGE. BAND XI.

*I. Magnetische Untersuchungen;
von Felix Auerbach.*

Erste Abhandlung: Ueber den temporären Magnetismus.

Einleitung. Der Einfluss der Grösse und der Gestalt, der Masse und der inneren Beschaffenheit magnetisirbarer Körper auf den temporären Magnetismus, welchen dieselben unter der Einwirkung einer äusseren Kraft annehmen, ist nach den zahlreichen, darüber vorliegenden Untersuchungen ein sehr verwickelter. Es hat das, wie man zu sagen pflegt, seinen Grund in dem Umstande, dass die Vertheilung des Magnetismus in solchen Körpern eine ungleichförmige ist. Geht man aber näher hierauf ein, so sieht man, dass auch die ungleichförmige Vertheilung, sei es nun, dass dieselbe als eine Vertheilung zweier Fluida oder als eine Richtungsvertheilung drehbarer Molecularmagnete gedacht wird, nur eine Folge der Begrenztheit des Körpers ist. Man wird also richtiger sagen, sowohl die Grösse des temporären Magnetismus als auch die Art seiner Vertheilung sind eine Folge der geometrischen und physikalischen Verhältnisse des Magnetisirungskörpers. Die Schwierigkeit liegt nur darin, die verschiedenen Einflüsse dieser Art, also, wenn es sich etwa um Körper von der Gestalt eines Kreiscylinders handelt, die Einflüsse der Länge, der Dicke, der Masse, der Dichtigkeit u. s. w. voneinander zu trennen; gerade hierauf ist bisher nicht genügend Bedacht genommen worden. Auf directem Wege ist diese Trennung überhaupt nicht erreichbar; zwei Stäbe z. B., welche bei gleicher Länge verschiedene Dicke haben, haben entweder verschiedene Masse oder verschiedene Dichtigkeit. Es ist daher erforderlich, durch paar-

weise Combination je zweier Einflüsse indirect dieselben zu ermitteln.

Demgemäss habe ich mir im Folgenden zunächst die Aufgabe gestellt, zu ermitteln, welchen Einfluss eine jede der Grössen: Masse, Länge, Dicke, Dichtigkeit, chemische Natur, auf den temporären Magnetismus ausüben würde, wenn die übrigen constant wären. Es ist klar, dass in Bezug auf eine dieser Grössen eine willkürliche Festsetzung des Einflusses gestattet ist; es soll im Folgenden festgesetzt werden: der Magnetismus ist der Masse proportional; alle scheinbaren Abweichungen von diesem Satze müssen und können dann auf Rechnung der übrigen Grössen gesetzt werden. Im ersten Abschnitte betrachte ich dann zunächst die Einflüsse von Länge und Dicke, indem ich mich dabei auf die zahlreichen bereits vorliegenden Angaben stütze. Ein interessanter Satz ist das allgemeinste Resultat dieser Betrachtung. Weniger befriedigend ist das, was man über den Einfluss der Dichtigkeit weiss; die Angaben, welche ich hierüber im zweiten Abschnitte machen werde, sind höchst schwankend und einander widersprechend. Ich habe daher ausgedehnte Versuchsreihen, besonders mit Metallpulvern, angestellt, deren Besprechung die zweite Hälfte dieses Abschnittes gewidmet ist; ausser Eisen wird dabei auch Nickel in Betracht gezogen. Damit ist die Grundlage für die theoretischen Betrachtungen des dritten Abschnittes wenigstens theilweise gewonnen; das Weitere muss aus den Erscheinungen des remanenten Magnetismus, der magnetischen Nachwirkung und den Beziehungen des Magnetismus zur Bewegung und zur Wärme geschöpft, und darum späterer Mittheilung vorbehalten werden.

1) Einfluss der Länge und Dicke.

Was zunächst den Einfluss der Länge cylindrischer Stäbe auf ihren temporären Magnetismus betrifft, so ist derselbe nach dem Obigen nur aus Versuchen zu ermitteln, bei welchen alle übrigen Einflüsse, abgesehen von demjenigen der Masse, ausgeschlossen sind. Bei den zahlreichen vorliegenden Versuchen ist das nicht streng der Fall. Zwar wurde die Dicke stets

constant gehalten; aber erstens scheint die Constanz der Dichtigkeiten nicht immer festgestellt worden zu sein, und zweitens kann auch eine constante Dicke einen Einfluss auf die Beziehung zwischen Länge und Magnetismus ausüben. Nach den Ergebnissen der Versuche ist das letztere thatsächlich der Fall. Um diesen Uebelstand zu beseitigen, müsste man entweder mit sehr dicken oder sehr dünnen Stäben operiren, bei welchen der Einfluss der Endlichkeit der Dicke verschwindet, oder, da dies Nachteile anderer Art im Gefolge haben würde, aus zahlreichen, bei verschiedenen Dicken angestellten Versuchsreihen durch Extrapolation die Beziehung zwischen Länge und Magnetismus berechnen, welche bei unendlicher, d. h. einflussloser Dicke stattfinden würde. Dazu kommt noch ein zweites Bedenken, welches sich auf die Constanz der magnetisirenden Kraft bezieht. Zur Erzielung vergleichbarer Resultate ist dieselbe durchaus erforderlich; um sie zu erreichen, genügt es aber nicht, wie dies meist geschehen ist, stets dieselbe Stromstärke und dieselbe Spirale anzuwenden; man muss vielmehr, je nachdem der untersuchte Stab kürzer oder länger ist, entweder die Stromstärke oder die Spirale ändern; auch darauf, dass die letztere stets länger sein muss, als der Stab, ist nicht immer geachtet worden. Endlich entsteht eine wesentliche Fehlerquelle bei diesen Versuchen durch die verschiedene Entfernung der zu vergleichenden Stäbe von dem Apparate, durch welchen der inducirte Magnetismus gemessen wird. Wie dem abzuhelpen sei, darauf werde ich weiter unten zurückkommen.

Inzwischen muss es genügen, näherungsweise den Einfluss der Länge auf den Magnetismus festzustellen. Dazu können die Versuche von Lenz und Jacobi, Dub und anderen¹⁾ dienen. Aus den ersteren z. B. folgt, dass der Magnetismus einer zwischen 2 und $\frac{5}{2}$ gelegenen Potenz der Länge proportional ist; dabei ist die Dicke $d = 1\frac{1}{4}$ Zoll und die Masse vermuthlich mit der Länge l proportional. Am besten scheint mir in den meisten Fällen die Formel $m \sim l^{\frac{7}{2}}$ die Beobachtungen darzustellen, wie z. B. folgende Tabelle zeigt,

1) Vgl. G. Wiedemann, Galv. (2) 2. p. 446.

welche einige Versuche von Dub¹⁾ darstellt, und in welcher ausser der Länge $2l$ der Stäbe die Quotienten angegeben sind, welche man erhält, wenn man den Magnetismus m dividirt 1) durch l^2 , 2) durch $l^2\sqrt{l}$, 3) durch $l^2\sqrt[3]{l}$.

Tabelle 1.

$2l$	$c \frac{m}{l^2}$	$c \frac{m}{l^2\sqrt{l}}$	$c \frac{m}{l^2\sqrt[3]{l}}$
6"	100	100	100
12	119	84	95
18	132	76,5	92
24	130?	65,3?	82?

Das wesentliche Ergebniss ist, dass für den Magnetismus gleich dicker und dichter, aber verschieden langer Stäbe die Proportionalität:

$$[m \sim l^{2+k}]$$

gilt, in welcher $0 < k < \frac{1}{2}$ ist. Diese Formel stellt aber, weil die Masse P der Stäbe nach der Formel $P \sim l$ variirte, noch nicht den reinen Einfluss der Länge dar; man muss vielmehr beiderseits durch l dividiren und erhält definitiv²⁾:

$$(1) \quad \mu \sim l^{1+k}.$$

Ganz analog verhält es sich mit dem Einflusse der Dicke. Auch dieser Einfluss ist, je nach der Länge der benutzten Stäbe, ein etwas schwankender; am besten scheint mir hier die Potenz $\frac{2}{3}$ der Dicke die Beobachtungen darzustellen; so ergeben die Versuche von v. Waltenhofen³⁾ mit Stäben von 103 mm Länge die folgenden Zahlen:

Tabelle 2.

d (mm)	1,108	2,071	3,015	5,978	11,823	19,824	28,292
$\frac{M}{d}$	0,660	0,530	0,455	0,380	0,277	0,248	0,228
$\frac{M}{\sqrt{d}}$	0,695	0,763	0,790	0,928	0,951	1,106	1,213
$\frac{M}{d^{\frac{2}{3}}}$	0,683	0,676	0,657	0,689	0,681	0,608	0,695

1) Dub, Pogg. Ann. **102**. p. 208. 1857.

2) Unter μ soll stets der Magnetismus, reducirt auf gleiche übrige Umstände, verstanden werden.

3) v. Waltenhofen, Wien. Ber. **52**. p. 87. 1865.

Während hier $\frac{M}{d}$ mit wachsendem d abnimmt, $\frac{M}{\sqrt{d}}$ zunimmt, bleibt $\frac{M}{d^{\frac{2}{3}}}$ im Durchschnitt constant. Ferner fand Wiedemann¹⁾ bei einer Länge von 250 mm folgende entsprechende Werthepaare:

Tabelle 3.

d (mm)	10,5	20	30	60	90
$c \frac{M}{\sqrt{d}}$	1000	1026	1067	1207	1339
während sich weiter ergibt:					
$c \frac{M}{d^{\frac{2}{3}}}$	1000	924	896	903	936

Werthe, welche ausser dem ersten als constant zu bezeichnen sind. Endlich ergeben die einwurfsfreiesten unter den Versuchen von Lenz und Jacobi²⁾ für $\frac{m}{d}$ abnehmende, für $\frac{m}{\sqrt{d}}$ zunehmende, dagegen für $\frac{m}{d^{\frac{2}{3}}}$ Zahlen, welche, abgesehen von der ersten, für $d = \frac{1}{2}$ Zoll gültigen, im Durchschnitt constant sind.

Es ist jedoch zu beachten, dass alle diese Versuche bei kleinen Längen angestellt worden sind. Bei verschiedenen, zum Theil sehr grossen Längen hat Dub³⁾ den Einfluss der Dicke untersucht; dabei zeigt sich dann, dass zwar für kleine Längen auch hier die Potenz $\frac{2}{3}$ der Dicke, für grössere jedoch die Potenz $\frac{1}{2}$ den Beobachtungen besser genügt. Bezeichnet k' wie k eine Zahl, für welche $0 < k' < \frac{1}{2}$ ist, so kann man jedenfalls sagen, dass die Proportionalität:

$$[m \sim d^{1-k'}]$$

besteht; da hierbei aber ausser d auch noch die Masse μ nach der Formel $\mu \sim d^2$ variirend gedacht werden muss, so

1) G. Wiedemann, Pogg. Ann. 117. p. 236. 1862.

2) Lenz u. Jacobi, Pogg. Ann. 47. p. 235. 1839. 61. p. 255. 1844.

3) Dub, Pogg. Ann. 90. p. 250. 1853; 94. p. 580. 1855; 120. p. 573. 1863 u. a. a. O.

folgt als Ausdruck des reinen Einflusses der Dichtigkeit auf den Magnetismus die Formel:

$$(2) \quad \mu \sim d^{-(1+k')}.$$

Der temporäre Magnetismus nimmt also *ceteris paribus* mit der Länge zu, mit zunehmender Dicke dagegen ab. Nach den Formeln (1) und (2) würde überdies sowohl jene Zunahme als auch diese Abnahme für verschiedene Längen, resp. Dicken, eine relativ gleichmässige sein; das ist jedoch nicht genau der Fall; vielmehr zeigen die Versuche ganz deutlich, dass sowohl mit wachsender Länge die Zunahme, als auch mit wachsender Dicke die Abnahme des Magnetismus eine langsamere wird. Setzt man speciell, was der Wahrheit sehr nahe kommt, $k' = k$, so findet man:

$$(3) \quad \mu \sim \left(\frac{l}{d}\right)^{1+k}, \quad 0 < k < \frac{1}{2},$$

in Worten: Der temporäre Magnetismus eines cylindrischen Stabes ist, abgesehen von dem Einflusse der Masse, nur von seiner Gestalt, nicht aber von seiner Grösse abhängig.

