

**5. Ueber magnetische Ungleichmässigkeit
und das Ausglühen von Eisen und Stahl ¹⁾;
von A. Ebeling und Erich Schmidt.**

(Mittheilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt Abth. II.)

Seit längerer Zeit sind in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt Versuche im Gange, welche vergleichende Bestimmungen über die verschiedenen Methoden zur Untersuchung magnetischer Materialien bezwecken. Hierbei traten bald verschiedene Schwierigkeiten auf, deren wichtigste die Ungleichmässigkeit der Materialien ist. ²⁾

Die Annahme, dass das technisch beste Eisen, welches schwedisches Schmiedeeisen, das homogenste und für magnetische Untersuchungen das geeignetste sei, bestätigte sich nicht. Eine bestimmte Sorte, die in einigen Stücken von hoher magnetischer Güte war, erwies sich in anderen unverhältnissmässig schlecht.

Es gab nun zwei Möglichkeiten, entweder das Material an sich war inhomogen, also für genaue Untersuchungen ungeeignet, oder die Behandlungsweise (es wurde so gut als möglich im offenen Holzkohlenfeuer ausgeglüht) war eine unzureichende.

In Bezug auf die chemischen und mechanischen Eigenschaften hat man Inhomogenität selbst in kleineren Stücken von Eisen nachgewiesen. ³⁾ Es liess sich also auch erwarten, dass sie magnetisch vorhanden seien. Aus der häufig gemachten Angabe, dass das Material gut ausgeglüht sei, darf man wohl

1) Auszug aus der Veröffentlichung in der Zeitschr. für Instrumentenkunde 16. p. 77—87. 1896.

2) Vgl. den Bericht über die Thätigkeit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in der Zeit vom 1. März 1894 bis 1. April 1895, Zeitschr. f. Instrumentenk. 15. p. 331. 1895.

3) R. Hennig, Wied. Ann. 27. p. 321. 1886; P. Gruner, Wied. Ann. 41. p. 334. 1890; H. Wedding, Zeitschr. d. Vereins deutscher Ingenieure 39. p. 1169. 1895.

schliessen, dass die Ansicht verbreitet ist, durch Ausglühen liessen sich diese Unregelmässigkeiten fortschaffen.

Theils um hierüber Aufschluss zu erhalten, theils um das brauchbarste Material zu finden, sind die folgenden Versuche angestellt worden, und zwar ist zunächst eine Reihe von Eisen- und Stahlstäben auf Gleichmässigkeit geprüft und dann untersucht worden, ob magnetisch inhomogene Materialien durch möglichst einwandfreies Ausglühen gleichmässig werden.

1. Prüfung der Gleichmässigkeit von Eisen- und Stahlstäben.

Zur Prüfung der magnetischen Gleichmässigkeit wurde ein Volljoch aus Stahlguss benutzt. Dasselbe hatte eine Länge von 18 cm, einen Querschnitt von 2×24 qcm und einen inneren Luftraum zur Aufnahme der Magnetisirungsspule von 10 cm Länge, 6 cm Höhe und 6 cm Breite. Die innere Bohrung der Magnetisirungsspule besass einen Durchmesser von 1,5 cm und enthielt in ihrer Mitte die kleine, 1,5 cm lange Inductionsspule, welche den Stab eng umschloss. Zur Herstellung des magnetischen Schlusses dienten geeignete Backen aus Schmiedeeisen.

