

Einleitung.

Im folgenden teile ich die Art der Ausführung, sowie die Resultate einer Reihe von Versuchen mit, die ich im Elektrotechnischen Institut der Technischen Hochschule zu Darmstadt über die Abhängigkeit der magnetischen Hysteresis, der Magnetisierbarkeit und des elektrischen Leitungsvermögens des Eisens und Nickels von der Temperatur angestellt habe.

Über den ersten Teil meiner Arbeit, die Abhängigkeit der Hysteresis von der Temperatur, liegen noch gar keine Angaben vor. Der zweite und dritte Teil sind bereits Gegenstand der Untersuchung einiger Beobachter gewesen; doch schien mir eine Wiederholung der einschlägigen Versuche mit den von mir benutzten Materialien nach teilweise anderer Methode, sowohl als Ergänzung der Hysteresisversuche, wie auch im allgemeinen, wünschenswert. Die Untersuchungen erstreckten sich auf vier Eisen-, zwei Stahlsorten und eine Nickelart in Drahtform und wurden derart ausgeführt, daß die Versuchsdrähte für den ersten und zweiten Teil der Arbeit innerhalb einer Magnetisierungsspule erwärmt wurden. Ihre Temperatur wurde mit Thermoelementen, die magnetischen Eigenschaften nach der magnetometrischen Methode ermittelt und die Resultate in Tabellen sowie graphisch dargestellt.

Wie üblich, bedeutet dabei

H die Feldstärke im Mittelpunkt der Magnetisierungsspule, d. h. die Kraftlinienzahl auf 1 qcm Querschnitt;

J die Intensität der Magnetisierung;

$B = 4\pi J + H$ die »totale« Induktion, d. h. die Gesamtzahl der Kraftlinien auf 1 qcm Querschnitt des Eisens und Solenoides;

$\mathfrak{B} = B - H = 4\pi J$ die »metallische« Induktion;

μ die Permeabilität;

\mathfrak{C} die Hysteresis.

Für den dritten Teil wurden die Drähte teils indirekt, teils direkt durch Strom erwärmt und aus Stromstärke und Spannungsdifferenz an zwei Stellen des Untersuchungsdrahtes die Widerstände für die jeweiligen Temperaturen ermittelt.

I. Über die Abhängigkeit der magnetischen Hysteresis von der Temperatur.

A. Historisches.

WARBURG hat 1881 zuerst in seinen magnetischen Untersuchungen¹⁾ gezeigt, daß, wenn ein Eisendraht einer von 0 bis zu einem Maximum stetig wachsenden, dann wieder bis zu 0 abnehmenden magnetisierenden Kraft K unterworfen wird, das magnetische Moment m für dieselbe magnetisierende Kraft K größer ist beim Abnehmen als beim Wachsen von K . Er hat zugleich nachgewiesen, daß die Kurve, die man erhält, wenn man bei einem solchen Kreisprozeß, nach einigen Wiederholungen desselben, das magnetische Moment als Funktion der

¹⁾ WIED. Ann., XIII, 1881, p. 141, s. übrigens auch FROMME, ebendas. p. 318.

magnetisierenden Kraft graphisch darstellt, eine Fläche umschließt, welche die pro Kreisprozeß von der magnetisierenden Kraft am Draht geleistete Arbeit A in absolutem Maße repräsentiert; also $A = -\int mdK$.

Dabei ist als Maßeinheit ein Rechteck zu nehmen, dessen Seiten die Einheit der magnetisierenden Kraft und die Einheit des Moments sind.

Als Aequivalent für die verbrauchte Arbeit muß Wärme auftreten, und zwar ist der einem Kreisprozeß entsprechende Wärmewert, bezogen auf Wasser, in Centigraden

$$w = \frac{A}{g \cdot 10^6 \cdot 425} \text{ im mm-, mg-, sek-System.}$$

Eingehende Untersuchungen über die von WARBURG gefundene Thatsache hat dann EWING¹⁾ bei seinen außerordentlich zahlreichen Experimenten über das magnetische Verhalten von Eisen und verwandten Metallen angestellt. Er zeigt ebenfalls, daß die Aenderungen des Magnetismus bei Kreisprozessen hinter den Aenderungen der magnetisierenden Kraft zurückbleiben, und schlägt daher den jetzt allgemein angenommenen Namen Hysteresis für diese Erscheinung vor.

Unabhängig von WARBURG hat EWING²⁾ wie jener gefunden, daß die Aenderungen der Magnetisierung in allen paramagnetischen Metallen mit einem Energieaufwande verbunden sind und daß derselbe pro cem Metall bei einem magnetischen Kreisprozeß dargestellt wird durch den Inhalt einer geschlossenen Kurve, die man erhält, wenn man die magnetisierenden Kräfte als Abscissen, die entsprechenden Induktionen als Ordinaten aufträgt.

Diese Energie wird in Wärme umgesetzt, wie die Erwärmung in den Eisenkernen von Transformatoren und in den Ankern von Dynamomaschinen beweist; die Erwärmung durch Foucaultströme in nicht genügend zerteiltem Eisen hat damit nichts zu thun.

Die durch einen magnetischen Kreisprozeß erzeugte Temperatursteigerung ist

$$w = \frac{\int HdJ}{42000000 \cdot 7,7 \cdot 0,11} = 2,81 \cdot 10^{-8} \int HdJ \text{ } ^\circ\text{C},$$

wo 42000000 Erg = 1 Wasser-Gramm-Kalorie, 7,7 das spezifische Gewicht, 0,11 die spezifische Wärme des Eisens ist.

EWING hat auch den Einfluß von Erschütterungen studiert und gefunden, daß bei weichem Eisendraht die Wirkung der Hysteresis fast vollständig verschwindet, wenn das untersuchte Stück während der cyklischen Aenderungen der magnetisierenden Kraft heftig erschüttert wird.

J. HOPKINSON³⁾ hat sich ebenfalls eingehend mit der Untersuchung der magnetischen Eigenschaften paramagnetischer Metalle und den Erscheinungen der Hysteresis befaßt. Er führt eine bestimmte Definition für den Begriff Koërcitivkraft ein (es ist die Größe der umgekehrten magnetisierenden Kraft, welche gerade genügt, den Magnetismus auf 0 zu bringen) und stellt einen Zusammenhang zwischen der Hysteresisfläche und dieser Koërcitivkraft derart fest, daß die Hysteresisfläche nur wenig vom Werte

$$4 \times \text{Koërcitivkraft} \times \text{maximale Induktion}$$

verschieden ist, so daß man diesen angenäherten Wert für praktische Zwecke für den Energieverlust setzen kann.

Gestützt auf die Arbeiten EWINGS hat neuerdings STEINMETZ⁴⁾ in seinen »Bemerkungen über die Hysteresis« ein überraschendes Resultat abgeleitet und durch viele Versuche für eine große Anzahl von Eisen-, Stahl- und Nickelsorten bestätigt gefunden.

¹⁾ EWING, Magn. Induktion in Fe und verwandten Met., 1892, dtsh. von HOLBORN und LINDECK. — EWING, Magnetism in iron and other metals. Electrician XXIV, p. 161 ff., 1890.

²⁾ Proc. Roy. Soc. Nr. 220, p. 39, May 1882; Phil. Trans. p. 549, 1885.

³⁾ Phil. Trans. Roy. Soc., Th. II, p. 455, 1885. — Centralbl. f. Elektrotechnik, X, p. 780, 1888.

⁴⁾ Electrot. Zeitschr., 6. Heft, p. 62, 1891.

Die Tabelle V, pag. 105 in EWINGS bereits angeführtem Werk zeigt, daß die Hysteresis nur von der Induktion, nicht von der magnetisierenden Kraft abhängt. Die Hysteresis nimmt rascher zu als die Induktion, aber langsamer als das Quadrat der Induktion.

(Schon WARBURG bemerkt, daß die Magnetisierungsarbeit nicht dem Quadrat des erregten Moments proportional ist.)

STEINMETZ findet nun, daß der Verlust durch Hysteresis proportional ist der 1,6ten Potenz der maximalen Induktion:

$$\xi = \eta \cdot \mathfrak{B}^{1,6} \text{ Erg pro Cyklus und ccm;}$$

η ist eine Materialkonstante.

Im Aufsatz »Das Gesetz der magnetischen Hysteresis und verwandte Phänomene des magnetischen Kreislaufs«¹⁾ weist STEINMETZ nach, daß der Energieverlust durch Hysteresis nur von der Differenz der Grenzwerte der magnetischen Induktion abhängig ist, nicht aber von deren absoluten Werten, so daß die Hysteresis dieselbe bleibt, solange die Amplitude des magnetischen Kreisprozesses dieselbe ist.

Er stellt deshalb für sein Gesetz die allgemeinere Form auf:

$$\xi = \eta \left(\frac{\mathfrak{B}_1 - \mathfrak{B}_2}{2} \right)^{1,6}, \text{ wo } \mathfrak{B}_1 \text{ und } \mathfrak{B}_2 \text{ die Grenzwerte der magnetischen Induktion sind.}$$

In den Schlußfolgerungen bemerkt STEINMETZ²⁾, daß die durch molekulare Reibung im Eisen verzehrte Energie nur dann durch die Fläche der schleifenförmigen Kurve der Hysteresis repräsentiert wird, wenn während der ganzen magnetischen Variation weder Arbeit von irgend einer anderen Energiequelle auf den magnetischen Kreislauf ausgeübt, noch vom oder im magnetischen Kreislauf Arbeit geleistet worden ist.

Er weist nach, daß beim Verschwinden von Hysteresis infolge von Erschütterungen des magnetisierten Körpers die von der molekularen Reibung verzehrte Energie nicht allein von der magnetisierenden Kraft, sondern auch von der Energie der Erschütterungen geliefert worden ist.

B. Beobachtungsmethoden und Apparate.

1. Die Temperaturmessung.

Zur Ermittlung der Temperatur der untersuchten Eisendrähte wurden Thermolemente benutzt. Nach LE CHATELIER³⁾ gestattet das Element aus reinem Platin und Platin mit 10% Rhodium, Temperaturen von 300 bis 1200° C mit einer Annäherung von ungefähr 10° zu messen; dieselbe Annäherung gestattet ein Platin-Platiniridiumelement. Ich entschied mich für Elemente aus Pt-PtRh, zu welchen die Drähte von W. C. HERZUS in Hanau bezogen wurden. Die zu erwärmende Verbindungsstelle beider Drähte wurde durch festes Umeinanderdrillen derselben auf ca. 1,5 cm Länge gebildet und auf die weiter unten beschriebene Art an die Versuchsdrähte gebracht. Es wurden durchweg zwei solcher Elemente verwendet, deren freie Enden wohl isoliert an einen Quecksilberkommutator geführt wurden, vermittelst dessen jedes Element sofort mit einem DEPPEZ-D'ARSONVAL-Galvanometer von etwa 200 Ohm Widerstand in Verbindung gebracht werden konnte. Das DEPPEZ-D'ARSONVAL'sche Spiegelgalvanometer ist ganz besonders für die pyrometrischen Zwecke geeignet wegen seiner Unabhängigkeit vom äußeren magnetischen Feld, seiner großen Empfindlichkeit und seiner starken Dämpfung. — Die Temperatur der äußeren Verbindungsstellen am Kommutator und am Galvanometer war immer nahezu dieselbe — ca. 20° C —, nämlich die des von den Temperaturänderungen im Freien ziemlich unabhängigen Souterrainraumes, in welchem die Versuche angestellt wurden.

¹⁾ Elektrot. Zeitschr., 1892, Heft 39, p. 519.

²⁾ Elektrot. Zeitschr., 1892, Heft 45, p. 599.

³⁾ La Lumière El., XXIV, p. 71, 1887. — BARUS, Messung hoher Temp., 1892, Leipzig, J. A. BARTH.

Die Aichung der Thermolemente bis 300° wurde mit einem genauen Quecksilberthermometer vorgenommen, welches mit einem Thermolemente zusammen in Leinöl getaucht war. Das Öl wurde in hohen und weiten, mit Asbestpapier unwickelten Bechergläsern erwärmt, durch Rühren stets auf gleichmäßiger Temperatur erhalten und die bestimmten Temperaturen zwischen 40 und 300° C entsprechenden Galvanometeraussschläge notiert.

Von 300° C aufwärts geschah die Aichung durch Benutzung bekannter Schmelztemperaturen verschiedener Substanzen, die als chemisch rein vom Hause MERCK dahier bezogen worden waren. Die Schmelzung wurde in einem Platintiegel mit Hilfe eines HEMPEL'schen Gasofens vorgenommen; die zusammengedrillten Enden der Thermolemente wurden in die geschmolzene Masse gebracht, die Flamme des Brenners etwas verkleinert und im Moment des beginnenden Erstarrens der Masse die Galvanometerablesung ausgeführt. Jedes Element wurde einzeln geaicht; dabei befanden sich die äußeren Verbindungsstellen der Elemente mit den Zuleitungsdrähten zum DEPREZ-D'ARSONVAL-Galvanometer zur Vermeidung von Temperaturänderungen in einem Petroleumbad von konstant 20° C.

Die Schmelzpunkte, meist von CARNELLEY bestimmt, sind dem Tabellenwerk von BÖRNSTEIN-LANDOLT¹⁾ entnommen.

In nachstehender Tabelle folgen die Namen der benutzten Stoffe, ihre Temperaturen bzw. Schmelzpunkte, sowie die entsprechenden Galvanometeraussschläge, die für die drei zum Gebrauche vorbereiteten Elemente fast gleich waren; die größte Abweichung betrug weniger als 1% . Die Ruhelage gab das Galvanometer an bei gleicher Temperatur der inneren und äußeren Verbindungsstellen des Elements; der Skalenabstand vom Instrument betrug 3 m.

Tabelle I.

Erwärmte bzw. geschmolzene Substanzen.	Temperatur bzw. Schmelzp. in $^{\circ}$ C.	Galv.-Ablenkung in mm.
Leinöl	40	16,0
»	73	27,2
»	104	38,0
»	140	50,8
»	200	77,6
»	300	125,4
$KClO_3$	359	155,6
$PbCl$	498	244,4
JK	634	330,2
KCl	734	393,6
$NaCl$	772	417,8
Na_2SO_4	861	474,2.

Die Ergebnisse sind auf Millimeterpapier graphisch dargestellt worden und zwar die Temperaturen als Abscissen, die den thermoelektrischen Kräften proportionalen Ablenkungen des Galvanometers als Ordinaten. Die durch Verbindung der Ordinatenendpunkte entstehende Temperaturkurve kann wie bei LE CHATELIER und BARUS von 350° aufwärts durch eine Gerade ersetzt werden. Aus dieser Kurve konnten die den gegebenen Ausschlägen entsprechenden Temperaturen direkt entnommen werden. Kontrollaichungen wurden von Zeit zu Zeit ausgeführt und ergaben keine Aenderung; unter denselben Bedingungen wurden immer dieselben elektromotorischen Kräfte konstatiert.

Von allen Pyrometern sind die Thermolemente wohl für den praktischen Gebrauch am passendsten. Sie wurden zuerst zu Temperaturmessungen von BECQUEREL und von POUILLET²⁾

¹⁾ BÖRNSTEIN-LANDOLT, Phys.-chem. Tab.

²⁾ DINGLERS Journ., LXIII, p. 221, 1837.

1836 und dann von RÉGNAULT¹⁾ angewandt. Doch waren die Resultate ungünstige und die Methode galt als nicht genau. Diese Ergebnisse sind jedoch nur den für die Elemente gewählten Metallen zuzuschreiben; die ersten Beobachter wandten fast durchweg Eisen oder Palladium an, welche beide für die gedachten Zwecke wohl am wenigsten geeignet sein dürften. Viel später erst hat BECQUEREL²⁾ Platinverbindungen und SCHINZ³⁾ für die Messung thermoelektrischer Kräfte Torsionsgalvanometer benutzt. TAIT⁴⁾ hat dann Platin-Platiniridiumelemente hergestellt und endlich LE CHATELIER⁵⁾ im Pt-PtRh-Element dasjenige gefunden, das in Bezug auf Homogenität alle anderen Thermolemente übertrifft; er hat auch sein Element mit dem DEPREZ-D'ARSONVAL'schen Galvanometer verbunden. Eine genaue Besprechung widmet BRAUN⁶⁾ den Thermolementen.

Die besonderen Vorzüge der Thermolemente sind: außerordentlich geringe Dimensionen, weite Grenzen, innerhalb deren Temperaturmessungen vorgenommen werden können, leichte Eichung und Kontroll Eichung, fast augenblickliches Einstellen des Galvanometers. Der einzige Mangel, den übrigens alle Pyrometer teilen, ist die Unsicherheit in Bezug auf die Lage der angewandten Fixpunkte.

2. Die Methode der Erwärmung.

Die zu untersuchenden Drähte konnten nach einer auch von LEDEBOER⁷⁾ angewandten Methode dadurch auf höhere Temperatur gebracht werden, daß man sie mit einer von ihnen wohlisolierten Platinspule bifilar umwickelte, die durch Strom erwärmt wurde.

LEDEBOER benutzte bei seinen Versuchen über den Einfluß der Temperatur auf die Magnetisierung des Eisens dickere Eisenstäbe, die er leicht mit dünnen, isolierenden Glimmerplättchen umgeben und auf welche er dann die Erwärmungsspule wickeln konnte.

Bei den von mir gewählten dünnen Eisendrähnen war dieses brüchige Isoliermaterial nicht anwendbar. Nach vielen vergeblichen Versuchen und Proben mit den verschiedensten Stoffen, die wiederholt sehr hohe Temperaturen aushalten sollten, wurde Porzellanrohr als das geeignetste Mittel zur Isolation der Eisendrähne von der Platinspule befunden. Einen Längsschnitt durch die Magnetisierungsspule und die in ihr enthaltene, nachstehend beschriebene Erwärmungsvorrichtung für die zu untersuchenden Drähte zeigt Fig. 1 (folg. Seite).