Das besprochene Verhalten weicher Magnetisirungskörper legt eine Anschauung nahe, welche bisher nur zur Beschreibung anderer magnetischer Erscheinungen, insbesondere zur Erklärung der Beziehungen zwischen magnetisirender Kraft und erzeugtem Magnetismus benutzt worden ist. Denkt man sich nämlich einen Magnetisirungskörper als ein System magnetischer Molecüle, welche ausser einer äussern Kraft, auch gegenseitigen Einflüssen unterworfen sind, so kommt man nothwendig zu dem Schlusse, dass die der Oberfläche nahe liegenden Theile eines Magnetisirungskörpers sich anders verhalten müssen, als die im Innern gelegenen, weil die Wechselwirkung bei ihnen eine andere sein muss. Es liegt also nahe, den constatirten Einfluss von Länge und Dicke auf einen Einfluss der magnetischen Wechselwirkung der Molecüle zurückzuführen. Ehe dieser Versuch gemacht werden wird, soll seine Berechtigung einer weiteren experimentellen Probe unterworfen werden. Macht sich nämlich die magnetische Wechselwirkung wirklich bei den Erscheinungen

des Magnetismus geltend, so muss sie dies auch thun, wenn man sie künstlich im Innern variiren lässt, es muss also z. B. der temporäre Magnetismus eines Stabes, *ceteris paribus*, von seiner Dichtigkeit abhängen.

2) Versuche über den temporären Magnetismus von Metallpulvern.

a. Frühere Versuche. Da consistente Magnetisirungskörper eine zu geringe Variation der Dichtigkeit gestatten, muss man zur Untersuchung des in Rede stehenden Einflusses Metallpulver anwenden. Schon Coulomb¹⁾ schlug diesen Weg ein. Er mengte Eisenfeilspäne mit Wachs derartig, dass die Entfernungen der Eisentheilchen recht erhebliche waren, und fand, dass in diesem Falle nicht nur die Grösse, sondern auch die Gestalt des Körpers ohne Einfluss auf seinen Magnetismus war. Aus neuerer Zeit liegen Versuche über Metallpulver von Boernstein, von Toepler und v. Ettingshausen²⁾, und von v. Waltenhofen vor. Von diesen Versuchen waren die an zweiter Stelle genannten gelegentliche. Es wurden aus Eisenpulver und Fett Gemische hergestellt, von denen das eine 0,920 g, das andere 0,5644 g Eisen auf je 35 g Fett enthielt. Die Gemische wurden in cylindrische Formen gebracht und durch Kräfte magnetisirt, welche von 1 bis 9 Bunsen'schen Elementen herrührten. Das Verhältniss der in ihnen inducirten temporären Magnetismen ergab sich ziemlich constant gleich 0,571, während das Verhältniss der Eisenmengen gleich 0,613 ist. Hieraus ergibt sich, dass der Magnetismus mit abnehmender Dichtigkeit ebenfalls abnimmt. Könnte man annehmen, dass die Gesamtdichtigkeit der Gemenge dieselbe war (dieselbe hängt beträchtlich von der Art der Füllung ab), so würde 0,613 auch das Verhältniss der Dichtigkeiten des Eisens in den beiden Gemengen sein, und man würde das Resultat erhalten, dass, wenn unter sonst gleichen Umständen, also auch bei gleichen Massen, die Dichtigkeiten sich wie 1:0,613 verhalten, die Magnetismen sich wie

1) Vgl. G. Wiedemann, *Galv.* (2) **2.** p. 420.

2) Toepler und v. Ettingshausen, *Pogg. Ann.* **160.** p. 1. 1877.

0,613 : 0,571 oder wie 1 : 0,932 verhalten. Der Einfluss der Dichtigkeit wäre hiernach ein ziemlich schwacher.

Für die beiden anderen oben erwähnten Untersuchungen bildete das Verhalten des pulverförmigen Eisens den eigentlichen Gegenstand. Boernstein¹⁾ setzte zu Lösungen der metallischen Salze Alaunlösung hinzu, fällte hieraus die Oxyde im Gemenge mit Thonerde und reducirte schliesslich im Wasserstoffstrome. So gelangte er zu staubförmigen Gemengen von Eisen, Nickel, Kobalt mit Thonerde, welche er nun in Bezug auf ihr magnetisches Verhalten mit analog, aber ohne Zusatz von Alaunlösung erhaltenen reinen Metallpulvern verglich. Zur Bestimmung des Einflusses der Dichtigkeit sind indess von diesen Versuchsreihen nur zwei zu verwenden, weil bei den anderen die Gewichtsverhältnisse nicht angegeben sind. Bei dem einen Versuche verhielten sich die in dem reinen Metallpulver und in dem Gemenge enthaltenen Eisenmengen wie 7:3, und es ergaben sich die durch gleiche äussere Kräfte in gleichen Massen erzeugten Magnetismen, so lange jene klein waren, im Verhältnisse von 73:189, für grössere Kräfte im Verhältnisse von 84:132. An diesen Zahlenverhältnissen muss jedoch, was von Boernstein's Seite nicht geschieht, eine Correction angebracht werden. Die verglichenen Pulver waren nämlich verschieden lang (142 resp. 185 mm), und die Länge l hat nach dem Obigen, unabhängig von der Masse, noch einen Einfluss, der sich durch Gleichung (1) darstellt. Setzt man in ihr $k = \frac{1}{3}$, und dividirt man demgemäss die zweite Verhältnisszahl durch $\left(\frac{185}{142}\right)^{\frac{1}{3}}$, so erhält man als corrigirtes Verhältniss der Magnetismen 1:1,85 für kleine, und 1:1,12 für grosse Kräfte. Das Resultat Boernstein's, dass der Magnetismus mit abnehmender Dichtigkeit zunehme, wird also durch die angebrachte Correction nicht alterirt. Eine Bestätigung hierfür liefert die andere brauchbare Versuchsreihe (Pulver VIII: Eisen, und Pulver IX: Gemenge). Dem ersteren Pulver ent-

1) Boernstein, Ber. d. k. sächs. Ges. d. Wiss. 1874. Pogg. Ann. 154. p. 336. 1875.

spricht nämlich eine 1,7 mal so grosse Dichtigkeit und trotzdem (nach Reduction auf gleiche Massen und Längen) nur ein etwas mehr als halb so grosser Magnetismus. Eine ähnliche Vergleichung der für Kobalt- und Nickelpulver geltenden Versuchsreihen (X und XI) würde, unter der Voraussetzung, dass kein erheblicher specifischer Unterschied zwischen den Magnetismen beider Metalle besteht, freilich zu einem ganz anderen Ergebnisse führen. Allein diese Versuche scheinen überhaupt keine allgemeinere Bedeutung zu haben, da die in verschiedenen Fällen für Kobalt und Nickel von Boernstein erhaltenen Zahlen in grellem Widerspruche miteinander stehen (vgl. die Reihen V, VII, X, XI). Es bleibt also dabei, dass nach Boernstein der Magnetismus mit abnehmender Dichtigkeit wächst.

Boernstein hat auch die bei Eisen, Nickel, Kobalt und ihren Gemengen mit Thonerde stattfindenden Beziehungen zwischen der magnetisirenden Kraft und dem erzeugten Magnetismus untersucht. Allein gegen diese Versuche können zwei Einwände erhoben werden; erstens wird auch hier von dem Einflusse der Länge gänzlich abgesehen, sodann aber wird auch auf die Verschiedenheit der absoluten Dichtigkeiten, welche jedenfalls sehr beträchtlich war, keine Rücksicht genommen. Die Berücksichtigung des ersteren Umstandes macht z. B. das Resultat, dass die Magnetisirungscurve des Nickelpulvers diejenige des Kobaltpulvers schneide, hinfällig; letzteres ist vielmehr von Anfang an schwächer magnetisch. Immerhin folgt aus den Versuchen, dass der Magnetismus, besonders für grössere Kräfte, desto langsamer mit der Kraft wächst, je geringere Dichtigkeit das Metall besitzt, und dass Nickel wie verdünntes Eisen, Kobalt wie verdünntes Nickel oder wie stark verdünntes Eisen in magnetischer Hinsicht sich verhält.

Im Einklange mit den Versuchen von Toepler und v. Ettingshausen, und im Widerspruche mit den bezüglichlichen von Boernstein stehen, was den Hauptpunkt betrifft, die Resultate von v. Waltenhofen.¹⁾ Auch dieser

1) v. Waltenhofen, Wien. Ber. 79. (3) Jan. 1879.

Physiker arbeitete mit chemisch reducirtem, sehr feinem Eisenpulver. Von den Füllungen der beiden Röhren A_1 und C_1 (von der Röhre B_1 möge hier abgesehen werden) war die erstere durch Zusammenklopfen verdichtet, die andere nicht; beide hatten 10 mm Durchmesser, die erstere war 99 mm lang und 7,1503 g schwer, die letztere 97 mm lang und 11,0944 g schwer. Diese Angaben würden miteinander im Widerspruche stehen, insofern das zusammengeklopfte Pulver weniger dicht ist als das andere, wenn nicht die Bemerkung hinzugefügt wäre, dass A_1 abgesiebtes Pulver, B_1 der zerriebene und abgesiebte Rest war. Immerhin bleibt dieser Sachverhalt einigermassen undeutlich. Jede dieser beiden Röhren wurde nun mit einem Stabe aus weichem Eisen von gleicher Länge und nahezu gleicher Masse verglichen. Es wog nämlich der Stab A_3 7,1206 g, der Stab C_3 11,1107 g. Da nun das Pulver A_1 eine Dichtigkeit, $\delta = 0,919$, A_3 dagegen als consistentes Eisen etwa eine solche $\delta = 7,788$ besass, so folgt, dass der Stab im Verhältniss von $\sqrt{\frac{0,919}{7,788}} : 1$ dünner war als das Pulver, d. h. 2,91 mal so dünn; ebenso kann der Durchmesser des Stabes A_3 nur $\frac{1}{2,91}$ von derjenigen des Pulvers C_1 , dessen Dichtigkeit $\delta = 1,456$ war, betragen haben. Aus der von v. Waltenhofen durchgeführten Vergleichung darf daher aus doppeltem Grunde kein Schluss gezogen werden: einmal, weil die Entfernung der Metalltheilchen von der Spirale in beiden Fällen eine verschiedene war, sodann, weil die Dicke, unabhängig von der Masse, einen Einfluss auf den Magnetismus ausübt. Um wenigstens diesen letzteren zu eliminiren, muss man nach Gleichung (2), indem man etwa $k = \frac{1}{3}$ setzt, die für die Stäbe gültigen Zahlen mit $(2,91)^{\frac{1}{3}}$ dividiren, d. h. mit 4,15. Die folgende Tabelle enthält die verschiedenen äusseren Kräften i entsprechenden Verhältnisse der Magnetismen der Metallkörper A_3 und A_1 , zuerst nach v. Waltenhofen's Angabe, sodann mit der von mir angebrachten Correction.

Tabelle 4.

<i>i</i>	10	20	30	40	45
$\frac{A_3}{A_1}$	7,72	6,32	5,94	4,59	4,31
$\frac{A_3'}{A_1}$	1,86	1,52	1,43	1,11	1,04

Entsprechend ergibt sich für das Vergleichspaar C_3 und C_1 , indem $C_3' = \frac{C_3}{(2,31)^{\frac{4}{3}}}$ gesetzt wird:

Tabelle 5.

