

Abhandlungen.

Directe Messung der Magnetisirungsarbeit.

Von

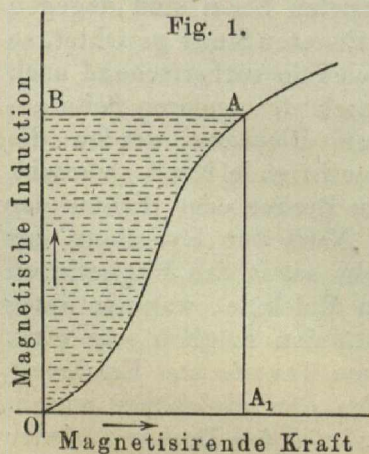
Prof. W. Peukert.

Vortrag, gehalten im Verein für Naturwissenschaften zu
Braunschweig am 2. December 1897.

Aus der von W. Weber mathematisch durchgeführten Theorie drehbarer Molekularmagnete, welche sich in neuerer Zeit immer mehr Eingang verschafft hat, folgt mit Nothwendigkeit, dass zu der Magnetisirung einer Eisenmasse eine gewisse Arbeit erforderlich ist, die durch die magnetisirende Kraft geleistet werden muss. Diese Hypothese setzt voraus, dass die kleinsten Theilchen eines Magneten von vornherein schon Magnete sind, dass also jedes Eisen- oder Stahlmolekül schon magnetische Polarität besitzt. Man muss dann annehmen, dass beim unmagnetischen Eisen die Molekularmagnete ganz unregelmässig gelagert sind, so dass es keine magnetische Fernwirkung äussern kann; denn wo immer z. B. ein Nordpol eines magnetischen Moleküls eine magnetische Fernwirkung äussert, wird diese durch die gleiche und entgegengesetzte eines unmittelbar daneben gelagerten Südpoles eines anderen Moleküls aufgehoben. Im magnetisirten Eisen sind dagegen die Molekularmagnete in einem bestimmten Sinne gerichtet, so dass die Nordpole der einzelnen Moleküle vorherrschend nach der einen, die Südpole dagegen nach der anderen Seite zugekehrt sind. In diese bestimmte Richtung werden die Elementarmagnete durch die magnetisirende Kraft gebracht, deren Wirkung somit nur in einem Drehen oder Richten der magnetischen Theilchen besteht. Nach der Hypothese der drehbaren Molekularmagnete besteht somit das Magnetisiren in einem Drehen der magnetischen Moleküle, was nur unter Ueberwindung von Reibungswiderständen möglich sein wird, die angenommen werden müssen, um Theorie und Erfahrung in Einklang zu bringen. Zwischen den Molekülen wirken Kräfte, welche dieselben nach einer erfolgten Drehung wieder

in ihre frühere Lage zurückzuführen suchen. Je nach der Grösse der Reibungswiderstände werden die Molekularmagnete in Folge ihrer Wechselwirkung mehr oder weniger in ihre ursprüngliche Gleichgewichtslage zurückkehren, sobald die magnetisirende Kraft aufhört zu wirken. Aus dem magnetischen Verhalten des Eisens und des Stahles müssen wir annehmen, dass beim Eisen die Reibungswiderstände geringer wie bei Stahl sind, da ersteres leichter sich magnetisiren lässt als Stahl, dafür aber auch den erlangten Magnetismus fast vollständig verliert, sobald die magnetisirende Kraft nicht mehr wirkt; Stahl zeigt dagegen eine schwere Magnetisirbarkeit, dafür behält er aber einen bedeutenden Theil des einmal erlangten Magnetismus zurück. Die sogenannte Coërcitivkraft, welche einerseits dem Magnetisiren, andererseits aber auch dem Aufhören des magnetischen Zustandes entgegenwirken sollte, erscheint im Sinne dieser Hypothese als molekulare Reibung, und diese wird bei Stahl grösser sein müssen wie bei Eisen. Es ist ferner leicht einzusehen, dass alle Umstände, welche die Beweglichkeit der Moleküle unterstützen, das Magnetisiren bezw. das Entmagnetisiren fördern werden. Eine Berechnung der Magnetisirungsarbeit nach absolutem Maasse ward erst durch ein von Stefan¹⁾ aufgestelltes Theorem ermöglicht, nach welchem die specifische Wärme des magnetisirten Eisens grösser ist als die des unmagnetischen.