Die Eisendrähne (*d*) wurden in ein aus 5 Teilen zusammengesetztes, 50 cm langes Porzellanrohr (*r*) von 1 mm Wandstärke und gut 1 mm innerem Durchmesser gebracht. Auf dieses war die Platinspule (*p*) aus 0,8 mm dickem, 5 m langem Platindraht bifilar gewickelt. Das Porzellanrohr mußte aus mehreren Stücken bestehen, um die Thermolemente einführen zu können. Zu diesem Zweck wurden bei einem am Ende des Rohres liegenden und einem mittleren Rohrstück die cylindrischen Höhlungen nach einer Seite hin auf die Länge der Drillung eines Thermolementes (ca. 1,5 cm) erweitert, was bei der außerordentlichen Härte des Porzellans mit mancherlei Schwierigkeiten verbunden war. An diese Stelle kam ein kleiner Hohlzylinder aus Glimmer (*h*), der sich an die innere Wandung des Rohres anlegte und durch dessen Inneres der zu erwärmende Eisendraht (*d*) ging, während der gedrillte Teil (*t*) des Thermolementes zwischen dem Glimmercylinder und der Rohrwand in der Ausbuchtung lag. Die beiden Elementdrähne eines Elementes wurden zwischen zwei aufeinander sitzenden Porzellanröhrchen und zwischen zwei aufeinanderfolgenden Windungen der Platinspule gut isoliert nach außen geführt. Nach jeder Versuchsreihe wurde die Isolation zwischen Thermolement und Platinspule geprüft.

¹⁾ Rel. des Exp., I, p. 246, 1845.

²⁾ Ann. ch. et. phys., LXVIII, p. 49, 1863.

³⁾ DINGLERS Journ., CLXXV, p. 87, 1865 und CLXXIX, p. 436, 1866.

⁴⁾ Trans. Roy. Soc. Edinb., XXVII, p. 125, 1872—1873.

⁵⁾ La Lum. El., XXIV, p. 71, 1887.

⁶⁾ Phil. Mag., XIX, p. 495, 1885.

⁷⁾ La Lum. El., XXVII, p. 61, 1888.

Die Platinspule war nun mit mehreren Lagen Asbestpapier (*a*) sehr sorgfältig umhüllt; zwischen zwei Lagen war der eine, zwischen zwei andern der zweite Draht des Thermoelements nach den Enden des Porzellanrohres, von da durch gut schließende Korke (*k*) aus dem gleich zu erwähnenden weiten Glasrohr (*g*) nach außen zum Kommutator geführt. Das asbestbewickelte

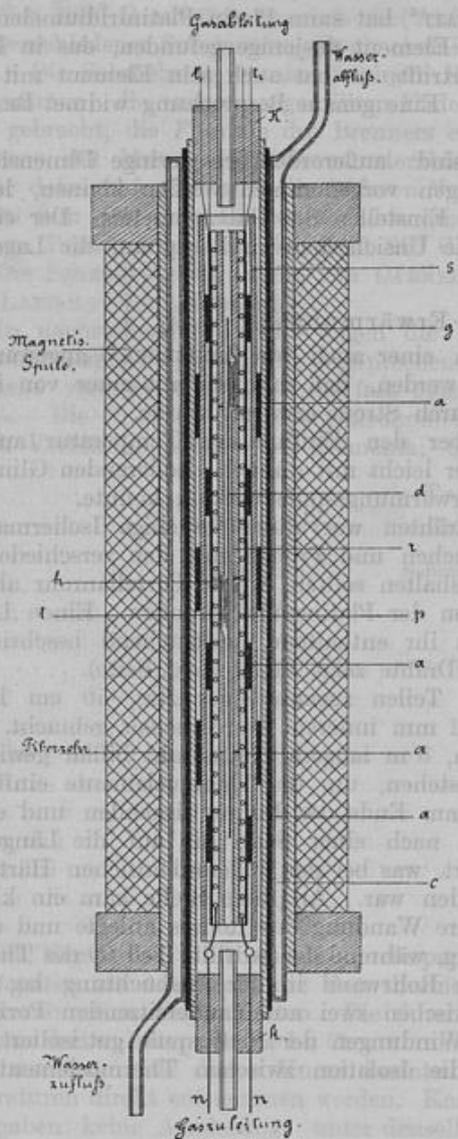


Fig. 1.

Rohr wurde in ein etwas weiteres Rohr von schwer schmelzbarem Glase (*s*) geschoben und in demselben genau central durch Asbestpackungen (*a*) befestigt. Dieses Rohr befand sich wiederum in einem weiteren Glasrohr (*g*) und wurde in gleichen Abständen von der Innenwandung durch Asbestringe (*a*) gehalten. Die Platindrähten waren im äußeren Glasrohr durch Klemmen mit dicken Neusilberdrähten (*n*) verbunden, die durch die Korke (*k*) nach außen führten und in den Erwärmungsstromkreis leicht eingeschaltet werden konnten.

Das Erhitzen der Drähte fand stets in einer Wasserstoffatmosphäre statt, um die schädlichen Einflüsse der Oxydation auszuschließen. Der Wasserstoff wurde in einem KIPP'schen Apparat entwickelt, durch Chlorcalciumröhren geleitet, und das Durchströmen durch die Glasröhren so reguliert, daß eine Füllung während der ganzen Versuchsdauer, also ca. 4—5 Stunden, ausreichte; nach dem Austritt aus der Versuchsröhre wurde der Wasserstoff verbrannt. Die Eisendrähte waren nach einer Versuchsreihe vollständig blank wie vorher und von außerordentlicher Weichheit.

Es war erst versucht worden, das Glühen in einer Leuchtgasatmosphäre stattfinden zu lassen; allein es hatte sich herausgestellt, daß eine Zersetzung des Gases und vollständige Karbonisierung der glühenden Metall- und Asbestteile eintrat, wodurch Kurzschlüsse zwischen den aufeinanderfolgenden Windungen der Platinspule sowie den Thermoelementen hervorgerufen werden konnten und außerdem zu befürchten war, daß das glühende Eisen Kohlenstoff gebunden hätte. — Zum Schutze der Magnetisierungsspule gegen die Einflüsse der hohen Temperaturen war ein Rohr aus eisenfreiem Kupfer mit doppelten Wandungen (*c*) angefertigt und in das Innere des Hohlraumes der Magnetisierungsspule gesteckt worden. Das doppelwandige Rohr wurde während der Versuche von kaltem Wasser durchflossen. Das äußere vorhin erwähnte Glasrohr mußte, um ein Zerspringen zu verhindern, nochmals durch eine Lage von Asbestpapier von diesem Kühlrohr getrennt sein.

Zur Erwärmung diente teils eine große Akkumulatorenbatterie von 60 und eine kleine von 14 Elementen in geeigneter Schaltung, teils der Strom einer SIEMENS'schen Wechselstrom-

maschine, der mittelst eines Ganz'schen Transformators auf niedere Spannung und hohe Stromstärke gebracht wurde. Die Regulierung des Erwärmungsstromes geschah mit 3 bis 4 hintereinandergeschalteten Kurbelrheostaten, die Messung der Stromstärke mit einem Elektrodynamometer. Der Strom wurde zum Platindraht mit dicken, umeinandergeflochtenen Kupferkabeln geführt; mit ca. 25 amp konnte die Platinspirale zur blendenden Weißglut gebracht werden. Die dünnen Kupferdrähte, mit denen die dicke Asbestpapierwicklung um den Platindraht festgehalten wurde, waren nach den Erwärmungen auf die höchsten angewandten Temperaturen oft zu kleinen Kugeln zusammengeschmolzen, die beim Abwickeln des Asbestpapiers herausfielen.

Um zu prüfen, ob die Erwärmung sich nicht auch auf die Magnetisierungsspule erstreckte und deren Widerstand und damit den Magnetisierungsstrom beeinflusste, wurde die Platinspule bei geschlossenem Magnetisierungsstrom, ohne daß sich ein Eisendraht in ihr befand, auf die höchste Glut gebracht; der elektrische Zustand blieb ungestört. Ebenso wurde konstatiert, daß die Platinspule selbst kein magnetisches Feld erzeugte.

Um nicht bei jeder neuen Versuchsreihe das mühsame Auseinandernehmen bezw. Zusammensetzen der soeben beschriebenen Vorrichtung erforderlich zu machen, war diese so beschaffen, daß nach dem Herausziehen des äußeren Glasrohres nebst Inhalt aus dem doppelwandigen Kupferrohr und nach Abnehmen der Wasserstoffzu- und -abführungsschläuche die Versuchseisendrähte von außen unmittelbar in das Porzellanrohr eingeführt bezw. aus ihm entfernt werden konnten. Die beiden angewandten Thermolemente stimmten immer in ihrem Gange überein, womit nachgewiesen ist, daß die Temperatur des Eisendrahtes eine durchaus gleichmäßige war. Selbstverständlich mußte nach Verstärkung des Erwärmungsstromes immer einige Zeit, etwa 5 Min., gewartet werden, bis Gleichgewicht zwischen Stromzufuhr und Wärmeabgabe eingetreten war und die Thermolemente konstante Temperatur anzeigten.

Vergleich mit andern Erwärmungsmethoden.

Die ersten Beobachter, die das magnetische Verhalten des Eisens bei verschiedenen Temperaturen genauer untersuchten, waren nicht zu hohen Wärmegraden gelangt. Erst C. BAUR¹⁾ erhitze dicke Eisenstäbe in einem Ofen bis zur Weißglut, brachte sie dann rasch in eine Magnetisierungsspule und beobachtete während des Abkühlens; abgesehen davon, daß durch das lange Glühen in atmosphärischer Luft die Stäbe infolge der Oxydation immer dünner wurden, ist eine gleichmäßige Temperatur durch den ganzen Stab hindurch und damit eine Messung derselben hierbei ausgeschlossen.

HOPKINSON²⁾ und ROWLAND³⁾ experimentierten mit Eisenringen, die mit einer primären und sekundären Spule bewickelt waren, von denen erstere zur Magnetisierung, die andere zur Temperaturmessung durch Widerstandsänderungen diente. Die Erwärmung geschah innerhalb einer eisernen Kapsel in einem Gasofen und konnte durch Regulierung der Gaszufuhr variiert werden. Der Widerstand der sekundären Spirale war nach dem Erhitzen etwas erhöht, was einer Oxydation des Kupferdrahtes besonders an jener Stelle, wo derselbe die eiserne Erwärmungskapsel verläßt, zuzuschreiben ist; dadurch werden die Temperaturmessungen etwas unsicher.

Die von LEDEBOER meines Wissens zuerst angewandte Erwärmung mit Strom ist außerordentlich sicher und bequem; die Temperatur kann beliebig erhöht, erniedrigt oder konstant gehalten werden, und ihre Messung ist durch Verwendung der Thermolemente die denkbar einfachste.

3. Gestalt der untersuchten Metalle.

Bekanntlich verändert ein Körper, der durch die Wirkung eines Feldes magnetisch wird, mehr oder weniger dieses Feld, so daß die Feldstärke in irgend einem Punkte des Feldes ver-

¹⁾ WIED. ANN., XI, p. 394, 1880.

²⁾ Phil. Trans. Roy. Soc. London, Vol. 180, p. 443, 1889.

³⁾ Phil. Mag., Nov. 1874.

schieden ist von dem Werte, den sie hatte, ehe der Körper in das Feld gebracht worden war. Die Ursache dieser Aenderung, durch welche die Magnetisierung des Körpers auch in einem vorher gleichförmigen Feld eine ungleichförmige wird, ist der besonders an den Enden des Körpers auftretende freie Magnetismus.

Man müßte daher, um den Einfluß der Enden auszuschließen, das zu untersuchende Material endlos machen, ihm also die Form von Ringen verleihen.

Doch gibt es noch eine andere Form, bei welcher von dem störenden Einfluß der Enden abgesehen werden kann, nämlich die langer Ellipsoide, wie dies MAXWELL¹⁾ nachgewiesen hat.

Wird ein langgestrecktes Rotationsellipsoid mit seiner Längsachse parallel zu den Kraftlinien in ein homogenes Feld gebracht, dann entsteht in ihm eine gleichförmige Magnetisierung; doch ist die magnetisierende Kraft im Innern und in der Nähe, je nach dem Achsenverhältnis des Ellipsoides, mehr oder weniger verschieden von dem Werte, den sie vorher an dieser Stelle hatte.

Ist H_1 der ursprüngliche Wert der magnetisierenden Kraft, H die infolge des Einflusses des Ellipsoides wirklich vorhandene, dann ist

$$H = H_1 - NJ^2,$$

wo N ein vom Achsenverhältnis $\frac{c}{a}$ abhängiger Wert ist. Da die Herstellung solch langgestreckter

Ellipsoide mit großen Schwierigkeiten verbunden ist, können dieselben durch im Verhältnis zu ihrem Durchmesser sehr lange Drähte ersetzt werden. Man erhält auf diese Weise in einem homogenen Feld gleichförmige Magnetisierung der Drähte und kann durch geeignete Wahl des Durchmessers und der Länge derselben den störenden Einfluß auf das Feld derart verringern, daß er außer Acht bleiben kann.

Die von mir benutzten Drähte hatten bei 0,1 cm Durchmesser 40 cm Länge; das Verhältnis beider Dimensionen ist sonach 1:400. Für dieses Achsenverhältnis beträgt der Wert N nach EWING 0,00045, und demnach ist

$$H = H_1 - 0,00045 J.$$

Der höchste bei meinen Versuchen für J erhaltene Wert betrug ca. 1200; dieser Intensität der Magnetisierung, welche durch eine Feldstärke $H_1 = 76$ erzeugt worden war, würde sonach eine entmagnetisierende Kraft von 0,5 entsprechen, welche ohne Fehler vernachlässigt werden kann. In den meisten Fällen betrug die entmagnetisierende Kraft höchstens 0,1% der Feldstärke.

4. Beobachtungsmethode für die magnetischen Eigenschaften.

Zur Untersuchung der magnetischen Eigenschaften magnetischer Metalle sind hauptsächlich zwei Methoden in Gebrauch, die ballistische und die magnetometrische. Bei der ersteren ist das Metall mit einer Induktionsspule umwunden, und Aenderungen seines Magnetismus werden durch Messung der hierdurch entstehenden Induktionsströme ermittelt. Die ballistische Methode hat den Vorzug, für jede Form der zu untersuchenden Metalle anwendbar zu sein. Bei der magnetometrischen Methode wird der Magnetismus der magnetisierten Körper durch die Ablenkungen bestimmt, welche sie am Magnet eines Magnetometers hervorbringen. Diese Methode ist nicht anwendbar für ringförmige Metallstücke, eignet sich dagegen wohl für Drähte, Stäbe und Ellipsoide.

Ich wählte wegen der besonderen Art der Erwärmung und der Temperaturbeobachtung die magnetometrische Methode und zwar die »Einpolmethode«³⁾, die für lange Drähte besonders zweckmäßig ist. Die Magnetisierungsspule wird senkrecht in die Ost-Westrichtung vom Magnetometer aufgestellt, der Eisendraht eingebracht und magnetisiert; sein oberer Pol soll in gleicher Höhe mit dem Magnet des Magnetometers liegen.

¹⁾ El. und Magn., Bd. II, § 437-38.

²⁾ Ewing, Magn. Ind., p. 32. 1892.

³⁾ Electrician, XXIV. Febr. 1890.

In einem solchen Draht ist die Lage der Pole für verschiedene Intensität der Magnetisierung etwas veränderlich und zwar rücken sie für stärkere Intensitäten gegeneinander; diese Annäherung wird teilweise wieder aufgehoben durch die infolge der Erwärmung stattfindende Ausdehnung des Drahtes. Gerade bei dieser Methode hat aber eine geringe Verschiebung des oberen Poles längs des Drahtes nur einen verschwindenden Einfluß auf die Ablenkung des Magnetometers, weil hierdurch die Entfernung zwischen Pol und Magnetometer kaum geändert wird; die geringe Bewegung des unteren Poles ist ganz ohne Einfluß; die ablenkende Kraft rührt hauptsächlich vom oberen Pole her.

Die richtige Lage des Drahtes wird durch Probieren gefunden, indem man ihn bei geschlossenem Magnetisierungsstrom solange verschiebt, bis die Magnetometerablenkung ein Maximum wird. Wegen seiner senkrechten Lage ist der Draht dem Einfluß der Vertikal-komponente des Erdmagnetismus unterworfen; wie die Wirkung derselben nötigenfalls kompensiert wird, ist weiter unten gezeigt.

Der Magnetisierungsstrom wurde von einer Akkumulatorenbatterie geliefert; je nach der größeren oder geringeren Permeabilität der Probestücke genügte ein Element, bzw. wurden zwei bis sechs Elemente hintereinandergeschaltet. Zunächst mußten einige Kreisprozesse zwischen den Grenzen der gewünschten positiven und negativen maximalen Induktion ausgeführt werden, bis ein stationärer Zustand erreicht war, in welchem sich für dieselbe magnetisierende Kraft immer dasselbe Moment ergibt, so daß beim graphischen Auftragen der Resultate die einzelnen Schleifen sich decken, denselben unmagnetischen Anfangszustand vorausgesetzt.

Dann begannen die eigentlichen Beobachtungen und zwar gleich beim Maximum der Induktion; es mußte gemessen werden: 1) die Stärke des Magnetisierungsstromes mit dem Torsionsgalvanometer, 2) der entsprechende Ausschlag am Magnetometer. Dann wurde die magnetisierende Kraft vermindert durch Einschalten von Rheostatenwiderstand, die neue Stromstärke und der entsprechende Magnetometerausgang bemerkt u. s. f., durch die Stromstärke Null hindurch zum negativen Maximum der Induktion und wieder zurück zum positiven Maximum derselben. Für jede Beobachtungsreihe von 5—6 Kreisprozessen wurden ca. 175 Beobachtungen an beiden Instrumenten gemacht, außerdem mußte die Stärke des Thermostromes am DEPPEZ-D'ARSONVAL-Galvanometer und die des Erwärmungsstromes am Dynamometer beobachtet und fortwährend die Wasserstoffentwicklung, sowie der Kühlwasserzu- und -abfluß (mit Thermometer am Ausfluß) kontrolliert werden.

