4. Zur Magnetisirung eiserner Hohl- und Vollringe; von F. KIRSTÄDTER.¹⁾

§ 1. Einleitung.

Untersuchungen über die Vertheilung der Magnetisirung hatte v. Feilitzsch²⁾ an eisernen Hohlcyclindern gleicher Oberfläche, aber verschiedener Wandstärke durchgeführt. Er benutzte bei seinen Versuchen 11 cm lange Röhren, welche aus 0,5 mm starkem Eisenblech hergestellt waren und ineinander geschoben werden konnten; die weiteste Röhre hatte einen Durchmesser von 3,1 cm, die engste einen solchen von 1,9 cm. Er zog aus seinen Versuchen den Schluss, dass bei geringen magnetisirenden Kräften die Magnetisirung nur bis zu einer, von der Intensität des magnetisirenden Feldes abhängigen, Tiefe in das Eisen eindringt.

Zu demselben Ergebnisse war vom Kolke³⁾ durch seine in demselben Jahre ausgeführten Abreissversuche gelangt. v. Waltenhofen⁴⁾ lieferte den Nachweis der ungleichen Magnetisirung von Hohl- und Vollcyclindern, indem er an dem einen Ende eines Waagebalkens einen massiven, an dem anderen Ende einen hohlen Eisencylinder aufhing, und dieselben bis ungefähr zur Hälfte in Drahtspulen hineinragen liess.

Die v. Feilitzsch'schen Versuche wurden neuerdings von Grottrian⁵⁾ wieder aufgenommen, welcher das magnetische Moment von Voll- und Hohlcyclindern von gleicher Länge (10,96 cm) und gleichem äusseren Durchmesser (3,31 cm), aber verschiedener Wandstärke bestimmte. Das Ergebniss seiner Versuche war, dass bei Spulenfeldern bis zu 300 C. G. S.-Ein-

1) Nach der Leipziger Inaugural-Dissertation (1896) für die Annalen bearbeitet; wegen weiterer Einzelheiten sei auf diese hingewiesen.

2) v. Feilitzsch, Pogg. Ann. 80. p. 321. 1850. Vgl. wegen der Literatur G. Wiedemann, Lehre v. d. Electricität 2. Aufl. 3. §§ 661 bis 668. 1895.

3) vom Kolke, Pogg. Ann. 81. p. 321. 1850.

4) v. Waltenhofen, Sitzungsber. d. k. k. Gesellsch. d. Wiss. zu Wien 62. (2) p. 438. 1870.

5) Grottrian, Wied. Ann. 50. p. 705. 1893.

heiten hinauf die magnetischen Momente der Hohlcyylinder bis zu einer Wandstärke von 0,287 cm dem Momente des Vollcyinders nahezu gleich waren, und dass bei schwächeren Spulenfeldern diese Uebereinstimmung für Hohlcyylinder von noch geringeren Wandstärken bestand. Auch Grotrian führt seine Versuchsergebnisse auf eine besondere magnetische Schirmwirkung, welche die äusseren Eisenschichten auf die inneren ausüben sollen, zurück. In zwei späteren Arbeiten unternimmt er es, durch neue Versuche weitere Beweismittel für seine Schlüsse beizubringen.¹⁾

H. du Bois²⁾ erklärt die von Grotrian erhaltenen Versuchsergebnisse durch die selbstentmagnetisirende Wirkung der Cylinder und zeigt, wie sich aus der gewöhnlichen Theorie der Selbstentmagnetisirung die von Grotrian für die dünnwandigen Hohlcyylinder erhaltenen Resultate erklären lassen. Bei dem dickwandigsten Hohlcyylinder dagegen lässt sich eine einwurfsfreie Rechnung nicht durchführen. Schliesslich weist er darauf hin, wie nur Versuche mit Hohlringen eine einwandfreie Entscheidung in dieser Frage erhoffen lassen, vorausgesetzt, dass sich die vorübergehende Schirmwirkung der Foucaultströme bei dem alsdann nothwendigen ballistischen Messverfahren genügend eliminiren lasse.

