X. Magnetische Eigenschaften.

A. Allgemeine Grundbegriffe.

383. Nimmt eine Magnetnadel an einem Orte des Raums eine bestimmte Richtung an, in die sie nach Ablenkung durch äußere Kräfte zurückkehrt, sobald die Wirkung dieser Kräfte aufhört, so sagt man: die Nadel befindet sich in einem magnetischen Kraftfeld. Die Richtung, in die sie sich einstellt, ist die Kraftrichtung des magnetischen Feldes an dem betreffenden Ort.

Über die ganze Erde erstreckt sich das Kraftfeld des Erdmagnetismus. Man kann magnetische Kraftfelder auch künstlich erzeugen. Sie treten z. B. auf in der Umgebung von Magneten, oder in der Umgebung eines vom elektrischen Strom durchflossenen Leiters.

Zwei magnetisierte dünne Stäbchen wirken so aufeinander ein, daß sich die gleichnamigen Pole (Nord- und Norpol oder Süd- und Südpol) gegenseitig abstoßen, während sich die ungleichnamigen Pole anziehen. Bei dünnen Stäbchen ist die Kraftäußerung so, als ob die wirksamen Kräfte von zwei Punkten in der Nähe der Enden der Stäbchen ausgingen. Man kann sich deswegen vorstellen, daß in diesen Punkten, den Polen, der Sitz des Magnetismus wäre, und daß in ihnen eine bestimmte Menge Magnetismus angehäuft sei, und zwar um so mehr, je stärker die Magnetisierung der Stäbchen, also je größer die gegenseitige Anziehung oder Abstoßung der Pole der beiden Stäbchen ist. Die Menge des $+$-Magnetismus am Nordpol eines der Stäbchen hat man sich dann gleich der Menge des $-$-Magnetismus am entgegengesetzten Pol, dem Südpol, vorzustellen. Nach Coulombs Feststellungen ist die Kraft, mit der sich der Nordpol des einen und der des anderen Stäbchens abstoßen,

$$\text{Kraft} = \text{Konst.}\,\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

wenn m_1 die im Nordpol des Stäbchens 1 angehäuft gedachte Menge $+$-Magnetismus, und m_2 die im Nordpol des Stäbchens 2 angehäuft gedachte Menge $+$-Magnetismus, r den Abstand der beiden Pole voneinander bedeutet.

Wählt man die Konstante gleich 1, so erhält man als Begriffserklärung der Einheit der Magnetismusmenge m diejenige, die eine ihr gleiche im Abstand 1 cm mit der Kraft von einer Dyne[1]) abstößt.

Man nennt m_1 und m_2 auch die Polstärken der beiden magnetischen Stäbchen.

Da nach der obigen Begriffserklärung

$$\frac{m \cdot m}{r^2} = \text{Kraft und somit } m = r\sqrt{\text{Kraft}} \text{ ist,}$$

---

[1]) Eine Dyne ist die Kraft, die der Masse 1 g die Beschleunigung 1 cm/sek^2 erteilt.

so ergeben sich die Abmessungen von m

$$\mathrm{Dim}\,(m) = \text{Länge} \times \sqrt{\text{Kraft}}.$$

Da die Abmessungen der Kraft im Zentimeter-Gramm-Sekunden-Maß (CGS) gleich $\dfrac{\text{Gramm} \times \text{Zentimeter}}{(\text{Sekunden})^2} = \mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}\cdot\mathrm{sek}^{-2}$, so ergibt sich

$$\mathrm{Dim}\,(m) = \mathrm{cm}\cdot\mathrm{g}^{1/2}\cdot\mathrm{cm}^{1/2}\cdot\mathrm{sek}^{-1} = \mathrm{g}^{1/2}\cdot\mathrm{cm}^{3/2}\cdot\mathrm{sek}^{-1}.$$

Wir hatten oben gesehen, daß die Richtung des magnetischen Feldes in einem Punkte durch die Richtung gegeben ist, die ein dünnes Magnetstäbchen in diesem Punkte annimmt. Es handelt sich nun auch noch darum, ein Maß für die Stärke des Feldes zu erhalten. Zu diesem Zwecke denkt man sich in dem betreffenden Punkte einen Magnetpol von der Polstärke 1 angebracht.

Ein magnetisches Feld hat dann die Feldstärke 1, wenn es auf diesen Einheitspol die Anziehungs- oder Abstoßungskraft 1 Dyne ausübt.