In diesem Volljoch wurden nun cylindrische Stäbe von 33 cm Länge und 0,6 cm Durchmesser (die Wahl der Dimensionen ist eine willkürliche) auf Gleichmässigkeit geprüft, indem nacheinander verschiedene Stellen derselben eingespannt wurden. Bei den hier in Frage stehenden Versuchen wurden je drei Stellen geprüft, die Mitte und die beiden Enden der Stäbe; diese drei Stellen vertheilen sich ziemlich gleichmässig über die Länge der Stäbe. Alle drei Messreihen wurden dicht nacheinander angestellt, damit möglichst die gleichen Bedingungen für sie vorhanden waren. An jeder Stelle führte man die Hälfte eines cyklischen Magnetisierungsprocesses aus, indem man, ausgehend von der höchsten benutzten Intensität des magnetisirenden Stromes, stufenweise zu Null herunterging und nach Commutiren des Stromes wieder bis zur höchsten Stromstärke aufstieg. Man gelangte so zu der Beziehung zwischen der Induction \mathfrak{B} und der Feldintensität \mathfrak{H} , welche durch die in Fig. 1 schematisch dargestellte hysteretische Schleife geliefert wird. Beobachtet ist also jedesmal von der Schleife der Theil abc ; die zweite Hälfte cda ist fortgelassen, weil sie mit

der ersten fast genau übereinstimmte, wie mehrfache Versuche bestätigt haben. Es sind dann die Werthe negativer Induction ($-\mathfrak{B}$) als positive Werthe in die Curven eingetragen, indem auch die zugehörigen Werthe von \mathfrak{H} positiv genommen sind, d. h. also, es ist die halbe Fläche $abef$ a gezeichnet worden.

Die Wiederholung einer Bestimmung ergab im allgemeinen genau dasselbe Resultat; unwesentliche Abweichungen kamen jedoch zuweilen vor.

Zur Construction der Curven hat man die Werthe der Feldintensität \mathfrak{H} und der stufenweisen Aenderung $\Delta\mathfrak{B}$ der Induction zu berechnen, welch' letztere durch die Aenderung des erregenden Stromes hervorgerufen wird und dem Ausschlag des ballistischen Galvanometers proportional ist.

Die Feldintensität \mathfrak{H} für die Mitte der Spule ist gegeben durch die Gleichung

$$\mathfrak{H} = 4 \pi n i \frac{1}{\sqrt{1 + 4 \frac{r^2}{l^2}}},$$

wo n die Windungszahl der magnetisirenden Spule pro Centimeter, l die Länge ihres Wicklungsraumes, r den mittleren Radius der Spule und i die Intensität des magnetisirenden Stromes bedeutet. Ferner ist

$$\Delta\mathfrak{B} = \frac{b w \alpha}{n_1 s}.$$

Hierin bedeutet w den Gesamtwiderstand des secundären Kreises, n_1 die Windungszahl der secundären Spule, s den Querschnitt des Eisenstabes, b den Werth der Constante des ballistischen Galvanometers und α den Ausschlag des Galvanometers, auf Bogenwerthe reducirt.

Durch Summirung der einzelnen $\Delta\mathfrak{B}$ gewinnt man die Werthe der Induction \mathfrak{B} selber. Alle Daten wurden in absoluten Werthen des electromagnetischen C. G. S.-Systems ausgedrückt. Da es sich hier nur um relative Werthe handelt, soll nicht näher auf die Bestimmung der einzelnen Grössen

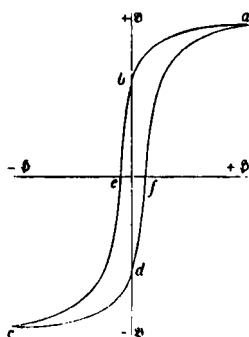


Fig. 1.

Ein vollkommener magnetischer Schluss ist wegen der Backen, die den Stab einklemmen, nicht zu erreichen; es war deshalb zu untersuchen, ob die aus dem Joch hervorragenden Enden der Stäbe die Messungen beeinflussten. Dass dies nicht der Fall war, wurde auf zwei Arten nachgewiesen.

1. Man schob eine Secundärspule über das aus dem Joch hervorragende Ende des Stabes und commutirte dann den Erregerstrom bei maximaler Stromstärke, d. h. man nahm die grösstmöglichen magnetischen Aenderungen im Innern des Joches vor; im Galvanometer, in dessen Kreis die Inductionsspule lag, zeigte sich dabei *keine* Ablenkung.