<i>i</i>	10	20	30	40	45	50
$\frac{C_3}{C_1}$	9,24	8,22	6,35	5,21	5,18	4,90
$\frac{C_3'}{C_1}$	3,03	2,69	2,08	1,71	1,70	1,61

Die angebrachte Correction lässt mithin qualitativ das von v. Waltenhofen gefundene Resultat bestehen, dass der Magnetismus des consistenten Eisens *ceteris paribus* stärker ist als derjenige pulverförmigen Eisens, quantitativ aber wird das Ergebniss infolge jener Correction erheblich modificirt: die Abhängigkeit des Magnetismus von der Consistenz ist bei weitem nicht so stark wie es nach den Zahlen von v. Waltenhofen den Anschein hat. Auch ist Folgendes zu beachten. Der Umstand, dass pulverförmiges Eisen schwächer magnetisch wird als consistentes, lässt erwarten, dass weiter das pulverförmige Eisen desto schwächer magnetisch werde, je weniger dicht es ist. Gerade das Gegentheil ergeben aber die Versuche von v. Waltenhofen. Rechnet man nämlich die für Pulver C_1 gefundenen Magnetismen auf die Länge und Masse des Pulvers A_1 um, indem man mit $\frac{7,1503}{11,0944} \times \left(\frac{99}{97}\right)^{1,33}$ multiplicirt (die Querschnitte sind ohnedies gleich), so erhält man durch graphische Interpolation als Verhältnisse der Magnetismen von C_1 und A_1 , erzeugt durch die Kraft *i*, folgende Zahlen:

Tabelle 6.

i	10	20	30	40	45
$\left(\frac{C_1}{A_1}\right)$	0,89	0,91	0,94	0,90	0,88

also lauter echte Brüche; das dichtere Pulver C_1 ist also schwächer magnetisch.¹⁾

b. Eigene Versuche. Unter diesen Umständen schien es mir geboten, durch neue Beobachtungen die Frage der Beziehung zwischen Dichtigkeit und Magnetismus wieder aufzunehmen.

Das Material, mit welchem ich arbeitete, war sehr feines, chemisch reducirtes Eisenpulver. Zum Zwecke der Verdünnung wurde es mit sehr feinem Holzpulver gemengt, dessen Magnetismus entweder, wie sich ergab, verschwindend klein war oder bei einigen Versuchsreihen, bei welchen die Empfindlichkeit des Apparates sehr gross war, eliminiert wurde. Die Vermengung wurde zunächst vor der Herstellung der Magnetisirungskörper möglichst sorgfältig gemacht und nach der Füllung in cylindrische Glasröhren wiederholt. Es zeigte sich nämlich einerseits, dass beim Füllen infolge der Wirkung der Schwere die Mischung an Gleichmässigkeit beträchtlich einbüsste; andererseits aber stellte sich heraus, dass diese Gleichmässigkeit ein ganz wesentliches Erforderniss für die Brauchbarkeit der Versuche ist. Eine einfache, auch für das spätere nützliche, theoretische Betrachtung macht dies Verhalten erklärlich. Es soll der Einfluss der Dichtigkeit ermittelt werden; vom Standpunkte der Molecularhypothese aus heisst das: es soll der Einfluss des Molecularabstandes untersucht werden; oder es sollen die Magne-

1) Nach des Hrn. Verfassers gefälliger Privatmittheilung können die von mir an seine Zahlen angeknüpften Betrachtungen deshalb keinen Anspruch auf Genauigkeit machen, weil die Dicke der verglichenen Röhren nur im Durchschnitt 10 mm betrug, während die Abweichungen hiervon auf einige Zehntelmillimeter sich beliefen, und weil der Einfluss der Dicke von der Weite der Spirale abhängt. Das Wesentliche der obigen Schlüsse bleibt aber trotzdem richtig.

tismen der beiden durch die Schemata 1 und 2 dargestellten Körper verglichen werden.

1) Fig. 1.

2) Fig. 2.

Aeusserere Gründe gestatten das nicht in genügender Weise; man muss vielmehr, indem man neben consistenten Körpern Pulver benutzt, mit dem Körper 1) den durch das Schema 3 dargestellten Körper vergleichen;

3) Fig. 3.

d. h. mit einem Körper, dessen Molecularabstand nicht absolut, sondern nur im Durchschnitt constant ist. Es ist ein Fall denkbar, in welchem die für 3) erhaltenen Resultate unmittelbar und ungeändert auf 2) übertragen werden dürfen; es ist dies der Fall, wenn sich herausstellen sollte, dass zwischen dem Molecularabstande und dem Magnetismus eine lineare Beziehung besteht. Es wird sich zeigen, dass dies nicht der Wirklichkeit entspricht. In allen anderen Fällen darf man die Ergebnisse für Pulver nicht auf Molecularsysteme übertragen. Wenn aber (und das ist, wie sich ergeben wird, der Fall) die Abhängigkeit des Magnetismus vom Molecularabstande eine stärkere ist, als sie nach dem linearen Gesetze sein würde, so ist wenigstens der Schluss zu ziehen, dass das für ein Pulver (3) gefundene Ergebniss zwischen dem für (1) erhaltenen und demjenigen liegen muss, welches bei gleichem mittleren Molecularabstande wie bei (3) für (2) gefunden werden würde. Die ganze Betrachtung setzt aber eins voraus: dass schon in sehr kleinen Theilen der untersuchten Pulver die mittlere Dichtigkeit dieselbe sei. Deshalb eben ist es erforderlich, einmal die Mischung des magnetischen mit dem nichtmagnetischen Bestandtheile möglichst gleichmässig zu machen, und sodann die Gesamtdichtigkeit der Mischung selbst nicht zu gering zu machen. Ich vermute, dass der erstere Umstand in Bezug auf Boernstein's, der zweite, in Bezug auf v. Waltenhofen's Resultate nicht ohne Einfluss gewesen sei.

Boernstein hat noch eine andere Rücksicht ausser Acht gelassen, welche auch ich anfangs glaubte nicht nehmen

zu müssen. Ich legte anfangs kein Gewicht darauf, den zu vergleichenden Pulvern genau die gleiche Länge zu geben, weil ich meinte, es werde genügen, die durch die Formel (1) angegebene Correction anzubringen. Es ist jedoch zu bedenken, dass die Wirkung verschieden langer Körper auf den Messapparat (bei Boernstein ein Magnetspiegel) eine verschiedene ist, selbst wenn die Mitten der Körper gleichen Abstand von jenem haben. Es rührt dies daher, dass die magnetische Fernwirkung mit einer höheren als der ersten Potenz der Entfernung umgekehrt proportional ist. Infolge dessen muss z. B. in den Figuren 1 u. 2 Taf. IV die Wirkung des Stabes *AB*, reducirt auf die Masse und Dimensionen des Stabes *CD*, eine grössere sein als diejenige des Stabes *CD*. Bei Boernstein musste daher die Wirkung des Pulvers II (l. c. p. 338) *ceteris paribus* grösser ausfallen als diejenige des Pulvers III; ein Einfluss, welcher bei der grossen Nähe des Apparates und der grossen Längendifferenz der Pulver (ca. 30 Proc.) sich sehr bedeutend und zwar in dem Sinne geäussert haben muss, dass der Magnetismus von II im Vergleich zu dem von III zu gross erscheint. Um diese Fehlerquelle zu beseitigen, muss man entweder gleich lange Pulver benutzen oder bei verschiedenen langen Pulvern nicht dem Mittelpunkte eine constante Entfernung vom Messapparate geben, d. h. nicht dem Punkte, für welchen r_0 der Mittelwerth aller Werthe r ist (r gleich Entfernung der Pulvertheilchen vom Messapparate), sondern demjenigen Punkte, für welchen $\frac{1}{r_0^3}$ der Mittelwerth aller Werthe $\frac{1}{r^3}$ ist. Ich habe meist den ersten Weg eingeschlagen.

Ferner habe ich den zu vergleichenden Pulvern stets die gleiche Dicke gegeben, um die Dickencorrection (Formel 2) vermeiden und ferner die magnetisirende Kraft als gleich ansehen zu dürfen; bei den verschiedenen Versuchsreihen war diese Dicke verschieden; es scheinen mir aber die Ergebnisse derjenigen Versuche am zuverlässigsten, bei welchen die magnetisirende Spirale die Röhren dicht umschloss.

Bezüglich der von der üblichen wenig abweichenden Versuchsmethode kann ich mich kurz fassen. Die die Pulver enthaltenden Glasröhren wurden in die Magnetisirungsspirale so eingeschoben, dass die Mittelpunkte von Pulver und Spirale zusammenfielen. Die Spirale selbst enthielt fünf Lagen 1,78 mm dicken Kupferdrahtes, jede zu 53 Windungen; der Durchmesser der innersten Lage mass 20 mm, derjenige der äussersten 41 mm; die Länge der Spirale betrug 127 mm; ihre Richtung fiel mit der Ostwest-Richtung zusammen.

In einer bei den verschiedenen Versuchsreihen verschiedenen Entfernung von ihr, je nach der erfordernten Empfindlichkeit, hing westlich eine Magnetnadel, deren Mittelpunkt in Verlängerung der Spiralenaxe fiel, und deren Ablenkungen mit Spiegel, Fernrohr und Scala beobachtet wurden. Die Ablenkungen rührten fast ausschliesslich vom Magnetismus der Pulver her, da die Stromwirkung durch passende Fortführung der Stromleitung im Westen der Magnetnadel bei Beginn jeder Versuchsreihe auf Null gebracht wurde und während der Dauer einer Reihe nur um sehr geringe, in Rücksicht gezogene Beträge von diesem Werthe sich entfernte. Auch die magnetische Wirkung von Glas, Stöpsel und Holz wurde nicht ausser Acht gelassen; sie war meist verschwindend klein. Der Strom ging noch durch eine Siemens'sche Widerstandsscala und durch ein Wiedemann'sches Galvanometer, dessen dickste Rollen weit von dem Magnetspiegel entfernt und so verbunden waren, dass nur die Differenz der Wirkungen zur Geltung kam. Sowohl der Magnetismus als die magnetisirende Kraft wurden den Tangenten der bezüglichen Ablenkungswinkel proportional gesetzt; dies Verfahren rechtfertigte sich in beiden Fällen durch die zwischen der Grösse der schwingenden Magnete und der Grösse ihrer Drehung stattfindenden numerischen Beziehungen. Bei sehr starken Magnetisirungen übte der Magnetismus einen sehr kleinen, directen Einfluss auf die Galvanometernadel aus, derselbe liess sich aber leicht ermitteln und eliminiren. Erzeugt wurde der Strom durch 1 bis 5 Bunsen'sche Elemente.

Grosse Meinungsverschiedenheit herrscht unter den Be-

obachttern in Bezug auf das zweckmässigste Verfahren bei der Reihenfolge der Manipulationen. Während die einen behaupten, ein klares Bild der Erscheinungen sei nur zu gewinnen, wenn man, während der Magnetisirungskörper in der Spirale sich befindet, den Strom weder schliesse, noch öffne, ja überhaupt weder verstärke noch schwäche, meinen die anderen, man müsse den Stab während der ganzen Versuchsreihe, einschliesslich des ersten Schliessens und des letzten Oeffnens, in der Spirale liegen lassen. Ich habe stets das letztere Verfahren angewendet; übrigens gab das gelegentlich benutzte andere Verfahren nur da verschiedene Resultate, wo es sich um die Magnetisirung durch verschiedene ansteigende Kräfte handelte.

Aus den Versuchsergebnissen wähle ich einige aus, welche von den oben angeführten Fehlern am freiesten sind. Die Tabellen enthalten die Nummer, die Länge l und die Dicke d der Pulver in Millimetern, ihren Gehalt an Eisen Pc , dessen Gewicht g in Grammen, und dessen Dichtigkeit δ ; ferner den Magnetismus m , eventuell corrigirt in Bezug auf die Länge l , endlich die auf gleiche Massen reducirten Magnetismen, d. h. die Quotienten $\mu = \frac{m}{g}$; diese Quotienten sind die gesuchten Functionen von δ . Die magnetisirende Kraft war bei jeder Versuchsreihe streng constant und bei den hier zunächst angegebenen Tabellen ziemlich gross; in absolutem Maasse habe ich sie nicht gemessen. Auch das Maass des Magnetismus ist ein relatives, und in den verschiedenen Tabellen im allgemeinen nicht dasselbe.