Ein magnetisches Feld von der Stärke $\mathfrak{H}$ übt somit auf einen Pol von der Polstärke m die Kraft $F = \mathfrak{H}\cdot m$ aus; folglich ist

$\mathfrak{H} = \dfrac{F}{m} = \dfrac{\text{Kraft}}{\text{Polstärke}}$. Daraus ergeben sich die Abmessungen:

$$\mathrm{Dim}\,(\mathfrak{H}) = \frac{\mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}\cdot\mathrm{sek}^{-2}}{\mathrm{g}^{1/2}\cdot\mathrm{cm}^{3/2}\cdot\mathrm{sek}^{-1}} = \mathrm{g}^{1/2}\cdot\mathrm{cm}^{-1/2}\cdot\mathrm{sek}^{-1}.\text{[1]}$$

Eine vom elektrischen Strom i durchflossene Drahtspirale (Spule oder Solenoid) mit n Windungen auf der Länge l gibt in ihrem Innern in der Richtung ihrer Achse eine Feldstärke $\mathfrak{H}$, die in genügender Entfernung von den Enden der Spirale durch die Gleichung ausgedrückt wird:

$$\mathfrak{H} = \frac{4\pi\cdot n}{l}\cdot i \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Hierin ist die Stromstärke i in CGS, wobei 1 Amp. $= {}^1/_{10}$ CGS ist, und l in cm auszudrücken.

Man denkt sich ein magnetisches Feld veranschaulicht durch ein System von Linien, den Kraftlinien, deren Richtung in jedem Punkte mit der Kraftrichtung des Feldes zusammenfällt, und die so dicht gelegt sind, daß ein Querschnitt von 1 qcm senkrecht zur Kraftlinienrichtung von $\nu = \mathfrak{H}$ Kraftlinien durchsetzt wird. Die Zahl ν nennt man die Dichte der Kraftlinien. Sie ist gleich dem Zahlenwert der Feldstärke.

Man nennt das Feld gleichförmig, wenn die Kraftlinien an jeder Stelle gleiche Richtung und gleiche Dichte haben, also parallel sind und gleichweit voneinander abstehen.

Das Feld des Erdmagnetismus kann man innerhalb eines kleinen abgegrenzten Raumes als angenähert gleichförmig betrachten. In seiner gesamten Erstreckung ist dieses Feld natürlich nicht gleichförmig, da ja die Kraftlinien an den Polen zusammenlaufen, also nicht gleichgerichtet sind.

Das in einer stromdurchflossenen Drahtspule erzeugte Feld ist in genügender Entfernung von den Spulenenden nahezu gleichförmig.

384. Wird ein Körper in ein magnetisches Feld $\mathfrak{H}$ eingebracht, so wird in ihm im allgemeinen magnetische Kraft und Polarisation hervorgerufen, d. h. es bildet sich in ihm ein Nord- und ein Südpol von gleicher Stärke, aber von entgegengesetztem Vorzeichen aus. Man sagt, es wird Magnetismus induziert. Dies

[1]) Man nennt die Einheit der Feldstärke auch 1 Gauß.

macht sich dadurch geltend, daß sich die Kraftliniendichte innerhalb des Körpers ändert. Die Zahl der gesamten, einen Quatratzentimeter des Körpers senkrecht durchsetzenden Kraftlinien (Induktions- oder Magnetisierungslinien) sei $\mathfrak{B}$. Dann besteht die Beziehung

$$\mathfrak{B} = \mu \cdot \mathfrak{H} \quad \text{(2)}$$

Die Zahl μ gibt an, um wieviel dichter die Kraftlinien innerhalb des induzierten Körpers laufen, als in der umgebenden Luft, für die μ gleich 1 ist. (Streng genommen müßte μ für Luftleere gleich 1 gesetzt werden.) Man nennt $\mathfrak{B}$ die magnetische Induktion.

Die Zahl μ heißt magnetische Durchlässigkeit, öfter Permeabilität, auch zuweilen Koeffizient der magnetischen Induktion, oder magnetische Leitfähigkeit. Für die weitaus größte Zahl der Stoffe liegt die Zahl μ in der Nähe von 1. Ist μ kleiner als 1, z. B. beim Wismut, so nennt man den Stoff diamagnetisch. Es verlaufen dann in ihm weniger Kraftlinien als im äußeren Luftfelde. Stoffe, deren magnetische Durchlässigkeit größer als 1 ist, nennt man paramagnetisch. In ihnen ist die Kraftliniendichte größer als im magnetischen Feld der umgebenden Luft.

Für alle Stoffe, deren magnetische Durchlässigkeit μ in der Nähe von 1 liegt, ist μ eine nur von der Natur des Körpers abhängige Konstante und ist unabhängig von der Feldstärke $\mathfrak{H}$.

Es gibt aber noch eine dritte Klasse von Stoffen, deren magnetische Durchlässigkeit sehr groß ist. Für diese ist μ keine Stoffkonstante, sondern stark mit der Feldstärke $\mathfrak{H}$ veränderlich. Man nennt solche Stoffe ferromagnetisch. Hierher gehören Eisen, Nickel, Kobalt, Magnetit.