2. Ein Stab aus weichem schwedischen Schmiedeeisen von 28 cm Länge wurde nach und nach auf 18 cm verkürzt, sodass er schliesslich gerade in das Joch passte. In seiner ursprünglichen Länge und nach jeder Verkürzung wurde der Stab an ein und derselben Stelle, und zwar in der Mitte, geprüft. Die Curven, die bei den Längen 28, 23 und 18 cm erhalten sind, wobei der Stab möglichst genau an dieselbe Stelle gebracht wurde, stimmten vollkommen miteinander überein.

2. Resultat der Prüfung der magnetischen Gleichmässigkeit.

Eine grössere Anzahl von Stäben, theils ungeglüht, theils im offenen Holzkohlenfeuer geglüht, aus Schmiedeeisen, Walzeisen, Stahl, Gusseisen und Stahlguss wurden in der angegebenen Weise auf Gleichmässigkeit geprüft. Dabei fand man eine Reihe von Stäben, die verhältnissmässig wenig ungleichartig waren, andere zeigten bedeutende Unregelmässigkeiten. Die geringsten Verschiedenheiten zeigte das gegossene Eisen.

Von allen bisher untersuchten Stäben hat sich jedoch erst ein einziger, und zwar ein solcher aus Stahlguss, soweit die benutzte Untersuchungsmethode diesen Schluss gestattet, als merklich gleichmässig erwiesen.

Als Beispiel seien in Fig. 2 für einen Stab aus bestem weichen schwedischen Schmiedeeisen die an den drei verschiedenen Stellen gewonnenen Inductionsschleifen wiedergegeben; dabei entsprechen die ausgezogenen, gestrichelten und strichpunktirten Curven je einer der drei Stellen. Dieser Stab ist aus demselben Material hergestellt, das eingangs erwähnt wurde;

er ist der ungleichmässigste, der im Verlaufe dieser Untersuchungen aufgefunden ist. Weiter unten sind in Fig. 3—6 noch einige weitere Beispiele gegeben; jedoch sind dort nur für je zwei Stellen des Stabes die Curven gezeichnet.

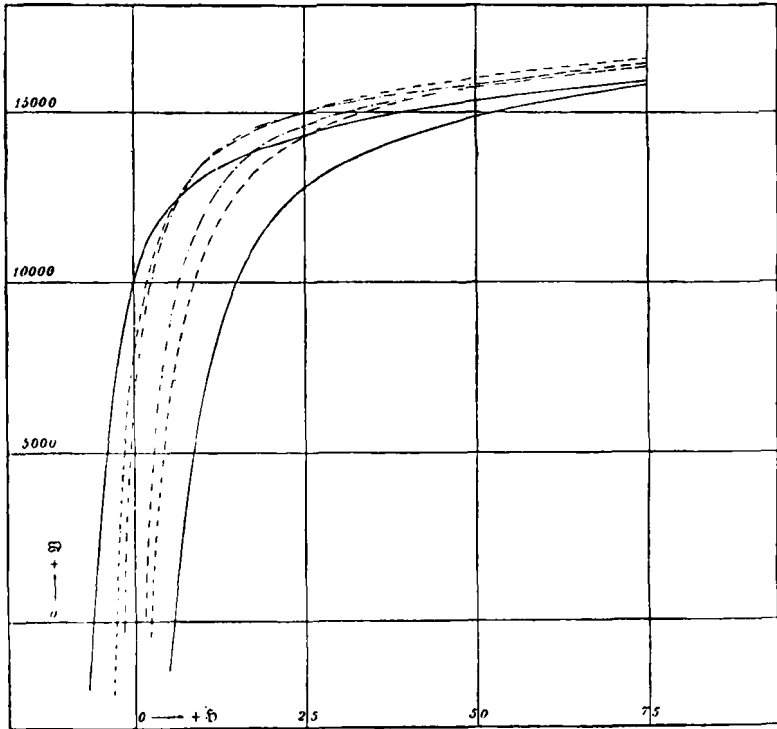


Fig. 2.