Eine gleiche Stellung nahm M. Ascoli³⁾ der Grotrian'schen Annahme einer Schirmwirkung gegenüber ein und begründete seine Stellungnahme durch die von ihm bei der Magnetisirung von Hohl- und Volleylindern, welche aus Eisen-
drähten bestanden, erhaltenen experimentellen Ergebnisse. Nach diesen nahm die Ungleichheit in der Magnetisirung von Hohl- und Volleylindern mit wachsender Länge ab und wurde sehr gering, wenn sich das Dimensionsverhältniss grösser als 50 stellte. Ferner wies der centrale Querschnitt der Cylinder bei jeder Länge eine fast gleichförmige Vertheilung der Magnetisirung auf, die ungleichmässige Vertheilung machte sich erst in der Nähe der Enden bemerkbar.

1) Grotrian, Wied. Ann. **52**. p. 735. 1894 u. **54**. p. 452. 1895.

2) du Bois, Wied. Ann. **51**. p. 529. 1894.

3) Ascoli, Rend. R. Acc. Lincei **3**. 1. Sem. p. 176. 279. 314. 377; 2. Sem. p. 157. 1894; **4**. 1. Sem. p. 341. 1895; Nuovo Cim. (4) **1**. p. 5. 108. 1895; (4) **3**. p. 1. 1896; l'Elettricista **3**. p. 107. 1894.

Bevor Grotrian seine Magnetisierungsversuche an Hohl- und Vollcylindern anstellte, hatte Silvanus Thompson¹⁾ die v. Feilitzsch'schen Versuchsergebnisse auf den grossen Widerstand zurückgeführt, welchen die magnetischen Kraftlinien bei Fortsetzung ihres Kreislaufes durch die den Cylinder umgebende Luft zu überwinden haben; die Länge des in dieser zurückgelegten Weges blieb, da bei allen Versuchen die äussere Rinde vorhanden war, fast ungeändert.

Bei den bisher angeführten Versuchen konnte wegen des an den Enden der Cylinder auftretenden „freien Magnetismus“ nicht einwandsfrei festgestellt werden, ob die erhaltenen Versuchsergebnisse lediglich eine Folge der entmagnetisirenden Wirkung der Cylinderenden sind, oder ob diese im Verein mit einer specifischen Art der magnetischen Schirmwirkung die beobachteten Erscheinungen bedingen.

Werden aber an Stelle der Cylinder geschlossene Voll- und Hohlringe genommen und diese peripherisch magnetisirt²⁾, so ist eine Fernwirkung der Ringe, und die damit im Zusammenhang stehende selbstentmagnetisirende Wirkung ausgeschlossen. Es ist nun von Wichtigkeit möglichst einwandsfrei festzustellen, ob in diesem Falle eine Schirmwirkung auftritt; denn wäre dies der Fall, so müsste die Kirchhoff'sche Theorie³⁾ angezweifelt werden, da in dieser eine solche Erscheinung nicht vorgesehen ist; damit wäre aber eine wichtige Grundlage der Lehre vom Magnetismus ins Wanken gebracht. Ich habe daher im physikalischen Institut der Universität zu Berlin im Jahre 1894/95 vergleichende magnetische Messungen an Voll- und Hohlringen zur experimentellen Lösung der Frage, ob eine magnetische Schirmwirkung der äusseren Eisenschichten bei schwachen magnetisirenden Kräften vorhanden ist, ausgeführt. Für die Versuche wurde zunächst aus einer Eisenplatte ein Vollring ausgedreht, und dessen Magnetisierungscurve bestimmt. Aus dem Vollringe wurde sodann ein Hohlring in

1) S. Thompson, The Electromagnet 2. Aufl. p. 180. London 1892.

2) W. v. Siemens (Gesamm. Abhandl. 2. Aufl. 1. p. 334. Berlin 1889) beschreibt Versuche über die Tragkraft und äussere angebliche Schirmwirkung *circular* magnetisirter Hohlringe, deren Zusammenhang mit der vorliegenden Untersuchung nur ein sehr indirecter ist.

3) Kirchhoff, Gesammelte Abhandl. p. 223.

der Weise hergestellt, dass jener nach seiner Aequatorialebene durchschnitten, und darauf in jede der beiden Ringhälften eine Hohlkehle eingedreht wurde. Durch stufenweises Vergrössern der Hohlkehle liessen sich Hohlringe von verschiedener Wandstärke und von annähernd $\frac{4}{5}$, $\frac{3}{5}$ und $\frac{2}{5}$ des Querschnitts des durchschnittenen Vollringes herstellen. Für letzteren erfolgte nach der Durchschneidung, wie auch für jeden der drei Hohlringe von neuem die Ermittlung der Magnetisirungscurve.

