Die magnetischen Eigenschaften von ungleichmäßigem Material.

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

Von

E. Gumlich¹⁾.

Übersicht.

Es wird teils rechnerisch, teils experimentell der Einfluß von Ungleichmäßigkeiten des Materials auf die ballistisch bzw. magnetometrisch aufgenommenen Magnetisierungskurven ermittelt, und zwar für den Fall, daß die inhomogenen Bestandteile in Gestalt von Längsschichten oder von kornförmigen Einschlüssen angeordnet sind. Für die im ersten Falle auftretenden starken Verzerrungen der Magnetisierungskurven werden mehrere praktische Beispiele auf Grund von mikrophographischen Aufnahmen besprochen.

Verschiedene Arten von Ungleichmäßigkeit. — Zweck der Untersuchung. Kein magnetisches Material ist vollkommen gleichmäßig, denn selbst unser reinstes, das Elektrolyteisen, besteht nach Beseitigung des härtenden Wasserstoffgehalts aus Ferritkristallen, deren Größe und Anordnung unter Umständen auch in der Gestalt der Magnetisierungskurven zum Ausdruck kommen dürften; zumeist aber enthält das magnetische Material noch mehr oder weniger erhebliche Verunreinigungen durch C, Mn, Si, P, S, Schlacke usw. in gelöstem oder ungelöstem Zustande, und wenn auch die Frage nach der Wirkung derartiger Verunreinigungen auf die magnetischen Eigenschaften des Grundmaterials durch die noch nicht völlig abgeschlossenen Untersuchungen der Reichsanstalt der Hauptsache nach geklärt worden ist²⁾, so wurden diese Versuche zunächst doch nur unter der Annahme durchgeführt, daß die Fremdkörper im Eisen gleichmäßig verteilt sind. Das wird aber im allgemeinen nur dann mit einiger Sicherheit angenommen werden können, wenn sich der Fremdkörper beim Schmelzen im Eisen vollkommen löst und beim Erkalten nicht wieder ausscheidet (beispielsweise Si, Al, Mn), nicht aber beim Kohlenstoff, der als Fe_3C in der Grundsubstanz Ferrit als Zementit (Perlit) eingebettet ist, und zwar unter Umständen auch da nicht einmal vollkommen gleichmäßig.

Andererseits kommen auch Fälle vor, wo durch äußere Bearbeitung (mechanische Härtung beim Walzen und dergleichen) oder durch chemische Einflüsse (Oxydation, Entkohlung u. dgl.) ganze Schichten in ihren magnetischen Eigenschaften erheblich verändert werden und nun ihrerseits wieder die magnetischen Eigenschaften der gesamten Probe beeinflussen. In welcher Weise dies geschieht, darüber liegen bis jetzt noch keine Erfahrungen vor. Nur ein in der Reichsanstalt früher ausgeführter Versuch mit einer Kombination von Streifen aus weichem Dynamoblech und aus gehärtetem Stahlblech hat außerordentlich verzerrte Magnetisierungskurven ergeben³⁾, deren Charakter an einige bis dahin unerklärte verzerrte Magnetisierungskurven erinnerte, die gelegentlich bei den zur Prüfung eingesandten Proben gefunden worden waren. Es ist sehr wahrscheinlich, daß auch die vielen, kaum sichtbaren Verzerrungen der Magnetisierungskurven, beispielsweise die vielfach zu beobachtende mehr oder weniger starke Verbreiterung der Hystereseschleife in der Gegend des

¹⁾ Die Schliffbilder sind im metallographischen Laboratorium der Technischen Hochschule zu Berlin unter Leitung von Herrn Professor Hanemann und Fräulein Schrader von Herrn Steinhagen hergestellt worden.

²⁾ Wissenschaftliche Abhandlungen der Phys.-Techn. Reichsanstalt IV, Heft 3.

³⁾ A. a. O. S. 344.

Knies u. dgl. auf Unhomogenität des Materials zurückzuführen sind, und es erschien daher erwünscht, den Einfluß harter oder weicher Beimengungen zu weichem oder hartem Grundmaterial auf die Gestalt der Magnetisierungskurven etwas genauer zu untersuchen.

Material aus harten und weichen Schichten ohne freie Enden. Dies war in den Fällen, wo es sich um Längsschichten von abweichender Beschaffenheit handelt, verhältnismäßig einfach und konnte sogar rechnerisch durchgeführt werden. Es hat sich nämlich gezeigt, daß man bei derartigen, in sich selbst oder durch ein Joch geschlossenen Proben die resultierende Magnetisierungskurven

Bild 1. Hystereseschleifen.

Bild 2. Hystereseschleifen.

kurve erhält, wenn man bei jeder Feldstärke die zugehörige Induktion des weichen und harten Bestandteils proportional dem zugehörigen Querschnitt nimmt. Dies ist auch ohne weiteres klar, denn der resultierende Induktionsfluß, welcher bei einer ballistischen Messung durch die die Probe umschließende Sekundärspule hindurchtritt, setzt sich ja aus den Induktionsflüssen in den einzelnen Schichten zusammen.