Mit jedem Material wurden mindestens vier, mit einigen Sorten noch mehr Beobachtungsreihen (von je 5—6 Kreisprozessen) bei gleicher maximaler Induktion meist für Werte von $\mathfrak{B} = 3590$ (bei Stahl 3450) durchlaufen und zwar zuerst immer ein Kreisprozeß (A) bei Zimmertemperatur (20°), ein weiterer (B) bei 270—300° C, (C) bei 460—470° C, (D) bei 650—660° C, (E) bei 720—750° C, (F) bei 810—830° C, bis zum vollständigen Verschwinden des Magnetismus infolge der hohen Temperatur (vgl. II. Teil); dann nochmals ein Kreisprozeß (H) nach dem Abkühlen; später wurde noch in das große Temperaturintervall zwischen 460 und 650° ein solcher (C₁) bei 560° eingeschaltet. Bei den meisten Probestücken verliefen die Prozesse bei den höchsten Temperaturen (über 800°) unregelmäßig. Jede einzelne Reihe erforderte einen Zeitaufwand von 4 bis 5 Stunden.

Bei zwei Materialien wurden auch für höhere Induktionen Kreisprozesse bei den oben genannten Temperaturen durchlaufen und zwar bei Holzkohleneisendraht für

$$\mathfrak{B} = 7200; \mathfrak{B} = 12280 \text{ und } \mathfrak{B} = 14400;$$

bei Patentriegelgußstahldraht für

$$\mathfrak{B} = 7940; \mathfrak{B} = 12600 \text{ und } \mathfrak{B} = 15000.$$

Es konnten indessen die bei gewöhnlicher Temperatur erzeugten höhern Induktionen bei höheren Temperaturen nicht mehr erreicht werden, weil das Material dann schon bei niederen Induktionen nahezu gesättigt war.

Während bisher für jede Beobachtungsreihe ein neuer Draht eingeführt worden war, wurden nun noch immer dieselben Drähte der beiden letztgenannten Sorten wiederholt hinter-

einander vier Reihen von Kreisprozessen bei gleicher maximaler Induktion und den obenangeführten Temperaturen unterworfen.

Mit Nickel wurden für $\mathfrak{B} = 3590$ drei Reihen von Kreisprozessen bei vier verschiedenen Temperaturen beobachtet, nämlich bei 20° , 86° , 188° und 288° . Bei etwas höherer Temperatur zeigten sich Unregelmäßigkeiten.

Bei manchen Eisensorten verging nach einer Aenderung der magnetisierenden Kraft einige Zeit, bis der entsprechende volle Magnetismus sich eingestellt hatte, eine Erscheinung, die auch von EWING¹⁾ beobachtet und als »Kriechen« des Skalenbildes bezeichnet wurde. Eisen nimmt sonach, wie auch Lord RAYLEIGH²⁾ angibt, einen neuen magnetischen Zustand nicht immer momentan an.

5. Das Magnetometer.

Das benutzte Magnetometer war ein sehr empfindliches Spiegelmagnetometer mit kleinem, mit Luft- und Kupferdämpfung versehenem Magnet, der an einem sehr dünnen Coconfaden von nicht in Betracht kommender Torsionskraft aufgehängt war. Die Beobachtung geschah mit Fernrohr; der Skalenabstand vom Spiegel betrug 281,0 cm. Sehr störend war der Umstand, daß der Versuchsraum in der Nähe einer Fahrstraße lag. Während des Vorüberfahrens von Wagen konnte wegen der hierdurch hervorgerufenen Magnetometerschwankungen nicht beobachtet werden.

6. Das Galvanometer zur Messung des Magnetisierungsstromes.

Die Stärke des Magnetisierungsstromes wurde mit einem Torsionsgalvanometer von SIEMENS gemessen. Schwache Ströme gingen direkt durch das Galvanometer; für stärkere Ströme lag es im Nebenschluß zu $0,955, \frac{1}{9}$ oder $0,01 \Omega$. Diese Widerstände waren aus Konstantanblech gebildet, dessen Temperaturkoeffizient $= 0$ ist.

Das Instrument wurde wiederholt mit dem Silber- und Kupfervoltmeter, sowie durch Vergleichung mit dem Normalinstrument des Institutes geacht.

7. Die Magnetisierungsspule.

Der 3 mm dicke, doppelt baumwollumspinnene und gefirniste Kupferdraht des Solenoids ist auf ein Vulkanfibrerröhr gewunden. Die Länge der Spule betrug 60 cm, der innere Durchmesser des Rohres 4, der äußere Durchmesser der Spule 16 cm. Das Solenoid besteht aus 16 Drahtlagen (8 Gruppen von je 2 Lagen), welche folgende Daten haben:

Tabelle 2.

	Nr.	Windungszahl.	Gewicht in kg.	Länge in m.	Widerstand in Ω .
Abteil.	I	164 + 165	3,950	60,6	0,160
»	II	166 + 166	4,700	72,2	0,193
»	III	165 + 162	5,500	84,5	0,222
»	IV	161 + 163	6,450	99,0	0,252
»	V	164 + 164	7,200	110,5	0,286
»	VI	163 + 166	8,000	122,9	0,317
»	VII	164 + 164	9,000	141,0	0,334
»	VIII	161 + 164	10,050	153,0	0,363
	Zusammen	2622	54,850	843,7	2,127.

¹⁾ EWING, p. 56.

²⁾ Phil. Mag., März 1887.

Die einzelnen Windungen konnten nach Belieben miteinander verbunden werden; ich benutzte sie hintereinandergeschaltet; nur bei den Versuchen, bei denen die Wirkung des Erdmagnetismus auf die Probedrähte kompensiert werden mußte, wurden die Abteilungen I—VII hintereinander geschaltet, während VIII als Leitung für den Kompensationsstrom diente.

8. Kompensation der Wirkung des Solenoides auf das Magnetometer.

Das stromdurchflossene Solenoid selbst übt einen bedeutenden Einfluß auf das Magnetometer aus. Man kann diesen Einfluß beobachten und in geeigneter Weise berücksichtigen; bequemer ist es, die Wirkung des Solenoides zu kompensieren. In demselben Stromkreis mit dem Solenoid, das westlich vom Magnetometer aufgestellt war, befand sich östlich von diesem eine Spule auf längsdurchschnittenem Messingkern, deren Achse senkrecht zum Magnet in dessen Ruhelage stand. Ehe die Eisenprobe in die Magnetisierungsspule gebracht wurde, schickte man den stärksten anzuwendenden Strom durch das Solenoid und jene Kompensationsspule und rückte sie so lange vor- oder rückwärts, bis das Magnetometer keine Ablenkung mehr zeigte. Zur genauen Einstellung wurde ein um eine senkrechte Achse drehbarer Schlitten konstruiert, auf welchem die Kompensationsspule ruhte und der vermittelt einer Mikrometerschraube leicht in die genau richtige Entfernung vom Magnetometer gebracht werden konnte. Die Kompensation blieb für alle schwächeren Ströme bestehen, vorausgesetzt, daß im Felde des Magnetometers keine Aenderung in der Lage von Eisenmassen stattgefunden hatte.

Es wurde durchweg mit kleinen Ablenkungen gearbeitet, damit auch für andere Lagen des Magnetometermagnetes die Kompensation erhalten blieb. Dieselbe wurde nach jeder Beobachtungsreihe kontrolliert und in den meisten Fällen noch gut befunden; bei wesentlichen Aenderungen wurde die betreffende Reihe verworfen. Für schwache Ströme war die Kompensation der Wirkung des Magnetisierungsstromes bei richtiger Lage der Kompensationsspule tagelang vollkommen gut. Bei allen Stromleitungen waren die Leitungsdrähte übrigens umeinandergeflochten, um eine direkte Wirkung der in ihnen fließenden Ströme auf die Instrumente zu verhindern.

9. Die Entmagnetisierungs-Vorrichtung.

Die untersuchten Drähte wurden gewöhnlich vor Beginn eines jeden Cyklus entmagnetisiert. Um den vorhandenen remanenten Magnetismus auszutreiben, wurden sie den Wirkungen immer schwächer werdender magnetisierender Kräfte von fortwährend wechselnder Richtung unterworfen; haben diese Kräfte den Wert Null erreicht, so ist der anfängliche oder remanente Magnetismus verschwunden. Um die magnetisierenden Kräfte ganz allmählich verringern zu können, wurde ein Flüssigkeitsnebenschluß in der von EWING¹⁾ angegebenen Form (Fig. 2, F, S. 14) konstruiert.

In einem 50 cm hohen, 6 cm weiten Standcylinder, der mit verdünnter Zinksulfatlösung angefüllt ist, befinden sich eine bewegliche und zwei feste amalgamierte Zinkscheiben *a*, *b*, *c*. *b* kann auf- und abbewegt werden vermittelt eines hineingenieteten Zinkdrahtes, der innerhalb eines Glasrohres wohlisoliert durch eine Oeffnung in der am Rand des Cylinders hängenden Zinkplatte *a* geführt ist. Die am Boden liegende Scheibe *c* und die Scheibe *a* sind durch isolierte Zinkdrähte mit der Quelle des Magnetisierungsstromes, *b* und der zweite Draht von *a* durch einen rasch wirkenden, rotierenden Kommutator mit der Magnetisierungsspule verbunden. Letztere liegt dadurch im Nebenschluß zu der veränderlichen Flüssigkeitssäule *ab*. Berührt *b* die Platte *a*, so geht kein Strom durch das Solenoid. Ruht *b* auf *c*, so ist das Magnetisierungssolenoid vom ganzen Strome durchflossen. Durch allmähliches Heben von *b* kann der Strom jeden beliebigen Wert zwischen seinem Maximum und Null annehmen.

¹⁾ EWING, Electrician, XXIV, 1890.

Um nun den remanenten Magnetismus aus dem Probedrahte zu entfernen, ist es nur nötig, einen Strom durch die Magnetisierungsspule zu schicken von der Intensität, wie sie der stärkste Strom hatte, dem der Draht unterworfen war, dann den Kommutator zu drehen und die

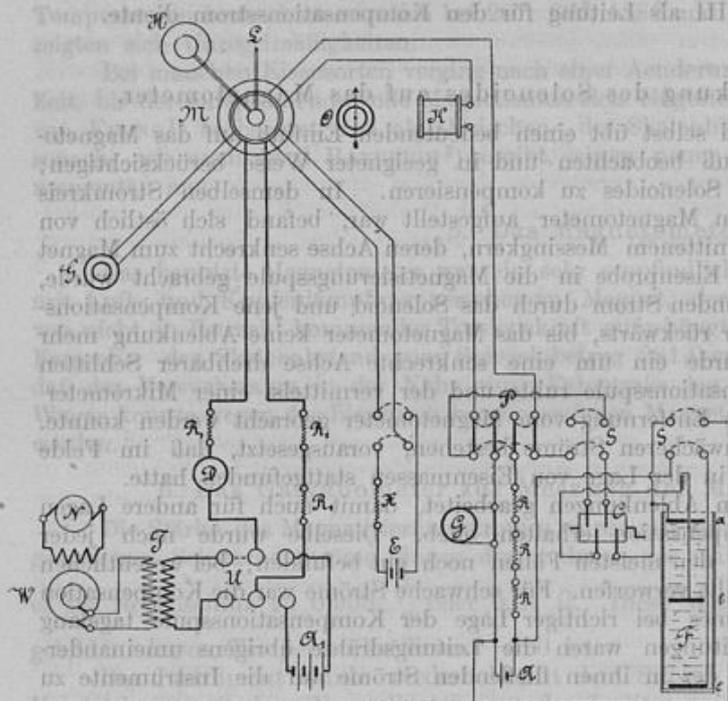


Fig. 2.

wie schon erwähnt, bestätigt gesehen, daß die Hysteresis nur von der Differenz der Grenzwerte der Induktion, nicht aber von den absoluten Werten derselben abhängig ist. Es ist also für Hysteresisversuche nicht nötig, die Probestücke zu entmagnetisieren und die Wirkung des Erdmagnetismus zu kompensieren; die Hysteresisflächen haben denselben Inhalt, einerlei ob der untersuchte Draht remanenten Magnetismus besitzt oder nicht; nur ist die Gestalt der Flächen im ersten Fall nicht symmetrisch in Bezug auf die Achsen des der graphischen Darstellung zu Grunde liegenden Koordinatensystems.

Bei Ermittlung der Abhängigkeit der Magnetisierung von der Temperatur unter Verwendung schwacher Felder ist es jedoch erforderlich, daß ein Draht unmagnetisch und die Vertikalkomponente des Erdmagnetismus kompensiert ist. Die Entmagnetisierungsvorrichtung blieb bei den Versuchen ein für allemal eingeschaltet und zwar, wie Fig. 2 zeigt, so, daß ein Umschalten zu ihrem Gebrauche nicht erforderlich war; sie konnte nach Öffnen der Poggendorff'schen Wippe *P* direkt in Tätigkeit gesetzt werden. Zur besonderen Sicherung waren sowohl in die Stromzuleitung zum Entmagnetisierungsapparat, wie in die Ableitung zur Spule noch Schlüssel (*S, S*) gelegt in Gestalt gewöhnlicher Kommutatoren.

C. Die Versuchsanordnung.

Die Versuchsanordnung wird aus Fig. 2 klar.

Die Akkumulatorenbatterie *A* liefert den durch das Torsionsgalvanometer *G* gemessenen, durch die Rheostaten *R* regulierten Magnetisierungsstrom zur Poggendorff'schen Wippe *P*, von da zur Kompensationsspule *K* und weiter zur Magnetisierungsspule *M*. Der Strom zum

bewegliche Zinkscheibe *b* langsam in die Höhe zu ziehen bis zur Berührung mit *a*.

Soll der Draht vollständig unmagnetisch werden, dann muß die Wirkung der Vertikalkomponente des Erdmagnetismus, von welcher der Draht in seiner senkrechten Stellung beeinflusst wird, kompensiert werden. Dies geschah mit dem durch die Windung Nr. VIII des Solenoides fließenden Strom eines Daniellelements, dessen Stärke durch Einschaltung eines Widerstandskastens reguliert werden konnte; die erforderliche Stromstärke ist dann die richtige, wenn der Draht, nach vorstehend beschriebener Methode behandelt, vollständig unmagnetisch wird, was sich aus der wiedereingetretenen Ruhelage des Magnetometers ergibt.

Ich habe übrigens gleich am Anfang meiner Untersuchungen gefunden und durch die späteren Veröffentlichungen von STEINMETZ,

Erhitzen der Platinspirale kann durch Benutzung eines einfachen Umschalters U nach Belieben von der Wechselstrommaschine W oder von der großen Akkumulatorenbatterie A_1 erhalten werden. N ist die die Wechselstrommaschine erregende Nebenschlußmaschine, T der Transformator zur Umwandlung des hochgespannten Wechselstromes in starken Strom von niedriger Spannung, R_1 sind Rheostaten zur Regulierung, D das Dynamometer zur Messung des Erhitzungsstromes. F ist der aufrecht gezeichnete Flüssigkeitsnebenschluß, C der rasch wirkende Stromwender, S sind einfache Stromschlüssel zur besonderen Sicherung. Das Danielllement E liefert den Strom zur Kompensation der Wirkung der Vertikalkomponente des Erdmagnetismus; X ist der zugehörige Stöpselrheostat; O ist das Magnetometer, G_1 das DEPPEZ-D'ARSONVAL'sche Galvanometer, H der Wasserstoffentwicklungsapparat, L die Kühlwasserzuleitung.

D. Berechnung der Versuchsergebnisse.

Die Feldstärke im Mittelpunkt des Solenoids wurde aus den beobachteten Stromstärken des Magnetisierungsstromes berechnet nach der Gleichung

$$H = \frac{4\pi zi}{10l} (c, g, s),$$

wo i die Stromstärke in amp, z die Windungszahl, l die Diagonale des Solenoids darstellt, für welche, da bei langen Solenoiden statt der Diagonale die Länge eingeführt werden kann, diese letztere gesetzt wurde. Für 1 amp ist bei Hintereinanderschaltung sämtlicher Windungen

$$H = 54,92 (c, g, s),$$

bei Hintereinanderschaltung der Windungen I—VII

$$H = 48,11 (c, g, s).$$

Die Intensität der Magnetisierung J wird bei Anwendung der »Einpolmethode«¹⁾ leicht auf folgende Weise gefunden:

Auf den durch den magnetisierten Draht mit den Polen PP_1 um den Winkel α aus der Ruhelage abgelenkten Magnet des Magnetometers O wirken zwei Kräfte: Die Horizontalkomponente F_1 des Erdmagnetismus und die ablenkende Kraft F_2 , herrührend vom magnetisierten Draht und zwar hauptsächlich vom oberen Pol P . Für die neue Lage ist Gleichgewicht vorhanden, wenn

$$F_2 = F_1 \operatorname{tg} \alpha \text{ ist.}$$

F_1 wurde direkt ermittelt²⁾ = 0,194. Fassen wir J als Polstärke pro qcm Endfläche auf, und ist a der Radius des cylindrischen Drahtes, dann ist:

$$F_2 = \frac{\pi a^2 J}{r^2} - \frac{\pi a^2 J}{r_1^2} \cdot \frac{r}{r_1} = \frac{\pi a^2 J}{r^2} \left[1 - \left(\frac{r}{r_1} \right)^3 \right] = F_1 \operatorname{tg} \alpha,$$

und hieraus ist

$$J = \frac{r^2 \cdot F_1 \operatorname{tg} \alpha}{\pi a^2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_1} \right)^3 \right]}$$

wobei r und r_1 die Abstände des oberen bzw. unteren Poles vom Magnetometer sind.

r war bei den Hysteresisversuchen und bei den Versuchen über das Verhalten von Eisen bei hohen Temperaturen in stärkeren Feldern = 40,70 cm; die Pole lagen je 1,00 cm von den Enden der Drähte entfernt; daher war $r_1 = 55,68$ cm; der Abstand der in mm geteilten Skala vom Magnetometer betrug 2810 mm und sonach $\operatorname{tg} \alpha$ für einen Skalenteil

$$= \frac{1}{2 \cdot 2810}$$

und der Wert von J , dem eine Ablenkung des Magnetometermagnets um einen Skalenteil entspricht, ist:

¹⁾ EWING, Electrician, XXIV, Febr. 1890.