Nachdem die magnetischen Messungen an diesen Ringen beendet waren, wurde, um eine etwa auftretende magnetische Schirmwirkung noch directer nachweisen zu können, ein zweiter, in den zuletzt benutzten Hohlring passender Vollring gedreht, und die Magnetisirungscurve für diesen allein, sowie für ihn sammt dem umhüllenden Hohlringe ermittelt.

§ 2. Herstellung, Messung und Bewickelung der Eisenringe.

Es war beabsichtigt, die vergleichenden magnetischen Messungen erst mit dem durchschnittenen Vollringe zu beginnen, zur Controle aber vorher auch die Magnetisirungscurve für den nicht durchschnittenen Ring zu bestimmen. Für den durchschnittenen Vollring und die daraus gedrehten drei Hohlringe war als Querschnittsform der Kreis vorgesehen.

Mit Rücksicht auf die beim Durchschneiden des Vollringes nach seiner Aequatorialebene eintretende Materialverminderung wurde er von vornherein aus einer Platte so abgedreht, dass der der Axe parallele Durchmesser des Ringquerschnittes um ungefähr 5 Proc. grösser war als der dazu senkrechte.

Beim Durchfräsen des Ringes ging indessen mehr Material verloren, als vorgesehen war, da die Schnittflächen der beiden Ringhälften uneben ausfielen und wieder eben geschliffen werden mussten. Hierdurch wurde der zuvor grössere Durchmesser des Ringquerschnittes nun um ungefähr 2,8 Proc. kleiner als der andere, und die beiden Ringhälften erhielten segmentförmige, statt genau halbkreisförmige Querschnitte. Den Hohlkehlen wurde später ein Profil gegeben, welches demjenigen der Ringhälften entsprach, und so erreicht, dass die Wandstärke der Hohlringe möglichst constant war. Die roh zugeordneten schmiedeeisernen Ringe wurden, um jede Spur von Magnetisirung zu entfernen, 24 Stunden lang in einem

Holzkohlenfeuer geglüht; nach langsamer Abkühlung wurden sie dann von neuem auf der Drehbank centrirt, genau abgedreht und geschliffen. Die Dimensionen der Ringe wurden mit der Theilmaschine und dem Kathetometer gemessen; ferner fand durch Wägung eine Volumbestimmung statt, ausserdem wurde unter Benutzung des Himstedt'schen Verfahrens¹⁾ der Umfang der Ringquerschnitte ermittelt; die Tiefe der Hohlkehlen wurde mit Hülfe der beim Ausdrehen derselben benutzten Leeren auf der Theilmaschine gemessen.

Tabelle 1.

	$2 R_i$	$2 R_m$	$2 R_a$	$2r \parallel$	$2r \perp$	S_f	D
	cm	cm	cm	cm	cm	qcm	
V_1	11,315	14,322	17,329	3,157	3,007	7,504	7,832
V_2	11,357	14,331	17,305	2,890	2,973	6,746	7,831
H_1	11,357	14,331	17,305	2,890	2,973	5,420	7,831
H_2	11,357	14,331	17,305	2,890	2,973	3,922	7,832
H_3	11,357	14,331	17,305	2,890	2,973	2,884	7,828
v	12,061	14,329	16,596	2,178	2,267	3,843	7,827
(v, H_3)						6,727	

Diese verschiedenen, sich gegenseitig controlirenden Messverfahren, deren Einzelheiten hier nicht mitgetheilt werden können²⁾, ergaben eine befriedigende Uebereinstimmung. Tab. 1 giebt eine Zusammenstellung der Dimensionen. Darin bedeuten:

V_1 den grossen undurchschnittenen Vollring,

V_2 den grossen durchschnittenen Vollring,

H_1 den dickwandigsten Hohlring,

H_2 den mittleren Hohlring,

H_3 den dünnwandigsten Hohlring,

v den zweiten kleineren Vollring,

(v, H_3) die Combination: v umhüllt von H_3 .