Bis vor kurzem waren nur das Eisen, seine Legierungen und einige seiner Verbindungen, sowie die dem Eisen verwandten Stoffe Nickel und Kobalt als ferromagnetische Stoffe bekannt. Heusler ($L_8\,1$) machte im Jahre 1904 die überraschende Entdeckung, daß durch Legieren nichtferromagnetischer Metalle miteinander ferromagnetische Stoffe entstehen können. So sind z. B. gewisse Legierungen von Mangan und Zinn, von Mangan und Aluminium, von Mangan, Aluminium und Kupfer, von Mangan, Zinn und Kupfer ziemlich kräftig ferromagnetisch. Man nennt diese Legierungen Heuslersche Legierungen.

Stäbchen aus diamagnetischen Stoffen suchen sich in einem magnetischen Felde mit der Längsrichtung senkrecht zu den Kraftlinien des Feldes einzustellen. Stäbchen aus para- und ferromagnetischen Stoffen suchen sich dagegen parallel zur Kraftlinienrichtung des Feldes einzustellen, und zwar ist die Richtkraft, mit der diese Einstellung angestrebt wird, bei gleicher Stärke $\mathfrak{H}$ des magnetischen Feldes um so größer, je größer die magnetische Durchlässigkeit μ des magnetisierten Stoffes ist. Da bei den meisten Stoffen μ nahe an 1 liegt, ist auch bei ihnen die Richtkraft so klein, daß sie scheinbar vom magnetischen Felde gar nicht beeinflußt werden. Ihr Magnetismus läßt sich nur mit sehr feinen Hilfsmitteln und unter der Einwirkung sehr starker Felder feststellen. Bei den ferromagnetischen Stoffen, deren μ bedeutende Werte annimmt, ist dagegen die Richtkraft in die Augen fallend.

Man nennt einen Körper gleichmäßig magnetisiert, wenn die Induktionslinien in ihm gerade und parallel zueinander verlaufen und gleichen Abstand voneinander haben. Dieser Fall tritt ein, wenn sich der Körper in einem gleichförmigen magnetischen Felde befindet, und wenn er entweder ein Ellipsoid oder ein unendlich langer Stab ist, deren Längsachsen in die Richtung der Kraftlinien fallen.

Die Zahl der Induktionslinien $\mathfrak{B}$ auf 1 qcm eines gleichförmigen magnetisierten Körpers setzt sich zusammen aus der Zahl der Kraftlinien $\mathfrak{H}$, die vom äußeren magnetischen Feld herrühren, und der Zahl $4\pi\mathfrak{J}$ der Induktionslinien, die infolge der magnetischen Induktion im Körper entstanden sind. Es ist also:

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi\mathfrak{J} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (3)$$

$\mathfrak{J}$ nennt man die Stärke oder Intensität der Magnetisierung, zuweilen auch den spezifischen Magnetismus. Sie ist gleich $\frac{ml}{v}$, worin m die Polstärke eines Poles des magnetisierten Körpers, l die Entfernung der beiden Pole, v das Volumen des magnetisierten Körpers ist. Da man das Produkt $ml = M$ auch das Moment des magnetisierten Körpers nennt, so ist $\mathfrak{J} = \frac{M}{v}$, also das auf die Raumeinheit bezogene magnetische Moment des magnetisierten Körpers. $\mathfrak{J}$ hat dieselben Dimensionen, wie die Feldstärke und die Induktion, nämlich $g^{1/2} \cdot cm^{-1/2} \cdot sek.^{-1}$.

Das Verhältnis $\varkappa = \frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}}$ hat den Namen Aufnahmefähigkeit oder Suszeptibilität erhalten. Zwischen $\varkappa$ und μ ergibt sich aus Gl. 2 und 3 folgende Beziehung:

$$\mu \cdot \mathfrak{H} = \mathfrak{H} + 4\pi\mathfrak{J} = \mathfrak{H} + 4\pi \cdot \varkappa\mathfrak{H}$$

$$\mu = 1 + 4\pi \cdot \varkappa \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (4)$$

Für Stoffe, deren Durchlässigkeit $\mu = 1$ ist (Luft, Luftleere), ist $\varkappa = 0$. Für diamagnetische Stoffe wird $\varkappa$ negativ, für alle anderen Stoffe ist es positiv. Für dia- und paramagnetische Stoffe ist $\varkappa$ eine sehr kleine Zahl, so daß μ von 1 wenig verschieden ist. Ferromagnetische Stoffe haben sehr große positive Werte von $\varkappa$ und demnach auch von μ.

Zuweilen bezieht man die Stärke der Magnetisierung statt auf die Raumeinheit auf die Einheit der Masse, so daß $\mathfrak{J}' = \frac{M}{v \cdot s}$ wird, worin s das spezifische Gewicht des magnetisierten Körpers bedeutet. Danach ergibt sich:

$$\mathfrak{J}' = \frac{\mathfrak{J}}{s} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (5)$$

Ebenso wird zuweilen die magnetische Aufnahmefähigkeit statt auf die Raumeinheit auf die Masseneinheit bezogen. Diese Größe $\varkappa'$ ist dann

$$\varkappa' = \frac{\varkappa}{s} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (6)$$

385. Messung der Beziehung zwischen $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ bei ferromagnetischen Stoffen. Es ist hier nicht beabsichtigt, die verschiedenen Arten dieser Messung zu besprechen. Hierüber muß man sich in der Sonderliteratur über diesen Gegenstand Rat holen (z. B. L_8 *2* und *3*). Hier soll nur ein Meßverfahren gestreift werden in der Hoffnung, daß durch die Angaben hierüber die Begriffe über Magnetismus etwas mehr ins Greifbare rücken. Die Meßvorrichtung ist schematisch in Abb. 469 angedeutet.