²⁾ KOHLRAUSCH, Leitf. d. prakt. Phys., 1892, p. 323.

$$J = \frac{40,70^2 \cdot 0,194}{3,14159 \cdot 0,0025 \cdot 0,61 \cdot 2 \cdot 2810} = 11,933.$$

Durch Multiplikation dieses Wertes mit den Ablenkungen in mm wurden die den jeweiligen magnetisierenden Kräften entsprechenden Werte von J , durch Multiplikation mit 4π die metallischen Induktionen \mathfrak{B} und durch Addition der H die totalen Induktionen B berechnet.

Die mir für die außerordentlich zeitraubenden Beobachtungen zugemessene Zeit war eine beschränkte; deshalb mußten dieselben rasch hintereinander angestellt und auf eine sofortige Berechnung der Versuchsergebnisse verzichtet werden. Um jedoch ein Urteil über den Ausfall der Versuche zu haben, wurden die Ergebnisse immer gleich graphisch dargestellt, und zwar wurden die Stromstärken als Abscissen, die Magnetometerauslässe als Ordinaten auf Millimeterpapier aufgetragen.

Ändert man den gewählten Maßstab derart, daß man die Länge in cm, die ein amp darstellt, durch den Wert 54,92 (= H für ein amp), die Länge in cm, die den größten Magnetometerausschlag darstellt, durch 11,933·24 bzw. bei Stahl durch 11,933·23 (= Maximalintensität der Magnetisierung) dividiert, so stellen die Schleifen die Beziehungen von H und J für einen Kreisprozeß dar.

Liest man aber für die Werte von J den 12,57-(= 4π)fachen Wert aus den graphischen Darstellungen, so zeigen die Kurven die Beziehungen zwischen H und \mathfrak{B} .

Damit die Fläche der Schleife gleich die verbrauchte Energie in Erg pro ccm und Kreisprozeß angibt, ist es vorteilhaft, die zweite Annahme zu Grunde zu legen; als Maßeinheit für die Fläche ist dann ein Rechteck anzuwenden von den Seiten $H = 1$ und $J = 1$ in absolutem Maße.

So ist, um irgend ein Beispiel herauszugreifen, für den Puddeleisendraht IV a, Fig. 3 A, Tab. 22, die mittlere Stärke des Magnetisierungsstromes, bei welcher die maximale Induktion $\mathfrak{B} = 3590$ erreicht wurde, = 0,11395 amp, dargestellt im Maßstab 1 amp = 50 cm. Die Einheit für H ist dann 50 : 54,92. Der Maximalaus Schlag 24 am Magnetometer ist in der Figur = 4,8 cm. also die Einheit für $J = 4,8 : (11,933 \cdot 24)$. Das Einheitsrechteck ist sonach

$$= \frac{50 \cdot 4,8}{54,92 \cdot 11,933 \cdot 24} = 0,01528 \text{ qcm.}$$

Mit diesem ist die Hysteresisfläche zu messen, um den Energieverlust in Erg pro ccm und Zyklus zu erhalten; also

$$47,4 \text{ qcm} : 0,01528 \text{ qcm} = 3100 \text{ Erg.}$$

Die Inhalte der Schleifen sind mit einem sorgfältig geachteten Polarplanimeter bestimmt worden; die angegebenen Zahlenwerte sind Mittel aus mindestens drei Umfahrungen.

E. Resultate.

1. Eisen und Stahl.

Ich gehe nunmehr dazu über, die Versuchsergebnisse im einzelnen mitzuteilen und zwar gebe ich zunächst für die Maximalinduktion $\mathfrak{B} = 3590$ für jede der untersuchten Eisen- und Stahlsorten die Resultate nur einer Beobachtungsreihe als Tabelle, da alle Reihen zu denselben Ergebnissen führten, nämlich zu für eine bestimmte Temperatur fast gleichen Hysteresisflächen, selbst bei etwas verschiedener Gestalt, die durch Unterlassen des Entmagnetisierens und Kompensierens der Vertikalkomponente bedingt ist. Von den zahlreichen graphischen Darstellungen der Hysteresisflächen, wie sie für jede Beobachtungsreihe bei den verschiedenen Materialien aufgezeichnet werden mußten, um aus den Flächen der entstandenen Schleifen die Energieverluste ermitteln zu können, habe ich, da der Verlauf bei allen Materialien ein ähnlicher ist, nur eine einzige Reihe IVa für Puddeleisendraht auf beigehefteter Tafel, Fig. 3, A — H, gegeben. Jede einem Zyklus entsprechende Fläche ist mit einem besonderen Buchstaben bezeichnet; die über diesem stehende Zahl gibt die Temperatur an, bei welcher der Zyklus durchlaufen wurde, die darunterstehende Zahl den Inhalt der Fläche in qcm. Der Raumersparnis halber

wurden die Flächen C_1 , D und E gestrichelt in A, bzw. B und C, die Fläche H strichpunktiert in A gezeichnet.

In den Tabellen enthält die erste Vertikalreihe die Feldstärke H , die zweite die entsprechende Intensität der Magnetisierung J , die dritte die metallische Induktion \mathfrak{B} . Dann folgt die Angabe des Inhaltes der Hysteresisfläche in qcm als Mittel aus vier Darstellungen, sowie der entsprechende Wert in Erg.

Ia. Deutscher geglühter Holzkohleneisendraht.

Tabelle 3. A. 20° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
4,52	286,39	3590	4,24	286,39	3590
3,70	274,59	3450	3,67	280,43	3523
3,08	268,49	3380	1,69	250,59	3144
1,68	250,59	3144	-0,89	232,69	2924
+0,88	226,73	2846	0	202,86	2544
0	190,93	2398	+0,89	173,03	2178
-0,88	143,20	1800	1,68	131,26	1650
1,69	83,53	1050	2,31	-83,53	-1050
2,29	+11,93	+150	3,09	+11,93	+150
2,62	-35,80	-450	3,70	119,33	1500
3,09	113,36	1422	4,24	226,73	2846
3,69	214,79	2700	4,52	286,39	3590

Hysteresisfläche = 32,225 qcm; \mathfrak{G} = 2350 Erg.

Tabelle 4. B. 290° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
3,26	286,39	3590	2,28	280,43	3523
2,04	262,53	3300	1,68	274,46	3450
1,68	256,56	3225	-0,83	262,53	3300
+0,88	232,69	2924	0	232,69	2924
0	190,93	2398	+0,83	184,96	2322
-0,88	+77,56	+975	1,68	-83,53	-1050
1,68	-125,30	-1574	2,30	+53,70	+675
2,03	190,93	2398	2,74	161,10	2024
2,28	226,73	2846	3,05	232,69	2924
2,74	274,46	3450	3,26	286,39	3590
2,99	286,39	3590			

Hysteresisfläche = 21,825 qcm; \mathfrak{G} = 1600 Erg.

Tabelle 5. C. 470° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
2,86	286,39	3590	0	155,13	1945
2,10	274,46	3450	-0,83	+11,93	+150
1,66	262,53	3300	1,24	-107,40	-1350
+0,83	226,73	2846	1,43	179,00	2250

Programm. 1891.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
1,67	262,53	3300	1,24	119,33	1500
1,84	286,39	3590	1,62	-35,80	-450
-0,83	262,53	3300	2,27	+167,06	+2100
0	226,73	2846	2,63	238,66	3000
+0,83	167,06	2100	2,86	286,39	3590

Hysteresisfläche = 16,550 qcm; \mathfrak{S} = 1204 Erg.

Tabelle 6. D. 656° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
2,12	286,39	3590	0	214,79	2700
1,68	274,46	3450	+0,83	101,43	1275
+0,83	238,66	3000	1,24	-11,93	-150
0	+143,20	+1800	1,53	+107,38	+1350
-0,83	-167,06	-2100	1,68	167,06	2100
1,06	226,73	2846	2,06	274,46	3450
1,24	286,39	3590	2,12	286,39	3590
-0,83	268,49	3380			

Hysteresisfläche = 9,750 qcm; \mathfrak{S} = 710 Erg.

Tabelle 7. E. 728° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
1,87	286,39	3590	-0,41	262,53	3300
1,13	256,56	3225	0	226,73	2846
0,82	226,73	2846	+0,41	155,13	1945
+0,41	196,89	2475	0,83	-29,83	-375
0	+119,33	+1500	1,12	+95,46	+1200
-0,41	-95,46	-1200	1,28	143,20	1800
0,55	161,10	2024	1,49	202,86	2550
0,72	226,73	2846	1,83	286,39	3590
0,87	286,39	3590			

Hysteresisfläche = 7,575 qcm; \mathfrak{S} = 550 Erg.

Tabelle 8. F. 836° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
2,50	286,39	3590	1,00	256,56	3225
1,28	214,79	2700	0,87	238,66	3000
0,82	178,99	2250	-0,41	184,96	2325
+0,42	119,33	1500	0	119,33	1500
0	+29,83	+375	+0,41	-59,67	-750
-0,42	-59,67	-750	0,83	+41,77	+525
0,82	143,20	1800	1,12	107,40	1350
1,12	202,86	2550	1,49	178,99	2250
1,49	262,53	3300	2,24	262,53	3300
1,74	286,39	3590	2,50	286,39	3590

Hysteresisfläche = 4,350 qcm; \mathfrak{S} = 316 Erg.

Tabelle 9: H. 20° C.

H	J	B	H	J	B
3,24	286,39	3590	1,67	262,53	3300
1,67	274,46	3450	-0,88	250,59	3144
+0,88	256,56	3225	0	214,79	2700
0	226,73	2846	+0,88	155,13	1945
-0,88	161,10	2024	1,34	101,43	1275
1,67	+53,70	+675	1,67	-59,67	-750
2,16	-53,70	-675	2,30	+71,60	+900
3,06	226,73	2846	2,63	167,06	2100
3,66	286,39	3590	3,24	286,39	3590

Hysteresisfläche = 25,025 qcm; $\mathfrak{H} = 2107$ Erg.

Wie aus den Tabellen und den entsprechenden (nicht beigegebenen) graphischen Darstellungen hervorgeht, wird der bei magnetischen Kreisprozessen eintretende Energieverlust durch Hysteresis bei zunehmender Temperatur bedeutend geringer, als er bei gewöhnlicher Temperatur ist, wächst jedoch nach dem Erkalten der Versuchsdrähte wieder, ohne indessen den anfänglichen Betrag zu erreichen.

Um für die angewandte Eisensorte die Art der Abhängigkeit der Hysteresis von der Temperatur kennen zu lernen, wurden die Werte der ersteren in Erg als Ordinaten, die Temperaturen als Abscissen in ein Koordinatensystem eingetragen nach dem Maßstab: 1000 Erg = 1 cm; 100° = 1 cm.

Es ergab sich dann, daß die Kurve der Abhängigkeit eine gerade Linie ist, die durch die Gleichung

$$\mathfrak{H} = a - bt$$

dargestellt wird.

Die Konstanten a und b wurden aus den experimentellen Daten bestimmt zu $a = 2400,82$; $b = 2,541$; demnach lautet die Gleichung, welche die Abhängigkeit der Hysteresis (\mathfrak{H}) von der Temperatur (t) bei der gewählten maximalen Induktion ausdrückt:

$$\mathfrak{H}_t = 2400,82 - 2,541 t.$$

Der STEINMETZ'sche Hysteresiskoeffizient¹⁾ η für das untersuchte Material wurde aus der Gleichung

$$\eta \cdot \mathfrak{B}^{1,6} = \mathfrak{H}$$

berechnet zu $\eta = 0,00482$.

Dieser Koeffizient ist eine Materialkonstante, deren Wert ebenfalls von der Temperatur abhängt. Der Zusammenhang des Hysteresiskoeffizienten mit der Temperatur kann wie folgt gefunden werden: sind η_t und \mathfrak{H}_t der Koeffizient, bzw. die Hysteresis bei t° , η und \mathfrak{H} die entsprechenden Werte bei gewöhnlicher Temperatur (20°), und man setzt

$$\mathfrak{H} = \eta \cdot \mathfrak{B}^{1,6}$$

$$\mathfrak{H}_t = \eta_t \cdot \mathfrak{B}^{1,6}, \text{ dann ergibt sich}$$

$$\eta_t = \frac{\mathfrak{H}_t}{\mathfrak{B}^{1,6}} \cdot \eta,$$

und durch Einsetzen der Werte von \mathfrak{H}_t und \mathfrak{H} und Division

$$\eta_t = (1,022 - 0,001082 t) \cdot \eta.$$

Der für eine beliebige Temperatur t° bei einem magnetischen Kreisprozeß eintretende Energieverlust \mathfrak{H}_t ist sonach bei der angegebenen maximalen Induktion \mathfrak{B} und dem bekannten Hysteresiskoeffizienten η für das hier untersuchte Material, da $\mathfrak{H}_t = \eta_t \cdot \mathfrak{B}^{1,6}$,

$$\mathfrak{H}_t = (1,022 - 0,001082 t) \cdot \eta \cdot \mathfrak{B}^{1,6}.$$

¹⁾ S. S. 5.

IIa. Schwedischer Eisendraht.

Tabelle 10. A. 20° C.

H	J	g	H	J	g
5,60	286,39	3590	3,02	268,49	3380
4,45	274,46	3450	1,83	244,63	3075
2,30	232,69	2924	0,85	214,79	2700
1,53	214,79	2700	-0,43	202,86	2544
0,85	202,86	2544	0	190,93	2398
+0,43	190,93	2398	+0,43	173,05	2178
0	173,03	2178	0,85	155,13	1945
-0,43	155,13	1945	1,52	119,33	1500
0,85	137,23	1725	2,28	-71,60	-900
1,53	107,40	1350	3,02	0	0
2,30	+59,67	+750	3,66	+83,53	+1050
3,02	-47,73	-600	4,37	178,99	2250
3,66	178,99	2250	4,84	226,73	2846
4,50	286,39	3590	5,60	286,39	3590
3,66	277,46	3490			

Hysteresisfläche = 33,600 qcm; \oint = 2690 Erg.

Tabelle 11. B. 270° C.

H	J	g	H	J	g
6,33	286,39	3590	3,02	274,46	3450
4,43	274,46	3450	1,52	238,66	3000
2,30	226,73	2846	0,85	220,76	2775
1,52	208,83	2625	-0,43	202,86	2550
0,85	190,93	2398	0	190,93	2398
+0,43	167,06	2100	+0,43	173,03	2175
0	143,20	1800	0,85	155,13	1945
-0,43	122,33	1535	1,52	119,33	1500
0,85	95,06	1200	2,28	-59,67	-750
1,52	+35,90	+450	3,02	+47,73	+600
2,28	-83,53	-1050	3,54	95,46	1200
3,02	238,66	3000	3,97	143,20	1800
3,23	262,53	3300	4,43	184,99	2325
3,41	286,39	3590	6,33	286,39	3590

Hysteresisfläche = 26,000 qcm; \oint = 2080 Erg.

Tabelle 12. C. 460° C.

H	J	g	H	J	g
4,43	286,39	3590	0,85	+59,66	+750
2,30	226,73	2846	1,52	-23,87	-300
1,52	202,86	2550	1,84	95,46	1200
0,85	173,03	2175	2,28	226,73	2846
+0,43	149,18	1875	2,52	286,39	3590
0	125,33	1575	2,28	280,43	3523
-0,43	95,46	1200	1,52	256,58	3250

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
0,85	232,69	2924	1,52	-95,46	-1200
-0,43	214,79	2700	2,28	+23,87	+300
0	190,93	2398	3,04	131,26	1650
+0,43	173,03	2175	3,56	190,93	2398
0,85	149,18	1875	4,43	286,39	3590

Hysteresisfläche = 19,400 qcm; \mathfrak{G} = 1550 Erg.

Tabelle 13. D. 650° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
2,58	286,39	3590	1,71	286,39	3590
2,28	280,43	3523	1,33	268,49	3380
1,52	250,59	3150	0,85	250,59	3150
0,85	214,79	2700	-0,43	226,73	2846
+0,43	178,99	2250	0	190,93	2398
0	131,26	1650	+0,43	131,26	1650
+0,43	+41,78	+525	0,85	-47,73	-600
0,85	-59,67	-750	1,52	+143,19	+1800
1,15	161,10	2024	1,82	214,79	2700
1,33	208,86	2625	2,58	286,39	3590
1,52	262,53	3300			

Hysteresisfläche = 11,300 qcm; \mathfrak{G} = 905 Erg.

Tabelle 14. E. 742° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
2,68	286,39	3590	1,71	286,39	3590
2,28	274,46	3450	-0,85	250,59	3150
1,52	250,59	3150	0	178,99	2250
0,85	214,79	2700	+0,43	131,26	1650
+0,43	190,93	2398	0,85	-59,67	-750
0	155,13	1945	1,52	+71,60	+900
-0,43	+89,53	+1125	1,82	155,13	1945
0,85	-11,93	-150	2,28	256,58	3250
1,52	250,59	3150	2,68	286,39	3590

Hysteresisfläche = 10,450 qm; \mathfrak{G} = 825 Erg.

