

Componente

4. Bauelemente

4.1. Messverfahren magnetischer Kenngrößen von Bauelementen

Dr. Ing. H. Diebold, Berlin

Zusammenfassung

Das Prüfen und Messen der Geräte in ihren verschiedenen Herstellungsstadien ist ein sehr wesentlicher Arbeitsprozeß, dessen Bedeutung wohl allgemein erkannt ist. Je mehr sinnvolle Zwischenprüfungen eingeführt werden, um so weniger Ausfall und Verlust von Montagezeit sind zu erwarten, und um so größer wird die Qualität der Erzeugnisse sein. Das Messen setzt bereits bei der Herstellung der Werkstoffe ein, und es sind wie auf allen übrigen Gebieten auch für die magnetischen Werkstoffe DIN-Normen geschaffen worden, die zwar noch nicht sämtlich vollständig verbindlich gelten, nach deren Entwurfsdaten man sich aber bereits weitgehend richtet. Diese Daten sind naturgemäß rein physikalischer Art, möglichst unabhängig von Probenform und Aufbau der späteren Anwendungsart, die reinen Werkstoffkennwerte erfassend. Zu ihrer Bestimmung werden Meßgeräte benötigt, die oft wegen eines mehr physikalischen Aufbaues verhältnismäßig umfangreich sind. Ihre Bedienung ist meist kostspielig. Entsprechend der unumgänglichen Forderung, jedes einzelne Bauelement vor seinem Einbau auf seinen Funktionswert hin zu prüfen, gilt es zuerst, den sinngemäßen Zusammenhang zwischen diesem Funktionswert und den Werkstoffkennwerten zu ermitteln und danach einfache, schnell arbeitende Meßverfahren hierfür anzuwenden. Liegt die Formgebung und thermische Endbehandlung der Bauelemente beim Werkstoffhersteller, wie dies z. B. bei Übertragern, Massekernen und Dauermagneten der Fall ist, so wird in Vereinbarung mit dem Verbraucher das Meßverfahren und die zu bestimmende Kenngröße festgelegt. Es ist anzustreben, daß der Hersteller in die Lage versetzt wird, jedes einzelne Stück zu prüfen, ohne daß dadurch der Verbraucher vorerst von einer Eingangsprüfung entbunden ist. Transformatorenbleche und Relaissteile werden dagegen üblicherweise als Halbzeug geliefert, und hier muß der Verbraucher möglichst noch die Werkstoffkennwerte bestimmen können.

In der folgenden Beschreibung der einzelnen Bauelementegruppen werden, ausgehend von den DIN-Kenngrößen, der Zusammenhang derselben mit den üblicherweise zu messenden Funktionswerten und die zweckmäßigsten Meßverfahren behandelt.

1. Übertrager

Für Elektrobleche, deren Arbeitspunkt bei kleinen Induktionen im Anfangsgebiet der Magnetisierungskurve liegt, gilt als Werkstoffnorm das seit Mai 1954 verbindliche DIN-Blatt 41301 „Magnetische Werkstoffe für Übertrager“. Anwen-

4

dung finden diese Bleche mit Dicken von 0,35 bis herab zu 0,1 bzw. 0,05 mm hauptsächlich im Tonfrequenzbereich bis zu einigen kHz. Die Entwicklungsrichtung zielt aber auf Blechdicken bis herab zu einigen Tausendstel Millimetern für das HF-Gebiet hin. Die normenmäßig vorgeschriebene Meßfrequenz beträgt 50 Hz, liegt also weit unterhalb der Grenzfrequenz, so daß die wirksame Permeabilität μ als Quotient der maximalen Induktion B_{\max} durch den Scheitelwert der Feldstärke unmittelbar der statisch gemessenen Gleichstrompermeabilität entspricht. Als Feldstärkenwerte sind 5 mOe für die hochpermeablen Werkstoffe (E3-Blech) und 20 mOe für die niederpermeablen Legierungen (A3- und D-Blech) festgelegt. Bei letzteren ist z. T. noch ein weiterer Meßpunkt bei 100 mOe zur Erfassung des Permeabilitätsanstiegs für klirrgradarme Übertrager vorgeschrieben.

An dieser Stelle sei kurz auf die verschiedenen Begriffe der Permeabilität, wie sie im Normblatt 41 130 beschrieben sind, eingegangen: Man rechnet zur Zeit mit verschiedenen Maßsystemen. Die Tendenz geht dahin, das absolute elektromagnetische cgs-System durch das Giorgische MKSA-System abzulösen. Um zu vergleichbaren Maßzahlen zu gelangen, wird der für Gleich- und Wechselstrom gültige Begriff der relativen Permeabilität als Vergleich der absoluten Permeabilität zu der absoluten Permeabilität des Vakuums als dimensionslos benutzt. Mit der Gleichfeldpermeabilität vergleichbar ist bei Wechselstrommagnetisierung mit vernachlässigbar geringem Wirbelstromeinfluß die Scheinpermeabilität μ_S aus

$$\mu_S = \frac{B_{\max}}{H_{\max}}$$
 Grundsicherung. Die Wirk- und Blindpermeabilität μ_{LR} und μ_{RR} sind die Phasenverschiebung zwischen der Induktion und der Grundwelle der Feldstärke und sind als Komponenten μ_{LR} und μ_{RR} der komplexen Permeabilität μ_{komplex} setzbar, wenn man den Übertrager als eine Induktivität auffaßt, die mit einem Verlustwiderstand in Reihe liegt. Der Betrag der komplexen Permeabilität ist gleich der Scheinpermeabilität μ_S nach Gl. (1):

$$\mu_S = \bar{\mu} = \sqrt{\mu_{LR}^2 + \mu_{RR}^2} \quad (1)$$

Der Begriff „Überlagerungspermeabilität“ $\mu_{\text{Ü}}$ bei gleichzeitiger Magnetisierung mit Gleichfeldern und kleinen Wechselfeldern, wie sie z. B. bei anodenstromdurchflossenen Übertragern vorliegt, entspricht der reversiblen Permeabilität μ_{rev} . Bei größerer Wechselfeldbelastung wird das magnetische Verhalten sehr verformt und man wird sich den jeweils vorliegenden praktischen Anforderungen: sinusförmige Spannung oder sinusförmiger Strom anpassen.