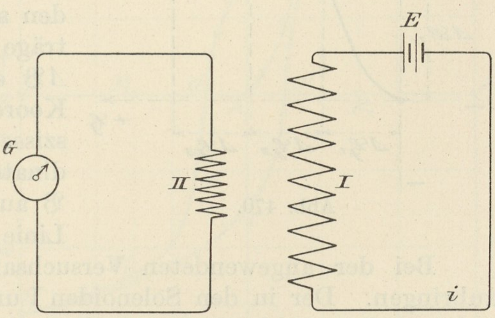

Abb. 469.

In der Abbildung sind die beiden Drahtspiralen I und II im Interesse der Übersichtlichkeit nebeneinander gezeichnet. In Wirklichkeit liegen sie konzentrisch ineinander, und der nicht gezeichnete, zu magnetisierende Stab liegt in der gemeinschaftlichen Achse. Die Spirale (Solenoid) I erzeugt in der Richtung ihrer

Achse ein angenähert gleichförmiges magnetisches Feld von der Größe $\mathfrak{H} = \frac{4\pi n}{l} i$ (Gl. 1).

Die Stromstärke i wird im Stromkreis des Solenoides I durch eine Stromquelle E erzeugt und kann durch Ein- und Ausschalten von Widerständen um bestimmte Beträge Δi geändert werden. Der in der Achse des Solenoides befindliche Eisenstab wird magnetisiert, sobald Strom durch das Solenoid geht. Durch Änderung der Stromstärke um einen Betrag Δi kann man das magnetische Feld im Innern der Spule I um einen entsprechenden Betrag $\Delta \mathfrak{H}$ ändern, der wiederum eine Änderung der magnetischen Induktion des Eisenstabes um den Betrag $\Delta \mathfrak{B}$ nach sich zieht.

Der magnetisierte Stab kann nun seinerseits bei Änderung seiner magnetischen Induktion um $\Delta \mathfrak{B}$ in einem ihn umgebenden Solenoid II eine bestimmte Elektrizitätsmenge ΔQ erzeugen, und zwar im Betrag von

$$\Delta Q = \frac{n_s \cdot q}{w_s} \cdot \Delta \mathfrak{B} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (7)$$

worin n_s die Zahl der Windungen der den magnetisierten Stab umgebenden Spule II, w_s der gesamte elektrische Leitwiderstand im Stromkreis dieser Spule (Widerstand in der Spule selbst plus Widerstand im Schließungskreis der Spule II), q der Querschnitt des magnetisierten Stabes ist.

Diese Elektrizitätsmenge ΔQ kann mit Hilfe eines ballistischen Galvanometers G gemessen werden, das in den Stromkreis der Spule II eingeschaltet wird. Sobald die Induktion des Eisenstabes um $\Delta \mathfrak{B}$ geändert wird, schlägt das Galvanometer um einen bestimmten Winkel φ aus, der proportional der im Stromkreis der Spule II erzeugten Elektrizitätsmenge ΔQ ist. Aus dem Winkel φ und der durch Eichung festgestellten Konstanten des Galvanometers ergibt sich dann ΔQ. Mit Hilfe dieser Größe und der Gl. 7 kann man dann $\Delta \mathfrak{B}$ berechnen. Im Stromkreis I liest man mittels eines Strommessers die der Änderung der Induktion um $\Delta \mathfrak{B}$ entsprechende Änderung Δi der Stromstärke ab und berechnet damit nach Gl. 1 die Änderung der magnetischen Feldstärke $\Delta \mathfrak{H}$.

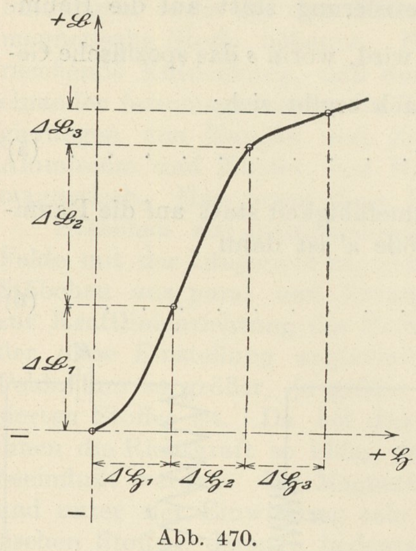

Abb. 470.