Die wichtigen magnetischen Untersuchungen von Warburg und Ewing gestatten in einfacher Weise die einer endlichen Zustandsänderung entsprechende Magnetisirungsarbeit zu berechnen, sobald die Magnetisierungscurve der betreffenden Eisensorte bekannt ist. Stellt, wie üblich, die durch einen Versuch ermittelte Magnetisierungscurve die Beziehung dar

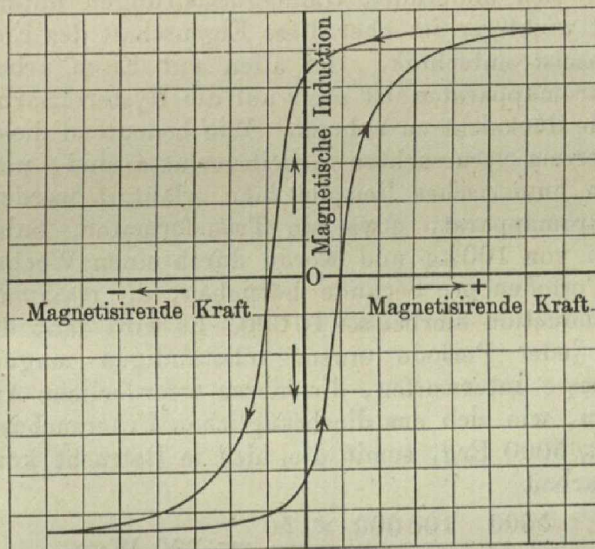


zwischen der magnetischen Induction (Kraftlinienzahl pro Quadratcentimeter Eisenquerschnitt) und der magnetisirenden Kraft, so giebt die in Fig. 1 schraffierte Fläche direct ein Maass der Magnetisirungsarbeit, die aufgewandt werden muss, um 1 cm^3 Eisen bis zur Induction B zu magnetisiren. Die im Eisen durch eine bestimmte magnetisirende Kraft erzeugte

¹⁾ Stefan, Ueber die Gesetze der elektrodynamischen Induction. Wiener akad. Berichte, Bd. 64, S. 28.

magnetische Induction hängt aber wesentlich ab von der vorhergegangenen Magnetisirung. Im Allgemeinen erhält man bei abnehmender magnetisirender Kraft höhere Werthe der Induction wie bei aufsteigender Magnetisirung, so dass die Aenderungen des Magnetismus gegenüber den Aenderungen der magnetisirenden Kraft zurückbleiben, diese Erscheinung wird als magnetische Hysteresis bezeichnet. Denkt man sich nun das Eisen so magnetisirt, dass die magnetisirende Kraft von Null bis zu einem Maximalwerthe wächst, dann wieder bis Null abnimmt, hierauf im entgegengesetzten Sinne wächst bis zu dem gleichen Maximum und dann wieder Null wird, so bilden die während eines solchen Magnetisirungsvorganges ermittelten Magnetisirungscurven eine Schleife (Fig. 2,

Fig. 2.



Hysteresisschleife), deren interessante physikalische Bedeutung zuerst von Warburg erkannt wurde. Die zur Ausführung eines solchen magnetischen Kreisprocesses erforderliche Arbeit wird nämlich durch den Flächeninhalt der Schleife gemessen, und zwar ist dieser dividirt durch 4π direct gleich der Arbeit in Erz, die aufgewendet werden muss, um 1 ccm Eisen dem genannten Kreisprocesse zu unterwerfen. Diese Hysteresisarbeit wird zunächst abhängig sein von der betreffenden Eisensorte, dann aber auch von den Grenzwerten der magnetischen Induction, zwischen welchen der Kreisprocess ausgeführt wird. Nach einer von Steinmetz empirisch aufgestellten

Formel lässt sich diese Arbeit berechnen; bezeichnet man dieselbe mit η , so ist nach dieser Formel