Ferner:

$2 R_i$ innere Ringdurchmesser,

$2 R_m$ mittlere Ringdurchmesser,

$2 R_a$ äussere Ringdurchmesser,

$2r \parallel$ Durchmesser des Ringquerschnittes $\parallel$ der Axe,

1) Himstedt, Wied. Ann. 26. p. 555. 1885.

2) Vgl. l. c. p. 11—14.

- $2r \perp$ Durchmesser des Ringquerschnittes $\perp$ zur Axe,
 S_f Ringquerschnitt, sofern durch Eisen ausgefüllt,
 D Dichtigkeit des Eisens.

Die Ringe wurden mit Kupferdraht vom Durchmesser 1,5 mm gleichmässig bewickelt. Ueber diese Windungen, welche dicht nebeneinander gereiht in einer einzigen Lage den Ring umgaben und zur Durchleitung des Primärstromes dienten, wurde dünner Kupferdraht gewickelt; diese secundären Windungen umgaben nur einen Theil, ungefähr ein Drittel, des Ringumfanges, und waren, damit sie sich nicht zwischen die primären Windungen legten, von diesen durch eine starke Papierlage getrennt. Die Dicke des für die secundäre Wickelung benutzten Drahtes stellte sich beim grossen Vollringe auf 0,5 mm, bei den übrigen Ringen auf 0,25 mm. Die Anzahl der Primärwindungen n_1 , sowie der secundären n_2 ist aus Tab. 2 zu entnehmen.

§ 3. Versuchsanordnung.

Bei der Messung der magnetischen Induction der Ringe, welche nur ballistisch erfolgen konnte, wurde folgende Versuchsanordnung gewählt. Der von einer Accumulatorenbatterie gelieferte primäre Magnetisierungsstrom wurde mit einem Siemens'schen Torsionsgalvanometer bestimmt. Zur Aichung des ballistischen Galvanometers diente ein Aichungssolenoid; eine Quecksilberwippe ermöglichte es, den Strom bald durch die primären Windungen des Ringes, bald durch die des Aichungssolenoids zu senden. Die secundären Windungen des letzteren standen mit dem ballistischen Galvanometer durch eine zweite Wippe in Verbindung, durch deren Umlegung die secundäre Ringwicklung an das Galvanometer angeschlossen wurde. Zur Beruhigung des Galvanometers diente ein Stabmagnet mit einer auf demselben verschiebbaren Spule. Der Eisenring lag während der magnetischen Messungen in einem Petroleumbade, welches bei starken Primärströmen mit kleinen Eisstücken gekühlt wurde. Es gelang so, die Temperatur des Bades zwischen 17° und 20° constant und grössere Temperaturschwankungen von dem Eisenringe fern zu halten. Der Regulirwiderstand des primären Kreises wurde von Eisendrahtspiralen gebildet, der des secundären Kreises dagegen war ein geaichter

Siemens'scher Decadenwiderstand und ermöglichte es, die Galvanometerausschläge in den richtigen Grenzen zu halten. Um die auftretenden Thermostrome unschädlich zu machen, war es erforderlich, den Widerstand des secundären Stromkreises auf mindestens 60 Ohm zu bringen; er schwankte zwischen 64 Ohm bei sehr schwachen Spulenfeldern und 9900 Ohm bei starken Feldern.

Das benutzte ballistische Galvanometer war ein du Bois-Rubens'sche halb-astatisches weispuliges Spiegelgalvanometer kleinerer Bauart.¹⁾ Bei diesem wurde das Magnetsystem durch Umliegen von Schutzringen um das Gehäuse astasirt; das leichte Magnetsystem wurde durch Vergrößerung seines Trägheitsmomentes auf eine volle Periode von 17" gebracht. Da die Empfindlichkeit des Galvanometers mit einer Spule genügte, wurde die zweite nicht eingeschaltet; der Widerstand betrug 5 Ohm.