Tabelle 15. F. 812° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
1,85	286,39	3590	1,15	268,49	3380
1,52	262,53	3300	0,85	250,59	3144
0,85	214,79	2700	-0,43	214,79	2700
+0,43	167,06	2100	0	167,06	2100
0	+107,40	1350	+0,43	107,40	1350
-0,43	0	0	0,85	-23,87	-300
0,85	-107,40	1350	1,15	+65,66	+825
1,15	202,86	2550	1,52	178,99	2250
1,33	250,59	3144	1,85	286,39	3590
1,41	286,39	3590			

Hysteresisfläche = 8,900 qcm; \mathfrak{G} = 712 Erg.

Bei einigen Beobachtungsreihen hatte sich eine Unregelmäßigkeit eingestellt, indem Fläche E (742° C) größer war als D (650° C). Bemerkenswert ist ferner, daß mit einer Ausnahme die nach Wiederabkühlung der Probestücke vorgenommenen Kreisprozesse keine geschlossenen Schleifen lieferten. Das »Kriechen« war bei dieser Eisensorte besonders bemerkbar.

Die Abhängigkeit der Hysteresis von der Temperatur wurde für den schwedischen Eisendraht wie bei I (S. 19) ermittelt. Auch hier ist die Kurve der Abhängigkeit eine Gerade von der Gleichung

$$\xi = a - bt,$$

deren Konstanten a und b sich zu 2741,80 bzw. 2,59 ergaben, so daß die Gleichung lautet

$$\xi_t = 2741,80 - 2,59 t.$$

Der Hysteresiskoeffizient ist

$$\eta = 0,00552$$

für gewöhnliche Temperatur; seine Abhängigkeit von der Temperatur wird ausgedrückt durch die Gleichung

$$\eta_t = (1,02 - 0,000962 t)\eta.$$

Über die Berechnung von ξ_t aus η_t und \mathfrak{B} , s. I, S. 19.

IIIa. Weicher Flußeisendraht.

Tabelle 16. A. 20° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
7,15	286,39	3590	6,04	286,39	3590
5,64	268,49	3380	4,43	283,00	3550
4,43	250,59	3144	3,04	274,46	3450
3,04	232,69	2924	1,84	262,53	3300
2,29	214,79	2700	0,85	238,66	3000
1,52	202,86	2550	-0,44	226,73	2846
0,85	190,93	2398	0	214,79	2700
+0,44	178,99	2250	+0,44	202,86	2550
0	167,06	2100	0,85	190,93	2398
-0,44	155,13	1945	1,52	170,06	2138
0,85	143,20	1800	2,29	143,20	1800
1,52	119,33	1500	3,04	-101,43	-1275
2,29	83,53	1050	4,43	+11,93	+150
3,02	+41,79	+525	5,08	83,53	1050
4,43	-83,53	-1050	5,63	131,26	1650
4,86	131,26	1650	6,32	196,92	2475
5,36	214,79	2700	6,72	232,69	2924
5,62	250,59	3144	7,15	286,39	3590

Hysteresisfläche = 52,000 qcm; $\xi = 3420$ Erg.

Tabelle 17. B. 284° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
4,86	286,39	3590	+0,44	202,86	2550
4,43	274,46	3450	0	190,93	2440
3,04	262,53	3300	+0,44	178,99	2250
1,84	238,66	3000	0,85	155,13	1945
0,85	214,79	2700	1,52	119,33	1500

H	J	B	H	J	B
2,26	+65,66	+825	-0,44	190,93	2400
3,04	-11,93	-150	0	173,03	2175
4,43	155,13	1945	+0,44	155,13	1945
4,87	214,79	2700	0,85	137,26	1725
5,08	250,59	3144	1,52	101,46	1275
5,36	286,39	3590	2,29	-59,67	-750
4,43	268,49	3380	3,04	+11,93	+150
3,04	250,59	3144	3,73	107,39	1350
1,52	220,76	2775	4,43	214,79	2700
0,85	202,86	2550	4,86	286,39	3590

Hysteresisfläche = 37,700 qcm; \oint = 2480 Erg.

Tabelle 18. C. 468° C.

H	J	B	H	J	B
4,32	286,39	3590	3,04	280,43	3523
3,56	268,49	3380	2,29	268,49	3380
1,52	202,86	2550	1,52	256,56	3225
0,85	178,99	2250	0,85	232,69	2924
+0,44	167,06	2100	-0,44	214,79	2700
0	149,19	1875	0	202,86	2550
-0,44	125,33	1575	+0,44	184,99	2325
0,85	101,46	1275	0,85	167,06	2100
1,52	+47,73	+600	1,52	119,33	1500
2,29	-35,80	-450	2,29	-35,79	-450
3,04	167,06	2100	3,04	+95,46	+1200
3,56	250,59	3144	3,62	190,93	2400
3,89	286,39	3590	4,32	286,39	3590

Hysteresisfläche = 26,650 qcm; \oint = 1750 Erg.

Tabelle 19. D. 656° C.

H	J	B	H	J	B
2,12	286,39	3590	1,32	268,49	3380
1,52	268,49	3380	0,85	238,66	3000
0,85	238,66	3000	-0,44	208,06	2625
+0,44	214,79	2700	0	173,03	2175
0	173,03	2175	+0,44	113,39	1425
-0,44	125,33	1575	0,85	-47,73	-600
0,85	41,79	525	1,16	+17,93	+225
1,04	+5,97	+75	1,53	119,33	1500
1,32	-101,46	-1275	1,83	214,79	2700
1,86	238,66	3000	1,95	250,59	3144
2,12	286,39	3590	2,12	286,39	3590
1,86	280,43	3523			

Hysteresisfläche = 12,500 qcm; \oint = 821 Erg.

Tabelle 20. E. 744° C.

H	J	B	H	J	B
1,98	286,39	3590	0,85	226,73	2846
1,52	268,49	3380	+0,44	190,93	2398

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
0	143,20	1800	-0,44	226,73	2846
-0,44	+77,60	-975	0	190,93	2398
0,85	-35,80	+450	+0,44	143,20	1800
1,16	119,33	1500	0,85	71,60	900
1,52	226,73	2846	1,16	-11,93	-150
1,67	250,59	3144	1,52	+83,53	+1050
1,83	286,39	3590	1,84	202,86	2550
1,52	280,43	3523	1,98	286,39	3590
0,85	250,59	3144			

Hysteresisfläche = 12,200 qcm; $\xi = 800$ Erg.

Tabelle 21. H. 20° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
1,60	286,39	3590	0,85	274,46	3450
1,04	268,49	3380	-0,44	262,53	3300
0,85	256,56	3225	0	238,66	3000
+0,44	226,73	2846	+0,44	190,93	2398
0	+143,30	+1800	0,85	95,46	1200
-0,44	-23,86	-300	1,04	-11,93	-150
0,85	178,99	2250	1,16	+47,73	+600
1,04	238,66	3000	1,53	250,59	3144
1,15	286,39	3590	1,60	286,39	3590
1,04	280,43	3523			

Hysteresisfläche = 13,700 qcm; $\xi = 900$ Erg.

Bei allen Beobachtungsreihen war von E (744° C) ab eine Unregelmäßigkeit zu erkennen; bei Erhitzungen über diese Temperatur konnten keine geschlossenen Schleifen mehr erhalten werden.

Stellt man, wie bei I, S. 19, die Energieverluste als Funktion der Temperatur graphisch dar, so zeigt sich, daß auch für das vorliegende Material die Kurve der Abhängigkeit der Hysterese von der Temperatur eine Gerade ist von der Gleichung

$$\xi = a - bt.$$

Die Konstanten a und b finden sich aus experimentellen Daten zu $a = 3494,54$, $b = 3,727$, so daß die Gleichung heißt

$$\xi_t = 3494,54 - 3,727 t.$$

Die Abhängigkeit des Hysteresiskoeffizienten von der Temperatur wird dargestellt durch die Gleichung:

$$\eta_t = (1,021 - 0,001091 t)\eta,$$

wobei η für das angewandte Material = 0,00702 ist.

IVa. Puddeleisendraht. Fig. 3. A—H. (Tafel, letzte Seite.)

Tabelle 22. A. 20° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
6,35	286,39	3590	1,55	238,66	3000
4,34	274,46	3450	+0,85	220,76	2775
3,02	262,53	3300	0	196,89	2475

H	J	B	H	J	B
-0,85	167,06	2100	1,57	226,73	2846
1,55	143,20	1800	-0,85	214,79	2700
2,29	95,46	1200	0	190,93	2400
3,03	+23,86	+300	+0,85	167,06	2100
4,34	-125,33	-1575	1,57	143,20	1800
5,24	202,86	2550	2,34	107,40	1350
5,80	259,59	3144	3,09	-59,67	-750
6,13	286,39	3590	4,49	+119,33	+1500
4,48	262,53	3300	5,23	214,79	2700
3,09	259,59	3144	6,35	286,39	3590

Hysteresisfläche = 47,400 qcm; \oint = 3100 Erg.

Tabelle 23. B. 275° C.

H	J	B	H	J	B
4,98	286,39	3590	4,45	238,66	3000
4,45	274,46	3450	5,05	286,39	3590
3,06	244,66	3075	3,11	256,56	3225
2,31	226,37	2846	2,37	243,66	3038
1,56	214,79	2700	1,57	226,73	2846
0,85	190,93	2400	-0,85	208,86	2625
+0,43	178,99	2250	0	190,93	2400
0	167,06	2100	+0,85	161,10	2024
-0,43	149,20	1875	1,57	125,33	1575
0,85	131,26	1650	2,35	-71,60	-900
1,56	+83,35	+1050	3,11	+23,86	+300
2,31	-11,93	-150	4,51	244,66	3075
3,06	95,46	1200	4,97	286,39	3590

Hysteresisfläche = 34,750 qcm; \oint = 2270 Erg.

Tabelle 24. C. 460° C.

H	J	B	H	J	B
3,65	286,39	3590	4,06	286,39	3590
3,05	274,46	3450	3,11	280,43	3523
2,32	262,53	3300	2,34	268,49	3380
1,56	244,66	3075	1,57	250,59	3144
-0,85	226,73	2846	-0,85	226,73	2846
0	190,93	2400	0	190,93	2400
+0,85	131,26	1650	+0,85	155,13	1945
1,56	+23,86	+300	1,56	-107,40	-1350
1,87	-29,86	-375	2,34	0	0
2,31	89,53	1125	3,08	+202,86	2550
3,06	167,06	2100	3,28	256,56	3225
3,41	214,79	2700	3,65	286,39	3590
3,65	238,66	3000			

Hysteresisfläche = 26,550 qcm; \oint = 1730 Erg.

Tabelle 25. C₁. 560° C.

H	J	B	H	J	B
2,98	286,39	3590	3,20	286,39	3590
2,31	274,46	3450	2,62	268,49	3380
1,55	250,59	3144	1,68	238,66	3000
0,85	220,76	2775	0,85	208,86	2625
+0,43	202,86	2550	-0,43	190,93	2400
0	178,99	2250	0	167,06	2100
-0,43	137,26	1725	+0,43	137,26	1725
0,85	+83,53	+1050	0,85	95,46	1200
1,18	0	0	1,18	-59,67	-750
1,55	-83,53	-1050	1,55	0	0
1,86	131,26	1650	1,86	+71,60	+900
2,32	181,99	2288	2,72	250,59	3144
2,62	226,73	2846	2,98	286,39	3590

Hysteresisfläche = 20,000 qcm; \oint = 1310 Erg.

Tabelle 26. D. 656° C.

H	J	B	H	J	B
2,04	286,39	3590	2,32	274,46	3450
1,57	274,46	3450	1,57	244,66	3075
0,85	238,66	3000	0,85	202,86	2550
+0,43	208,86	2625	-0,43	178,99	2250
0	167,06	2100	0	143,20	1800
-0,43	119,33	1500	+0,43	101,46	1275
0,85	71,60	900	0,85	-47,73	-600
1,18	+11,93	+150	1,18	0	0
1,57	-59,67	-750	1,56	+83,53	+1050
1,87	107,40	1350	1,88	190,93	2400
2,34	202,86	2550	1,97	250,59	3144
2,62	250,59	3144	2,04	286,39	3590
2,85	286,39	3590			

Hysteresisfläche = 14,950 qcm; \oint = 979 Erg.

Tabelle 27. E. 744° C.

H	J	B	H	J	B
2,14	286,39	3590	1,75	286,39	3590
1,87	274,46	3450	1,34	274,46	3450
1,56	262,53	3300	0,85	250,59	3144
0,85	220,79	2775	-0,43	226,73	2846
+0,43	190,93	2400	0	190,93	2400
0	143,20	1800	+0,43	155,13	1945
-0,43	+71,60	+900	0,85	107,40	1350
0,85	-23,86	-300	1,17	-35,80	-450
1,04	95,46	1200	1,57	+95,46	+1200
1,17	143,20	1800	1,87	226,73	2846
1,34	202,86	2550	2,14	286,39	3590
1,57	250,59	3144			

Hysteresisfläche = 11,875 qcm; \oint = 777 Erg.

Tabelle 28. H. 20° C.

H	J	B	H	J	B
3,96	286,39	3590	4,47	286,39	3590
2,30	280,43	3523	3,04	280,43	3523
1,16	262,53	3300	1,54	262,53	3300
+0,84	256,56	3225	-0,84	250,59	3144
0	226,73	2846	0	226,73	2846
-0,84	173,06	2175	+0,84	190,93	2400
1,54	+113,40	+1425	2,30	-5,96	-75
2,32	-11,93	-150	3,04	+137,26	+1725
3,04	137,26	1725	3,36	238,66	3000
3,65	220,76	2775	3,96	286,39	3590

Hysteresisfläche = 32,300 qcm; $\xi = 2090$ Erg.

Die Schleifen verliefen regelmäßig bis 744° C, von da ab zeigten sich nur noch ungeschlossene Kurven. Die an den wiedererkalteten Drähten vorgenommenen Beobachtungen ergaben dagegen wieder geschlossene Kurven.

Bei dem Puddeleisendraht ist ebenfalls die Kurve, welche die Abhängigkeit der Hysteresis von der Temperatur ausdrückt, eine Gerade von der Gleichung

$$\xi = a - bt,$$

die nach Ermittlung der Werte von a und b lautet

$$\xi_t = 3166,30 - 3,315 t.$$

Ferner findet sich

$$\eta_t = (1,021 - 0,001068 t)\eta,$$

wobei $\eta = 0,00634$ ist.

Va. Harter Patentstahldraht.

Tabelle 29. A. 20° C.

H	J	B	H	J	B
19,75	274,46	3450	16,90	268,49	3380
17,00	268,49	3380	13,00	256,56	3225
13,00	250,59	3144	7,50	238,66	3000
7,62	220,76	2775	4,93	226,73	2846
4,93	202,86	2550	-2,68	208,86	2625
+2,68	190,93	2400	0	190,93	2400
0	167,06	2100	+2,68	161,13	2025
-2,68	137,26	1725	4,93	131,26	1650
4,93	107,40	1350	7,62	-89,53	-1125
7,62	+59,67	+750	12,90	+35,80	+450
13,00	-59,67	-750	16,95	167,06	2100
16,95	190,93	2400	19,75	274,46	3450
19,20	274,46	3450			

Hysteresisfläche = 57,725 qcm; $\xi = 11540$ Erg.

Tabelle 30. B. 309° C.

H	J	B	H	J	B
15,00	274,46	3450	3,51	244,66	3075
9,10	268,49	3380	2,58	232,69	2924

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
+1,37	220,76	2775	-1,37	232,69	2924
0	202,86	2550	0	226,73	2846
-1,37	190,93	2400	+1,37	214,79	2700
2,57	178,99	2250	2,57	202,86	2550
5,49	131,26	1650	5,94	173,06	2175
8,98	+35,80	+450	8,98	-107,40	-1350
13,00	-220,76	-2775	12,95	+71,60	+900
13,50	274,46	3450	14,14	167,06	2100
8,98	262,53	3300	14,80	238,66	3000
5,94	250,59	3144	15,00	274,46	3450
2,57	238,66	3000			

Hysteresisfläche = 57,100 qcm; \mathfrak{S} = 11580 Erg.

Tabelle 31. A. 526° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
9,31	274,46	3450	5,49	250,59	3144
5,49	250,59	3144	2,58	238,66	3000
2,58	214,79	2700	-1,37	220,76	2775
+1,37	196,93	2475	0	196,93	2475
0	178,99	2250	+1,37	167,06	2100
-1,37	155,13	1945	2,58	137,26	1725
2,58	+131,26	+1650	5,49	-23,86	-300
5,50	0	0	7,12	+95,46	+1200
7,12	-119,33	-1500	7,62	161,13	2025
9,31	274,46	3450	9,26	274,46	3450
7,12	262,53	3300			

Hysteresisfläche = 30,625 qcm; \mathfrak{S} = 6040 Erg.

Tabelle 32. D. 660° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
4,00	274,46	3450	2,58	250,59	3144
2,58	256,56	3225	-1,37	214,79	2700
+1,37	226,73	2846	0	167,06	2100
0	178,99	2250	+1,37	-95,46	-1200
-1,37	+77,60	+975	2,58	+35,80	+450
2,58	-23,86	-300	3,51	178,99	2250
3,51	178,99	2250	4,00	274,46	3450
4,00	274,46	3450			

Hysteresisfläche = 10,860 qcm; \mathfrak{S} = 2200 Erg.

Tabelle 33. E. 790° C.

H	J	\mathfrak{B}	H	J	\mathfrak{B}
7,95	274,46	3450	0	+47,73	+600
5,49	238,66	3000	-1,37	-5,96	-75
2,58	167,03	2100	2,58	65,67	825
+1,37	119,33	1500	5,49	196,93	2475

H	J	B	H	J	B
17,66	256,56	3225	0	-53,73	-675
8,82	274,46	3450	+1,37	+5,96	+75
7,66	268,49	3380	2,58	131,26	1650
5,49	238,66	3000	5,49	196,93	2475
2,58	161,13	2025	7,95	274,46	3450
-1,37	113,40	1425			

Hysteresisfläche = 6,230 qcm; $\xi = 1180$ Erg.