Tabelle 7.

$d = 7,4 \text{ mm}$				
N	1	2	3	4
l	150	154	152	155
Pc	50	71,4	83,3	100
g	2,085	4,805	8,005	2,006
δ	0,3231	0,7254	1,2244	3,009
m ($l = 150$)	596	1994	4370	16150
μ	285	415	546	807

Tabelle 8.

$d = 7,4 \text{ mm}$				
N	21	22	23	24
l	137	159	151	150
Pc	50	71,4	83,3	100
g	1,350	391	6,20	1902
δ	0,229	0,571	0,954	2,948
m	229	984	1765	7530
μ	169	252	289	396

Tabelle 9.

<i>N</i>	<i>d</i>	<i>l</i>	<i>Pc</i>	<i>g</i>	δ	<i>m</i>	μ
36	10,1	155	5,4	0,197	0,0159	33	167
37	10,1	154	20	0,984	0,0797	186	189

Tabelle 10.

d = 7,4 mm

<i>N</i>	71	72	73	74	75	77	78
<i>l</i>	147	157	149	159?	159	154	155
<i>Pc</i>	12,5	20,0	33,3	50,0	71,0	91,0	100
<i>g</i>	0,267	0,576	0,973	1,91	5,08	9,93	18,14
δ	0,0423	0,0853	0,151	0,279	0,742	1,500	2,72
<i>m</i>	79	206	343	685	2610	6820	16800
μ	296	358	352	356	514	687	927

Tabelle 11.

l = 148, *d* = 7,4 mm

<i>N</i>	81	82	83	84	<i>N</i>	81	82	83	84
<i>Pc</i>	5,4	20	50	100	<i>m</i>	6,5	58	174	3916
<i>g</i>	0,112	0,598	1,835	18,99	μ	58	97	95	206
δ	0,0176	0,0939	0,288	2,98					

Tabelle 12.

l = 100 mm, *d* = 10,1 mm

<i>N</i>	98	99	100	101	102	103
<i>Pc</i>	12,5	33,3	71	83	91	100
<i>g</i>	0,366	1,33	5,34	9,47	14,12	28,94
δ	0,0457	0,166	0,666	1,182	1,762	3,612
<i>m</i>	82	336	1813	4263	6630	24700
μ	224	252	339	438	470	853

Was diese Zahlen zunächst zeigen, ist, dass im grossen ganzen μ stark mit δ wächst. Der temporäre Magnetismus von Eisenpulvern nimmt also mit ihrer Dichtigkeit unter sonst gleichen Umständen stark zu. Die äussersten Dichtigkeiten, welche oben vorkommen, sind $\delta = 0,0176$ und $\delta = 3,612$, d. h. etwa $\frac{1}{46}$, resp. $\frac{1}{2,2}$ von der Dichtigkeit des cohärenten Eisens. Diesen Grenzwerten entsprechen Magnetismen, welche sich etwa wie 1:4 ver-

halten. Weiter zu gehen, gelang mir weder nach der Seite der stärkern Verdichtung, noch nach der Seite der stärkern Verdünnung; nach jener nicht, weil die Röhren sprangen, nach dieser nicht, weil bei der Schwäche der Magnetismen so fein vertheilten Eisens die Spirale dem Messapparate in eine Nähe gebracht werden musste, welche die Beobachtung unsicher und die Rechnung allzu complicirt machte.

Die obigen Zahlen lehren ferner, dass die Zunahme des Magnetismus mit der Dichtigkeit durchaus keine gleichförmige ist; vielmehr nimmt der Magnetismus für kleine Dichtigkeiten stark, für mittlere schwach und für grosse wiederum stark zu. Dass weiterhin auch noch vom möglichst dichten, pulverförmigen bis zum consistenten Zustande eine starke Zunahme des Magnetismus stattfindet, ergaben vergleichende Beobachtungen an dichten, reinen Eisenpulvern und an mit ihnen gleich langen und nahezu gleich dicken Stäben weichen Eisens. Auch hier genüge es, einige Zahlen anzugeben.

Tabelle 13.

	l	d	g	δ	m	$m : g$
Pulver	99	10,2	29,51	3,65	1824	62
Stab 1	99	10,75	70,21	7,87	8320	119

Die grössere Dicke des Stabes hätte, streng genommen, eine kleine Correction erfordert; dieselbe wurde unterlassen, weil hier andererseits, eben infolge der grösseren Dicke, die magnetisirende Kraft etwas grösser ist.

Ferner für verschiedene magnetisirende Kräfte:

Tabelle 14.

Pulver: $\delta = 3,37$. Stab 3: $\delta = 7,8$.

i	12	32,5	58,5	114	166	315
$m : g = \mu$ (Stab) }	90	253	455	870	1237	1956
$m' : g' = \mu'$ (Pulver) }	29	84	160	338	508	933
$\mu : \mu'$	3,1	3,0	2,7	2,6	2,4	2,1

Tabelle 15.

Pulver: $\delta = 3,12$. Stab 3: $\delta = 7,8$.

<i>i</i>	16,5	44,5	78	148	214	398
μ	216	619	1076	2127	3023	5564
μ'	53	158	304	656	1002	1928
$\mu : \mu'$	4,1	3,9	3,5	3,2	3,0	2,9

Wie man sieht, schwankt das Verhältniss der Magnetismen des consistenten Eisens und des Eisenpulvers zwischen den Grenzen 2 und 4, je nach der Dichtigkeit des Pulvers (je grösser dieselbe, desto kleiner ist natürlich das Verhältniss) und je nach der Grösse der Kraft (für grosse Kräfte ist es kleiner als für geringe); theilweise stimmt dies Ergebniss recht gut mit demjenigen von v. Waltenhofen (p. 363). Im ganzen ergibt sich somit, dass der Magnetismus consistenten Eisens unter sonst gleichen Umständen etwa acht- bis zwölfmal so stark ist wie derjenige des äusserst verdünnten Eisens.

Im übrigen bieten die Tabellen 9 bis 12 ziemlich grosse Verschiedenheiten dar; so fällt z. B. die langsame Zunahme des Magnetismus nicht stets auf dieselben Dichtigkeitswerthe; einige Zahlen deuten sogar auf eine kurz andauernde Verminderung des Magnetismus (Tab. 10 zwischen $\delta = 0,0853$ und $\delta = 0,279$; Tab. 11 zwischen $\delta = 0,0939$ und $\delta = 0,288$); theilweise mögen diese Verschiedenheiten auf Rechnung der übrigen, von Reihe zu Reihe variirenden Grössen, als Dicke, Länge und Kraft kommen; theilweise rühren sie aber jedenfalls von unberechenbaren, mit der schwankenden Natur pulverförmiger Körper zusammenhängenden Einflüssen her. Es soll daher vorläufig auf dieselben nicht des Näheren eingegangen und nur betont werden, dass die Zahlen der Tabelle 12 als die zuverlässigsten und von Fehlern freiesten zu betrachten sind.

Die Resultate meiner Versuche bestätigen qualitativ diejenigen von Toepler und v. Ettingshausen, zum Theil auch die von v. Waltenhofen, stehen aber mit denen von

Boernstein im Widerspruch. Eine quantitative Vergleichung ist nicht ausführbar, weil bei jenen älteren Versuchen die Angaben über die absolute Dichtigkeit der benutzten Pulver fehlen.

Mit der Frage der Abhängigkeit des Magnetismus von der Dichtigkeit hat E. Becquerel¹⁾ eine andere in Verbindung gebracht, indem er die Vermuthung aussprach, dass die Verschiedenheit der Magnetismen von Eisen, Nickel und Kobalt nur eine Folge ihrer Dichtigkeitsunterschiede sein möchte. Theils um diese Frage zu entscheiden, theils um überhaupt das Verhalten des Nickels kennen zu lernen, habe ich auch Nickelpulver in den Kreis meiner Beobachtungen gezogen. Dasselbe war freilich nicht direct auf chemischem Wege, sondern mit der Feile hergestellt; es war aber trotzdem nicht sehr grobkörnig, und sein Gehalt an Eisen lag, wenn überhaupt vorhanden, jedenfalls unter einem Tausendtheil. Die Mischung mit Holz und die Einfüllung in Röhren geschah hier genau wie beim Eisen; nur musste wegen der geringen Adhäsion auf die gleichmässige Vertheilung noch grössere Sorgfalt verwendet werden. Einige der zuverlässigsten Versuchsergebnisse sind im Folgenden zusammengestellt. Die magnetisirende Kraft war meist erheblich, die Einheit des Magnetismus ist in den verschiedenen Reihen nicht dieselbe; g bedeutet das Gewicht des in dem Gemenge enthaltenen Nickels, die übrigen Zeichen haben die frühere Bedeutung.

Tabelle 16.

 $d = 7,4 \text{ mm.}$

Nr.	42	43	44	45	46
l	163	152	150	154	146
Pc	33,3	50	67,3	90,5	100
g	0,94	2,34	3,01	9,16	18,47
δ	0,134	0,358	0,465	1,383	2,902
m	69,5	305	346	1368	3183
μ	74	110	115	149	172

1) E. Becquerel, Compt. rend. **20.** p. 1708. 1845.

Tabelle 17.

 $d = 7,4 \text{ mm.}$

Nr.	61	62	63	64	65
l	148	155	152	157	156
Pc	18,6	33,3	65,2	90,5	100
g	0,413	1,027	3,605	11,611	24,89
δ	0,065	0,154	0,551	1,72	3,72
m	64	178	786	3320	7700
μ	155	173	218	286	306

Tabelle 18.¹⁾ $l = 100 \text{ mm,} \quad d = 10,1 \text{ mm.}$

Nr.	104	105	106	107	108	109	110
Pc	18,4	33,3	66,6	90	100	100	100
g	0,548	1,383	4,714	14,64	27,75	31,36	33,06
δ	0,0684	0,1726	0,5884	1,828	3,464	3,914	4,126
m	61	169	672	2536	5355	7541	8550
μ	111	123	145	173	193	241	259

Aus diesen Tabellen folgt, dass auch verschiedene Nickelpulver temporäre Magnetismen zeigen, welche unter sonst gleichen Umständen desto grösser sind, je grösser die Dichtigkeit ist. Auch erkennt man in allen drei Versuchsreihen die beiden ersten von den drei beim Eisen unterschiedenen Gebiete wieder, nämlich das Gebiet starken Ansteigens für kleine, und das Gebiet schwachen Ansteigens für grössere Dichtigkeiten; dagegen fehlt bei den beiden ersten Reihen das letzte Gebiet, das des erneuten starken Ansteigens für grosse Dichtigkeiten; um so deutlicher zeigt die dritte Reihe dasselbe, indem sie zugleich erkennen lässt, warum bei den übrigen dieses Gebiet fehlt. Es ist dazu nämlich eine viel grössere Dichtigkeit erforderlich, als beim Eisen; eine Dichtigkeit, welche der halben Dichte des consistenten Metalles sich nähert, und die den Pulvern 108, 109, 110 (Tab. 18) nur durch starke Pressung gegeben werden konnte. Diese und die übrigen

1) Die magnetisierende Kraft sowie die Einheit des Magnetismus ist hier dieselbe wie in Tab. 12.

besprochenen und noch zu besprechenden Verhältnisse werden in sehr deutlicher Weise durch die Fig. 3 Taf. IV veranschaulicht, welche in den Curven I und II die Abhängigkeit der Magnetismen von Eisen und Nickel von der Dichtigkeit gemäss den Tabellen 12 und 18 darstellt, letztere der bequemerem Vergleichung halber in doppeltem Massstabe.