Das Aichungssolenoid bestand aus einem 48,70 cm langen Holzcyylinder, über welchen 1,5 mm dicker Kupferdraht in einer Lage von 298 Windungen gewickelt war. Ueber diese primäre Spule war eine secundäre Spule von 626 Windungen 0,3 mm dicken Kupferdrahtes geschoben.²⁾ Durch Einsetzen obiger Bestimmungsstücke in bekannte Formeln ergibt sich für die Mitte des Solenoides die Feldintensität

$$\mathfrak{S} = 7,672 I',$$

wenn I' die Stromstärke in Ampère bedeutet; das Feld kann innerhalb des von der Secundärspule bedeckten Bereiches als gleichförmig angesehen werden. Das Product aus der Feldintensität in die mittlere Windungsfläche der Primärwicklung ($S_1 = 9,909 \text{ qcm}$) ergibt den von der Secundärspule umschlossenen Inductionsfluss, welcher mit $\mathfrak{G}$ bezeichnet sei; es ist

$$\mathfrak{G} = S_1 \mathfrak{S} = 9,909 \times 7,672 I' = 76,0 I'.$$

Ist ferner die Gesamtzahl der Secundärwindungen n_2 , so wird beim Commutiren in jenen ein „electromotorisches Zeitintegral“

$$\int E dT = 2 n_2 \mathfrak{G}$$

1) du Bois u. Rubens, Electrotechn. Zeitschr. 15. p. 321. 1894.

2) Die Benutzung des Solenoids verdanke ich Hrn. H. Lehmann, der es bewickelt und eingehend beschrieben hat (Wied. Ann. 48. p. 406. 1893); Einzelheiten sind dort angegeben; bei seinen Versuchen hatte indessen die Secundäre 632 Windungen.

inducirt; und es fliesst bei einem Widerstand des Secundärkreises von R_2 Ohm die Electricitätsmenge $Q = 2 n_2 \mathfrak{G} / R_2 10^9$ durch das Galvanometer, welche einen Ausschlag a erzeuge. Werden die Zahlenwerthe für $\mathfrak{G}$ und n_2 eingesetzt, so ergibt sich der Ausdruck

$$\frac{2 \times 76,0 \times 626 \cdot 10^{-9}}{R_2 a} I'$$

als der bei den späteren Messungen zu benutzende Reductions-factor.

Die Aichungen geschahen während der Messungen in stündlichen Zwischenräumen und wichen bei einem aushülfweise benutzten Galvanometer alter Bauart um $\frac{1}{2}$ — $1\frac{1}{2}$ Proc., bei dem du Bois-Rubens'schen Galvanometer bis zu $\frac{1}{2}$ Proc. voneinander ab, differirten jedoch bei letzterem in den meisten Fällen nicht mehr als $\frac{1}{3}$ Proc.

§ 4. Rechenverfahren und Fehlerquellen.

Aus der Theorie des mehrdeutigen Potentials innerhalb eines Rotationskörpers, welcher von n_1 Drahtwindungen in einer Lage gleichmässig umgeben ist, lässt sich in ganz voraussetzungsloser Weise die mittlere Feldintensität $\mathfrak{H}$ für sämtliche untersuchten Ringe berechnen und zwar durch Reihenentwicklung.¹⁾ Ich begnüge mich an dieser Stelle mit der tabellarischen Zusammenstellung der dafür in Betracht kommenden Bestimmungsstücke, sowie der Factoren, mit denen die Stromstärke I' (in Ampère) zu multipliciren war, um $\mathfrak{H}$ zu erhalten.

Tabelle 2.

	n_1	S	$\mathfrak{H}$	S_f	n_2
		qcm		qcm	
V_1	190	7,504	5,40 I'	7,504	203
V_2	201	6,746	5,64 I'	6,746	150
H_1	200	6,746	5,61 I'	5,420	200
H_2	193	6,746	5,42 I'	3,922	200
H_3	198	6,746	5,56 I'	2,884	217
v	212	3,843	5,99 I'	3,843	208
(v, H_3)	199	6,746	5,59 I'	6,727	160

1) l. c. p. 20—26.

In Tabelle 2 bedeuten n_1 und n_2 die primäre bez. secundäre Windungszahl, S den von den Primärwindungen umschlossenen Querschnitt, S_f den Eisenquerschnitt (der Tab. 1 entnommen).