Tabelle 34. H. 20° C.

H	J	B	H	J	B
12,34	274,46	3450	9,54	268,49	3380
9,54	271,49	3418	5,80	250,59	3144
5,80	262,53	3300	-2,63	220,76	2775
+2,63	232,69	2924	0	190,93	2400
0	190,93	2400	+2,63	-131,26	-1650
-2,63	+113,40	+1425	5,80	0	0
5,80	-23,86	-300	9,54	+173,06	+2175
9,54	173,06	2175	12,34	274,46	3450
12,34	274,46	3450			

Hysteresisfläche = 32,400 qcm; $\xi = 5230$ Erg.

Via. Patenttiegelgußstahldraht.

Tabelle 35. A. 20° C.

H	J	B	H	J	B
19,75	274,46	3450	19,97	220,76	2775
15,95	262,53	3300	21,40	274,46	3450
13,94	250,59	3144	17,66	262,53	3300
9,55	226,73	2846	13,43	244,66	3075
5,82	208,86	2625	9,33	220,76	2775
4,17	202,86	2550	4,78	196,89	2475
+2,63	190,93	2400	-2,58	178,99	2250
0	173,06	2175	0	161,13	2025
-2,63	149,20	1875	+2,58	143,20	1800
4,83	131,26	1650	4,78	119,33	1500
7,25	95,46	1200	7,08	89,53	1125
9,50	+59,67	+750	9,27	-59,67	-750
13,78	-35,80	-450	13,49	+47,73	+600
16,10	95,46	1200	15,85	131,26	1650
17,71	143,20	1800	17,56	190,93	2400
18,76	178,99	2250	19,75	274,46	3450

Hysteresisfläche = 59,125 qcm; $\xi = 9660$ Erg.

Tabelle 36. E. 309° C.

H	J	B	H	J	B
17,18	274,46	3450	9,50	250,59	3144
13,82	268,49	3380	4,78	226,73	2846

H	J	B	H	J	B
+2,63	208,86	2625	4,78	226,73	2846
0	184,99	2325	-2,63	220,76	2775
-2,63	167,06	2100	0	202,86	2550
4,78	143,20	1800	+2,63	184,99	2325
7,14	119,33	1500	4,78	167,06	2100
9,44	+77,60	+975	7,14	143,20	1800
11,79	0	0	9,45	107,40	1350
13,78	-107,40	-1350	11,79	-29,86	-375
15,09	202,86	2550	13,71	+59,67	+825
15,80	274,46	3450	15,09	149,20	1875
13,71	262,53	3300	15,80	202,86	2550
9,44	244,66	3075	17,18	274,46	3450
7,14	238,66	3000			

Hysteresisfläche = 60,400 qcm; $\xi = 9860$ Erg.

Tabelle 37. C. 468° C.

H	J	B	H	J	B
9,34	274,46	3450	7,14	268,49	3380
7,14	256,56	3225	4,78	256,56	3225
4,78	238,66	3000	-2,63	238,66	3000
+2,63	220,76	2775	0	208,86	2625
0	190,93	2400	+2,63	155,13	1945
-2,63	137,26	1725	4,78	-77,60	-975
4,78	+47,73	+600	7,14	+71,60	+900
7,14	-131,26	-1650	7,63	119,33	1500
8,01	226,73	2846	8,24	190,93	2400
8,73	274,46	3450	9,34	274,46	3450

Hysteresisfläche = 30,250 qcm; $\xi = 4950$ Erg.

Tabelle 38. C₁. 560° C.

H	J	B	H	J	B
4,00	274,46	3450	3,18	262,53	3300
2,63	262,53	3300	-1,37	226,73	2846
+1,37	232,63	2924	0	178,99	2250
0	178,99	2250	+1,37	95,46	1200
-1,37	95,46	1200	1,92	-47,73	-600
1,92	+41,76	+525	2,63	+23,86	+300
2,63	-47,73	-600	3,18	95,46	1200
3,18	143,20	1800	3,66	155,13	1945
3,66	214,79	2700	3,84	238,66	3000
4,00	274,46	3450	4,00	274,46	3450

Hysteresisfläche = 12,175 qcm; $\xi = 1985$ Erg.

Tabelle 39. D. 640° C.

H	J	B	H	J	B
4,06	274,46	3450	+1,37	226,73	2846
2,63	262,53	3300	0	155,13	1945

H	J	B	H	J	B
-1,37	+35,80	+450	+1,37	71,60	900
1,81	-11,93	-150	1,81	-23,86	-300
2,63	143,20	1800	2,58	+59,67	+750
3,13	274,46	3450	3,18	155,13	1945
2,58	262,53	3300	3,57	226,73	2846
-1,37	226,73	2846	4,06	274,46	3450
0	167,06	2100			

Hysteresisfläche = 9,875 qcm; \oint = 1614 Erg.

Tabelle 40. E. 744° C.

H	J	B	H	J	B
2,41	274,46	3450	1,76	262,53	3300
1,87	262,53	3300	-1,37	250,59	3144
+1,37	244,66	3075	0	190,93	2400
0	+155,13	+1945	+1,37	-11,93	-150
-1,37	-71,60	-900	1,76	+47,73	+600
1,76	167,06	2100	2,09	107,40	1350
2,09	226,73	2846	2,41	274,46	3450
2,19	274,46	3450			

Hysteresisfläche = 6,400 qcm; \oint = 1048 Erg.

Tabelle 41. H. 20° C.

H	J	B	H	J	B
9,04	274,46	3450	6,85	256,56	3225
6,85	268,49	3380	4,60	238,66	3000
4,60	256,56	3225	2,52	220,79	2775
2,52	232,69	2924	-1,36	205,86	2558
+1,37	214,79	2700	0	190,93	2398
0	190,93	2398	+1,36	173,06	2175
-1,37	167,06	2100	2,52	143,20	1800
2,52	137,26	1725	4,60	-47,73	-600
4,60	+35,79	+450	5,49	+11,93	+150
5,54	-11,93	-150	6,85	95,46	1200
6,85	95,46	1200	7,45	143,20	1800
7,50	143,20	1800	8,27	220,79	2775
8,50	214,79	2700	8,98	274,46	3550
9,32	274,46	3450			

Hysteresisfläche = 28,500 qcm; \oint = 4670 Erg.

Bei diesen beiden Stahlsorten zeigte die Hysteresisfläche für gewöhnliche Temperatur die Form eines langgestreckten Rhombus. Derselbe wird bei ca. 300° C weniger gestreckt und wächst bei Tiegelgußstahldraht sogar an Inhalt, so daß der für einen Kreisprozeß erforderliche Energieaufwand bei dieser Temperatur größer ist als bei gewöhnlicher. Bei der nun folgenden Versuchstemperatur, 526° C bzw. 468° C, gleicht die Gestalt der die Versuchsergebnisse darstellenden Schleifen der Form für weiches Eisen, und ihr Inhalt beträgt nur etwa die Hälfte vom vorhergehenden; die Inhalte der für noch höhere Temperaturen erhaltenen Flächen nehmen erst rascher, dann langsamer ab und über 750° C sind die Resultate der Versuche

unregelmäßig. Die nach dem Erkalten der Probedrähte ausgeführten Kreisprozesse ergaben Flächen von etwa halber Größe wie bei Beginn der Versuchsreihen; der Stahl hatte jedenfalls während des Erhitzens seine charakteristischen Eigenschaften verloren; dies war auch äußerlich bei den Versuchsdrähten erkennbar, indem sie, nach Vornahme aller Cyklen, ganz außerordentlich weich und biegsam waren.

Aus den Tabellen wie aus den (nicht beigegebenen) Zeichnungen geht hervor, daß zur Zerstörung des beträchtlichen remanenten Magnetismus der Probestücke bei höheren Temperaturen immer geringere, entgegengesetzt magnetisierende Kräfte erforderlich werden; nach dem Erkalten ist die hierzu erforderliche Kraft wieder größer, doch immer bedeutend geringer als am Anfang.

Wird wieder, um die Abhängigkeit der Hysterisis von der Temperatur für die angewandten Stahlsorten zu ermitteln, der Energieverlust in Erg als Funktion der Temperatur dargestellt, so zeigt sich für Patentstahldraht erst ein horizontaler Verlauf, für Patentiegelgußstahldraht ein leichtes Ansteigen der Kurve bis etwa 300° C, dann ein steiles, geradliniges Abfallen bis etwa 560° für das letztere, bis 660° für das erstere Material, und von da an nähert sich die Kurve in geringer Neigung der Abscissenachse und verhält sich in diesem letzten Teil wie die Kurve für weiches Eisen.

Eine einfache Beziehung zwischen dem Energieverlust durch Hysterisis und den Temperaturen, wie sie sich für weiches Eisen ergeben hatte, konnte für Stahl nicht gefunden werden.

Kreisprozesse mit Eisen für höhere Grenzwerte der Induktion.

Um zu ermitteln, ob die für eine bestimmte Amplitude des Kreisprozesses beobachtete Abnahme der Hysterisis mit steigender Temperatur auch für höhere Induktionen in gesetzmäßiger Weise eintritt, wurden mit einer neubezogenen Sorte von Holzkohleneisendraht Kreisprozesse bei wachsender Temperatur und den in nachstehenden Tabellen angeführten Induktionen vorgenommen. Die erste Horizontalreihe enthält die Bezeichnung des Cyklus, die zweite die Temperatur, bei welcher er durchlaufen wurde, die dritte den entsprechenden Energieverlust in Erg.

Tabelle 42. a. $\mathfrak{B} = 7200$.

Bezeichnung.	A	B	C	C ₁	D	E
Temp. in ° C.	20	270	468	570	668	744
Erg.	8900	6690	4660	3340	2270	2168

Tabelle 43. b. $\mathfrak{B} = 12288$.

Bezeichnung.	A	B	C	C ₁	D	E
Temp. in ° C.	20	275	470	572	.	.
Erg.	16590	11490	7770	5720	.	.

Tabelle 44. c. $\mathfrak{B} = 14400$.

Bezeichnung.	A	B	C	C ₁	D	E
Temp. in ° C.	20	270	470	570	.	.
Erg.	21020	14840	9900	7550	.	.

Die Flächen der Reihe a sind vollständig regelmäßig, und die Kreisprozesse konnten bis zur Temperatur von 742° C ohne Störung durchlaufen werden. Die Flächen der Reihen b und c waren von 600° C ab nicht mehr vergleichbar, da die gewählten maximalen Induktionen bei höheren Temperaturen nicht mehr erreicht werden konnten; das Maximum der Magnetisierung war für die stärkeren magnetisierenden Kräfte hier bereits überschritten und die Induktion daher schon kleiner geworden.

Die graphischen Darstellungen der Energieverluste als Funktion der Temperatur ergaben, daß auch, wenn das Material höheren Induktionen unterworfen wird, die Abhängigkeit der Hysteresis von der Temperatur durch eine Gerade hinreichend genau ausgedrückt wird.

Kreisprozesse mit Stahl für höhere Grenzwerte der Induktion.

Mit Patentiegelgußstahldraht wurden ebenfalls Kreisprozesse bei steigenden Temperaturen und höheren, in nachstehenden Tabellen angegebenen Induktionen vorgenommen. Die erste Horizontalreihe enthält wieder die Bezeichnung des Cyklus, die zweite die Temperatur, die dritte die entsprechenden Energieverluste in Erg.

Tabelle 45. a. $\mathfrak{B} = 7940$.

Bezeichnung.	A	B	C	C ₁	D	H
Temp. in ° C.	20	309	468	560	640	20
Erg.	36200	36300	17600	6720	4640	13650

Tabelle 46. b. $\mathfrak{B} = 12600$.

Bezeichnung.	A	B	C	C ₁	D	H
Temp. in ° C.	20	309	470	560	.	20
Erg.	69500	76800	49400	23800	.	28500

Tabelle 47. c. $\mathfrak{B} = 15000$.

Bezeichnung.	A	B	C	C ₁	D	H
Temp. in ° C.	20	309	470	560	.	20
Erg.	90400	99200	59400	26000	.	34500

In den (nicht beigegebenen) graphischen Darstellungen der Beobachtungsreihen zeigte besonders Fläche B (309° C) die für die Stahlproben charakteristische, eigentümliche, rhombische Form, die durchweg größeren Inhalt hatte, als die Fläche für den Cyklus bei gewöhnlicher Temperatur. Die Inhalte der Hysteresisflächen nahmen von dieser Temperatur an jedoch für höhere Temperaturen rasch ab und waren für die Kreisprozesse über 560° C bei den höheren Induktionen nicht mehr vergleichbar. Die nach dem Erkalten der Probedrähte mit ihnen vorgenommenen Kreisprozesse ergaben Schleifen (H), deren Inhalt bedeutend kleiner ist als der anfängliche, was wiederum auf den vollständigen Verlust der besonderen Eigenschaften des Stahles hindeutet.

Die graphische Darstellung der Energieverluste als Funktion der Temperatur erwies, daß der Charakter der Kurven für Stahl auch bei höheren Induktionen gewahrt bleibt: die Kurven zeigten ein für höhere Induktionen immer stärkeres Ansteigen bis etwa 300° C, dann steiles Abfallen und für Temperaturen über 600° C, falls überhaupt noch Kreisprozesse zwischen denselben Amplituden der Induktion ausführbar waren, weniger steilen, den Eisenkurven ähnlichen Verlauf.

Wiederholte Reihen von Kreisprozessen bei steigenden Temperaturen mit demselben Draht.

a. Puddelleisendraht.

Während bisher zu jeder Versuchsreihe ein neuer Probedraht verwendet worden war, wurde nunmehr auch mit einem und demselben Draht in wiederholten Reihen eine große Anzahl Kreisprozesse bei steigenden Temperaturen für die Maximalinduktion $\mathfrak{B} = 3590$ vorgenommen.

Bis zur vierten Reihe war eine fortgesetzte Abnahme der erhaltenen Hysteresisflächen zu bemerken; jede für eine bestimmte Temperatur gezeichnete Fläche war kleiner, als die entsprechende in der vorher ausgeführten Reihe. Von der vierten Reihe ab konnte dies für

weitere Beobachtungsreihen nicht mehr konstatiert werden; es ist also auch hier ein stationärer Zustand eingetreten.

Hieraus folgt, daß durch wiederholt mit demselben Material bei steigender Temperatur vorgenommene Kreisprozesse die pro Zyklus aufzuwendende Energie für irgend eine Temperatur des Materials verringert werden kann bis zu einer gewissen Grenze, von welcher ab für beliebig viele weitere Kreisprozesse bei veränderlichen Temperaturen keine weitere Abnahme des Energieaufwandes mehr eintritt. Bei steigender Temperatur erfolgt eine Abnahme der Hysteresisfläche nach wie vor; für eine und dieselbe Temperatur bleibt jedoch immer bei allen folgenden Kreisprozessen die Größe der Fläche dieselbe. Die am Schluß jeder weiteren Beobachtungsreihe mit den wiedererkalteten Probestücken durchlaufenen Cyklen ergaben immer dieselben Resultate wie die Beobachtung beim Beginn einer solchen Reihe.

Auch die aus diesen Beobachtungen erhaltenen Energieverluste sind als Funktionen der Temperatur dargestellt worden und bei allen zeigte sich, daß die Abhängigkeit der Hysteresis von der Temperatur durch eine Gerade ausgedrückt werden kann, deren Neigung gegen die Abscissenachse mit der Zahl der Wiederholungen der sämtlichen Cyklen bei steigender Temperatur fortwährend geringer wird, bis sie, sobald der erwähnte stationäre Zustand erreicht worden ist, dieselbe Neigung beibehält.

b. Patentiiegelgußstahldraht.

Dieselben Prozesse, wie sie soeben für Puddelleisen beschrieben worden sind, wurden auch für Patentiiegelgußstahldraht ausgeführt und zwar für die Maximalinduktion $\mathfrak{B} = 3450$. Die erste Beobachtungsreihe lieferte die Werte, wie sie die Tabellen 35—40 angeben. Schon die zweite Reihe zeigte, daß die Hysteresisflächen von Anfang an durch die ganze Reihe hindurch geringeren Inhalt hatten, als die entsprechenden der ersten Reihe; auch war die für Stahl charakteristische Eigentümlichkeit, daß Fläche B größer ist als A (Tab. 35 u. 36), hier nicht mehr zu finden. Dasselbe ist bei der dritten Reihe, verglichen mit der zweiten, und bei der vierten, verglichen mit der dritten, der Fall; in der fünften Reihe sind die Flächen im Vergleich zu den entsprechenden der ersten Reihe außerordentlich klein geworden, unter sich jedoch nicht mehr so sehr verschieden.

Von der fünften Reihe an konnte bei weiteren Beobachtungsreihen eine noch größere Abnahme der Hysteresisflächen für eine und dieselbe Temperatur nicht mehr gefunden werden; es war wie bei der Eisenprobe auch hier ein stationärer Zustand eingetreten. Der nach dem Wiedererkalten des Versuchsdrahtes vorgenommene Kreisprozeß der fünften und der weiteren Reihen lieferte eine Fläche, deren Größe sich zur Größe der allerersten Hysteresisfläche verhält wie 1 : 8,3.

Zu einem interessanten Ergebnis führte für den vorliegenden Fall die graphische Darstellung der Hysteresis als Funktion der Temperatur. Die Kurve, welche die Abhängigkeit der Hysteresis von der Temperatur ausdrückt, zeigte für die erste Reihe die gewöhnliche, dem Stahl eigentümliche Form, also eine gebrochene, erst aufsteigende, dann steil, dann weniger rasch abfallende Linie.

Die zweite Reihe lieferte eine gegen die Abscissenachse stark geneigte Gerade, zeigte also bereits die Form der Abhängigkeitskurve des weichen Eisens; für die dritte Reihe ist die Neigung der Geraden geringer, für die vierte desgleichen, und die fünfte Gerade läuft fast parallel mit der Abscissenachse. Der Stahl hat also bereits nach Vornahme der Kreisprozesse der ersten Reihe bei verschiedenen Temperaturen seine charakteristischen Eigenschaften verloren; er wird, wie dies die Kurven der folgenden Reihen beweisen, zu immer weicherem, kohlenstoffärmerem Eisen.