3. Ausglühen von Stäben.

Nachdem nachgewiesen war, dass fast alle Eisenstäbe magnetisch inhomogen waren, blieb zu untersuchen, ob diese Ungleichmässigkeiten durch irgend ein Ausglühverfahren entfernt werden können.

Es ist allgemein bekannt, dass Eisen durch Ausglühen magnetisch besser oder „weicher“ wird. Dies zeigt sich darin, dass der Energieumsatz durch Hysteresis, der dem Flächeninhalt der Inductionsschleife proportional ist, durch Ausglühen kleiner wird; in der Hauptsache liegt dies daran, dass der Werth der Coercitivkraft ein geringerer wird. Auch ändert

sich sowohl der Maximalwerth der Permeabilität, wie die Gestalt der Permeabilitätscurve, indem der Anstieg und Abfall der Inductionscurven für die niedrigen Werthe der Feldintensität ein steilerer wird.

Naturgemäss wird die Art des Ausglühens von Einfluss sein; man wird also ein magnetisch homogenes Material durch schlechtes Ausglühen auch verschlechtern können. Ein magnetisch recht gleichmässiger Stab aus Stahlguss, welcher so ausgeglüht wurde, dass das eine Ende auf ca. 1000° C. gehalten wurde, während das andere Ende gar nicht zum Glühen kam, zeigte jedenfalls nach dem Versuch sehr starke Unterschiede in den Curven.

Für den vorliegenden Zweck musste man mithin beim Ausglühen alle Theile der Stäbe gleichen Temperaturen aussetzen. Dazu bedurfte man eines Ofens mit gleichmässiger Temperaturvertheilung von genügender Dauer und mit langsamem Temperaturabfall.

Die ersten Versuche sind mit einem Gasofen angestellt, der demjenigen ähnlich war, welcher bei den pyrometrischen Arbeiten von Holborn und Wien in der Reichsanstalt benutzt wurde¹⁾. Eingehende Versuche, an denen sich Hr. Diesselhorst betheiligte, zeigten, dass ein solcher Ofen, was Gleichmässigkeit der Temperaturverhältnisse betrifft, bei geeignetem Bau sehr wohl verwendbar wäre. Nach einer allgemeinen Annahme ist es aber nothwendig, das Material der hohen Temperatur lange Zeit hindurch auszusetzen, und dies war mit dem genannten Ofen nur unter Aufwand von sehr grosser Mühe zu erreichen. Ausserdem war eine langsame, gleichmässige Abkühlung mit Schwierigkeiten verbunden.

Um unter nach jeder Richtung geeigneten Bedingungen arbeiten zu können, wandte man sich an die Kgl. Porzellan-Manufactur mit der Bitte, in einem der dortigen grossen Oefen einige Stäbe ausglühen zu dürfen. Die Erlaubniss hierzu wurde auf das bereitwilligste gewährt, wofür Hrn. Director Dr. Heinecke auch an dieser Stelle der Dank ausgesprochen sei; den Hrn. Dr. Pukall und Marquardt sei für die freundliche Unterstützung bei den Versuchen ebenfalls bestens gedankt.

1) Holborn u. Wien, Zeitschr. f. Instrumentenk. 12. p. 257, 296. 1892; Wied. Ann. 47. p. 107. 1892.

Das Ausglühen der Stäbe geschah bei den endgültigen Versuchen in folgender Weise: In der mittleren der drei übereinander liegenden Kammern eines cylindrischen Ofens von fast 4 m innerem Durchmesser war ein einseitig geschlossenes Porzellanrohr von 150 cm Länge und etwa 1,5 cm lichter Weite horizontal so eingelegt, dass das offene Ende eben noch frei nach aussen ragte. Es war von einem Thonrohr umgeben, welches auf zwei Stössen von Chamottekapseln auflag, die zur Aufnahme der Porzellangegegenstände dienen. Das Thonrohr wurde beim Vermauern der Ofenöffnung mit eingemauert. In dem Porzellanrohr, nahe am geschlossenen Ende, also tief im Ofen, lag der auszuglühende Stab; derselbe lag flach im Rohre.