Als Material für die einzelnen Schichten wurde, um den Einfluß möglichst auffällig zu machen, solches mit sehr verschiedenen Eigenschaften gewählt, nämlich weicher Dynamostahl AV₁H und bei 900° gehärteter Chrom-Kohlenstoffstahl mit 1,1% C und 5,8% Cr, deren Hystereseschleifen in Bild 1 unter — und •• — ••

angegeben sind. Die Koerzitivkraft betrug 0,47 bzw. 72 Gauß, die Remanenz 11300 bzw. 9200. Aus dem Bild 1, welche die berechneten Hystereseschleifen der Kombinationen von weichem Eisen mit 0%; 30%; 50%; 70%; 100% hartem Material darstellt, ergibt sich nun folgendes:

Mit steigendem Prozentsatz an hartem Material tritt neben dem Sinken der Maximalinduktion eine anfänglich schwache und bei geringem Zusatz von wenigen Prozent kaum sichtbare, bei stärkerem Zusatz aber immer mehr wachsende Ausbauchung des aufsteigenden Astes zunächst in der Gegend von $\mathfrak{H} = 40 - 60$ Gauß auf, welche naturgemäß den Hystereseverlust erheblich beeinflussen muß, während die scheinbare Koerzitivkraft selbst bei dem Zusatz von etwa 30% Stahl nur wenig und sogar bei einem Zusatz von 50% nur auf etwa das Doppelte, also von 0,47 auf etwa 1 Gauß anwächst. Bei einem Zusatz von 70% hartem Material hat der immer größer werdende Bauch bereits die Abszissenachse ($\mathfrak{H}$ -Achse) überschritten, die Koerzitivkraft ist dabei sehr rasch und stark angewachsen, aber der größte Teil des absteigenden Astes zwischen Remanenz und Koerzitivkraft trägt noch immer den Charakter des weichen Materials, liegt also sehr nahe an der Ordinatenachse und geht erst allmählich in die Gestalt der Schleife für Stahl über.

Bei der Kombination von weichem Grundmaterial mit Stahl erstreckt sich also die Wirkung der harten Beimengung zunächst und hauptsächlich auf den aufsteigenden Ast, während, wie Bild 2 zeigt, bei der Kombination von Stahl mit weichem Zusatz eine Wirkung zunächst auf den absteigenden Ast sichtbar wird. Diese tritt ganz in der Nähe der Remanenz zwischen Remanenz und Koerzitivkraft als Einbuchtung auf, ist schon bei 2% Zusatz recht deutlich und prägt sich mit wachsendem Prozentgehalt des weichen Materials immer stärker aus, während die Koerzitivkraft zunächst nur sehr wenig abnimmt. Erst allmählich wird auch hier eine starke Einwirkung merklich; bei etwa 40% Zusatz würde die Koerzitivkraft schon mehr den Charakter des weichen Materials angenommen haben und etwa von der Größenordnung 2 sein, bei 50% ist sie nur noch etwa 1 Gauß, die Einbuchtung ist über die Abszissenachse hinweg in den aufsteigenden Ast gerückt und bildet hier den kollosalen Bauch, der schon oben erwähnt wurde und der sich nun mit weiterer Zunahme des weichen Bestandteils immer mehr abflacht.

Der Charakter der Einbuchtung hängt naturgemäß von der Beschaffenheit der beiden Materialien ab, die hier absichtlich außerordentlich verschieden gewählt wurden. Sinkt der absteigende Ast des weichen Teiles nicht so außerordentlich rasch, ist also die Remanenz kleiner, die Koerzitivkraft erheblich größer als hier angenommen wurde, so wird natürlich auch die Verzerrung weniger scharf hervortreten, und zwar nur als langgestreckte schwache Einbuchtung, wie sie etwa die Bilder 8 und 10 zeigen und die in ganz geringem Maß auch bei gewöhnlichem Material oft zu beobachten ist.

Eigentümlich und beachtenswert ist die außerordentlich niedrige Koerzitivkraft, welche die Kombination aufweist, auch wenn der Gehalt an hartem Material bereits bis auf 50% angestiegen ist, denn man würde von vornherein geneigt sein, auch für die Koerzitivkraft einen mittleren Wert von etwa 35 Gauß anzunehmen, während man tatsächlich nur 2 Gauß findet. Der Grund für diese eigentümliche Erscheinung liegt darin, daß die gewöhnliche Definition der Koerzitivkraft als derjenigen Feldstärke, welche notwendig ist, um den remanenten Magnetismus mit seiner Wirkung auf Induktionsspule und Magnetometer zu beseitigen, bei magnetisch ungleichmäßigem Material versagt. Hier wird diese Wirkung null, wenn die beiden Induktionsflüsse in dem weichen und harten Material sich gerade aufheben; dies tritt aber bei verhältnismäßig niedriger Feldstärke ein, wo im harten Material noch eine erhebliche positive Magnetisierung vorhanden ist, während der weiche Teil bereits eine ebenso hohe negative Magnetisierung angenommen hat.