Hat sich somit ein Unterschied in dem Verhalten von Nickel und Eisen ergeben, welcher sich so zu sagen auf den zweiten Differentialquotienten des Magnetismus nach der Dichtigkeit, d. h. auf die Krümmung der die Functionalabhängigkeit darstellenden Curve bezieht, so sind diesem Unterschiede zwei weitere auf den ersten Differentialquotienten und den Functionalwerth selbst, d. h. auf die Steigung und die Höhe der Curve bezügliche hinzuzufügen. Erstens nämlich steigt der Magnetismus des Nickelpulvers vom Zustande grösster Zerstreuung bis zum Zustande grösster Verdichtung ($\delta = 0,06$ bis $\delta = 4,13$) nur auf das zwei- bis dreifache (beim Eisen auf das vierfache) seines Werthes, wobei allerdings zu bedenken ist, dass in der Zerstreuung hier nicht so weit gegangen worden ist wie beim Eisen. Zweitens aber, und das führt uns auf den Ausgangspunkt der Betrachtung des Nickels zurück, ist der Magnetismus dieses Metalls, seinem absoluten Betrage nach, für alle untersuchten Dichtigkeiten kleiner als derjenige des Eisens. Es ergibt sich dies aus einer Vergleichung der Tabellen 12 und 18, in welchen die Einheit des Magnetismus die nämliche ist. Man erhält nämlich durch graphische Interpolation mit Hülfe der Fig. 3 Taf. IV für das Verhältniss der gleichen Dichtigkeiten entsprechenden Magnetismen die Werthe $\mu (ni) : \mu (fe)$, welche in der folgenden Tabelle angegeben sind.

Tabelle 19.

δ	0,05	0,1	0,5	1	2	4
$\frac{\mu (ni)}{\mu (fe)}$	0,49	0,49	0,45	0,39	0,35	0,24

Nickelpulver zeigt also bei keiner Dichtigkeit mehr als halb so starken Magnetismus wie das

gleich dichte Eisen; für sehr kleine Dichtigkeiten ist er gerade halb so stark; mit steigender Dichtigkeit nimmt dann dieses Verhältniss stetig ab und ist bei der halben natürlichen Dichtigkeit nur noch ein Viertel. Es holt jedoch das Nickel weiterhin dieses Zurückbleiben wieder ein; zahlreiche Versuche von älteren und neueren Physikern¹⁾ haben nämlich für die cohärenten Metalle das Verhältniss $\mu(ni) : \mu(fe)$ wieder nahezu gleich $\frac{1}{2}$ ergeben. Da nun nicht anzunehmen ist, dass die Dichtigkeit, welche bei Pulvern den oben angegebenen mässigen Einfluss auf den Magnetismus ausübt, bei festen Metallen einen so gewaltigen Einfluss habe, dass sie beim Ansteigen von 7,8 auf 8,5 (Dichtigkeiten von Eisen und Nickel) den Magnetismus des Eisens um 100 Proc. veränderte, da ferner diese Veränderung, entgegen den obigen Ergebnissen, in einer Abnahme bestehen müsste, da endlich es mindestens sehr unwahrscheinlich ist, dass Eisen und Nickel bei einer gleichen Dichtigkeit gleichen, bei allen anderen gleichen Dichtigkeiten wesentlich verschiedenen Magnetismus besitzen, so ist zu schliessen, dass die Behauptung Becquerel's der Wirklichkeit nicht entspricht. Das Verhältniss der Magnetismen von Nickel und Eisen für verschiedene Dichtigkeiten (und grosse Kräfte) ist in Taf. IV Fig. 4 graphisch dargestellt.

Will man der zwischen Dichtigkeit und Magnetismus bestehenden Functionalbeziehung auch eine mathematische Form geben, etwa die einer Potenzreihe in δ , so muss man die letztere mit einem von δ unabhängigen Gliede beginnen. Dasselbe stellt den Magnetismus eines unendlich zerstreuten Eisen- oder Nickelpulvers dar und beträgt etwa ein Zehntel der ganzen Summe. Als zweites Glied muss man sodann ein mit δ proportionales, und zwar mit einem positiven Coëfficienten behaftetes setzen. Da weiterhin die Zunahme des Magnetismus erst schwächer,

1) Vergleiche über die älteren Wied. Galv. (2) 2. p. 360. Von neueren fand namentlich Hankel (Wied. Ann. 1. p. 285. 1877) für grosse magnetisirende Kräfte und gleiche Volumina das Verhältniss der Magnetismen von Nickel und Eisen gleich 133 : 239.

dann wiederum stärker wird, so müssen nunmehr zwei Glieder mit höheren Potenzen von δ folgen, deren erstes einen negativen, deren zweites einen positiven Coëfficienten besitzt. Welche Exponenten man wählt, ist natürlich vom Standpunkte rein empirischer Darstellung gleichgültig; aus theoretischen Gründen habe ich:

$$(4) \quad \mu = a + b\delta - c\delta^{\frac{5}{3}} + d\delta^{\frac{7}{3}} - \dots$$

gesetzt; diese Reihe ist nämlich unter gewissen Annahmen mit der Reihe:

$$(5) \quad \mu = a + \frac{b}{\rho^3} - \frac{c}{\rho^5} + \frac{d}{\rho^7} - \dots$$

identisch, in welcher ρ den mittlern Molecularabstand bedeutet, und an welche unten angeknüpft werden wird.

Die numerische Bestimmung der Coëfficienten ist natürlich bei der Schwierigkeit der Versuche nicht mit ausreichender Sicherheit zu leisten; um aber wenigstens ein Bild von der Grössenordnung derselben zu erhalten, habe ich die Zahlen der beiden besten Versuchsreihen, Tab. 12 für Eisen und Tab. 18 für Nickel, berechnet. Für Eisen ergibt die Benutzung der vier Pulver 98, 100, 102 und 103 die Gleichung:

$$(6) \quad \mu(Fe) = 211(1 + 1,5\delta - 1,0\delta^{\frac{5}{3}} + 0,3\delta^{\frac{7}{3}}),$$

für Nickel die Benutzung der vier Pulver 104, 106, 108, 110 die Gleichung:

$$(7) \quad \mu(Ni) = 100(1 + 1,5\delta - 1,4\delta^{\frac{5}{3}} + 0,4\delta^{\frac{7}{3}}).$$

Diese Gleichungen zeigen im wesentlichen, dass die Coëfficienten der von δ abhängigen Glieder durchaus nicht klein sind gegen das constante Glied; die beiden Coëfficienten von δ und $-\delta^{\frac{5}{3}}$ sind sogar grösser als jenes. Dass übrigens die Formeln auch zahlenmässig nicht ohne jede Zuverlässigkeit sind, lehrt der Umstand, dass sie auch für andere Werthe-paare von δ und μ als die zur Berechnung benutzten, zum Theil in sehr befriedigender Weise stimmen. Auch ergeben sie, über die durch die Berechnung gesteckten Grenzen hinaus, auf die consistenten Metalle angewendet (etwa $\delta = 8$) deren Magnetismen im richtigen Verhältnisse von etwas über 2. Jeden einzelnen dieser Magnetismen freilich liefern

sie viel zu gross, nämlich etwa 15mal so gross wie für sehr kleine δ , während er nach dem Obigen nur etwa 10mal so gross ist; daraus ist jedoch nur zu schliessen, dass für consistente Metalle mindestens ein weiteres Glied von der Form $-e\delta^{\frac{9}{2}}$ hinzugefügt werden muss; dabei brauchte der Coëfficient e , da für $\delta = 8$ $\delta^{\frac{9}{2}} = 512$ ist, nur den sehr kleinen Werth $e = 0,015$ zu erhalten.

Es bleibt mir noch übrig, die Versuche zu besprechen, welche ich über den Einfluss der magnetisirenden Kraft auf den temporären Magnetismus der Pulver anstellte.

Bei diesen Versuchen fing ich stets mit der kleinsten Kraft an und hörte mit der grössten auf; bei dem starken remanenten Magnetismus, welchen pulverförmige Magnetisierungskörper auffälligerweise zeigen, ist diese Reihenfolge durchaus erforderlich. Ferner ging ich von dem schwächern zum stärkern Strome (die Spirale war stets dieselbe) stets über, ohne den Strom zu öffnen; die Benutzung einer Siemens'schen Widerstandsscala gestattete dies Verfahren. Dadurch wurde eine gewisse beträchtliche Fehlerquelle, wenn auch nicht ganz beseitigt, so doch bedeutend geschwächt; bezügliche Versuche ergaben nämlich, dass, wenn man dasselbe Pulver zweimal hintereinander durch dieselbe Kraft magnetisirt, der Magnetismus beim zweiten Versuche beträchtlich grösser ausfällt, dass also die Magnetisirbarkeit der Pulver durch ihre Magnetisirung zunimmt. Bei den bisher besprochenen Versuchen wurden daher ausschliesslich frisch gefällte Pulver benutzt; bei den nun anzuführenden war dies offenbar nicht möglich. Die erhaltene Zunahme des Magnetismus mit der äussern Kraft muss daher als zu gross, und die Zahlen selbst dürfen mithin nur als obere Grenzwerte angesehen werden.

Wird hierdurch der Werth dieser Versuche erheblich beeinträchtigt, so geschieht dies noch mehr durch die grosse Unregelmässigkeit der auftretenden Resultate; eine Unregelmässigkeit, welche auch die bezüglichen Versuche Boernstein's aufweisen, und welche nur wenige sichere Schlüsse gestattet. Ueber die Ursache dieser Ungesetzmässigkeit habe

ich, ausser dem bereits angeführten, nur die Vermuthung, dass die äussere Kraft ausser der Magnetisirungsarbeit noch andere Arbeit, insbesondere bei nicht genügend verdichteten Pulvern mechanische Arbeit leiste, was auf die erstere nicht ohne erheblichen Einfluss sein kann; in ähnlicher Weise übt bekanntlich bei consistenten Körpern die Härte einen sehr starken Einfluss auf das Ansteigen des Magnetismus aus, ja Riecke¹⁾ fand sogar bei einem und demselben Stück Eisen innerhalb zweier Jahre ganz verschiedene Resultate.

Wie bei den consistenten, so auch bei den pulverförmigen Körpern wächst der Magnetismus für sehr kleine Kräfte proportional mit diesen, für grössere schneller als diese und für noch grössere langsamer. Mit anderen Worten: Das Verhältniss k des Magnetismus m zur Kraft i ist im ersten Theile der Magnetisirungcurve constant, im zweiten nimmt es zu, im dritten ab. Der zweite dieser drei Theile scheint jedoch bei sehr zerstreutem Eisenpulver zu fehlen; hier nimmt k schon für sehr kleine Kräfte ab. Das zeigt z. B. die folgende Tabelle.

Tabelle 20.

Pulver 115, bestehend aus 12,5 Proc. Fe und 87,5 Proc. Holz.

δ (fe) = 0,052. l = 97. d = 10,2.

i	13	35,5	63	117	165	275
m	14	38	67	118	162	254
const $\times k$	100	99	98	96	91	86

Dagegen zeigen die beiden folgenden Tabellen schon eine, wenn auch schwache anfängliche Zunahme von k .

Tabelle 21.

Nr 116. 45 Proc. Fe δ = 0,232. l = 98. d = 10,2.

i	13	34,5	60,5	112	159	265
m	47	129	225	404	568	892
const. $\times k$	100	101	101	100	99	94

1) Riecke, Pogg. Ann. **149**. p. 433. 1873.

Tabelle 22.

Nr. 117. 83 Proc. Fe $\delta = 1,404$. $l = 99$. $d = 10,2$.

i	18	34,5	60,5	111,5	156	260
m	520	1431	2525	4703	6157	9960
k	100	104	104	106	99	96

Bei reinem Eisenpulver ist endlich die Zunahme von k noch beträchtlicher, und hält überdies länger an.

Tabelle 23.