Für Puddelleisen wurden auch noch Versuche in der Weise vorgenommen, daß erst ein Zyklus bei gewöhnlicher Temperatur, dann sofort ein solcher bei der höchsten, noch geeigneten Temperatur (750°C), dann nochmals ein solcher wieder bei gewöhnlicher Temperatur durchlaufen wurde. Auch hier hat sich herausgestellt, daß die Hysteresisfläche bei hoher Temperatur nur etwa $\frac{1}{4}$ derjenigen bei gewöhnlicher Temperatur ausmacht, und daß die Fläche, welche die nach dem Wiedererkalten des Versuchsdrahtes bei einem Zyklus geleistete Magnetisierungsarbeit repräsentiert, ebenfalls kleiner ist als die erste; sie beträgt nur etwa $\frac{2}{3}$ derselben.

Nickel.

Mit Nickel wurden, wie schon erwähnt, für die maximale Induktion $\mathfrak{B} = 3590$ drei Reihen von Kreisprozessen durchlaufen. Die Ergebnisse (Mittelwerte) sind in folgenden Tabellen niedergelegt.

Tabelle 48. $\mathfrak{B} = 3590$.

Bezeichnung.	A	B	C	D
Temp. in $^{\circ}\text{C}$.	20	86	188	288
Erg.	11420	7960	6260	4700.

Auch bei diesem Material ist eine Abnahme der Hysterese mit steigender Temperatur wahrzunehmen; die Kurve der Abhängigkeit der Hysterese von der Temperatur zeigt erst ein rasches Fallen, dann geht sie allmählich in eine gegen die Abscissenachse geneigte Gerade über.

Wie aus den Tabellen und graphischen Darstellungen hervorgeht, nimmt die Hysterese, d. h. die von einem magnetischen Kreisprozeß verzehrte Magnetisierungsarbeit für weiches Eisen bei beliebiger Amplitude dieser Kreisprozesse mit steigender Temperatur ab. Für Stahl findet anfänglich eine geringe Zunahme, dann bei circa 300°C zunächst eine sehr rasche, später eine langsamere Abnahme der Hysterese statt. Für Nickel nimmt dagegen die Hysterese mit zunehmender Temperatur anfangs rasch, dann langsam ab.

Während sich nun für Stahl und Nickel einfache Beziehungen zwischen Hysterese und Temperatur nicht auffinden ließen, ergab sich für die untersuchten weichen Eisensorten, bei beliebigen Grenzwerten der Induktion, für die Abhängigkeit der Hysterese von der Temperatur die lineare Gleichung:

$$\mathfrak{H} = a - bt.$$

Die Konstanten dieser Gleichung sind für verschiedene Eisensorten verschieden; sie sind ferner abhängig von der gewählten maximalen Induktion.

Nach dem Erkalten der Probedrähte ist für einen magnetischen Kreisprozeß wieder ein größerer Energieaufwand nötig als für die Drähte im erhitzten Zustande; doch erreicht derselbe nicht mehr den nämlichen Wert, wie er anfangs, vor der Erhitzung des Materials, erforderlich war.

Durch fortgesetzt wiederholte Kreisprozesse in erhitztem Zustande der Probestücke läßt sich die für einen weiteren Kreisprozeß desselben Materials aufzuwendende Energie bedeutend reducieren.

Es scheint, daß dies auch erreicht werden kann, wenn bei sehr hoher Temperatur nur ein Kreisprozeß durchlaufen wird und man dann wieder Abkühlung eintreten läßt.

II. Ueber die Abhängigkeit der Magnetisierbarkeit des Eisens und Nickels von der Temperatur.

Seit langer Zeit weiß man, daß ein glühendes Stück Eisen von einem Magnet nicht angezogen wird, ebenso, daß der Magnetismus eines Magnets bei der Rotglut verschwindet. Schon GILBERT, 1600, erwähnt, daß Magnete im Feuer ihre Kraft verlieren, und nach ihm finden die erwähnten Thatsachen noch durch viele Beobachter ihre Bestätigung. Gleichwohl ist die Abhängigkeit der Magnetisierung von der Temperatur erst in der neuesten Zeit genauer erforscht worden. Die Ursache dafür dürfte einmal in der Schwierigkeit liegen, hohe Temperaturen längere

Zeit konstant zu halten und zu messen, dann darin, heiße und besonders glühende Metallstücke in geeigneter Weise magnetisierenden Kräften zu unterwerfen. Die ersten Beobachter, die den Zusammenhang zwischen Temperatur und Magnetismus zum Gegenstand ihrer Studien machten, arbeiteten denn auch mit verhältnismäßig niedrigen Temperaturen. Doch ist von ihnen meist die Größe der magnetisierenden Kräfte nicht in Rechnung gezogen worden oder wenigstens nicht aus den Veröffentlichungen zu entnehmen; deshalb sind die Angaben unvollständig und scheinen sich teilweise zu widersprechen.

Ueber die Versuche bis zum Jahre 1880 findet sich ein genauer Bericht in Wiedemanns Elektrizität, III. Bd., 1883.

Hervorzuheben sind die Untersuchungen von ROWLAND¹⁾, 1873—1874 und von C. BAUR²⁾ 1880. Nach dieser Zeit sind noch Versuche angestellt worden von TROWBRIDGE und Mc RAE³⁾, welche die Wirkung der Temperatur auf die magnetische Permeabilität des Eisens und Kobalts untersucht haben innerhalb der Grenzen 40° und 280° C. Die Versuche BERSONS⁴⁾ 1886 über das Verhalten von Eisen-, Stahl- und Nickelstäben in einem konstanten Feld erstrecken sich bis zu Temperaturen von etwa 340°, die vermittelt eines Paraffinbades erzeugt wurden. Für Nickel fand er die wichtigen Resultate, daß sowohl das totale wie das temporäre Moment mit der Temperatur wächst bis über 200° C, dann abnimmt und bei Temperaturen unterhalb 340° C verschwindet; das remanente Moment nimmt fortwährend ab und wird Null bei derselben Temperatur wie das totale.

Bei seiner Arbeit über den Zusammenhang zwischen Magnetisierbarkeit und elektrischem Leitungsvermögen hat W. KOHLRAUSCH⁵⁾ (1887) für verschiedene Eisensorten und Nickel die Magnetisierbarkeit eines durch hindurchfließenden Strom erhitzten Drahtes durch die Anziehung gemessen, welche ein in gleicher Höhe quer vor seiner Mitte aufgestellter Elektromagnet auf den Draht ausübte. Es ergab sich, daß die Magnetisierbarkeit im allgemeinen bei Rotglut verschwindet, daß sie aber nahe vor vollständigem Verschwinden sehr langsam abnimmt.

Im Jahre 1888 hat LEDEBOER⁶⁾ seine Arbeiten über den Einfluß der Temperatur auf die Magnetisierung des Eisens veröffentlicht. Er ermittelte die magnetischen Momente eines in einer Magnetisierungsspule befindlichen und erhitzten weichen Eisenstabes durch Messen des Selbstinduktionskoeffizienten der Spule. Der Stab wurde, wie schon Seite 7 erwähnt, durch eine um ihn gewickelte, stromdurchflossene Platinspirale erhitzt; zwischen Eisenstab und Platindraht war ein Thermolement geschoben, vermittelt dessen die Temperatur gemessen wurde; alle nötigen Isolationen bestanden aus Glimmerblättchen. LEDEBOER hat gefunden, daß die magnetische Permeabilität des weichen Eisens in den von ihm gewählten Feldern von 35, 100 und 200 (c, g, s) fast unabhängig war von der Temperatur bis gegen 680° C, wo eine plötzliche Aenderung eintritt und die Permeabilität auf einen kleinen Bruchteil des ursprünglichen Wertes herabging.

Die umfassendsten Versuche über das magnetische Verhalten von Eisen, Stahl, Nickel und Legierungen dieser Metalle bei hohen Temperaturen hat in neuester Zeit, 1889, J. HOPKINSON⁷⁾ angestellt und zwar auf zwei Arten.

Er untersuchte seine Metalle in Ringform, die er, wie schon erwähnt, in einem Gasofen erwärmte, nach der ballistischen Methode, einmal bei konstant gehaltener, magnetisierender Kraft und variabler Temperatur, das andere Mal bei konstanter Temperatur und veränderlicher magnetisierender Kraft. Es zeigte sich, daß die Magnetisierung des Eisens und Stahles für geringe magnetisierende Kräfte stetig zunimmt, wenn die Temperatur steigt; in der Nähe der

¹⁾ Phil. Mag., XLVI, p. 140 und XLVIII, p. 321, 1873 u. 1874.

²⁾ WIEDEM. Ann., XI, p. 394, 1880.

³⁾ Proceedings of the Am. Ac. of Arts and Sc., May 1885.

⁴⁾ La Lum. El., XXI, p. 361, 1886.

⁵⁾ WIEDEM. Ann., XXXIII, p. 42, 1888.

⁶⁾ La Lum. El., XXVII, p. 61, 1888.

⁷⁾ Trans. of the Roy. Soc., p. 443, 1889.

kritischen Temperatur — nach HOPKINSON jene Temperatur, bei welcher das Eisen unmagnetisch wird — wächst die Magnetisierung sehr rasch, um alsbald jäh abzufallen und fast ganz zu verschwinden. Für starke Kräfte nimmt dagegen bei zunehmender Temperatur die Magnetisierung ab. Ähnliches findet er für Nickel, nur vollzieht sich der Uebergang vom magnetischen zum unmagnetischen Zustand bei viel tieferen Temperaturen und allmählicher. Die kritischen Temperaturen fand HOPKINSON für verschiedene Eisen- und Stahlsorten zwischen 690 und 870°, für Nickel bei 310°.

1889 hat auch Du Bois¹⁾ seine besonders durch die Methode interessanten Versuche über die Magnetisierung in starken Feldern bei verschiedenen Temperaturen veröffentlicht. Er giebt zunächst an, daß die Magnetisierungskurve für Eisen und Stahl bei 0° über derjenigen bei 100° verläuft; dann zeigt er, daß in einem konstanten, starken Feld $H = 900$, in welchem die Magnetisierung von Eisen und Stahl als Funktion der Temperatur bis zu 300° bestimmt wird, eine Abnahme des Moments mit steigender Temperatur stattfindet, und daß die unter denselben Bedingungen erhaltene Nickelkurve weniger rasch abfällt als in schwächeren Feldern.

Resultate der Versuche.

Die Versuche über die Abhängigkeit der Magnetisierbarkeit von der Temperatur wurden mit den früher beschriebenen Materialien in Drahtform ausgeführt.

Magnetisierung, Erwärmung, Temperatur- und magnetische Messungen erfolgten ebenfalls, wie bereits angegeben. Die Probestücke wurden entmagnetisiert, der Einfluß der Vertikal-komponente des Erdmagnetismus kompensiert, und dann begannen die Beobachtungen in vier konstant gehaltenen, verschieden starken Feldern bei variabler Temperatur.

Es wurde mit niedrigen Temperaturen angefangen, die Stärke des Erwärmungsstromes allmählich gesteigert, und nachdem das Thermolement einige Zeit lang konstante Temperatur angezeigt hatte, die magnetische Beobachtung ausgeführt. Die Resultate, Mittel aus je drei Versuchsreihen, sind in folgenden Tabellen niedergelegt und wurden auch graphisch auf Millimeterpapier dargestellt, und zwar wurde nach dem Vorgange von HOPKINSON die Permeabilität als Funktion der Temperatur aufgezeichnet. Aus der großen Anzahl der erhaltenen Kurven, die alle ziemlich ähnlich verlaufen, wurden die für Puddeleisen beigegeben in Fig. 4, letzte Seite; die Temperaturen sind als Abscissen im Maßstabe 1 cm = 100° C, die entsprechenden Werte der Permeabilität als Ordinaten im Maßstabe 1 cm = 500 aufgetragen; die jeweiligen Feldintensitäten sind den Kurven beigegeben.

In den Tabellen enthält die erste Horizontalreihe die Temperaturen in Celsiusgraden, die zweite Reihe gibt die entsprechenden Werte der Permeabilität μ an.

I. Deutscher geglühter Holzkohleneisendraht.

Tabelle 49. $H = 1,16$.

Temp. in ° C:	20	141	218	320	406	484	564	580	585	610	665	678	690	722	800	900
μ :	208	279	434	542	697	975	1640	1700	1830	1390	620	465	310	93	3,5	1,08

Tabelle 50. $H = 3,03$.

Temp. in ° C:	20	100	218	320	406	484	531	564	592	628	642	690	754	786	800	900
μ :	450	528	792	940	1140	1340	1530	1630	1850	1830	1800	1530	990	198	49,5	1

Tabelle 51. $H = 30,0$.

Temp. in ° C:	20	100	218	320	484	564	642	722	754	786	800	818	850	880	910	942	950
μ :	590	590	580	570	565	550	514	406	366	310	275	236	176	139	90	60	1

¹⁾ Phil. Mag., April, p. 293, 1890.

Tabelle 52. $H = 136,0$.

Temp. in °C:	20	100	218	406	484	564	642	722	800	832	850	864	880	910	942
μ :	178	177	175	174	168	156	134	106	68	47	37	30	24	13	1

II. Schwedischer Eisendraht.Tabelle 53. $H = 1,16$.

Temp. in °C:	20	94	215	318	404	480	562	600	642	663	704	750	800	880	930
μ :	298	320	490	590	600	705	962	1380	2270	1320	300	112	82	25	1

Tabelle 54. $H = 3,04$.

Temp. in °C:	20	155	220	322	408	486	566	597	629	644	660	703	723	787
μ :	530	936	1230	1390	1580	1780	2120	2300	2470	2570	2520	2210	2020	642
					803	819	850	881	930					
					543	397	198	98	1					

Tabelle 55. $H = 30,0$.

Temp. in °C:	20	206	310	396	555	586	634	712	792	870	910	938
μ :	541	541	538	531	521	511	486	386	206	66	41	1

Tabelle 56. $H = 136,0$.

Temp. in °C:	20	100	222	320	404	484	644	718	800	850	900	930
μ :	190	190	190	185	180	170	150	142	51	24	12	1

III. Weicher Flußeisendraht.Tabelle 57. $H = 1,16$.

Temp. in °C:	20	100	218	320	406	519	564	580	592	678	722	754	800	860	900	961
μ :	155	201	325	511	805	1390	1700	1920	1530	800	557	526	400	290	198	1

Tabelle 58. $H = 3,04$.

Temp. in °C:	20	100	220	325	408	486	566	580	597	648	724	794	806	884	930
μ :	350	400	650	880	1110	1400	1803	1880	1910	1770	1100	302	250	100	1

Tabelle 59. $H = 30,0$.

Temp. in °C:	20	100	220	320	406	484	564	644	723	803	881	930
μ :	515	526	526	526	526	526	526	501	395	176	41	1

Tabelle 60. $H = 136,0$.

Temp. in °C:	20	100	218	320	406	484	564	642	722	800	880	910	930
μ :	189	193	193	193	193	189	170	158	135	73	43	39	1

IV. Puddeleisendraht. (Fig. 4, letzte Seite.)Tabelle 61. $H = 1,16$.

Temp. in °C:	20	100	216	318	404	484	564	587	640	724	800	900	960
μ :	300	315	398	450	597	910	2010	2592	1205	315	160	97	1

Tabelle 62. $H = 3,04$.

Temp. in ° C:	20	100	210	322	408	486	566	597	644	722	803	890	930
μ :	98	101	299	501	688	900	1288	1562	1510	1250	850	150	1

Tabelle 63. $H = 30,0$.

Temp. in ° C:	20	100	220	322	408	486	566	644	723	803	880	920
μ :	301	301	301	301	299	291	286	266	216	156	26	1

Tabelle 64. $H = 136,0$.

Temp. in ° C:	20	98	216	320	404	483	562	641	720	800	879	942
μ :	119	119	118	118	118	116	109	103	78	56	14	1

V. Harter Patentstahldraht.Tabelle 65. $H = 1,16$.

Temp. in ° C:	20	100	218	320	406	484	568	580	592	646	684	728	800	880
μ :	124	139	263	372	511	696	1300	1390	1240	464	150	93	48	1

Tabelle 66. $H = 3,03$.

Temp. in ° C:	20	220	410	482	580	642	684	720	800	860
μ :	348	600	952	1140	1480	1100	486	198	51	1

Tabelle 67. $H = 30,0$.

Temp. in ° C:	20	100	210	403	484	640	720	750	800	850	900
μ :	400	410	423	437	440	390	310	230	200	48	1

Tabelle 68. $H = 136,0$.

Temp. in ° C:	20	100	216	322	406	484	560	690	722	753	780	810	860
μ :	190	190	190	182	165	156	150	102	98	86	67	52	1

VI. Patenttiegelgußstahldraht.Tabelle 69. $H = 1,16$.

Temp. in ° C:	20	100	220	320	410	484	568	580	594	642	725	830
μ :	88	126	270	416	590	806	1342	1492	1276	772	48	1

Tabelle 70. $H = 4,00$.

Temp. in ° C:	20	214	402	482	561	580	597	642	722	800	900
μ :	362	644	983	1150	1590	1651	1603	1294	301	158	1

Tabelle 71. $H = 32,95$.

Temp. in ° C:	20	100	216	320	404	483	562	641	689	720	752	784	800	848	879	900
μ :	346	424	470	494	480	465	442	388	254	297	243	183	152	78	46	1

Tabelle 72. $H = 135,6$.

Temp. in ° C:	20	94	214	318	402	482	561	640	720	798	898	930
μ :	172	177	174	167	161	151	141	134	110	85	41	1

Nickeldraht.

Tabelle 73. $H = 1,16$.