Material mit stetig ineinander übergehenden Schichten. Bisher hatten wir angenommen, daß das Material aus zwei scharf getrennten Schichten verschiedener Beschaffenheit zusammengesetzt sei; dies wird aber zumeist nicht der Fall sein, vielmehr wird es vielfach aus einer größeren Anzahl von Schichten

Bild 3. Hystereseschleifen.
Kombination von hartem und weichem Material mit Zwischenstufen.

bestehen, die stetig ineinander übergehen. In diesem Fall muß, wie eine einfache Überlegung zeigt, die Verzerrung der Hystereseschleife um so mehr verschwinden, je stetiger die Änderung der Materialbeschaffenheit ist. Zum Nachweis dafür wurden

20 X

Bild 4. Kohlenstoff-Legierung mit 0,55% C; Randpartie unvollständig entkohlte.

mit den beiden eben benutzten Materialien I und II, noch drei andere Materialien III, IV, V kombiniert, welche die Koerzitivkräfte 6,5; 23; 37 und die Remanenzen 8500; 10100 und 11200 besaßen, und zwar bildete man für eine Anzahl von Feldstärken die Induktionen $\frac{I + II}{2}$; $\frac{I + II + III}{3}$; $\frac{I + II + III + IV}{4}$; $\frac{I + II + III + IV + V}{5}$.

Hierbei bedeuten die Werte I, II, III, IV, V die zu der betreffenden Feldstärke gehörigen Induktionswerte der 5 Originalkurven; die so berechneten Zahlen sind in Bild 3 wiedergegeben. Man sieht, wie die Kurve $\frac{I+II}{2}$, welche mit der in Bild 1 und 2 für 50% dargestellten Kurve identisch ist, durch Hinzunahme der 1, 2 und 3 andern Materialien mit Magnetisierungskurven, deren Charakter zwischen denen von I und II liegt, ihre Verzerrung immer mehr verliert und normaleren Charakter annimmt.

Es war nun von Interesse, dieses rechnerische Ergebnis auch experimentell zu bestätigen. Zu diesem Zweck wurde ein Stab AV6 mit ursprünglich 0,55% Kohlestoff durch 5 stündiges Glühen bei 900° in einer mit Eisen-Oxydul gefüllten Röhre am Rande stark entkohlt und dann bei 850° gehärtet. Bild 4 gibt das Schliffbild vor der Härtung in etwa 20facher Vergrößerung; man sieht, wie der schwarze perlitische Gefügebestandteil nach dem Rande zu nicht vollkommen, aber doch ziemlich regelmäßig abnimmt. Die Hystereseschleife nach dem Härten ist in Bild 5

Bild 5. Stab AV6 $\times$, von außen entkohlt, gehärtet.

wiedergegeben; sie ist, wie zu erwarten war, nicht ganz frei von Verzerrung, namentlich zeigt sie die oben erwähnte schwache Einbuchtung zwischen Remanenz und Koerzitivkraft, aber die Verzerrung hält sich doch in sehr mässigen Grenzen.

Einfluß der Unstetigkeiten auf die Permeabilitätskurven. Am deutlichsten tritt hier die noch vorhandene Anomalie in der Lage der Nullkurve hervor, die sich nicht, wie sonst, von vorn herein dem aufsteigenden Ast nähert, und deren eigentümliche, in der Wiedergabe etwas verwischte Krümmungen nicht ohne weiteres zu erklären sind. Es wurden daher, um auch hierüber einen gewissen Überblick zu gewinnen, die Kombinationsrechnungen mit den beiden bei Bild 1 und 2 angegebenen Materialien in derselben Weise durchgeführt, wie bei den Hystereseschleifen. Die erhaltenen Nullkurven zeigen tatsächlich denselben Charakter wie in Bild 5, sie lassen aber die Einzelheiten viel weniger gut erkennen, als die zugehörigen in Bild 6 und 7 wiedergegebenen Permeabilitätskurven. Geht man bei diesen vom weichen Grundmaterial aus (Bild 6), so sieht man, wie mit wachsendem Zusatz von hartem Material des Maximum von μ , das beim Grundmaterial etwa 11500 betrug und etwa bei $B = 6500$ lag, immer niedriger wird und bei immer kleineren Werten der Induktion auftritt, so daß es bei etwa 10% von weichem Eisen und 90% Stahl nur noch 1200 beträgt und bei $B = 800$ liegt; die zugehörige Feldstärke dagegen bleibt nahezu konstant. Von $B = 2000$ ab nimmt die Permeabilität gleichmäßig ab; das ist aber auch nur scheinbar, wie sich aus Bild 7 ergibt, welches in stark vergrößertem Maßstabe den Einfluß von weichem Material auf hartes Grundmaterial wiedergibt:

Man sieht, daß schon bei einer Kombination mit 2% weichem Material auf der ursprünglich ganz gleichmäßig und flach verlaufenden Permeabilitätskurve des Stahles mit seinem Maximum von $\mu = 85$ bei etwa $\mathfrak{B} = 9000$ ein zweites, außerordentlich starkes Maximum von etwa $\mu = 250$ bei $\mathfrak{B} = 200$ auftritt, das bei weiterer Steigerung des weichen Bestandteils immer höher und höher ansteigt und auch zu immer höheren Werten der Induktion hinaufrückt. Das ursprüngliche Maximum der Grundsубstanz wird dabei immer flacher, ist aber auch bei Zusatz von 30% Eisen noch deutlich zu erkennen, bei noch höheren Werten markiert es sich nur noch als Wendepunkt. Hier also, und das ist ganz besonders wichtig und interessant,