Um das Zuströmen frischer Luft abzuschwächen, wurde das Porzellanrohr durch einen Kork lose verschlossen; zur weiteren Beschränkung der oxydirenden Wirkung der Luft wurde vor den Stab ein beliebiges Stück Eisen in das Rohr gelegt, von jenem durch ein Thonrohr getrennt. Es wurde erreicht, dass die Oxydschichten der ausgeglühten Stäbe weniger als 0,01 mm betragen.

4. Temperaturverlauf und Temperaturvertheilung im Ofen der Königlichen Porzellan-Manufactur.

Um über die Temperaturverhältnisse des Ofens Aufschluss zu erhalten, benutzte man die von Holborn und Wien in der Reichsanstalt ausgearbeitete Methode der Messung hoher Temperaturen.¹⁾ Von dem Le Chatelier'schen Thermoelement, bestehend aus Platin und einer Legirung von Platin mit 10 Proc. Rhodium, befand sich der eine Draht im Innern eines 124 cm langen, capillaren Porzellanrohrs, die Rückleitung lag frei in dem umhüllenden Rohr, in dem sonst die Stäbe geglüht wurden. Die Löthstelle $Pt/PtRh$ war an das innere Ende des Capillarrohres gebracht und liess sich mit diesem verschieben.

Die durch die Zuleitungen bedingten Contactstellen Pt/Cu und $PtRh/Cu$ befanden sich bei diesem Versuche in einem Wasserbade, durch U-förmige Glasröhren gegen Wasser isolirt. Die Temperatur des Wassers blieb während des Versuchs, der über 50 Stunden dauerte, bis auf wenige Grade constant und betrug im Mittel 25° C. Auf diese Temperatur wurde

1) Holborn u. Wien, Wied. Ann. 56. p. 395. 1895.

die Nulllage des Messinstrumentes eingestellt. Dasselbe war ein d'Arsonval-Galvanometer der Firma Keiser & Schmidt in Berlin, das von Holborn und Wien als Pyrometer geeignet ist.¹⁾ Dasselbe gestattet direct die Temperatur der Contactstelle $Pt/PtRh$ abzulesen.

Der *Temperaturverlauf* im Ofen war derart, dass die höchste beobachtete Temperatur von rund 1000° C. etwa 28 Stunden, nachdem der Ofen angefeuert war, erreicht wurde; die Beobachtungen wurden etwa 12 Stunden nach dem Anfeuern mit ca. 270° C. begonnen. Solange noch gefeuert wurde, kamen Schwankungen der Temperatur vor, welche durch das Aufschütten von Kohle und durch Abrosten hervorgerufen wurden. Während der übrigen ca. 36 Stunden nahm die Temperatur langsam und gleichmässig ab.

Die *Temperaturvertheilung* im Ofen wurde dadurch bestimmt, dass die Löthstelle $Pt/PtRh$ in dem Porzellanrohr verschoben wurde.

Während des Anstieges der Temperatur begann der Raum von gleichmässiger Temperatur bei etwa 40 cm Abstand von der inneren Ofenwand, während der Abkühlung waren schon von 20 cm ab keine Temperaturunterschiede in dem Porzellanrohr nachzuweisen. Da die auszuglühenden Stäbe in einem Abstand von etwa 70—110 cm lagen (der Durchmesser des Ofens betrug, wie bereits angegeben ist, fast 4 m), so befanden sich mithin alle Theile derselben während des Glühens auf durchaus gleichmässiger Temperatur.