$$\eta = \alpha \cdot B^{1.6} \text{ Erg,}$$

wobei α eine Materialconstante ist (für weiches Schmiedeeisen 0,002, für Gusseisen 0,0162, für Werkzeugstahl 0,0094 u. s. w.) und B die maximale magnetische Induction. η ist dann die Magnetisirungsarbeit in Erg pro 1 ccm Eisen. Die Hysteresisarbeit hat nun insofern eine ganz besondere Wichtigkeit, als sehr häufig das bei elektrotechnischen Apparaten verwendete Eisen derartigen magnetischen Kreisprocessen dauernd ausgesetzt ist und es nothwendig wird, die dadurch bedingten Arbeitsverluste möglichst zu reduciren, somit Eisen von möglichst geringer Hysteresis zu verwenden. So wird das Ankerisen jeder Gleichstrommaschine während des Betriebes solchen periodisch sich ändernden Ummagnetisirungen unterworfen; noch viel wichtiger ist aber diese Eigenschaft des Eisens für die Wechselstromtechnik. Bei allen mit Eisen arbeitenden Wechselstromapparaten ist stets auf die Hysteresisarbeit entsprechende Rücksicht zu nehmen. Wie bedeutend diese durch die Hysteresis verursachten Arbeitsverluste sind, mag noch durch ein numerisches Beispiel hier erläutert werden. Ein Wechselstromapparat, etwa ein Transformator, habe einen Eisenkern von 100 kg und werde durch einen Wechselstrom von 50 Perioden pro Secunde betrieben, die maximale magnetische Induction hierbei sei 10 000. Es wird dann das Eisen während jeder Periode einem vollständigen magnetischen Kreisprocesse unterworfen, die hierzu erforderliche Arbeit ist pro 1 ccm, wie sich aus diesbezüglichen Untersuchungen ergeben hat, 5000 Erg, somit die hier in Betracht kommende Gesamtarbeit

$$\frac{5000}{5,78} \cdot \frac{100\,000 \times 50}{10^7} = 320 \text{ Watt.}$$

als secundlicher Arbeitsverlust.

Bei der Bedeutung nun, welche nach dem Gesagten die magnetische Hysteresis des Eisens für die Wechselstromtechnik besitzt, ist das Bedürfniss nach Methoden und Apparaten erklärlich, welche eine möglichst directe Messung der Hysteresis in einfachster Weise gestatten. Wenn auch solche Apparate nicht jene Genauigkeit gewähren wie die sonst üblichen Messungen mit dem ballistischen Galvanometer, so werden sie doch in vielen Fällen der Praxis sich als vollständig verwendbar erweisen, da es oft wünschenswerth ist, verschiedene Eisenproben bezüglich ihres magnetischen Verhaltens mit ein-

ander vergleichen zu können nach einer Methode, die wenig umständlich und zeitraubend ist.

Einen einfachen Apparat zur Bestimmung der Hysterisis des Eisens hat schon 1889 El. Thomson ¹⁾ angegeben. Das Eisen wurde im magnetischen Felde bewegt und die dabei verbrauchte Arbeit gemessen oder es wurde das zu untersuchende Eisen als Anker eines kleinen Motors bewickelt und auf diese Weise der hysteretische Verlust bestimmt. Ein anderer demselben Zwecke dienender Apparat ist der von Holden ²⁾ (1892). Das zu untersuchende Eisen wurde in Ringscheiben gestanzt und ein Ring von etwa 4,5 cm Höhe aufgebaut. Dieser Ring wurde in den Polzwischenraum eines Elektromagneten gebracht, der um die Ringaxe gedreht werden konnte; bei der Drehung übte er ein Moment auf das Ringeisen aus, das mittelst einer Feder gemessen wurde. Später hat Ewing ³⁾ einen interessanten Apparat angegeben, welcher ebenfalls mit Hilfe magneto-mechanischer Bewegungsantriebe bei ausserordentlich einfacher Handhabung eine unmittelbare Messung der Hysterisisarbeit in Eisenproben gestattet. Bei dem grossen Interesse, das dieser Ewing'sche Apparat besitzt, der nicht nur für praktische Zwecke sehr geeignet erscheint, sondern auch einen sehr brauchbaren Laboratoriums- und Vorlesungsapparat bildet, liess ich einen solchen in etwas modificirter Form in der Instituts-Werkstätte ausführen und möchte hier eine kurze Mittheilung über einige Versuche mit demselben machen. Bei dem in Fig. 3 (a. f. S.) in $\frac{1}{6}$ der natürlichen Grösse dargestellten Apparate wurde ein Stahlmagnet *M* verwendet, der um eine horizontale auf Schneiden ruhenden Axe drehbar ist. Mit dem Magneten ist ein leichter Zeiger *z* verbunden, der auf einer Scala *ss* spielt. Zwischen die Pole des Magneten werden die genau abgepassten Blechproben in einer durch Kurbel drehbaren Schwungradvorrichtung, wie aus der Figur ersichtlich, gelagert. Der zur Aufnahme der Blechproben dienende Support *a* ist aus Vulcanfiber hergestellt und besitzt eine der Breite der Bleche entsprechende Nuthe, in welche diese eingelegt und durch darüber gespannte Gummibänder festgehalten werden. Die Magnetaxe ist noch mit einem Metallflügel versehen, der in ein mit Oel oder Glycerin gefülltes Gefäss *g* taucht, wodurch die Bewegungen des Magneten stark gedämpft werden und eine sichere Zeigereinstellung er-