Temp. in ° C:	20	96	152	190	220	260	281	300	318	340	350	360
μ :	186	270	392	550	651	586	500	398	312	100	45	1

Tabelle 74. $H = 3,0$.

Temp. in ° C:	20	100	150	216	260	284	300	318	340
μ :	294	350	398	500	452	370	300	218	20

Tabelle 75. $H = 30,0$.

Temp. in ° C:	20	100	152	216	258	318	340
μ :	440	470	480	480	400	204	25

Tabelle 76. Abhängigkeit des remanenten Magnetismus von der Temperatur.

Temp. in ° C:	20	94	148	214	256	318	335
\mathfrak{B} :	1600	1520	1400	1280	1120	640	0

Aus den Tabellen und Zeichnungen ergibt sich, daß im schwächsten Feld $H = 1,16$ bei allen Eisen und Stahlsorten übereinstimmend μ allmählich mit der Temperatur wächst, bei 580° (bei schwed. Eisendraht 640°) ein Maximum erreicht und nun mehr oder weniger steil und fast geradlinig abfällt in den meisten Fällen bis etwa 720° , von welcher Temperatur bis zum vollständigen Verschwinden des Magnetismus bei ca. 900° eine sehr langsame Abnahme stattfindet; letzteres hat auch KOHLRAUSCH angegeben.

Der größte Wert von μ (2270) beträgt z. B. bei schwed. Eisendraht fast das achtfache des Wertes bei gewöhnlicher Temperatur (298); bei 750° ist der Wert von μ auf 112, also 5% des Maximalwertes herabgegangen. Bei weichem Flußeisendraht vollzieht sich der Abfall der Kurve nicht so plötzlich; bei den Stahlsorten tritt dasselbe ein, und die Anfangs- wie die Maximalwerte von μ erreichen nicht die Höhe der Werte des Eisens.

Bei Nickel findet ein langsames Anwachsen der Permeabilitätskurven bis zur Temperatur 230° statt, wo die Kurve wendet und allmählich abfällt bis zu 340° ; hier verschwindet der Magnetismus.

Im Felde $H = 3$ steigt bei fast allen Eisen- und Stahlsorten die Permeabilität von höherem Anfangswert steiler an und erreicht ungefähr dasselbe Maximum wie bei der schwächeren magnetisierenden Kraft; dann wendet sich die Kurve bei denselben Temperaturen wie dort ($580-640^\circ$) und fällt statt geradlinig, konvex ab; der absteigende Ast ist sonach in diesem Felde bereits in die Form übergegangen, die sich in den stärkeren Feldern überhaupt zeigt. Bei 800° ist der Magnetismus auf ein sehr geringes Maß herabgesunken, bei 920 bis 930° absolut verschwunden.

Die Nickelkurve zeigt ein flaches Ansteigen zu einem kleineren Maximum bei 230° , dann ein allmähliches Abfallen bis 350° .

Im Feld $H = 30$ verläuft die wieder mit größerem Anfangswert beginnende Permeabilitätskurve horizontal (nur bei Flußeisen und bei den Stählen ist ein leichtes Ansteigen zu bemerken) bis gegen 600° , von wo ab ein konvexes Abfallen der Kurve eintritt bis zu $800-850^\circ$. Doch verschwinden auch hier die letzten Spuren von Magnetismus nur sehr allmählich; die Kurve wendet sich noch einmal und verläuft nach und nach bei $950-960^\circ$ in der Abscissenachse.

Für Nickel ist ein noch langsames Ansteigen bei ebenfalls größerem Anfangswert von μ wahrzunehmen; das Maximum wird bei 220° mit $\mu = 480$ erreicht und dann erfolgt das Abfallen bis zu 340° .

Im stärksten untersuchten Feld $H = 136$ beginnt die Permeabilitätskurve für Eisen und Stahl mit bedeutend kleinerem Anfangswert, verläuft wieder horizontal oder neigt sich gleich ein wenig bis gegen 600° , fällt dann stärker und wendet sich, wenn der Magnetismus fast vollständig verschwunden ist (bei 800°) noch einmal, um allmählich bei 930° mit der Abscissenachse zusammenzulaufen. Nickel wurde in diesem Felde nicht untersucht; es wurde dagegen das Verhalten des remanenten Magnetismus bei höheren Temperaturen betrachtet; die Tabelle zeigt, daß das remanente Moment gleich von vornherein abnimmt; von 250° an wird die Abnahme eine rapide bis zu 340° , wo der Magnetismus verschwunden ist.

Die Resultate meiner Untersuchungen über den Einfluß der Temperatur auf die Magnetisierbarkeit des Eisens, Stahls und Nickels stimmen, wie die Tabellen und graphischen Darstellungen ergeben, mit denen von HOPKINSON, BAUR, ROWLAND, LEDEBOER, BERSON und anderen überein. Das temporäre Moment und damit die Induktion und die Permeabilität von Eisen und Stahldrähten wachsen für geringe magnetisierende Kräfte mit steigender Temperatur und erreichen bei Rotglut ein Maximum, um dann plötzlich fast auf Null herabzusinken. Für stärkere Kräfte ergibt sich gleich eine allmähliche Abnahme des Moments, die bei den Temperaturen, bei welchen für schwächere Kräfte der Maximalwert eingetreten war, in ein rascheres Abfallen übergeht. Das vollständige Verschwinden des auf ein sehr geringes Maß zurückgegangenen Magnetismus tritt sehr langsam bei denselben Temperaturen ein, wie vorher bei Anwendung der schwächeren Kräfte. Das temporäre Moment des Nickeldrahtes wächst anfangs mit steigender Temperatur, hat (für die drei angewandten Feldstärken) bei ca. 240° C ein Maximum und verschwindet bei 340° C.

Das remanente Moment des Nickeldrahtes nimmt mit steigender Temperatur fortwährend ab und wird bei 340° C Null.

Ich fand jedoch, daß für die von mir untersuchten dünnen Drähte die Maximalwerte der Permeabilität μ bei tieferen Temperaturen eintraten, als sie HOPKINSON angibt, nämlich bei $580-640^{\circ}$, einer Temperatur, bei welcher, wie verschiedene außerhalb der Magnetisierungsschule vorgenommene Erwärmungsversuche ergaben, die Drähte in lebhafter Rotglut leuchteten. Dann konnte ich, wie schon erwähnt, in keinem Falle das absolute plötzliche Verschwinden des Magnetismus, also das scharfe, fast rechtwinkelige Einschneiden der Permeabilitätskurve in die Abscissenachse bei der kritischen Temperatur feststellen. Die Versuchsdrähte hatten allerdings bei dieser Temperatur ($700-800^{\circ}$ C) ihren Magnetismus fast verloren; allein ein kleiner Rest verblieb immer noch, der dann, wie auch BAUR und KOHLRAUSCH bemerken, nur sehr allmählich verschwand.

III. Die Abhängigkeit des elektrischen Leitungsvermögens des Eisens und des Nickels von der Temperatur.

Eingehende Versuche über den Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischem Leitungsvermögen magnetischer Metalle sind zuerst 1887 von W. KOHLRAUSCH angestellt und in der bereits angeführten Arbeit¹⁾ veröffentlicht worden. Er fand, daß der spezifische Leitungswiderstand von gewöhnlichem Eisen-, Gußstahl-, chemisch reinem Eisen- und Nickeldraht mit zunehmender Temperatur schneller als bei nicht magnetisierbaren Metallen wächst bis zu dem Wärmegrad, bei welchem die Magnetisierbarkeit verschwindet; von da ab nimmt der Widerstand, wie bei nicht magnetisierbaren Metallen, langsam mit der Temperatur zu; es besteht demnach ein Zusammenhang zwischen Magnetisierbarkeit und elektrischem Leitungsvermögen.

¹⁾ WIEDEM. Ann., XXXIII, p. 42, 1888.

Ueber den Einfluß der Temperatur auf den Leitungswiderstand von Nickel waren vorher Untersuchungen von KNOTT¹⁾ mit ähnlichen Resultaten ausgeführt worden. Wenig später als KOHLRAUSCH hat auch J. HOPKINSON²⁾ über diesen Gegenstand bei seinen magnetischen Arbeiten Versuche angestellt und ebenfalls mit KOHLRAUSCH übereinstimmende Resultate erhalten.

Es schien mir interessant, auch für die Drahtsorten, mit denen die seither beschriebenen Versuche ausgeführt worden waren, die Abhängigkeit des Leistungsvermögens von der Temperatur zu ermitteln.

Die Widerstände der Versuchsdrähte wurden nach der Gleichung

$$w = \frac{e}{i}$$

bestimmt durch Messung der Stärke eines durch den betreffenden Draht geschickten Stromes in amp und der Spannungsdifferenz in Volt an zwei, um 10 cm von den Enden, also 20 cm voneinander entfernten Stellen des 40 cm langen Drahtes.

An diese beiden Stellen, zwischen denen jedenfalls gleichmäßige Erwärmung vorhanden war, wurden sehr dünne Platindrähte hart angelötet, die nach einem zur Spannungsmessung dienenden HARTMANN und BRAUN'schen Spiegelgalvanometer führten, dem nach Bedürfnis Widerstände von 500 bis 30000 S. E. vorgeschaltet wurden. Das Galvanometer wurde mit einem als Normalinstrument dienenden WESTON-Voltmeter geaicht.

Die Erwärmung der Versuchsdrähte geschah innerhalb einer weiten Glasröhre in Wasserstoffatmosphäre wie früher vermittelt eines um die Probedrähte gewundenen stromdurchflossenen Platindrahtes; diesmal wurde jedoch der letztere direkt auf die mit Asbestpapier umkleideten Versuchsdrähte gewickelt, da ein Einschieben in die Porzellanröhre wegen der angelöteten Platindrähte nicht möglich gewesen wäre. Zwischen zwei Lagen Asbestpapier unter dem Erhitzungsdraht lagen die beiden zur Temperaturmessung bestimmten Thermolemente und zwar eines in der Mitte des Versuchsdrahtes, das andere nahe an einer der oben erwähnten Lötstellen; die Angaben beider Elemente stimmten jederzeit überein. Die Probedrähte waren mit dicken Neusilberdrähten verbunden, da Neusilber durch den Strom stärker erwärmt wird und die Wärme schlechter leitet; diese Drähte, der Erwärmungsplatindraht, die Platindrähte zur Spannungsmessung sowie die Thermolemente waren, sorgfältig isoliert, durch die die Enden der Glasröhre schließenden Korke nach außen geführt. Daß die Platinspule noch besonders mit Asbestpapier umwunden war, ist selbstverständlich.

Die Bewickelung der Probedrähte mit der Platinspirale war außerordentlich mühsam und zeitraubend; häufig zerrissen dabei trotz der größten Vorsicht die dünnen, angelöteten Platindrähte. Es wurde daher auch versucht, nach dem Vorgange von KOHLRAUSCH die Probedrähte direkt, vermittelt eines starken, durch sie geleiteten Stromes zu erwärmen, dessen Intensität durch Kurbelrheostaten reguliert und mit dem SIEMENS'schen Torsionsgalvanometer, im Nebenschluß zu 0,01 Ω (aus Konstantanblech), gemessen wurde. Aus dieser Stromstärke und der Spannungsdifferenz an den beiden Lötstellen wurde der Widerstand des Versuchsdrahtes berechnet; da die Resultate sich mit den beim andern Erwärmungsverfahren erhaltenen deckten, wurde nunmehr diese einfachere Erhitzungsmethode gewählt.

Die Resultate wurden wie früher auf Millimeterpapier dargestellt und zwar die Temperaturen als Abscissen im Maßstab 1 cm = 100°, die Widerstände in Ohm als Ordinaten für Eisen im Maßstabe 2 cm = 0,1 Ω , für Nickel 5 cm = 0,1 Ω .

Die erhaltenen Widerstandskurven, von denen in Fig. 5, letzte Seite, diejenige für Puddel-eisen, in Fig. 6 die für Nickel beigegeben ist, zeigen sämtlich ein rasches Ansteigen mit wachsender Temperatur, wie es auch HOPKINSON angibt, bis zu dem Temperaturgrad, bei welchem die Permeabilitätskurve sich wendet und der Magnetismus rasch abnimmt. Von

¹⁾ Trans. of Roy. Soc. Edinb., Jul. 1886.

²⁾ Trans of Roy. Soc. London, p. 443, 1889.

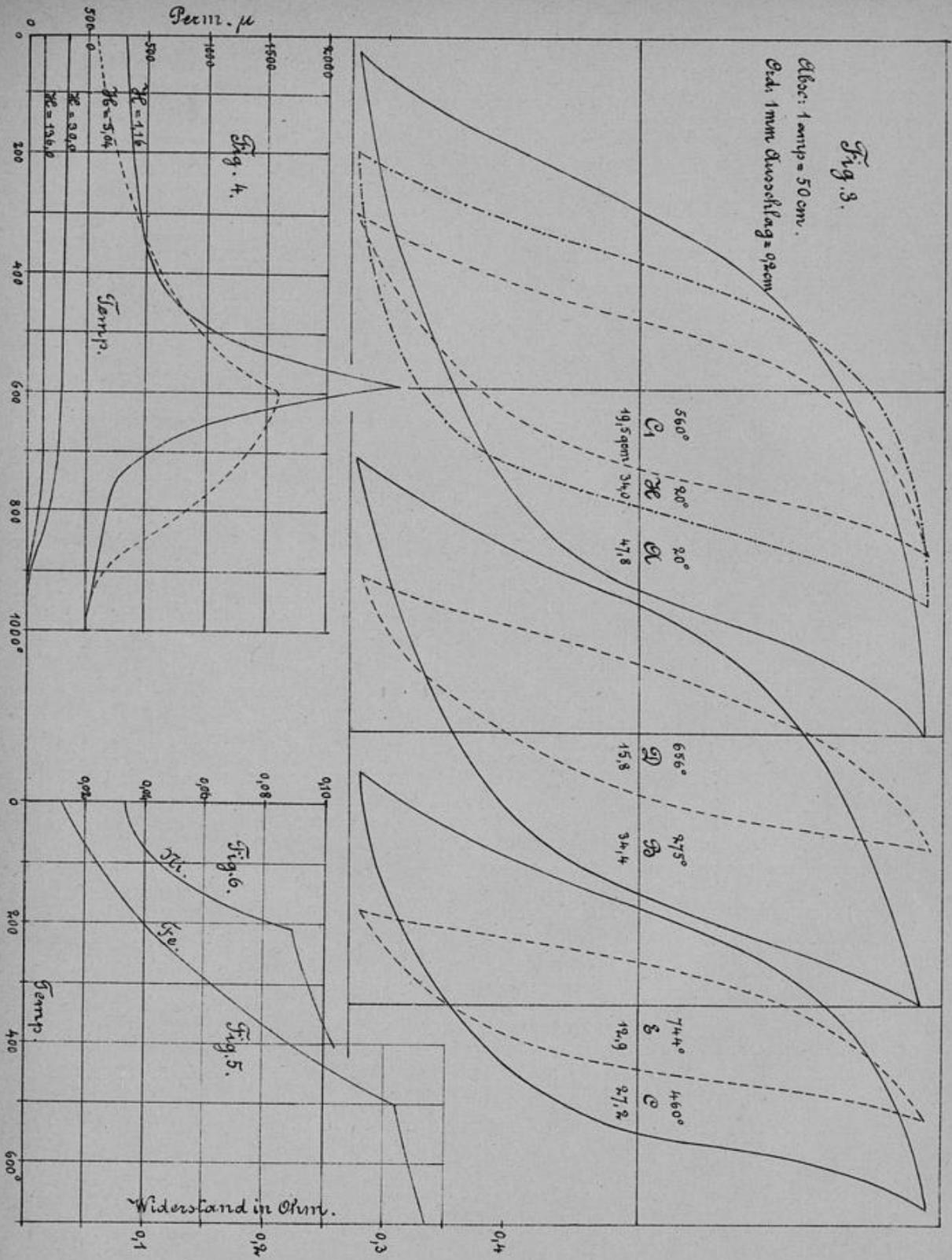
diesem Punkt an steigt die Widerstandskurve nach einem scharfen Knick ganz langsam und zeigt denselben Charakter wie bei nicht magnetisierbaren Metallen. Der Verlauf der Kurven für die verschiedenen Eisensorten und für Nickel ist, wie auch KOHLRAUSCH bemerkt, ein ganz gleichartiger, nur tritt bei Nickel die scharfe Wendung bereits bei viel tieferer Temperatur ein.

Es sei mir zum Schlusse gestattet, Herrn Geh. Hofrat Professor Dr. KITTLER, in dessen Laboratorium die Arbeit ausgeführt wurde, für die außerordentliche Freundlichkeit, mit welcher er mir sämtliche Apparate und Maschinen des Elektrotechnischen Instituts zur Verfügung stellte, meinen innigsten Dank auszusprechen.

Nicht minder gebührt mein Dank Herrn Professor Dr. HIMSTEDT in Gießen für viele wertvolle Ratschläge und besonders für die Anregung zum zweiten Teil der Arbeit.

Ebenso danke ich herzlich den Herren Assistenten des Elektrotechnischen Institutes Dr. WIRTZ und ROB. M. FRIESE für die mannigfache Unterstützung, die sie mir durch Rat und That zu teil werden ließen.

Den Herren FELTEN und GUILLEAUME in Mülheim (Rhein), der Direktion der Düsseldorfer Eisen- und Draht-Industrie in Düsseldorf-Oberbilk, sowie der Direktion des Nickelwalzwerks Schwerte in Westfalen bin ich für die freundliche Ueberlassung der Drahtproben gleichfalls zu bestem Dank verpflichtet.



diesem Punkt an... die Widerstandskurve nach einem...
 zeit den... Charakter... bei...
 für die...
 gleichmäßig...

Es... zum...
 Laboratorium...
 welche...
 führt...
 Zeit...
 wertvolle...
 Dr. W...
 That...
 den...
 davor...
 w...
 gleichfalls...