Weiches Eisen AV₁H

Weiches Eisen mit 5% Stahl

Weiches Eisen mit 30% Stahl

Weiches Eisen mit 50% Stahl

Weiches Eisen mit 70% Stahl

Weiches Eisen mit 90% Stahl

Gehärteter Cr-C-Stahl

Stahl mit 2% weichem Eisen

Stahl mit 10% weichem Eisen

Stahl mit 30% weichem Eisen

Stahl mit 50% weichem Eisen

Stahl mit 70% weichem Eisen

Stahl mit 90% weichem Eisen

Bild 6. Permeabilitätskurven.

Bild 7. Permeabilitätskurven.

treten in den Maximis der Permeabilität die beiden Bestandteile des kombinierten Materials getrennt deutlich hervor und lassen unter Umständen sogar eine gewisse Analyse des Materials zu. Ein Beispiel möge dies zeigen.

Beispiel einer magnetischen Analyse; Schliffbild einer Probe. Ein an die Reichsanstalt eingesandter Draht aus reinstem Elektrolyteisen sollte angeblich 0,9% Kohlenstoff und 5% Wolfram enthalten, versprach also nach der Härtung bei 850° bzw. 950° gute magnetische Eigenschaften für permanente Magnete, insbesondere eine Koerzitivkraft von mindestens 60 Gauß. Die Untersuchung ergab die in Bild 8 a und b dargestellten Magnetisierungs- und Permeabilitätskurven. Danach beträgt die Koerzitivkraft statt 60 nur 27,5 Gauß, man wird also nur auf etwa 0,4% C schließen dürfen¹⁾. Außerdem zeigen die Magnetisierungskurven aus-

¹⁾ Wissenschaftl. Abh. IV, Heft 3, Abb. 47 und 48.

gesprochene Verzerrungen und die Permeabilitätskurve 2 Kuppen, welche auf das Vorhandensein zweier scharf getrennter Bestandteile in dem Material hinweisen. Das Permeabilitätsmaximum des weichen Bestandteils beträgt rund 300 und liegt bei $\mathfrak{B} = 1800$, dasjenige des harten Teiles beträgt 285 bei etwa $\mathfrak{B} = 10700$. Ein Vergleich mit Bild 7 sagt uns, daß der harte Teil in unserem Draht magnetisch erheblich weicher sein muß, als die dortige Chrom-Kohlenstoff-Legierung, denn die Maximalpermeabilität ist hier reichlich dreimal so hoch wie dort, während die geringere Höhe bei größerer Breite des Permeabilitätsmaximums des weicheren Teils

Draht aus 5% igem
Wolframstahl, bei 950°
gehärtet.

Bild 8a. Magnetisierungskurven.

Draht aus 5% igem Wolframstahl,
bei 950° gehärtet.

Bild 8b. Permeabilitätskurven.

im Draht dafür spricht, daß hier der weichere Teil erheblich schlechtere magnetische Eigenschaften hat, als bei dem in Bild 7 dargestellten kombinierten Material.

Nun ergibt sich aus der Nullkurve Bild 8a, daß den beiden Permeabilitätsmaximis bei $\mathfrak{B} = 1800$ und $\mathfrak{B} = 10700$ eine Feldstärke von $\mathfrak{H} = 6$ bzw. $\mathfrak{H} = 37$ entspricht; es wurde aber früher¹⁾ die empirische Regel gefunden, daß das Maximum der Permeabilität bei einer Feldstärke liegt, die etwa dem 1,3fachen der Koerzitivkraft entspricht. Somit würde die Koerzitivkraft für den weichen Bestandteil etwa $6:1,3 = 4,6$ und für den harten etwa $37:1,3 = 28,4$ Gauß betragen. Der letztere Wert stimmt mit dem gemessenen Wert der Koerzitivkraft des ganzen Drahtes 27,5 Gauß durchaus befriedigend überein, da ja durch den weichen Bestandteil die Koerzitivkraft des harten Materials etwas herabgesetzt werden muß.

Es war nun interessant, die gefundenen magnetischen Ergebnisse an einem Schliffbild zu prüfen, das der größeren Deutlichkeit halber an einem schrägen Schnitt

¹⁾ Gumlich und Schmidt, ETZ. 1901. 22. S. 697.

durch den Draht ausgeführt wurde. Bild 9a und b geben die Aufnahmen des ungehärteten Materials im Anlieferungszustand wieder. Sie zeigen deutlich, daß offenbar bei der Herstellung des Drahtes eine Entkohlung der äußeren Randschicht

Bild 9a. Draht aus Cr-C-Legierung; schräger Durchschnitt. 50 ×

Bild 9b. Draht aus Cr-C-Legierung; Rand. 500 ×

stattgefunden hat, die ungefähr 13 % des gesamten Querschnitts in Anspruch nimmt und im wesentlichen nur noch einen auf dem Schlibfbild nicht erkennbaren Anteil an Wolfram in Lösung enthält, während der gesamte innere Teil aus der normalen Wolfram-Kohlenstoff-Legierung besteht, deren Aussehen auch nach der Härtung

keine besonderen charakteristischen Änderungen erleidet. Eine nachträgliche Anfrage bei der liefernden Firma bestätigte die Annahme eines Irrtums bei der chemischen Analyse, infolgedessen der Kohlestoffgehalt nicht 0,9%, sondern nur 0,3 bis 0,4% betrage. Außerdem wurde mitgeteilt, daß die Probe bei der Verarbeitung in Wasserstoff bei 850° geglüht worden war; hierdurch erklärt sich also das Entstehen der entkohlten Randzone.