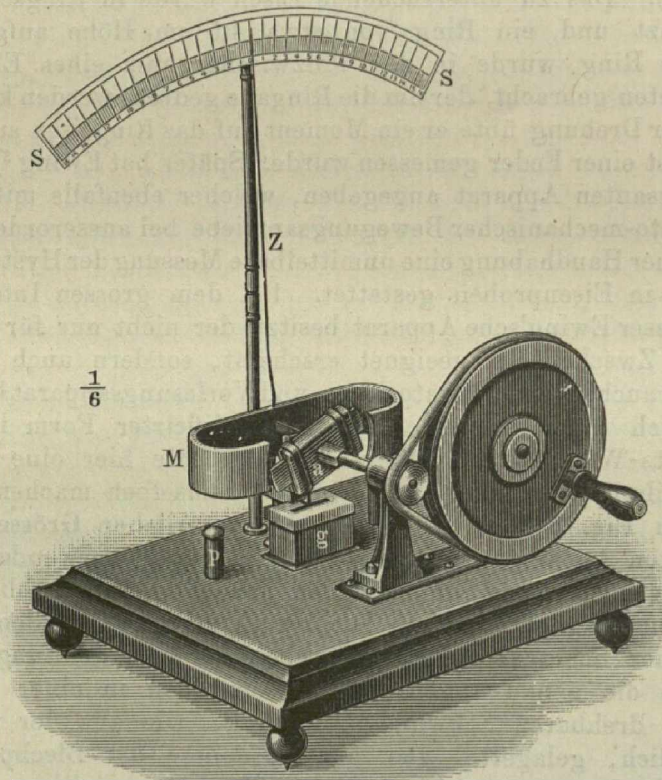
¹⁾ El. World, Bd. 25, S. 652.

²⁾ El. World, Bd. 25, S. 687.

³⁾ El. Rev., Bd. 36, S. 596. — Elektrotechn. Zeitschr. 1895, S. 292.

möglichst wird. Zwei Gummi-Puffer p begrenzen die anfänglich auftretenden starken Schwingungen des Magneten. Die zwischen den Polen befindliche Blechprobe bildet den magnetischen Schluss für den Stahlmagneten und es wird bei einer Rotation derselben eine periodische Ummagnetisierung stattfinden, welche zur Folge hat, dass auf den Stahlmagneten ein der Hysteresisarbeit proportionales Drehmoment im Sinne der Drehrichtung ausgeübt wird, so dass dieser mit-

Fig. 3.



genommen wird. Den Winkel, um welchen der Magnet dabei gedreht wird, zeigt der damit verbundene Zeiger auf der Scala an. Der Ausschlag erfolgt je nach der Drehrichtung nach der einen oder nach der anderen Seite und ist unabhängig von der Rotationsgeschwindigkeit der Blechprobe, so bald diese ein gewisses Maass überschreitet. Bei zu geringen Geschwindigkeiten nimmt der Magnet keine bestimmte Gleichgewichtslage ein, sondern schwingt hin und her, so dass eine genauere Zeigerablesung nicht möglich ist. Bei zu grossen Drehgeschwindigkeiten können die in der zu untersuchenden

Probe inducirten Wirbelströme die Angaben des Apparates ungünstig beeinflussen. Dass bei mittleren Geschwindigkeiten die Wirbelströme ohne Einfluss sind, kann man leicht nachweisen, wenn man in den Apparat eine Probe aus einem magnetisch indifferenten Material einspannt, etwa Kupferblechstreifen; der Magnet bleibt auch bei bedeutenden Drehgeschwindigkeiten in der ursprünglichen Gleichgewichtslage und der Zeiger spielt dauernd auf den Nullpunkt der Scala ein. Die zu untersuchenden Proben wurden in dünnen Blechstreifen von 80 mm Länge und 18 mm Breite verwendet. Der mit dem Apparate erzielte Ausschlag hängt im Allgemeinen ab von der Zahl der eingespannten Probestreifen, und wurde am grössten bei Verwendung von drei Streifen und blieb dann bei weiterer Vermehrung der Streifen praktisch constant. Das zeigte sich bei Proben von Schmiedeeisen, Gusseisen und Stahl. Mit einander gut vergleichbare Resultate bei den einzelnen Materialien erhielt ich aber bei Verwendung von nur je eines Probebleches, vielleicht war die ungleiche Dicke der verschiedenen Proben hierbei von Einfluss. Bei Benutzung des Apparates muss derselbe so aufgestellt sein, dass der Magnet in einer zum magnetischen Meridiane senkrechten Ebene schwingt, da nur in diesem Falle die Ausschläge nach beiden Seiten nahezu gleich sind, das arithmetische Mittel aus beiden kann dann als resultirender Ausschlag entsprechend der betreffenden Probe angesehen werden.