Der den Beobachtungen am ballistischen Galvanometer unter Berücksichtigung des Reductionsfactors direct zu entnehmende gesammte Inductionsfluss $\mathfrak{G}$ setzt sich zusammen aus dem im Eisen verlaufenden $\mathfrak{G}_f$ und bei den Hohlringen ausserdem aus dem im Hohlraum verlaufenden $\mathfrak{G}_h$. Wenn $\mathfrak{B}$ die mittlere Induction bezeichnet, so ist offenbar

$$\mathfrak{G} = \mathfrak{G}_f + \mathfrak{G}_h = \mathfrak{B} S_f + \bar{\mathfrak{S}} (S - S_f).$$

Daraus erhält man dann die Induction

$$\mathfrak{B} = \frac{\mathfrak{G} - \bar{\mathfrak{S}} (S - S_f)}{S_f}$$

oder die mittlere Magnetisirung

$$\bar{\mathfrak{S}} = \frac{\mathfrak{B} - \bar{\mathfrak{B}}}{4\pi} = \frac{\mathfrak{G} - \bar{\mathfrak{S}} S}{4\pi S_f}.$$

Was den Einfluss der Selbstinduction auf die Resultate betrifft, so lautet die Gleichung für den Selbstinductionscoefficient A_1 des Primärkreises bei einem Ringe bekanntlich

$$A_1 = \frac{2 n_1^2 S}{R_m} \cdot \frac{d\mathfrak{B}}{d\mathfrak{S}}.$$

Setzen wir hier $S = 7,5$ qcm, $R_m = 7$ cm, $n_1 = 200$, so lässt sich für A_1 eine obere Grenze berechnen, indem vorweg bemerkt wird, dass der höchste Werth des Differentialquotienten $d\mathfrak{S}/d\mathfrak{B}$ aus den Magnetisirungscurven (Fig. 1) sich ungefähr gleich 100 ergibt, sodass $d\mathfrak{B}/d\mathfrak{S} = \text{ca. } 1250$ wird; daher ist

$$A_1 < 0,1 \text{ Henry.}$$

Bei dem Strome, welchem jener steilste Anstieg der Magnetisirungscurve entspricht, betrug der Widerstand R_1 des Primärkreises 2,5 Ohm; man findet daher seine Relaxationsdauer aus der Gleichung

$$\theta = \frac{A_1}{R_1}, \text{ daher } \theta < 0,04'',$$

was gegenüber der Periode von $17''$ des Galvanometers als genügend gering zu erachten ist.

Ausser der Selbstinduction beeinflussen die Magnetisirung kurz nach dem Stromwechsel in dem primären Kreise die durch die plötzliche Aenderung des magnetischen Zustandes in dem Eisen selbst hervorgerufenen Foucault'schen Wirbelströme. Diese verzögern beim Abfall der magnetisirenden Kraft die Abnahme und beim Ansteigen der magnetisirenden Kraft die Zunahme der Magnetisirung. Da wir zur Ermittlung der Induction des Eisenringes die ballistische Methode anwenden, so wird, wenn die Wirkung der Wirbelströme bei den Messungen hervortritt, was bei der grossen nicht zertheilten Eisenmasse der Ringe zu erwarten ist, ihr Einfluss sich dadurch geltend machen, dass die Magnetisirung bei dem nicht durchschnittenen Vollringe kleiner als bei dem durchschnittenen und bei diesem wieder geringer als bei den einzelnen Hohlringen ausfällt. Bei letzteren endlich wird noch eine Zunahme der Magnetisirung mit abnehmender Wandstärke zu erwarten sein. Die durch die Wirbelströme bedingte scheinbar ungleichmässige Magnetisirung der Voll- und Hohlringe von gleicher Oberfläche ist daher bei der Beurtheilung der erhaltenen Resultate zu berücksichtigen, bevor auf Grund dieser Messungsergebnisse ein etwaiger Schluss auf die gleichmässige oder ungleichmässige Magnetisirung der einzelnen Schichten und somit auf eine Schirmwirkung der äusseren Eischichten gezogen werden kann.

Da die magnetischen Messungen an den einzelnen Ringen nun thatsächlich etwas verschiedene Magnetisirungswerthe ergaben, wurde, um eine etwaige Schirmwirkung der letzten Art direct nachweisen zu können, der in den Hohlring H_3 gerade hineinpassende kleine Vollring v gedreht, und die Magnetisirungscurve für diesen allein, sowie für diesen, sammt dem Hohlring H_3 , ermittelt.