Bild 10. Aluminiumlegierung (Blech)
nach dem Glühen bei 800° - - - - -
nach dem Glühen bei 1100° ———.

Praktische Beispiele von Schichtungen; mikroskopische Aufnahmen. Zwei weitere instructive Beispiele hat die Untersuchung der Aluminium-

Bild 11. Legierung mit 0,70% Al (Blech) nach dem Glühen bei 1100° Randpartie. 500 ×

und der Mangan-Legierungen ergeben¹⁾. Bei den zu Blech ausgewalzten Aluminium-Legierungen traten bei niedrigem Prozentgehalt mit der Glühtemperatur (bis 1100°)

¹⁾ Wissenschaftl. Abh. IV, S. 371 u. 389.

wachsende starke Verzerrungen der Magnetisierungskurven an (vgl. Bild 10), zu deren Erklärung damals mangels mikrographischer Unterlagen nur Vermutungen geäußert werden konnten, die sich nunmehr nach photographischer Aufnahme mehrerer Schliffe als richtig erwiesen. Danach besteht (Bild 11) die Hauptmasse des Grundmaterials mit 0,7% Al aus wohl ausgebildeten, magnetisch weichen Ferrit-Mischkristallen, die von einem offenbar magnetisch harten Rand von etwa $\frac{1}{8}$ der Blechdicke umgeben ist, welcher bei der entsprechenden, bei nur 800° geglühten Probe vollkommen fehlt. Über die eigentliche Natur dieser Randzone läßt sich natürlich ohne eingehende Untersuchungen nichts feststellen; wahrscheinlich handelt es sich um Beimischungen von Eisenxyd-Oxydul, das ja als magnetisch ziemlich harte Substanz anzusehen ist.

Endlich zeigte ein Stab aus einer Eisenlegierung mit 12,4 % Mn nach dem Abschrecken von 800° eine starke Verzerrung zwischen Remanenz und Koerzitivkraft (Abb. 12), welche offenbar durch die Kombination des harten Grundmaterials

Bild 12. Manganlegierung ^{124}C nach dem Abschrecken von 800° .

mit einer dünnen weichen Oberflächenschicht hervorgerufen wurde und nach oberflächlichem Abschmirgeln des Stabes verschwand. Diese Schicht ist jedenfalls dadurch entstanden, daß während der Erhitzungen vor dem Abschrecken der Mangan-Gehalt der Oberfläche oxydiert wurde, so daß sich eine dünne Schicht von reinem Eisen oder niedrigeren Mn-Legierungen bildete, welche den Charakter der ursprünglichen Kurve entsprechend veränderte; dies ließ sich sogar rechnerisch verfolgen: nimmt man nämlich den Querschnitt des ausgeschiedenen Eisens zu $\frac{1}{50}$ von demjenigen des Kernes an, so erhält man unter Verwendung der Hystereseschleife 3 für reines Eisen nach der Beziehung $\mathfrak{B}_4 = \mathfrak{B}_2 + \frac{1}{50} \mathfrak{B}_3$ die Kurve 4, welche tatsächlich zwischen Remanenz und Koerzitivkraft sehr nahe mit der beobachteten Kurve zusammenfällt.

Berücksichtigung des Einflusses von Luftschichten usw. Zu dieser Art von Kombination gehört im grunde genommen auch die Verbindung der ferromagnetischen Probe mit einer umgebenden Luftschicht, wie sie bei jeder ballistischen Messung vorkommt. Da nämlich die sekundäre Spule die Probe niemals vollkommen eng umschließt, sondern immer durch eine mehr oder weniger dicke Unterlage, eine Luftschicht und dergleichen von ihr getrennt ist, und da sich außerdem bei der Messung von Blechen und Drähten auch zwischen den einzelnen Probeteilen Luftschichten befinden, so rührt der ballistische Ausschlag des Galvanometers nicht nur von der Induktion $\mathfrak{B}$ im Eisen, sondern auch von den Kraftlinien in dieser von der Spule umschlossenen Schicht her. Diese Kraftlinien sind durch

die innerhalb der Magnetisierungsspule herrschende Feldstärke $\mathfrak{H}$ gegeben. Bezeichnet also q' den mittleren Querschnitt der Sekundärspule, q denjenigen der Probe; so ist der gesamte gemessene Kraftlinienfluß $\Phi = q \times \mathfrak{B} + (q' - q) \times \mathfrak{H}$, oder die gesuchte Induktion $\mathfrak{B} = \frac{\Phi}{q} - \left(\frac{q'}{q} - 1\right) \times \mathfrak{H}$.