Nr. 119. Eisenpulver. $\delta = 3,37$. $l = 95$. $d = 10,2$.

i	12	33	59	116	170	326
m	70	203	388	817	1228	2257
k	100	103	112	119	123	118

Ein Theil dieser Zunahme von k scheint jedoch auf die oben angedeuteten fremden Einflüsse abgerechnet werden zu müssen; eine andere Versuchsreihe mit reinem Eisenpulver z. B., nicht minder sorgfältig ausgeführt, ergab nämlich eine viel kleinere Zunahme.

Tabelle 24.

Nr. 132. $\delta = 3,5$. $l = 90$. $d = 10,2$.

i	26	49	101	156	375
m	121	232	502	798	1811
k	100	103	108	110	105

So verschiedene Werthe von k diese beiden Tabellen auch ergeben, in einem Punkte stimmen sie überein: das Maximum von k tritt bei derselben Stromstärke ein. Dies zeigte sich bei gleicher Dichtigkeit ganz allgemein, und ferner, dass dieser sogenannte Wendepunkt bei einer desto geringeren Kraft eintritt, je zerstreuter das Pulver ist. Diese Verhältnisse werden durch die Fig. 5 Taf. IV in deutlicher Weise veranschaulicht; die dem Pulver 119 entsprechende Curve ist daselbst punktirt, die Wendepunkte sind mit W bezeichnet.

Ähnliche Resultate ergeben analoge Versuche mit reinem oder mit Holz gemengtem Nickelpulver.

Tabelle 25.

Nr. 120. 33,3 Proc. Ni. $\delta = 0,179$. $l = 90$. $d = 10,2$.

i	11	32	56	108	156	278
m	11	32	55	105	154	276
const. $\times k$	100	100	98	97	99	99

Tabelle 26.

Nr. 136. 90,5 Proc. Ni. $\delta = 1,75$ etwa. $d = 10,2$.

i	20,5	37	78	124	301
m	30	58	134	232	579
k	100	108	118	127	131

Tabelle 27.

Nr. 133. Reines Nickelpulver. δ etwa = 3,8.

i	20,5	38	78	123	297
m	50	98	233	412	1056
k	100	105	126	137	146

Je dichter das Nickel vertheilt ist, desto stärker nimmt also k zu. Darauf, dass es bei den beiden letzten der hier mitgetheilten Reihen überhaupt stärker zunimmt, als beim Eisen, ist kein Gewicht zu legen, weil das Nickelpulver gröber als das Eisenpulver und nicht wie dieses chemisch, sondern mechanisch hergestellt war, sodass jener Umstand sehr wohl fremden Einflüssen zugeschrieben werden kann.

Ein Zustand, welchen ich bei diesen Versuchen nicht nur nie erreichte, sondern dem ich auch, trotz Anwendung grosser magnetisirender Kräfte und sehr schwacher Magnetisirungskörper, niemals sehr nahe kam, ist der Zustand der sogenannten magnetischen Sättigung. Während nämlich dieser Zustand durch die Constanz der Werthe von m charakterisirt ist, nahm bei meinen Versuchen m , selbst wenn es bereits stark zugenommen hatte, unbegrenzt, wenn auch mit abnehmender Geschwindigkeit, weiter zu.

Was endlich den Vergleich der Pulver mit consistenten Stäben von gleichen Dimensionen hinsichtlich des Ansteigens des Magnetismus betrifft, so ist derselbe wegen des

Einflusses der Härte schwer durchzuführen. Jedoch lässt sich, wie ich fand, so viel sagen, dass das Ansteigen des Magnetismus mit der äussern Kraft bei Pulvern ein schwächeres ist als bei Stäben, welche sich in anderer Beziehung ebenso verhalten, welche insbesondere einen verhältnissmässig ebenso starken remanenten Magnetismus zeigen. Dazu ist ein ganz bestimmter Härtegrad, und zwar ein gar nicht sehr geringer, erforderlich.¹⁾ Andererseits aber zeigen Stäbe, welche so weich sind, dass sie so gut wie gar keinen Magnetismus nach dem Aufhören der äussern Kraft zurückbehalten, ein erheblich geringeres Ansteigen von k , als die dichteren Pulver. So ergaben zwei Stäbe aus schwedischem Eisen, deren Dimensionen mit den obigen Pulvern etwa übereinstimmten, folgende Zahlen.

Tabelle 28.

Stab 4. $\delta = 7,8$.

i	15,5	44	80	151	213	404
m	124	353	649	1232	1740	3075
k	100	100	101	102	102	95

Tabelle 29.

Stab 5. $\delta = 7,8$.

i	16	44	77	144	211	388
m	122	342	602	1148	1652	2586
k	100	102	103	105	103	95

Aus dem Angeführten geht hervor, dass die Erscheinung des Ansteigens des temporären Magnetismus mit der äussern Kraft in nahem Zusammenhange steht mit den Erscheinungen des remanenten Magnetismus und der magnetischen Nachwirkung: ich beabsichtige, demgemäss in einer späteren Arbeit hierauf zurückzukommen.

1) Ich führe meine hierher gehörigen Versuche nicht an, weil sie mit den von Ruths in seiner Schrift: „Ueber den Magnetismus weicher Eisencylinder und verschieden harter Stahlsorten“, Dortmund 1876, mitgetheilten völlig übereinstimmen.

Für jetzt stelle ich die wesentlichsten Ergebnisse der Untersuchung wie folgt zusammen:

Der temporäre Magnetismus cylindrischer Körper ist unter übrigens gleichen Umständen:

- 1) mit der Masse proportional;
- 2) desto grösser, je grösser die Länge ist;
- 3) desto grösser, je kleiner die Dicke ist;
- 4) nur von der Gestalt, nicht aber von der Grösse abhängig;
- 5) desto grösser, je grösser die Dichtigkeit ist (von einer Einschränkung dieses Satzes wird noch die Rede sein);
- 6) bei Nickel, je nach der Dichtigkeit und Kraft, ein Viertel bis halb so gross wie beim Eisen;
- 7) er wächst mit der magnetisirenden Kraft, zuerst proportional, dann (ausser bei sehr geringer Dichtigkeit) schneller, zuletzt langsamer als jene;
- 8) das raschere Ansteigen ist desto stärker, je dichter der Körper ist;
- 9) der Wendepunkt liegt bei gleicher Dichtigkeit an derselben Stelle; aber bei desto grösseren Kräften, je grösser die Dichtigkeit ist;
- 10) zur magnetischen Sättigung von Pulvern sind ausserordentlich grosse Kräfte erforderlich.

3) Theoretisches.

Man hat zur Beschreibung der magnetischen Erscheinungen eine ganze Reihe von Theorien aufgestellt; nur zwei von ihnen sind aber bisher im Hinblick auf die hier behandelten Gesetze der Induction des temporären Magnetismus ausgeführt worden, nämlich die Theorie der magnetischen Fluida zur Beschreibung des Einflusses von Grösse und Gestalt (Kugel, Ellipsoid u. s. w.) und die Theorie der drehbaren Molecularmagnete zur Beschreibung des Einflusses der äussern magnetisirenden Kraft. Hier soll, unter Vorbehalt der weitem Ausführung, nur angedeutet werden, wie alle zugehörigen Erscheinungen vom Standpunkte der letzteren Theorie aus aufgefasst werden können.

Die fundamentale Thatsache im Gebiete der magneti-

schen Induction ist die, dass eine endliche Kraft im allgemeinen nur eine unvollständige Magnetisirung zu Stande bringt. Dadurch wird man gezwungen, zu der gegebenen äusseren Kraft innere Kräfte in Gedanken hinzuzufügen. Durch das Gleichgewicht der inneren und äusseren Kräfte ist dann der temporäre magnetische Zustand bestimmt. Der Begründer der in Rede stehenden Theorie, Wilhelm Weber¹⁾, nannte die innere Kraft, welche auf jeden Molecularmagnet wirkt, seine Directionskraft, und verlegte sie in die Richtung seiner ursprünglichen Axe. Diese Annahme führt in Bezug auf den Einfluss der äusseren Kraft, der hier zunächst betrachtet werden möge, zu dem Resultate, dass der Magnetismus anfangs proportional mit der äusseren Kraft, später aber langsamer als diese wächst und schliesslich einem Maximum (Sättigungspunkt) sich nähert. Mit der Erfahrung stimmt dieses Ergebniss nur in roher Annäherung überein; die Erscheinung namentlich, dass zwischen den Gebieten der Proportionalität und der langsameren Zunahme im allgemeinen ein solches rascherer Zunahme liegt²⁾, bleibt gänzlich unbeschrieben. Man muss also die Theorie in irgend einer Weise modificiren.

Verschiedene Forscher haben dies gethan, indem sie auf den von Weber gänzlich unbestimmt gelassenen Begriff der Directionschaft näher eingingen; es sind das namentlich G. Wiedemann, Stefan³⁾, Boernstein, Chwolson und v. Waltenhofen. Zwei wesentliche Bestandtheile der Directionskraft lassen sich ohne weiteres angeben, nämlich die gravitirende Wechselwirkung der Molecüle und ihre magnetische Wechselwirkung. Ueber die Natur der letztern sind jedoch die Ansichten gänzlich getheilt. Während nämlich Boernstein, um die von ihm gefundene Abnahme des Magnetismus mit wachsender Dichtigkeit zu erklären, die Wechselwirkung der äusseren Kraft entgegenwirken lässt, lässt v. Wal-

1) W. Weber, Abh. d. math.-phys. Cl. d. k. Sächs. Ges. d. Wiss. **1.** p. 570. 1852.

2) G. Wiedemann, Pogg. Ann. **100.** p. 235. 1857; **106.** p. 161. 1859. **117.** p. 194. 1862.

3) Stefan, Wien. Ber. **69.** (2) p. 196. 1874.

tenhofen, der eine Zunahme des Magnetismus mit der Dichtigkeit fand, die Wechselwirkung die äussere Kraft unterstützen. Es hat dies jedoch den Nachtheil, dass die Nothwendigkeit eintritt, andere Kräfte hinzuzufügen, welche den beiden bisherigen entgegenwirken; das können nur Gravitations- oder, wie v. Waltenhofen sie nennt, Cohäsionskräfte sein; es ist aber nicht zweckmässig, derartige Kräfte in die Betrachtung einzuführen, da erfahrungsmässig eine in quantitativer Hinsicht wesentliche Beziehung zwischen den mechanischen und den magnetischen Erscheinungen nicht besteht; der Einfluss von Dehnung, Biegung und Drillung auf den Magnetismus und umgekehrt ist zwar ein sehr regelmässiger und interessanter, aber numerisch höchst schwacher. Ich meine also: zur Beschreibung rein magnetischer Erscheinungen mechanische Kräfte zu Hülfe zu nehmen, ist nicht zweckmässig. In der That lässt Boernstein¹⁾, welcher ihrer nicht bedarf, dieselben für die temporär magnetischen Erscheinungen gänzlich ausser Betracht.

In der folgerichtigsten Weise hat Chwolson²⁾ die Weber'sche Theorie modificirt. Er definirt die Directions-kraft einfach als die magnetische Wechselwirkung der Molecüle, lässt sie der äussern Kraft entgegenwirken, setzt sie aber mit zunehmender äusserer Kraft der Richtung und Grösse nach variabel; eine Annahme, auf deren Nothwendigkeit schon G. Wiedemann hingewiesen hatte. Denken wir uns, um die Bedeutung dieser Annahme zu verstehen, ein im unmagnetischen Zustande befindliches System magnetischer Molecüle; im gesammten System wird keine Richtung über die anderen überwiegen; aber, nach der Natur der Wechselwirkung, die Richtungen der Molecüle werden sich nicht sprungweise, sondern continuirlich ändern; ein Magnet wird also die in Taf. IV Fig. 6, nicht die in Taf. IV Fig. 7 dargestellte Constitution besitzen.³⁾ Greifen wir daher eine

1) Boernstein, l. c. p. 350 ff.

2) Chwolson, Pogg. Ann. Ergbd. 7. p. 53. 1876.