In der angegebenen Weise kann man die zu den stufenweisen Änderungen von $\mathfrak{H}$ um die Beträge $\Delta \mathfrak{H}$ gehörigen Änderungen der Induktion $\Delta \mathfrak{B}$ ermitteln und die erhaltenen Werte in ein Koordinatensystem eintragen, indem man die Abszissen proportional der Feldstärke $\mathfrak{H}$ und die Ordinaten proportional der magnetischen Induktion $\mathfrak{B}$ aufzeichnet, wie in Abb. 470. Die erhaltene Linie heißt Magnetisierungs- oder $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{B}$-Linie.

Bei der angewendeten Versuchsanordnung ist noch eine Verbesserung anzubringen. Der in den Solenoiden I und II befindliche Eisenstab, dessen Magnetisierungslinie (Abb. 470) ermittelt werden soll, beeinflußt durch seine Magnetisierung das Feld $\mathfrak{H}$. Er schickt von seinen Polen ein eigenes Kraftfeld aus, das dem Feld $\mathfrak{H}$ entgegengesetzt gerichtet ist und dieses demnach schwächt. Die eigentliche, die Induktion erzeugende Feldstärke ist dann

$$\mathfrak{H} = \frac{4\pi n}{l} i - N \cdot \mathfrak{J}.$$

N ist der sogenannte Entmagnetisierungsfaktor, über dessen Größe man sich durch Rechnung oder durch den Versuch unterrichten muß. Er wird immer kleiner, je länger der Stab gegenüber seinem Durchmesser wird. Ist beispielsweise das Verhältnis $\mathfrak{m}$ der Länge des Stabes zu seinem Durchmesser gleich 5, so ist N 0,68, bei $\mathfrak{m} = 300$ ist N dagegen auf den sehr kleinen Wert von 0,00075 gesunken (nach Riborg Mann, L_8 *6*).

Für genaue Messungen wird das Eisen, dessen Magnetisierungslinie zu ermitteln ist, nicht in Form eines Stabes, sondern in Form eines geschlossenen Ringes angewendet, über den dann die beiden Solenoide I und II gewickelt werden. Der Ring hat keine Pole und kann somit auch keine feldschwächende Wirkung ausüben.

386. Magnetischer Kreisvorgang. Während bei dia- und paramagnetischen Stoffen μ unabhängig von $\mathfrak{H}$ ist, und sonach die Linie, welche $\mathfrak{B}$ in Abhängigkeit von $\mathfrak{H}$ darstellt (die $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{B}$-Linie), eine Gerade $\mathfrak{B} = \mu \cdot \mathfrak{H}$ ist, wird bei ferromagnetischen Stoffen μ abhängig von der Feldstärke $\mathfrak{H}$, so daß die $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{B}$-Linie im allgemeinen eine gekrümmte Linie ist. Sie steigt bei Eisen mit wachsendem $\mathfrak{H}$ sehr rasch an, und der Wert von μ erreicht außerordentlich große Werte (bis 3000 und mehr). Bei noch weiter steigender Feldstärke wird μ wieder kleiner, die Linie für $\mathfrak{B}$ wird wieder flacher und bei sehr großen Feldstärken eine gerade Linie, deren Gleichung

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi\mathfrak{J}_0 = \mathfrak{H} + \text{Konst.}$$

wird. Die Stärke der Magnetisierung $\mathfrak{J}$ ist unveränderlich gleich $\mathfrak{J}_0$ geworden, und man sagt, daß das Eisen magnetisch gesättigt sei.

Die Feldstärke, bei der das Eisen gesättigt wird, ist je nach seiner Art verschieden. Sie beträgt für kohlenstoffarmes Eisen etwa 2000, für kohlenstoffreichere Eisensorten bis zu 10000 CGS-Einheiten oder Gauß.

Die unveränderlich gewordene Stärke der Magnetisierung für den Zustand der magnetischen Sättigung soll mit $\mathfrak{J}_0$ bezeichnet werden.

Die magnetische Durchlässigkeit μ hängt nun bei ferromagnetischen Stoffen nicht nur von der Größe der jeweiligen Feldstärke $\mathfrak{H}$ ab, sondern sie ist auch noch veränderlich je nach den Werten, die die Feldstärke vorher gehabt hat, also von der magnetischen Vorbehandlung des Metalls. Für denselben Wert von $\mathfrak{H}$ kann $\mathfrak{B}$ verschiedene Werte haben, je nachdem ob die Feldstärke vorher größer oder kleiner war, je nachdem ob man sich dem Wert $\mathfrak{H}$ von oben oder von unten nähert.