Auch die unkorrigierte $\mathfrak{B}/\mathfrak{H}$ -Kurve wird also durch die mitgemessenen Luftlinien etwas deformiert, wenn auch bei niedrigen Feldstärken kaum merklich. Dagegen spielen diese Korrekturen bei den höheren Induktionen und hauptsächlich bei der Bestimmung der Sättigungswerte eine geradezu ausschlaggebende Rolle und erfordern namentlich bei den sogenannten Isthmus-Methoden eine besonders sorgfältige Berücksichtigung.

Ungleichmässige, geschichtete Proben mit freien Enden. Die bisherigen Ausführungen bezogen sich auf den Fall, daß die zu untersuchende Probe in sich selbst oder vermittelt eines Jochs zu einem magnetischen Kreis zusammengeschlossen ist, also keine freien Enden besitzt; sie haben also nicht ohne weiteres Gültigkeit für die magnetometrischen Messungen, bei denen das Vorhandensein freier Enden geradezu Vorbedingung ist. Es erschien deshalb erwünscht, auch diese Wirkung der freien Enden von Probestücken zu berücksichtigen. Hier hat man an allen den Stellen, wo Induktionslinien aus dem Innern nach außen treten, freien Magnetismus anzunehmen, der auf das Innere des Stabes entmagnetisierend zurückwirkt, d. h. die dort vorhandene Feldstärke verringert. Infolgedessen verlaufen die mit einem freiem Stabe aufgenommenen Magnetisierungskurven schräger, als die mit dem geschlossenen magnetischen Kreis gewonnenen, und zwar um so mehr, je kürzer und dicker die Proben, also je kleiner das Dimensionsverhältnis $\frac{l}{d}$ ist (l = Länge, d = Durchmesser). Ganz besonders tritt dies hervor bei der scheinbaren Remanenz, die infolgedessen namentlich bei weichen Materialien unter Umständen sehr erheblich geringer wird als die wahre, im geschlossenen Kreis gemessene Remanenz. Außerdem ist die Rückwirkung proportional der Intensität der Magnetisierung $\mathfrak{J}$, so daß für die wahre, im Innern der Probe herrschende Feldstärke $\mathfrak{H}$ die Beziehung gilt

$$\mathfrak{H} = \mathfrak{H}' - N \times \mathfrak{J};$$

dabei ist $\mathfrak{H}'$ die Feldstärke der Magnetisierungsspule und N der sogenannte Entmagnetisierungsfaktor, der durch die Gestalt der Probe gegeben ist, aber nur beim Ellipsoid für jede Magnetisierung konstant ist und sich aus den Dimensionen berechnen läßt, beim Stab oder Blechbündel aber auch noch von $\mathfrak{J}$ abhängt.

Besteht nun die Probe, wie in unserem Fall, aus einem stärker und einem schwächer magnetisierbaren Teil, so wird die magnetische Belegung der Enden und infolgedessen auch die Rückwirkung beider Teile auf die Feldstärke im Innern ganz verschieden sein; die Rückwirkung wird nicht nur die Feldstärke des zugehörigen, sondern auch diejenige des anderen Bestandteiles beeinflussen, und zwar um so stärker, je näher die beiden Bestandteile aneinander liegen. Um dies möglichst deutlich zu machen, kombinierte man ein Bündel von Blechstreifen aus magnetisch vorzüglichem Elektrolyteisen mit einem Bündel von Streifen aus gehärteter Kohlenstoff-Legierung mit 1,5% C, und zwar einmal, indem man das weiche und das harte Bündel durch eine 4,5 mm dicke Zwischenlage aus Holz trennt, so daß die gegenseitige Wirkung der Enden des einen Bündels auf das andere Bündel noch verhältnismäßig gering blieb, und ferner, indem man die beiden Materialien abwechselnd schichtete, so daß die gegenseitige Wirkung ein Maximum wurde. Beides wurde mit Bündeln von möglichst gleichem Querschnitt und von 22,5 cm bzw. 7,5 cm Länge durchgeführt, um auch über die Zunahme der Wirkung mit der Verringerung der Dimensions-

verhältnisses Aufschluß zu erhalten. Die Aufnahme erfolgte mit dem störungsfreien Magnetometer von Kohlrausch und Holborn, und zwar befanden sich die von der Magnetisierungsspule umschlossenen Probekörper stets im gleichen Abstand vom Magnetometermagnet, so daß es gestattet war, als Maß für die Magnetisierung vergleichsweise direkt die Magnetometerausläge zu benutzen. In derselben An-

5 Streifen Elektrolyteisen, 4 Streifen Stahlblech; Länge = 22 cm
berechnet in zwei Bündeln abwechselnd geschichtet

Bild 13. Magnetometrische Beobachtung.