5. Ergebniss der Glühversuche.

In dem Ofen der Kgl. Porzellan-Manufactur sind vier verschiedene Typen von Eisensorten in der angegebenen Weise ausgeglüht worden, und zwar congruente Stäbe von 33 cm Länge und 0,6 cm Durchmesser:

1. aus schwedischem Schmiedeeisen,
2. „ Walzeisen,
3. „ Wolframstahl,
4. „ Stahlguss.

Von jedem Stabe kamen, wie in Abschnitt 1 beschrieben, drei Strecken von je 10 cm zur Untersuchung.

1) Holborn u. Wien, Wied. Ann. 56. p. 395. 1895.

Die Resultate sind in den Fig. 3—6 zusammengestellt, und zwar geben die Fig. 3a—6a die Inductionsschleifen vor dem Glühen, Fig. 3b—6b dieselben nach dem Glühen, nachdem die Oxydschicht von den Stäben mit Schmirgelpapier vorsichtig abgerieben worden war. In den Fig. a und b entsprechen jedesmal die gleichgezeichneten Curven gleichen Stellen des Stabes. Der Uebersichtlichkeit wegen sind jedesmal von den drei beobachteten Curven nur zwei, und zwar die am stärksten differirenden, gezeichnet.

Auch mit der Oxydschicht wurden die ausgeglühten Stäbe geprüft. Dabei war nur der schmiedeeiserne Stab gerade zu richten, und zwar um etwa 3 mm auf seine Länge von 33 cm. Das Richten geschah durch Biegen mit der Hand. Die Curven sind nicht mitgetheilt; dieselben weichen nur unwesentlich von den Curven b ab. Bemerkenswerthes über dieselben wird bei den einzelnen Stäben besprochen werden.

Beim Entfernen der Oxydschicht wurden auch bei den anderen Stäben die ganz geringfügigen Durchbiegungen entfernt. Der schmiedeeiserne und der Stahlstab waren vor dem Abdrehen im offenen Holzkohlenfeuer geglüht, die beiden anderen Stäbe sind so, wie das Material eingeliefert war, zum Abdrehen benutzt.

In allen vier Fällen wurde das Material, wie man erwartet hatte, weicher; am wenigsten geändert hat sich das Walzeisen. Hinsichtlich der erreichten Gleichmässigkeit ist Folgendes zu bemerken.

1. Der schmiedeeiserne Stab ist nach dem Glühen magnetisch fast ebenso inhomogen als vorher (vgl. Fig. 3a und 3b).¹⁾

2. Der Stab aus Walzeisen war bereits vor dem Glühen ziemlich gleichmässig (vgl. Fig. 4a); ein etwas weniger regelmässiger Stab aus dem gleichen Material war leider verunglückt. Die mit dem ersteren gewonnenen Resultate sind deshalb weniger ausgeprägt. Vollkommene Gleichmässigkeit ist auch in Fig. 4b nicht vorhanden.

1) Dass dieses Resultat durch das Biegen des Stabes nicht beeinflusst ist, wurde inzwischen durch ein nochmaliges Ausglühen des Stabes nachgewiesen, wobei derselbe gerade blieb. Die in Fig. 3b angegebenen Unregelmässigkeiten sind erhalten geblieben, nur ist der Stab noch weicher geworden.