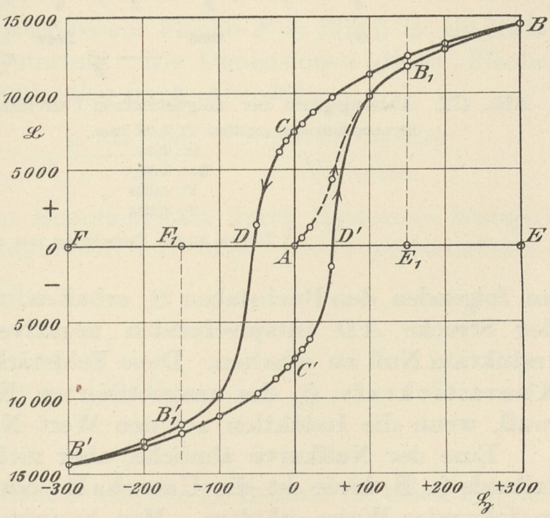

Abb. 471. $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{B}$-Linie eines gehärteten Stahles mit 0,99 % Kohlenstoff. (Nach Gumlich.)

Geht man von dem unmagnetischen Zustand des Eisens und von der Feldstärke Null aus, so nennt man die gewonnene $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{B}$-Linie die jungfräuliche Linie oder die Nullkurve. Sie ist in Abb. 471 gestrichelt und mit AB bezeichnet. Läßt man die Feldstärke von dem positiven, dem Punkte B entsprechenden Werte AE allmählich abnehmen, durch Null hindurch (durch Umschalten des magnetisierenden Stromes in der Spule I) auf den gleichgroßen, aber entgegengesetzten Wert AF anwachsen und kehrt dann allmählich wieder auf den Anfangswert AE zurück, so hat man einen magnetischen Kreisvorgang durchgeführt. Die zugehörigen Werte von $\mathfrak{B}$ fallen dann in die in Abb. 471 dargestellte Kurvenschleife $BCDB'C'D'B$, die man Hysteresisschleife nennt. Falls, wie oben angenommen, $AE = AF$, so ist auch $AC = AC'$ und $AD' = AD$, die Schleife ist also symmetrisch.

Wie Abb. 471 zeigt, hat nach Abnahme der Feldstärke von AE auf Null die Induktion noch den Betrag AC, den man als zurückbleibenden Magnetismus, als remanenten Magnetismus oder kurz als Remanenz bezeichnet. Er soll

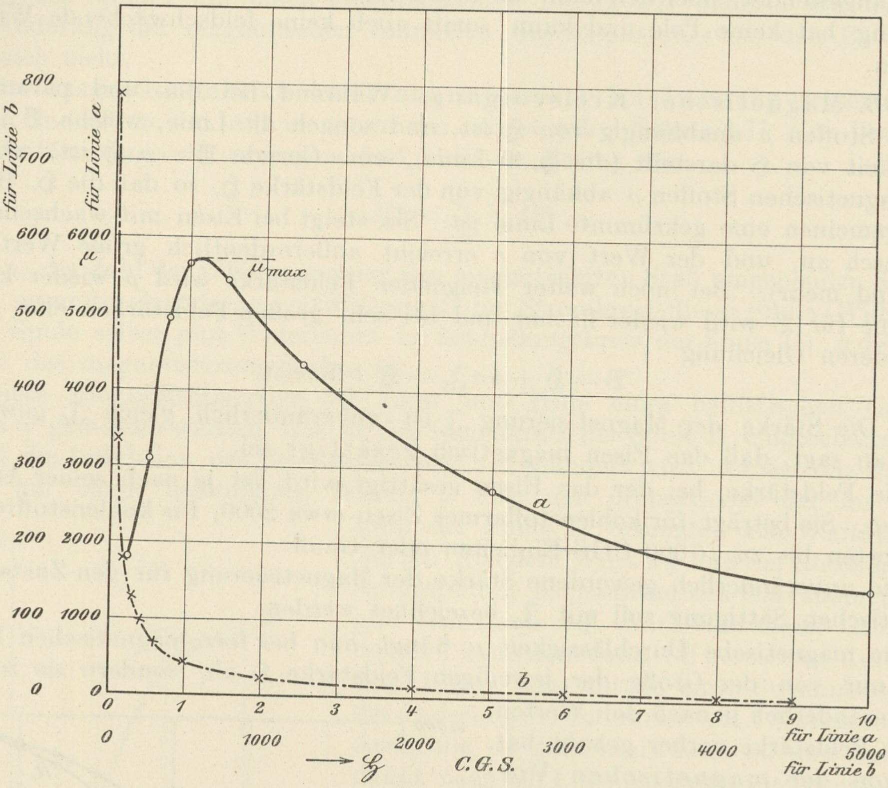

Abb. 472. Abhängigkeit der magnetischen Durchlässigkeit von der Feldstärke. (Nach Gumlich.)

Dynamoflußeisen geglüht: C: 0,08 Proz.	$\mathfrak{B}_r$:	10250
Si: 0,03 ,,	$\mathfrak{H}_c$:	$0{,}88_5$
Mn: 0,38 ,,	μ_{max}:	5700
P: 0,029 ,,	η:	0,00110
S: 0,024 ,,	$\mathfrak{J}_0$:	1700.