5 Streifen Elektrolyteisen,
4 Streifen Stahlblech; Länge 7,5 cm.
berechnet in zwei Bündeln
abwechselnd geschichtet

Bild 14. Magnetometrische Beobachtung.

ordnung wurden auch die weichen und harten Bündel für sich allein untersucht und in der früher angegebenen Weise rechnerisch kombiniert; der Vergleich der so berechneten mit den experimentell gefundenen Schleifen läßt dann den wechselseitigen Einfluß der freien Enden erkennen.

Das Ergebnis ist in Bild 13 und 14 für Bündel von 22,5 bzw. 7,5 cm Länge dargestellt. Die aus den Schleifen der beiden Bestandteile berechneten Hystereseschleifen zeigen sich in beiden Fällen weit weniger stark verzerrt, als dies unter denselben Verhältnissen beim geschlossenen Kreis der Fall gewesen wäre (vgl. Bild 1 und 2, 50%), da hier infolge der Einwirkung der freien Enden die B/S' -Schleife viel weniger steil ansteigt, als dort die B/S -Schleife. Die Verzerrung wächst jedoch deutlich bei den experimentell aufgenommenen Kurven in Abb. 13, und zwar noch in erhöhtem Maße bei der abwechselnd geschichteten Probe. Weniger deutlich aus-

geprägt ist sie bei Bild 14, die dafür wieder den ganzen Charakter der Einwirkung der Enden am stärksten hervortreten läßt. Hiernach liegt die tatsächlich beobachtete Induktion der kombinierten Bündel erheblich höher als der berechnete Wert (rund 475 gegen 400 mm) und ebenso liegt der absteigende Ast bis in die Gegend von 100 mm Ausschlag weit oberhalb der berechneten Werte, um dann darunter zu sinken. Der aufsteigende Ast liegt durchweg oberhalb des berechneten,

so daß also die experimentell erhaltene Hystereseschleife gegenüber der berechneten im unteren Teil außerordentlich zusammenschrumpft. Dies erklärt sich folgendermaßen:

Denkt man sich in einem homogenen Bündel weichen Materials einzelne Streifen durch hartes Material ersetzt, so wird die Wirkung von deren freien Enden auf die Feldstärke im Innern geringer, bei gleichbleibender Feldstärke der Magnetisierungsspule muß also die wahre Feldstärke und somit auch die Induktion gegenüber der berechneten steigen. Dies ist solange der Fall, als die wahre Induktionskurve des harten Materials unterhalb derjenigen des weichen liegt. Zwischen Remanenz und Koerzitivkraft aber dreht sich dies um; hier sinkt mit wachsender Feldstärke die Induktion des weichen Materials außerordentlich rasch, um bald negativ zu werden, während diejenige des harten Materials noch lange positiv bleibt. Nunmehr wird die entmagnetisierende Wirkung der Enden des harten Materials auf das gesamte Bündel größer, als es im Fall des gleichmäßig weichen Materials gewesen wäre, die Feldstärke und somit auch die Induktion müssen also unter den berechneten Wert sinken. Eine Übersicht hierüber gibt die nachstehende Tabelle.

l cm	Scheinbare Remanenz in mm			Scheinbare Koerzitivkraft in Gauß		
	berechnet	kombiniert in zwei Bündeln	abwechselnd geschichtet	berechnet	kombiniert in zwei Bündeln	abwechselnd geschichtet
22,5	244,3	108,5	37,6	4,0	1,3	0,4
7,5	133,2	41,4	10,2	6,7	1,85	0,4

Hieraus geht hervor, daß die scheinbare Remanenz und die scheinbare Koerzitivkraft namentlich bei abwechselnder Schichtung ganz außerordentlich stark unter die berechneten Werte sinken, und zwar auf den 13. bzw. 17. Teil. Es folgt daraus, daß auch die Bestimmung der Koerzitivkraft mit dem Magnetometer, die bei gleichmäßigem Material von der Wirkung der freien Enden unabhängig ist (wegen $\mathfrak{J} = 0$ in der Formel $\mathfrak{H} = \mathfrak{H}' - N\mathfrak{J}$), bei ungleichmäßigem geschichtetem Material vollkommen versagt; sie liefert unter sonst gleichen Verhältnissen um so kleinere Werte, je geringer das Dimensionsverhältnis der Probe ist.

Einfluß vereinzelter harter oder weicher Stellen. Während die bisher betrachtete Wirkung der Kombination verschiedenartigen Materials in Form von Längsschichten verhältnismäßig recht gut zu übersehen und experimentell zu prüfen ist, bietet die Untersuchung der Wirkung von vereinzelt abgegrenzten harten Stellen in weichem Material, oder umgekehrt, erhebliche Schwierigkeit. Zwar ist der Einfluß des wachsenden Gehaltes an hartem Eisenkarbid Fe_3C in Gestalt von Perlit in weichem Ferritgefüge durch die Untersuchung der langsam abgekühlten Eisen-Kohlenstoff-Legierungen in der Reichsanstalt eingehend untersucht worden, und ebenso die Wirkung des gelösten Kohlenstoffs bei abgeschreckten C-Legierungen¹⁾, aber die Anschaulichkeit des Ergebnisses wird dadurch beeinträchtigt, daß die magnetischen Eigenschaften des einen Bestandteils, des Zementits, nicht bekannt sind. Man könnte daran denken, die Kombination von hartem und weichem Material mit bekannten Eigenschaften in Form von Pulvern oder Feilspänen gemischt zu untersuchen; dies hat aber einmal den Nachteil, daß die Zerkleinerung von weichem Eisen mit einer starken mechanischen und magnetischen Härtung verbunden ist, und daß weiterhin die Magnetisierungskurven von derartigen pulverförmigen Proben infolge der Luftzwischenräume und der außerordent-