Besteht nun keine magnetische Schirmwirkung, so müssen die durch den Versuch für die Combination: Hohlring H_3 und kleiner Vollring v erhaltenen Magnetisirungswerthe mit den Werthen übereinstimmen, welche sich mit Hülfe der Rechnung aus den für jeden der beiden Ringe durch den Versuch gefundenen Magnetisirungscurven ermitteln lassen.

§ 5. Versuchsergebnisse.

Nach jeder Bearbeitung des Ringes wurde er, bevor die Messungen begannen, gegen hundertmal einem cyklischen Magnetisierungsprocess unterzogen, welcher mit der Feldstärke Null begann und sich über die grösste Feldstärke, bis zu welcher die Messungen sich erstrecken sollten, ausdehnte. Hierdurch wurden die, den magnetischen Zustand des Ringes beeinflussenden Structuränderungen beseitigt, welche nach dem Ausglühen durch dessen weitere Bearbeitung, namentlich durch das Nachdrehen und das Eindrehen der Hohlkehlen hervorgerufen sein konnten. Gleichzeitig wird bekanntlich durch die wiederholte Um- und Entmagnetisirung ein eindeutig bestimmter magnetischer Zustand des Eisens erreicht. Bei den Messungen selbst wurde stets von schwächeren zu stärkeren Feldern übergegangen; falls ein Zurückgreifen auf schwächere Felder nothwendig war, erfolgte zuvor die vollständige Entmagnetisirung des Ringes durch allmählich abnehmende Stromwechsel. Für jeden Ring wurden drei Messungsreihen aufgenommen, welche mit einem magnetisirenden Felde von 0,02 C.G.S.-Einheiten begannen und bis zu 86 Einheiten durchgeführt wurden. Die Messungsintervalle betrugen bei sehr schwachen magnetisirenden Feldern 0,1—0,2, bei solchen bis zu 10 C.G.S.-Einheiten 0,3—0,5 Einheit, stiegen dann bis zu 3 Einheiten bei Feldern bis zu 40 und betrugen schliesslich bei noch höheren Feldstärken 4—8 Einheiten.

Bei jedem Werthe der Feldintensität wurden vier Bestimmungen ausgeführt. An Stelle der tabellarischen Wiedergabe der erhaltenen Resultate (l. c. p. 31—37) beschränke ich mich hier auf die graphische Darstellung der daraus nach § 4 berechneten Mittelwerthe der Magnetisirung. Es sind in Fig. 1 (Vgl. nächste Seite) für sämtliche untersuchten Ringe die „aufsteigenden Commutirungscurven“ aufgezeichnet, und zwar der Raumersparniss halber nur bis zum Magnetisirungswerthe 350 C.G.S.-Einheiten.

Die Betrachtung der Magnetisirungscurven lehrt nun folgendes: die Curve des massiven Vollringes V_1 — welche wie gesagt der Controle halber vorher ermittelt war — liegt um einen sehr merklichen Betrag unter derjenigen, welche

nach dem Durchschneiden gefunden wurde und mit V_2 bezeichnet ist. Offenbar hat dieses Ergebniss mit irgend einer dauernden, rein magnetischen Schirmwirkung nichts zu thun, sondern ist durch die vorübergehende Schirmwirkung von Wirbelströmen zu erklären, welche bei der immerhin nicht allzu langen Periode (17'') des ballistischen Galvanometers noch in Betracht kommt. Eine umfassende Theorie der in

Fig. 1.

Frage stehenden Erscheinung liegt bisher kaum vor, trotz der gelegentlich gemachten Ansätze¹⁾; sie wird bekanntlich durch das Product $4\pi\gamma\mu$ bestimmt, wo γ den electrischen Leitungscoefficient, μ die Permeabilität bezeichnet. Bei cylindrischen oder toroidalen massiven Eisenkernen von kreis-

1) Man vgl. Sir W. Thomson, math. and phys. papers 3. Art. 98. 101. 102. London 1890; J. J. Thomson, Phil. Mag. (5) 32. p. 458. 1891 und The Electrician 28. p. 599. 1892; Ewing, l. c. 28. p. 631. 1892.

rundem Querschnitte führt das Problem auf Bessel'sche Functionen. Im vorliegenden Falle kommt es wesentlich auf die Frist an, welche verläuft bis der Inductionsfluss einen gewissen, der Einheit genügend nahen Bruchtheil seines Endwerthes erreicht hat; man dürfte der Natur der Sache nach in der Annahme nicht fehl gehen, dass diese Frist in erster Annäherung durch den Querschnitt, also durch das Quadrat des Durchmessers bestimmt wird.