Linie b ist die Fortsetzung von a für größere Feldstärken

im folgenden den Buchstaben $\mathfrak{B}_r$ erhalten. Man muß die Feldstärke erst auf den der Strecke AD entsprechenden negativen Betrag abnehmen lassen, um die Induktion Null zu erhalten. Diese Feldstärke AD nennt man die Rückhalts- oder Koerzitivkraft $\mathfrak{H}_c$ des magnetisierten Körpers, die erst überwunden werden muß, wenn die Induktion auf den Wert Null heruntergedrückt werden soll.

Eine der Nullkurve ähnliche, aber nicht notwendigerweise mit ihr zusammenfallende $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{B}$- Linie ist die Umschalt- oder Kommutierungskurve. Sie wird in folgender Weise erhalten. Man beginnt beim unmagnetischen Zustand des zu prüfenden Stoffes und steigt bis zu einem gewissen Werte $\mathfrak{B}$ auf. Bevor man jedoch die Induktion beobachtet, wechselt man einige Male die Feldrichtung durch Umschalten des Stromes im Kreis der Spule I (Abb. 469). Erst der alsdann zu einem bestimmten Wert von $\mathfrak{H}$ gehörige Wert $\mathfrak{B}$ wird aufgezeichnet. Dann geht man zu einem weiteren Wert der Induktion, indem man auch hier wieder die Feldrichtung wechselt usw.

Die zur jeweiligen Feldstärke $\mathfrak{H}$ gehörige Durchlässigkeit μ wird aus der Nullkurve abgeleitet. Abb. 472 gibt ein Beispiel für die Abhängigkeit der Zahl μ von der Felstärke $\mathfrak{H}$. Sie bezieht sich auf ein geglühtes Dynamoflußeisen von der der Abbildung beigeschriebenen Zusammensetzung (nach Gumlich, L_8 8). Die Linie a gibt den Verlauf für schwache Felder von 0 bis 10 CGS. Die Linie b bildet in verändertem Maßstab die Fortsetzung der Linie a für größere Feldstärken. Die Durchlässigkeit steigt mit wachsendem Feld sehr rasch an, erreicht bei $\mathfrak{H} = 1{,}2$ den Höchstwert $\mu_{max} = 5700$ und fällt dann wieder ab bis auf sehr kleine Werte.

Für nicht abgeschreckte Eisensorten einschließlich der mit Silizium bis zu 4% legierten Eisensorten besteht nach Gumlich und Schmidt (L_8 7) zwischen μ_{max}, dem zurückbleibenden Magnetismus $\mathfrak{B}_r$ und der Rückhaltskraft $\mathfrak{H}_c$ mit genügender Annäherung die Beziehung:

$$\mu_{max} = 0{,}49 \cdot \frac{\mathfrak{B}_r}{\mathfrak{H}_c}.$$

Bei dem in Abb. 472 gegebenen Beispiel berechnet sich μ_{max} nach dieser Formel zu $0{,}49 \cdot \frac{10250}{0{,}88_5} = 5660$, statt des durch den Versuch gefundenen Wertes 5700.

387. Magnetische Hysteresis. Die Hysteresisschleife (Abb. 471) läßt erkennen, daß in den ferromagnetischen Stoffen das Bestreben vorhanden ist, einen einmal erlangten magnetischen Zustand festzuhalten. Die Induktion bleibt hinter der Einwirkung des magnetischen Feldes zurück. Man nennt dies die magnetische Hysteresis. Sie kann als Widerstand aufgefaßt werden, der dem erregenden Felde entgegengesetzt wird. Zur Überwindung dieses Widerstandes ist Energie erforderlich, die für den eigentlichen Magnetisierungsvorgang verloren geht. Sie wird in Wärme umgesetzt, die in dem magnetisierten Körper auftritt. Diese Wirkung macht sich z. B. in Transformatoren geltend, deren Eisenkörper schnell wechselnden magnetischen Kreisvorgängen ausgesetzt werden.

Die von der Hysteresisschleife eingeschlossene Fläche $F = \int \mathfrak{B}\, d\mathfrak{H}$ ist ein Maßstab für den Energieumsatz durch Hysteresis. Die Dimensionen dieser Fläche sind Dim (F) = (Feldstärke) $\times$ (Induktion), also nach Abs. *383*

$$(g^{1/2}\,cm^{-1/2}\,sek^{-1})^2 = g \cdot cm^{-1} \cdot sek^{-2} = \frac{g \cdot cm^2 \cdot sek^{-2}}{cm^3} = \frac{\text{Arbeit in Erg}}{\text{Volumen}}.$$

Die Fläche F ist also proportional dem Energieumsatz durch Hysteresis bezogen auf die Raumeinheit (Erg auf 1 ccm) des magnetisierten Stoffes. Der Proportionalitätsfaktor ist $\frac{1}{4\pi}$, so daß die Beziehung gilt

$$E = \frac{1}{4\pi} F = \frac{1}{4\pi} \int_{-\mathfrak{H}}^{+\mathfrak{H}} \mathfrak{B}\, d\mathfrak{H}. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (8)$$

Einheit: Erg/ccm.