¹⁾ Wissenschaftl. Abb. IV, H. 3.

lich stark entmagnetisierenden Wirkung der freien Enden der kleinen Teilchen so gestreckt verlaufen, daß geringere Änderungen der magnetischen Eigenschaften kaum festzustellen sind. Es wurde nun versucht, wenigstens einen gewissen Überblick dadurch zu gewinnen, daß man die mittleren Teile eines Stabes aus Stahl und eines solchen aus weichem Eisen von bekannten magnetischen Eigenschaften in einzelne Stücke von 5 bzw. 10 mm Länge zerlegte, von denen die kürzeren beiderseits einen Zapfen von 2,5 mm Länge mit Gewinde trugen, die längeren mit entsprechendem Gewinde versehene Bohrungen von gleicher Länge, so daß man Stäbe beliebig aus harten und weichen Materialteilen zusammensetzen und im Joch untersuchen konnte. Um den Gegensatz zu vermehren, wurden die Stahlstücke nachträglich noch gehärtet. Auch hier war der Einfluß der Luftschlitze zwischen den einzelnen Einsatzstücken störend und bedingte einen schrägeren Anstieg der Magnetisierungskurve; man konnte dem aber dadurch einigermaßen Rechnung tragen, daß man die Proben zunächst aus identischem Material zusammensetzte und dann erst einzelne Stücke durch Material aus anderen Sorten ersetzte, wobei die Anzahl der Luftschlitze ungeändert blieb. Das Ergebnis der ganzen ziemlich umfangreichen Messungen läßt sich folgendermaßen zusammenfassen:

Im Gegensatz zu den Kombinationen von Längsschichtungen tritt hier eine Verzerrung der Magnetisierungskurven überhaupt nicht auf. Jede Einfügung eines harten Teils in weiches Grundmaterial oder umgekehrt macht sich natürlich durch entsprechende Abflachung bzw. Erhöhung der Gestalt der Magnetisierungskurven sowie durch eine entsprechende Vergrößerung oder Verringerung der Koerzitivkraft bemerkbar; die Kurven verlaufen aber durchaus regelmäßig, einerlei, ob sich die mit dem ballistischen Galvanometer verbundene Induktionsspule direkt über der Unstetigkeitsstelle befindet oder ein Stück seitlich davon. Auch die mit dem Joch aufgenommenen Kurven der abwechselnd aus harten und weichen Teilen zusammengesetzten Stäbe verliefen durchaus normal und gaben auch, abgesehen von der üblichen Scherung, dieselbe Koerzitivkraft wie das Magnetometer, und zwar ließ sich in diesem Falle die Koerzitivkraft der kombinierten Proben aus den Koerzitivkräften der einzelnen Teile ziemlich genau berechnen. Beispielsweise bestand ein derartiger Stab aus 9 weichen und 8 harten Stücken, deren Gesamtgewicht sich wie 53:47 verhielt; die Koerzitivkraft des weichen Materials betrug 1,2, diejenige des harten 45 Gauß. Die Berechnung lieferte $0,47 \cdot 45,0 + 0,53 \cdot 1,2 = 21,8$ Gauß, während die Beobachtung mit dem Magnetometer 21,9 Gauß ergab.

Hiernach würde sich beispielsweise auch die Koerzitivkraft des Eisenkarbids, das ja bei jedem käuflichen Eisen als Verunreinigung in größerer oder geringerer Menge vorkommt, überschlagen lassen. Die Koerzitivkraft der eutektoiden Legierung mit rund 1% C beträgt nach den Messungen der Reichsanstalt (a. a. O. S. 334) für eine maximale Feldstärke $\mathfrak{H} = 150$ etwa 8 Gauß. Nun nimmt bei der eutektoiden Legierung das Eisenkarbid etwa 15% des Volumens ein, das reine Eisen dagegen 85%; setzt man die Koerzitivkraft des letzteren zu 0,7, so erhält man aus der Beziehung $15x + 85 \cdot 0,7 = 100 \cdot 8,0$ für die gesuchte Koerzitivkraft des im Eisen eingebetteten Eisenkarbids für eine Feldstärke von $\mathfrak{H} = 150$ rund 50 Gauß.

Jedenfalls geht aus dem Obigen hervor, daß die magnetometrische Bestimmung der Koerzitivkraft, dieser zur Charakterisierung des Materials so wichtigen Konstante, auch bei inhomogenem Material, falls dies nur die verschiedenen Bestandteile nicht in geschichtetem Zustand enthält, richtige Werte liefert, welche mit der gewöhnlichen Definition der Koerzitivkraft als derjenigen Feldstärke, die zur Beseitigung der Remanenz notwendig ist, im Einklang stehen.