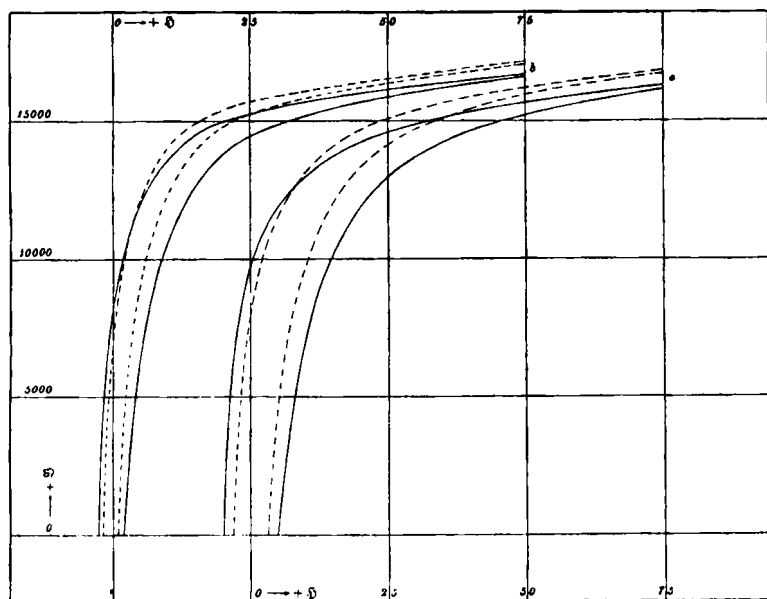


Fig. 3a, b. Schmiedeeisen.

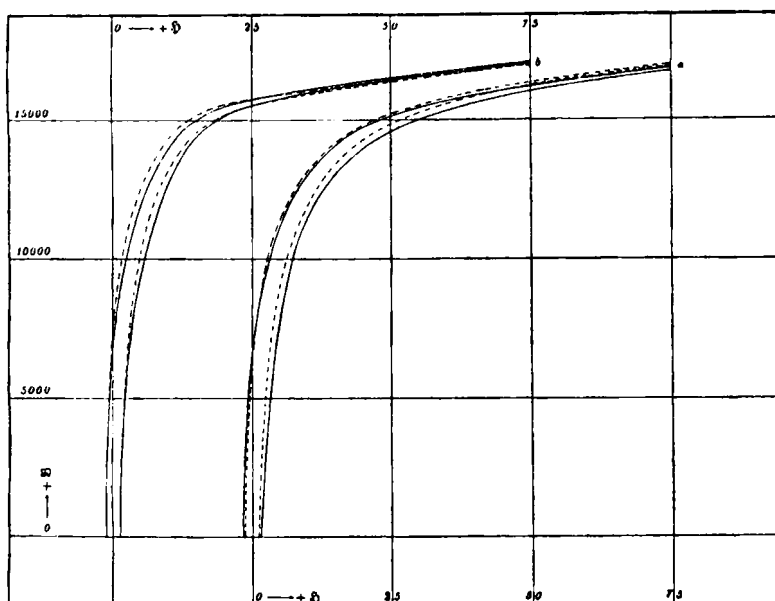


Fig. 4a, b. Walzeisen.

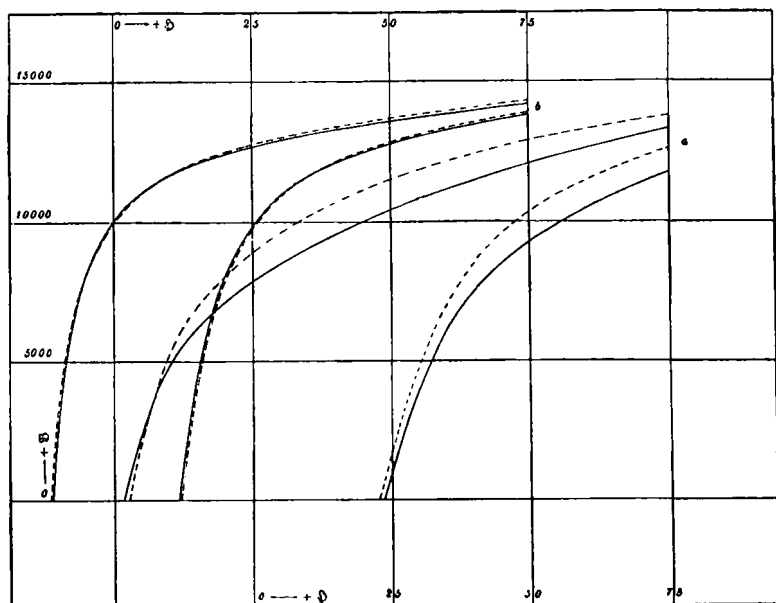


Fig. 5 a, b. Wolframstahl.