3) Eine ähnliche Vorstellung hat schon Chwolson entwickelt; jedoch sind die Betrachtungen, welche er zu ihrer Begründung anführt, im allgemeinen nicht stichhaltig. Denn wenn er sagt, in der Umgebung eines

kleine Gruppe von Molecülen heraus, so haben sie sämmtlich nahezu gleiche Richtung. In diesem Zustande wirkt also die Wechselwirkung in der Richtung des betrachteten Centralmolecüls; wirkt nunmehr aber die äussere Kraft, so wirkt sie einmal auf das Centralmolecül, sodann aber auch auf die ganze umgebende Gruppe; sie ändert somit die Wechselwirkung der Grösse und Richtung nach. Ohwolson zeigt nun, dass dadurch das Moment der Wechselwirkung für kleine Kräfte verringert wird; der Magnetismus muss also mit wachsender Kraft rascher als diese zunehmen.

Weiter ergibt sich die von Boernstein und mir constatirte Thatsache, dass jenes raschere Ansteigen desto mehr hervortritt, je dichter der Magnetisirungskörper ist, unmittelbar. Denn mit abnehmender Dichtigkeit nimmt die Wechselwirkung ab, also auch ihre Aenderung durch die äussere Kraft. Ist die Dichtigkeit und somit die Wechselwirkung sehr gering, so wächst das Verhältniss $m : i$ überhaupt nicht, die Weber'sche Theorie gilt dann also streng.

Zur Beschreibung des Einflusses der Dichtigkeit selbst ist dagegen Weber's Theorie auch näherungsweise nicht geeignet. Denn nach ihr müsste, gemäss den Formeln:

$$m \sim \frac{1}{3} \frac{i}{w} \quad (i < w) \quad \text{und} \quad m \sim 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{w}{i} \right)^2 \quad (i > w),$$

in welchen m den Magnetismus, i die äussere Kraft und w

die Richtung α innehaltenden Molecüls müsse eine „Tendenz nach der Richtung α “ vorhanden sein, weil doch eben die Umgebung eine Resultante in der Richtung α ausübe, so gilt das nur unter der Voraussetzung, dass jedes Molecül nur von seinen Nachbarmolecülen beeinflusst werde. Es wird aber, wie wir sehen werden, bei nicht zu grossen Körpern von sämmtlichen übrigen Molecülen beeinflusst. Trotzdem muss die Richtung eine continuirliche Function des Ortes sein, und zwar aus folgendem Grunde: Die Richtung eines Molecüls ist bestimmt durch die Resultante der Einwirkung aller anderen; für das benachbarte Molecül ist aber diese Resultante nahezu dieselbe, weil alle Entfernungen sich nur unendlich wenig geändert haben, die Zahl der Molecüle dieselbe geblieben ist und nur an die Stelle eines sehr kleinen Bruchtheils derselben ebenso viele andere getreten sind. Die Nachbarmolecüle müssen daher nahezu dieselbe Richtung haben. Auf die interessanten Schlüsse, welche sich hieran über die Richtung und den Gleichgewichtszustand der Oberflächenmolecüle knüpfen lassen, kann ich hier nicht eingehen.

die Directionskraft bezeichnet, m wachsen, wenn w abnimmt, gleichviel wie gross i ist; was zwar mit den Resultaten der Versuche Boernstein's im Einklange, dagegen mit denen von Toepler, v. Waltenhofen und mir im Widerspruche steht. Am nächsten liegt es daher in der That, anzunehmen (wie dies v. Waltenhofen thut), die Wechselwirkung unterstütze die äussere Kraft. Dass einer der beiden Bestandtheile, in welcher die magnetische Wechselwirkung sich zerlegen lässt, nämlich die Wirkung von in der Richtung der äussern Kraft benachbarter Molecüle aufeinander, d. h. die Längswirkung die magnetisirende Kraft unterstützen muss, lässt sich durch einen von v. Waltenhofen angeführten Versuch veranschaulichen, wonach eine schwingende Magnetnadel durch einen in der Meridianrichtung von ihr aus befindlichen, senkrecht zu diesem gelegenen Magnetstab stärker abgelenkt wird, wenn rechts und links von ihr zwei andere Nadeln aufgestellt sind, als wenn letztere fehlen. (Taf. IV Fig. 8). Diesem Versuche steht aber ein anderer gegenüber, bei welchem die zweite und dritte Nadel vor und hinter der ersten aufgestellt sind, und wo die Ablenkung durch deren Wirkung verringert wird (Taf. IV Fig. 9). Die Querswirkung schädigt also die äussere Kraft. v. Waltenhofen berücksichtigt diesen Fall nicht, weil ihm die Querswirkung bei Stäben so gering zu sein scheint, dass sie vernachlässigt werden darf. Gerade umgekehrt schliesst Boernstein aus seinen Betrachtungen, die Querswirkung müsse überwiegen. Von vornherein lässt sich, wie ich meine, hierüber überhaupt nichts sagen. Denn wenn auch bei Stäben die Länge über die Dicke überwiegt, so ist andererseits die Längswirkung nur eine lineare, die Querswirkung aber eine flächenhafte. Dazu kommt, dass durchaus nicht der Molecularabstand, welcher die Grösse der Wechselwirkung im wesentlichen bestimmt, in der Querrichtung ebenso gross sein muss wie in der Längsrichtung; verschiedene Erscheinungen sprechen sogar dafür, dass er in der Querrichtung kleiner sei.

Lässt sich somit die Frage, ob die der äussern Kraft günstige Längswirkung oder die ihr ungünstige Querswirkung

überwiege, von vornherein nicht entscheiden, so scheint es, als ob die Thatsache der Abnahme des Magnetismus mit der Dichtigkeit in zwingender Weise für die erstere Alternative spräche. Aber auch dies ist nicht der Fall. Es lässt sich nämlich zeigen, dass jene Thatsache mit der Annahme, die Wechselwirkung wirke der äussern Kraft entgegen, durchaus nicht nothwendigerweise im Widerspruche steht. Denken wir uns nämlich diese Annahme als richtig, und fassen wir zwei Fälle (Taf. IV Fig. 10 u. 11) in's Auge, in welchen die Dichtigkeit verschieden, sonst aber alles gleich ist. $MA = ma$ sei die äussere Kraft der Richtung und Grösse nach, MB , resp. mb das Molecül in seiner ursprünglichen Richtung; im ersten Falle sei seine Endlage MC , im zweiten, welchem eine geringere Dichtigkeit entsprechen möge, sei dieselbe mc , sodass $bmc < BMC$ ist. Die Wechselwirkung sei durch MD , resp. md dargestellt, sodass $MD < md$ ist. Dann müssen im ersten Falle die Momente der Kräfte MA und MD , und im zweiten die Momente der Kräfte ma und md gleich sein. Das Moment von ma ist grösser als das von MA , weil $ma = MA$, aber der Winkel $cma > CMA$ ist; also muss auch das Moment von md grösser sein als das Moment von MD , mithin, da $md = MD$, in höherem Grade der Winkel $dmc > DMC$ sein. Das ist das einzige, was erforderlich ist, damit unsere theoretische Annahme mit unserer beobachteten Thatsache im Einklang sei. Nun hat Chwolson bereits gezeigt, dass „die Drehung des Momentes der Umgebung“, wie er sich treffend ausdrückt, hinter der Drehung des Molecüls selbst zurückbleibt; und es lässt sich weiter zeigen, dass dies in um so höherem Grade der Fall ist, je geringer die Grösse w der Wechselwirkung ist. Der Winkel dmc wird also grösser sein als DMC , und es ist sehr wohl möglich, dass er es in dem erforderlichen Maasse ist; wenigstens für Werthe von w , welche eine gewisse Grösse nicht überschreiten. Zum Beweise, dass es sich wirklich so verhalte, ist die Chwolson'sche Formel nicht anwendbar; vielmehr müsste man, da es sich um unabhängige Variation von w und i handelt, die beiden Weber'schen Formeln unter Berücksichtigung der Drehung des Momentes

der Umgebung in eine neue umgestalten. Diese Umgestaltung erweist sich jedoch als äusserst schwierig.

Gleichzeitig lässt sich die Folgerung ziehen, dass die Zunahme des Magnetismus mit der Dichtigkeit eine desto stärkere sein muss, je grösser die äussere Kraft ist; eine Forderung, welche identisch ist mit der, dass bei dichteren Körpern die Zunahme des Magnetismus mit der Kraft eine stärkere sein müsse als bei weniger dichten; das ist aber nach meinen Versuchen in der That der Fall.

Bisher war von dem Gesetze der Wechselwirkung selbst noch nicht die Rede; es liegt aber kein Grund vor, warum auf diese moleculare Wechselwirkung nicht einfach die für die Fernwirkung endlicher Systeme beobachteten Verhältnisse übertragen werden sollten; was also den Einfluss der Entfernung betrifft, so ist anzunehmen, dass die Wechselwirkung mit der dritten Potenz des Molecularabstandes in erster Annäherung umgekehrt proportional sei. Streng würde dies der Fall sein, wenn die Grösse, oder, unter der Voraussetzung linearer Gestalt, die Länge der Molecüle sehr klein gegen ihre Abstände wäre. Nun geben die Versuche mit Pulvern, wie oben ausgeführt, Resultate, welche jedenfalls qualitativ auf Molecularsysteme übertragen werden dürfen; ferner ist die der Beobachtung zugängliche Dichtigkeit für einen und denselben Stoff mit der dritten Potenz des Molecularabstandes umgekehrt proportional; für sehr zerstreute Pulver müsste sich also Proportionalität der Wechselwirkung mit der Dichtigkeit ergeben, oder, mit Hinzufügung eines, den directen Einfluss der äussern Kraft darstellenden constanten Gliedes, der gesammte Magnetismus muss in diesem Falle eine lineare Function der Dichtigkeit sein. In der That ergibt die Gleichung (4), durch welche ich meine Versuche dargestellt habe, für sehr kleine δ :

$$\mu = a + b\delta,$$

zugleich lehrt aber die entsprechende, mit den numerischen Werthen der Coëfficienten versehene Gleichung (6), welche für Eisen, und ebenso Gl. (7), welche für Nickel gilt, dass schon für Werthe von δ , welche immer noch sehr klein sind,

höhere Potenzen von δ berücksichtigt werden müssen; daraus ist zu schliessen, dass schon bei mässig verdünnten Eisen- und Nickelpulvern die Länge der Molecüle nicht gegen ihren mittleren Abstand zu vernachlässigen ist; bei dichten Pulvern aber, und besonders beim consistenten Eisen kann die Länge der Molecüle gegen ihren Abstand überhaupt nicht klein, sondern muss von derselben Grössenordnung sein.

Uebrigens ist, da die Wechselwirkung aus zwei ganz verschiedenen Theilen, der Längswirkung und der Querswirkung sich zusammensetzt, die angedeutete Functionalbeziehung auf solche Körper zu beschränken, bei welchen der Molecularabstand oder wenigstens sein durchschnittlicher Werth (vgl. oben p. 365) constant ist, und zwar nicht nur von Ort zu Ort, sondern auch von Richtung zu Richtung. Ausgeschlossen sind „anisotrope Körper“, d. h. Körper, deren Längsdichtigkeit von der Querdichtigkeit verschieden ist. Solche Körper müssen, wenn die Theorie richtig ist, einen andern Magnetismus zeigen, als ihnen nach ihrer Gesamtdichtigkeit gemäss der gefundenen Formel zukommt, und zwar einen grössern, wenn die Längsdichtigkeit über die Querdichtigkeit überwiegt, einen geringeren, wenn umgekehrt die Querdichtigkeit über die Längsdichtigkeit überwiegt. Dies haben einige von mir angestellte Versuche ergeben, welche ich erst hier mittheile, weil vom rein empirischen Standpunkte ihre Nützlichkeit nicht hätte dargethan werden können.