Bei dem massiven Vollring V_1 von über 3 cm Dicke daher ist eine erhebliche Störung durch Wirbelströme von vornherein zu erwarten; bei V_2 dürfte aber der mit Petroleum durchtränkte Schnitt den Wirbelströmen gegenüber fast vollkommen isoliren, sodass diese dann etwa in die punktirten Bahnen gedrängt (Fig. 2) werden; nach den vorher ausgeführten wird ihr Einfluss daher schon durch den einen Schnitt sehr ver-

Fig. 2.

Fig. 3.

ringert; damit ist die Divergenz der Curven V_1 und V_2 genügend erklärt. Die *viel geringeren* Unterschiede zwischen V_2 und H_1 , H_2 und H_3 , welche in dem kleinen Maassstabe kaum darstellbar sind¹⁾,

1) Die bei schwachen magnetisirenden Feldern auftretenden Ungleichheiten in der Magnetisirung der einzelnen Ringe V_2 , H_1 , H_2 , H_3 können, da diese nacheinander aus ein und derselben Eisenmasse hergestellt, und weder beim Ausdrehen der Hohlkehlen eine ungleichmässige Structur des Eisens oder in dieses eingebettete Hohlräume gefunden wurden, noch die bei den einzelnen Ringen ermittelten specifischen Gewichte irgend welche nennenswerthen Abweichungen aufweisen, kaum auf das bei den Versuchen benutzte Eisenmaterial zurückgeführt werden. Ebenso wenig kann infolge der im Anfange dieses Paragraphen erwähnten Behandlung des Eisens vor Beginn der magnetischen Messungen eine ungleichartige magnetische Beschaffenheit der einzelnen Eisenringe bei der Ermittlung dieser Versuchsergebnisse mitgewirkt haben.

lassen sich ebenfalls in ungezwungener Weise auf die immer noch vorhandenen schwächeren Wirbelströme zurückführen (vgl. Fig. 3). Hier müsste aber nun eine etwa vorhandene rein magnetische Schirmwirkung der Eisenrinde sich bemerkbar machen, was aber offenbar nicht oder doch nur in sehr geringem Maasse der Fall ist.

Vergleichen wir schliesslich noch die Curven H_3 und v ; letztere liegt bedeutend unter ersterer; das Material der beiden; aus verschiedenen Platten gedrehten Ringe verhält sich offenbar verschieden. Es ist nun unter Berücksichtigung der verschiedenen Querschnitte von H_3 und v (Tab. 1) eine mittlere Magnetisirungscurve für beide berechnet worden, welche punktirt aufgetragen ist; die unmittelbar daneben verlaufende ausgezogene Curve (v , H_3) wurde experimentell gefunden, für den Fall das v in H_3 eingelegt war; die Abweichung zwischen beiden beträgt kaum 1 Proc. Bei den auf Fig. 1 nicht dargestellten weiteren Curvenstrecken, für welche $\mathfrak{J} > 350$ C.G.S. ist, werden die Differenzen in allen Fällen procentisch noch geringer. In der That muss bei der alsdann eintretenden Verringerung der Permeabilität auch das Proeuct $4 \pi \mathfrak{J} \mu$ abnehmen, welches nach dem Vorigen die Schirmwirkung der Wirbelströme bestimmt. Unter Berücksichtigung der bei ballistischen Messungen überhaupt zu erwartenden Genauigkeit scheint namentlich die Betrachtung des zuletzt erwähnten Curvenpaares (v , H_3) unabweislich zu der Schlussfolgerung zu nöthigen:

Eine dauernde Schirmwirkung der äusseren Eisenrinde im Sinne v. Feilitzsch's und Grotrian's lässt sich bei Ringen nicht nachweisen. Die Kirchhoff'sche Theorie der Magnetisirung eines Rotationskörpers weist in dieser Beziehung keine Lücke auf.

(Eingegangen 29. December 1897.)