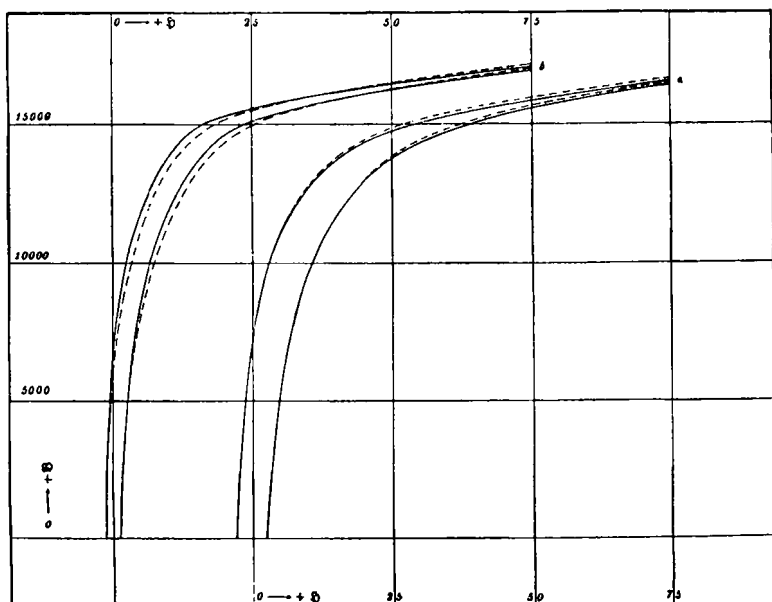


Fig. 6 a, b. Stahlguss.

3. Der Stahlstab ist durch das Ausglühen bedeutend besser geworden (vgl. Fig. 5a und b).

4. Der Stab aus Stahlguss war auch vor dem Glühen schon recht gleichmässig, ein weniger regelmässiger stand nicht zur Verfügung. Es kam hier hauptsächlich darauf an, zu untersuchen, in welcher Weise das Ausglühen auf dieses Material wirkt. Es ist schon vorher erwähnt worden, dass dasselbe durch Glühen bedeutend weicher geworden ist. Die Curven in Fig. 6b differiren stärker untereinander, als man gemäss Fig. 6a erwarten sollte; eine Controllbeobachtung an allen drei Stellen bestätigte jedoch durchaus dieses Resultat. Die hier nicht mitgetheilten, mit dem oxydirten Stab gewonnenen Curven stimmten sehr gut überein, sodass man annehmen muss, dass auf diesen Stab auch schon die geringfügige mechanische Bearbeitung des Richtens und Abschmirelins ungünstig eingewirkt hat.

Das Resultat der Glühversuche lässt sich etwa dahin zusammenfassen: Ausglühen von Eisen kann, wenn es wirklich gleichmässig geschieht, zuweilen vortheilhaft sein, wenn man ein gleichmässiges Material gewinnen will; dies zeigt der Stab aus Wolframstahl. Durch ungleichmässiges Glühen wird man das Material jedoch verschlechtern. Andererseits kann man nicht etwa jedes Material durch Glühen magnetisch homogen machen, wie dies in deutlicher Weise der schmiedeeiserne Stab zeigt. Ob in einem solchen Fall die magnetische Inhomogenität mit einer Unregelmässigkeit in der chemischen Zusammensetzung identisch ist, soll untersucht werden, nachdem einige weitere beabsichtigte Versuche mit den Stäben angestellt sind.

Nach dem Ergebniss der Versuche kann man die folgenden Sätze aufstellen:

1. Gleichmässiges Material liefert am wahrscheinlichsten ein sorgfältig überwachter Guss.

2. Gleichmässiges Ausglühen von Eisen ist in jedem Falle vortheilhaft.

3. Ungleichheiten im geschmiedeten Eisen konnten bei den angestellten Versuchen durch Ausglühen nicht beseitigt werden.