Die Anisotropie wurde auf die roheste Weise erzeugt; einerseits nämlich wurden zur Herstellung von Körpern mit überwiegender Querdichtigkeit abwechselnde Schichten von Eisen oder Nickel und Holz in Glasröhren gefüllt, und diese Körper in Bezug auf ihre Magnetismen mit anderen isotropen, womöglich von derselben Gesamtdichtigkeit verglichen. In der That zeigten die ersteren Körper nach Reduction auf gleiche Verhältnisse stets einen beträchtlich geringeren Magnetismus. So ergab eine Röhre Nr. 5, zusammengesetzt aus Eisen- und Holzschichten von je 2 mm Höhe, verglichen einmal mit dem isotropen Pulver Nr. 4 von gleicher Querdichtigkeit und zweitens mit dem durch Mischung

der Schichten von Nr. 5 entstandenen, ebenfalls isotropen Pulver Nr. 6 folgende Resultate.

Tabelle 30.

Nr.	<i>l</i>	<i>d</i>	δ	μ (<i>i</i> klein)	μ (<i>i</i> gross)
4	155	7,4	3,009	142	807
5	156	„	1,59	66	303
6	153	„	1,56	103	604

μ ist hier der auf gleiche Gewichte und Längen reducirte Magnetismus. Auch ergab sich, dass das Ansteigen des Magnetismus mit der äussern Kraft bei Pulvern, deren Längsdichtigkeit gegen die Querdichtigkeit zurücktritt, ebenfalls bedeutend geringer ist als bei im ganzen gleich dichten isotropen Pulvern. Es fand sich nämlich:

Tabelle 31.

<i>i</i>	158	293	451	610	924	2205
Röhre 5						
<i>m</i>	158	288	432	563	827	1708
<i>k</i>	100	98	95	92	89	77
Röhre 6						
<i>m</i>	158	295	469	627	980	2232
<i>k</i>	100	101	104	105	106	101

Hier ist der Magnetismus *m* für die kleinste äussere Kraft *i* dieser gleich und sodann $k = 100 \frac{m}{i}$ gesetzt worden. Man sieht, während *k* bei dem isotropen Pulver 6 seiner schon ziemlich beträchtlichen Dichtigkeit gemäss anfangs mit *i* wächst und erst für grosse *i* wiederum abnimmt, nimmt *k* bei dem anisotropen Pulver 5 von vornherein ab, und schliesslich für grosse *i* sehr stark. Es verhält sich also ein anisotropes Pulver der betrachteten ersten Gattung wie ein viel dünneres, isotropes, sowohl hinsichtlich des Ansteigens des Magnetismus als auch in Bezug auf dessen Stärke selbst. Aehnlich verhält sich aber, worauf schon Boernstein aufmerksam gemacht hat, Nickel und in noch höherem Grade Kobalt. Vielleicht ist diese Uebereinstimmung keine zu-

fällige, sondern eine Folge der eigenthümlichen Molecularconstitution der magnetischen Metalle, auf welche schon oben (p. 384) hingewiesen wurde.

Anisotrope Körper zweiter Gattung, d. h. Körper, deren Längsdichtigkeit über die Querdichtigkeit überwiegt, sind schon vielfach untersucht worden. Hierher gehören namentlich die vergleichenden Messungen des Magnetismus von Stäben und gleich schweren Nadelbündeln oder hohlen Röhren; bei denjenigen unter diesen Versuchen, bei welchen am sorgfältigsten fremde Einflüsse, insbesondere der grössern Härte der Nadeln, eliminirt wurden, ergab sich, dass Bündel und Röhren verhältnissmässig stärker temporär magnetisch werden als Stäbe, und einige Versuche, welche ich mit Pulvern anstellte, deren Masse der Länge nach durch unmagnetische Stäbchen unterbrochen waren, bestätigen diese Resultate.

Die letzten Betrachtungen führen naturgemäss auf den Einfluss der Grösse und Gestalt auf den temporären Magnetismus. Lehrt schon der starke Einfluss der Dichtigkeit, dass die magnetische Wechselwirkung in weite Entfernungen merklich sein müsse, so folgt dies noch sicherer aus dem Einflusse von Grösse und Gestalt, und insbesondere bei kreiscylindrischen Körpern, aus dem Einflusse von Länge und Dicke. Was den erstern betrifft, so kann man sich nämlich einen linearen Magnetisirungskörper in drei Theile zerlegt denken; in einen mittleren, in welchem die volle Wechselwirkung zur Geltung kommt, und in je ein Endstück an jeder Seite, in welchem die Wechselwirkung continuirlich von ihrem vollen Werthe bis zu einem Minimum abnimmt. Sei l die Länge, λ der lineare Bereich der Längswechselwirkung, sei ferner m_0 der in der Längeneinheit direct, m_1 der mit Hülfe der vollen Längswirkung in ihr erregte Magnetismus, sei endlich α ein echter Bruch, so ist der gesammte Magnetismus:

$$(8) \quad M \sim l m_0 + (l - 2\lambda) m_1 + 2\lambda \alpha m_1,$$

oder, wenn $m_1 = \beta m_0$, $l = \gamma \lambda$ gesetzt wird:

$$M \sim \lambda m_0 (\gamma + \beta \{ \gamma + 2\alpha - 2 \}).$$

Nimmt man etwa an, es sei $\alpha = \frac{1}{2}$, so findet man:

$$\text{für } \gamma = 2 : M \sim \lambda m_0 (2 + \beta)$$

$$,, \quad \gamma = 3 : M \sim \lambda m_0 (3 + 2\beta),$$

oder für gleiche Massen:

$$\text{für } \gamma = 2 : \mu \sim \lambda m_0 \left(1 + \frac{\beta}{2}\right)$$

$$,, \quad \gamma = 3 : \mu \sim \lambda m_0 \left(1 + \frac{2}{3}\beta\right).$$

.

Der Magnetismus muss also mit der Länge, unabhängig von der Masse, steigen, und zwar, in Uebereinstimmung mit der Erfahrung (p. 358) immer langsamer, je mehr γ zunimmt; setzt man den oben mitgetheilten Versuchen gemäss etwa $\beta = 10$, so bilden die Verhältnisse von μ die Reihe $6 : 7\frac{2}{3} : 8\frac{1}{2}$, wenn die Verhältnisse von γ , also auch von l die Reihe $2 : 3 : 4$ bilden. Die Magnetismen wachsen also für solche Längen langsamer als diese, während sie factisch nach Formel (1) schneller wachsen, und auch für grössere β wäre dies noch der Fall. Daraus ist zu schliessen, dass für die bisher zu Beobachtungen benutzten Magnete $\gamma < 2$ ist, also $\lambda > \frac{l}{2}$. Bei allen diesen Magneten ist also die volle Wechselwirkung nirgends, selbst in der Mitte nicht zur Geltung gekommen. Für solche Stäbe müssen an der obigen Betrachtung zwei Aenderungen vorgenommen werden: das mittlere Stück, und folglich auch das zweite Glied rechts in der Formel (8) fällt fort, und ferner wird α kleiner als vorhin, also jedenfalls $\alpha < \frac{1}{2}$, im übrigen aber von γ abhängig. Es wird dann in der That der Magnetismus von der Länge stärker abhängig als bei grösseren Werthen von γ , und zwar genügt es schon, γ zwischen 1 und 2 zu wählen, um die Formel (1) annähernd zu befriedigen; dass sie aber mit irgend welcher Genauigkeit überhaupt nicht erfüllt wird, habe ich schon bei Anführung der bezüglichen Beobachtungen hervorgehoben, und insbesondere bemerkt, dass in der That, wie die Theorie es nunmehr als erforderlich herausstellt, mit wachsender Länge die Zunahme des Magnetismus sich verlangsamt. Hiernach übertrifft der lineare Bereich der magnetischen Längswech-

selwirkung die Grösse der bisher benutzten Stäbe (die längsten waren etwa 1 m lang).

Bei der Analogie der Betrachtungen, welche ich über die Beschreibung des Einflusses der Dicke anzustellen hätte, mit den eben durchgeführten will ich mich auf das Resultat desselben beschränken. Die Dicke hat deshalb unter sonst gleichen Umständen einen schädlichen Einfluss auf den Magnetismus, weil die Querwechselwirkung, welche der äussern Kraft entgegenwirkt, desto vollständiger zur Geltung kommt, je dicker der Stab ist. Ist der Querschnitt kein Kreis, so muss nothwendig der Magnetismus stärker ausfallen, weil die Kreisfläche von allen Flächen gleichen Inhalts die gedrungeenste ist. Indess hat v. Waltenhofen¹⁾ bei prismatischen Stäben von weichem Eisen diesen Unterschied nicht beobachten können.

Uebrigens bleibt weder die Längswirkung noch die Querswirkung bei steigender äusserer Kraft unverändert; vielmehr ergibt eine einfache Betrachtung, auf welche auch Boernstein aufmerksam macht, dass die Längswirkung zunimmt, die Querswirkung abnimmt; vielleicht erklärt sich das negative Ergebniss v. Waltenhofen's aus diesem Umstande.

Schliesslich ist ersichtlich, dass, wenigstens für kleine Kräfte, die Vergrösserung der Querswirkung durch Vergrösserung des Querschnittes demselben Gesetze unterworfen sein muss wie die Vergrösserung der Längswirkung durch Vergrösserung der Länge. Denn in einem unmagnetischen Stabe hat der Begriff der Längs- resp. Querrichtung des Stabes durchaus nichts mit der Längs-, resp. Querrichtung der Molecüle zu thun, wie die Fig. 6 Taf. IV lehrt; von der letztern hängt aber ausschliesslich jenes Gesetz ab. Es folgt hieraus der in der That durch die Erfahrung bestätigte und p. 358 hervorgehobene Satz, dass der temporäre Magnetismus cylindrischer Stäbe gleicher Gestalt von ihrer Grösse nicht abhängt. Bei fortschreitender Magnetisirung freilich muss, vom theoretischen Gesichtspunkte aus, ein sol-

1) v. Waltenhofen, Pogg. Ann. **121**. p. 450. 1864.

cher Einfluss sich geltend machen; denn mehr und mehr werden dann die in der Längsrichtung des Stabes benachbarten Molecüle einer bestimmten, und die in der Querrichtung des Stabes benachbarten Molecüle einer andern bestimmten gegenseitigen Lage sich nähern; und für diese beiden Lagen ist das Gesetz der Wechselwirkung ein ganz verschiedenes; jedoch lassen die Beobachtungen nicht erkennen, ob wirklich jener Satz desto genauer zutrifft, je geringer die Magnetisirungen sind.

Zu weiterer Aufklärung über die Theorie der drehbaren Molecularmagnete halte ich, neben den Beziehungen zwischen magnetischen, mechanischen und thermischen Erscheinungen die Gesetze des remanenten Magnetismus für geeignet, insbesondere aber werde ich meine Aufmerksamkeit auf den noch sehr wenig beachteten Vorgang der magnetischen Nachwirkung unter den einfachsten Bedingungen richten und über die Ergebnisse demnächst Bericht erstatten.

Breslau, 12. Juli 1880.

II. *Neue Untersuchungen über den Magnetismus; von C. Baur.*

Einleitung.

Man habe irgend ein homogenes magnetisches Feld und bringe in dasselbe eine magnetisirbare Masse vom Volumen V . Ist X die Grösse der magnetisirenden Kraft in jedem Punkte des Feldes, M das in der Masse V erzeugte magnetische Moment, so setzt man $M = kVX$, oder, wenn $V = 1$, $M = kX$. k ist eine Zahl und wird die Magnetisirungsfunktion genannt. Diese ist also der Quotient aus dem in der Masse erzeugten magnetischen Moment M durch die magnetisirende Kraft X , die dieses Moment erzeugt.

Die Magnetisirungsfunktion war der Gegenstand einer sehr eingehenden Untersuchung, und es liegen über sie eine Reihe von Abhandlungen vor von W. Weber, G. Wiedemann, Quintus Icilius, Kirchhoff, Stoletow etc.