Um den Apparat zu aichen, wurden zunächst Versuche ausgeführt mit Proben von Schmiedeeisen und Stahl. Das erstere Probeblech von den Abmessungen $0,64 \times 18 \times 80$ mm ergab als mittleren Ausschlag 20; die Stahlprobe ($0,54 \times 18 \times 80$ mm) einen Ausschlag 47. Für beide Proben wurde mit dem ballistischen Galvanometer nach der Schlussjochmethode der Hysteresiscoefficient ermittelt, indem für beide die Hysteresisschleife bestimmt, diese ausplanimetriert und so nach der oben erwähnten Formel von Steinmetz die Berechnung dieses Coefficienten vorgenommen wurde; für Schmiedeeisen war dieser 0,0064, für die untersuchte Stahlprobe 0,0182. Die magnetische Induction in den Blechproben, während sie in dem Apparate sich befanden, wurde gleichfalls mit dem ballistischen Galvanometer ermittelt, zu welchem Zwecke die Blechstreifen mit einer aus 100 Windungen bestehenden Drahtwicklung versehen wurden. Die Induction im Schmiedeeisen wurde so zu 9330, die in der Stahlprobe zu 8400 bestimmt. Die Hysteresisarbeiten in diesen Proben liessen sich nun ohne Weiteres berechnen nach der bekannten Formel von

Steinmetz. Sie war bei Schmiedeeisen 14 360 Erg, bei Stahl 34 640 Erg. Diese Werthe müssen nach den Versuchen von Ewing mit seinem Apparate den Ausschlägen proportional sein, was in der That auch nahezu zutrifft, da das Verhältniss der Ausschläge $\frac{47}{20} = 2,35$, das Verhältniss der Hysteresisarbeiten $\frac{34460}{14360} = 2,39$ ist.

Man kann nun ohne Weiteres die Hysteresisarbeiten für andere Eisenproben bestimmen und zwar erhält man hierfür in einfacher und bequemer Weise nicht nur relative Werthe, sondern absolute Werthe. Wenn auch auf diese Weise naturgemäss nicht die Bestimmung mit der Genauigkeit geschieht, wie dies bei der ballistischen Methode möglich ist, so ist diese Methode wenig zeitraubend und liefert Resultate, welche für viele Zwecke brauchbar sein werden, insbesondere gestattet sie eine sehr bequeme und mit wenig Zeitaufwand ausführbare Vergleichung verschiedener Eisenproben bezüglich ihrer magnetischen Eigenschaften.

Der Apparat gestattet auch in einfacher Weise eine Bestimmung des Hysteresiscoefficienten; zu diesem Zwecke ist ausser der Ermittlung der Hysteresisarbeit noch die Bestimmung der magnetischen Induction in der Probe erforderlich, die durch einen Versuch mit dem ballistischen Galvanometer leicht vorgenommen werden kann. So wurde z. B. für eine Probe aus Gusseisen, welche die Abmessungen $1,67 \times 18 \times 80$ mm hatte, mit dem Apparate in der früher beschriebenen Weise die Hysteresisarbeit bestimmt und dafür die Zahl 23 335 gefunden, die Ablesung am Apparate war 32,5; die Induction ergab sich zu 3630. Aus diesen Werthen berechnet sich der Hysteresiscoefficient nach der Beziehung

$$\alpha = \frac{23\,335}{3630^{1.6}} = 0,0475.$$

Der analoge Versuch wurde mit einem Nickelblech gemacht, die Abmessungen desselben waren $3,1 \times 18 \times 80$ mm. Die Hysteresisarbeit war dem Ausschlage 17,5 am Apparate entsprechend 12 565 Erg. Die Induction betrug 1610. Da nach den Versuchen von Kenelly und Steinmetz auch für Nickel der hysteretische Verlust nach derselben Formel wie bei Eisen bestimmt werden kann, so ist der Hysteresiscoefficient für die untersuchte Probe

$$\alpha = \frac{12\,565}{1610^{1.6}} = 0,0935.$$

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Jahresbericht des Vereins für Naturwissenschaft zu Braunschweig](#)

Jahr/Year: 1897-1899

Band/Volume: [11_1897-1899](#)

Autor(en)/Author(s): Peukert Wilhelm

Artikel/Article: [Abhandlungen: Directe Messung der Magnetisirungsarbeit 223-230](#)