Die Fläche F kann leicht mittels Planimeter aus der $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{B}$-Linie für einen magnetischen Kreisvorgang (vgl. z. B. Abb. 471) ermittelt werden, und daraus ergibt sich E.

Finden in der Sekunde n magnetische Kreisvorgänge (Zyklen) statt, so ist der Energieverlust in 1 Sekunde $n \cdot E$ Erg/sek·ccm oder $n \cdot E\, 10^{-7}$ Watt auf 1 ccm Eisen.

Zum Vergleich des Energieumsatzes E verschiedener Eisensorten wird in der Regel die Steinmetzzahl η (L_8 *13*) verwendet, die sich aus der Gleichung

$$E = \eta \cdot \mathfrak{B}_{max}^{1,6} \qquad (9)$$

ergibt. Die Fläche F innerhalb der Schleife (Abb. 471) hat verschieden große Werte, je nachdem zwischen welchen Grenzen AE und AF der Feldstärke man den Kreisvorgang durchführt. Würde man im Falle der Abb. 471 die Feldstärke nur innerhalb der Grenzen AE_1 und AF_1 verändert haben, so würde die Schleifenfläche F kleiner geworden sein. Den kleineren Grenzen der Feldstärke würden auch kleinere Grenzen der höchsterreichten Induktion $\mathfrak{B}_{max}$ entsprochen haben, und zwar E_1B_1 und F_1B_1' anstatt EB und FB'. Nach Steinmetz ist nun der Energieumsatz E bei verschiedenen Werten von $\mathfrak{B}_{max}$ nahezu proportional der 1,6ten Potenz von $\mathfrak{B}_{max}$. Er würde also bei $\mathfrak{B}_{max} = EB$ den Wert $\eta \cdot \overline{EB}^{1,6}$ und bei $\mathfrak{B}_{max} = E_1B_1$ den Wert $\eta \cdot \overline{E_1B_1}^{1,6}$ annehmen.

Die Gl. 9 gilt mit genügender Annäherung nur dann, wenn $\mathfrak{B}_{max}$ in der Nähe der Sättigung des magnetisierten Eisens liegt. Benutzt man dagegen einen von der Sättigung noch sehr weit entfernten Wert von $\mathfrak{B}_{max}$ und berechnet aus ihm und der gemessenen Fläche F die Zahl η, so ist die letztere nicht mehr mit genügender Annäherung als Vergleichsmaßstab für den Energieumsatz verschiedener Materialien zu benutzen (Ebeling und Schmidt, L_8 *14; 15*).

B. Einige Zahlenwerte für die magnetischen Eigenschaften technischer Eisen- und Stahlsorten. Beziehungen zwischen den einzelnen magnetischen Eigenschaften.

388. a) Für Teile von elektrischen Maschinen, die wechselnden magnetischen Feldern ausgesetzt sind (Anker der Dynamos, Transformatorkerne usw.), muß das Maß der Energievergeudung E durch Hysteresis möglichst klein sein. Bei den zu Feldmagneten verwendeten Materialien ist diese Größe E von geringerer Bedeutung. Hier verlangt man namentlich hohe magnetische Durchlässigkeit μ.

Außer der Energievergeudung durch magnetische Hysteresis tritt bei den Transformatorkernen und Dynamoankern noch Energievergeudung durch Wirbelströme auf. Man nennt den gesamten bei abwechselnder Magnetisierung im Eisen auftretenden Verlust, der sich aus Hysteresis- und Wirbelstromverlust zusammensetzt, den Eisenverlust. Der Wirbelstromverlust kann dadurch verkleinert werden, daß man das Eisen möglichst weitgehend unterteilt, indem man es aus lauter dünnen Blechen zusammenbaut, oder dadurch, daß man ein Eisen mit möglichst hohem elektrischen Leitwiderstand wählt.

Das erstere Mittel hat seine Grenzen, weil für den Eisenkern um so mehr Bleche erforderlich sind, je dünner diese werden. Bei gleichem geometrischen Querschnitt des Eisens ist aber der wirksame magnetische Querschnitt des Eisens um so kleiner, je dünner die Bleche sind. Man hat deswegen vielfach den zweiten Weg betreten und durch Legieren des Eisens mit besonderen Stoffen (Silizium, Aluminium usw.) den elektrischen Leitwiderstand erhöht. Man spricht dann von sogenannten legierten Blechen (z. B. Legierungen mit etwa 0,1% Kohlenstoff und 2 bis 4% Silizium). (L_8 *16.*)

b) An das Material für Dauermagnete (permanente Magnete) stellt man gerade die entgegengesetzten Forderungen, wie an die unter a) aufgeführten Baustoffe. Während die letzteren der Änderung der Magnetisierung möglichst sofort und ohne erhebliche Verluste folgen sollen, verlangt man von Materialien