Als Funktionswert der fertigen Übertrager oder Drosseln gilt in erster Linie die Induktivität L und daraus als magnetische Kenngröße die sogenannte Induktivitätskonstante A_L als Quotient aus L in $H\gamma$ und dem Windungsquadrat N^2 der Prüfwicklung. Dieser allgemein eingeführte A_L -Wert ist mit der Scheinpermeabilität in einfacher Abhängigkeit über die jeweiligen Kerndimensionen (Kernlänge L_B und Eisenquerschnitt F_B) verknüpft nach Gl. (2)

$$A_L \cdot 10^{-6} = \frac{0,4 \pi \cdot 10^{-9} \cdot F_B}{L_B} \cdot \mu_H$$

Gl. (2) ist der A_L -Wert als magnetische Leitfähigkeit für eine bestimmte Kernform Grundlage für die praktische Berechnung von Übertragern.

Man kann somit aus der einfachen L -Bestimmung bei bekannter Windungszahl die Permeabilität berechnen, wobei allerdings die Messung bei 50 Hz mit normaler

4.1

L-Brücken nicht mehr sicher ist. Übliche Messungen, z. B. bei 800 Hz, ergeben jedoch bei hochpermeablen Werkstoffen wegen der bereits tiefer liegenden Grenzfrequenz eine wirbelstrombedingte Minderung des L -Wertes um beispielsweise 65 % bei E3-Blech von 0,35 mm Dicke, dessen Grenzfrequenz bereits bei 340 Hz liegt. Die sicherste Methode ist die Messung des A_L -Wertes bei 50 Hz aus einer Strommessung und der in einer Sekundärwicklung induzierten Spannung, also eines praktisch leerlaufenden Übertragers. Es gibt dazu komplizierte Geräte, wie das Ferrometer oder den Vektormesser, die mittels gesteuerter Kontaktgleichrichter bei sinusförmiger Spannung über die DIN-Feldstärkeprüfwerte hinaus die Messung der gesamten Magnetisierungskurven und Hystereseschleifen gestatten. Einfache, mit sinusförmigem Strom arbeitende Geräte zeigen im Anfangsgebiet der Magnetisierungskurve im sogenannten Rayleigh-Gebiet wegen der hier praktisch noch reversibel verlaufenden Magnetisierungsvorgänge ausreichend genau vergleichbare Werte.

Eines dieser Geräte, der sogenannte A_L -Messger, besitzt eine stabilisierte Stromversorgung über normale Netztrafos mit drei verschiedenen, den Prüffeldstärken angepaßten festen Stromwerten. Die induzierte Spannung wird bei ausgesiebttem Oberwellenteil 2000fach verstärkt, mittels Röhrenvoltmeter praktisch leistungslos angezeigt. Zur Probenaufnahme dienen Meßkäfige mit Steckspulen, jeweils einer für jede Probenform. Die Anpassung der festen Ströme der Stromversorgung an die verschiedenen Eisenweglängen sowie die der induzierten Spannung an die verschiedenen Eisenquerschnitte der einzelnen Kennformen erfolgt in jedem Meßkäfig gesondert. Diese A_L -Messger arbeiten bei einer für die meisten technischen Verwendungszwecke ausreichenden Genauigkeit von $\pm 3\%$ sehr schnell und sind sowohl zur Beurteilung des Werkstoffes in Anlehnung an die DIN-Normen als auch der Einflußgrößen, wie Luftspalt, Vormagnetisierung usw., bei den verschiedenen Kerntypen ausgezeichnet geeignet.

Für die Anwendung von Übertragerkernen interessiert neben den reinen Werkstoffkennwerten besonders die Frequenzabhängigkeit des Wirkwiderstandes, um daraus den Verlustwinkel $\operatorname{tg} \delta = R_{\text{Wirk}} / \omega L$ bzw. dessen Kehrwert, die Spulengüte Q , zu bestimmen und damit die Dämpfungsverhältnisse erkennen zu können. Üblicherweise werden Brückenordnungen, z. B. nach Maxwell-Wien, zur Bestimmung des Frequenzganges von L und R_{Wirk} herangezogen. Hierbei wird die Messung von R_{Wirk} als Summe aus Wicklungswiderstand R_{Cu} und Eisenverlustwiderstand R_{Fe} und besonders die getrennte Erfassung von R_{Fe} bei tiefen Frequenzen ungenau. Besonders dann, wenn R_{Fe} sehr klein gegen R_{Cu} wird, so daß schon kleine Änderungen von R_{Cu} , z. B. durch Temperaturschwankungen, wesentliche Meßfehler geben. Ein Meßverfahren im Bereich tiefer Frequenzen von 1000 Hz bis herab zu 1 Hz bei Feldstärken von 1 bis 100 mA/cm ist von Wilde als Gegeninduktivitäts-Meßbrücke entwickelt worden, bei der diese Fehlermöglichkeit eliminiert wird. Dieses Verfahren ist wegen seines verhältnismäßig komplizierten Aufbaues und entsprechend schwieriger Bedienung mehr als physikalisches Gerät anzusprechen, das noch keine Verwendung für die technische Prüfung von Übertragern gefunden hat. In der Grundlagenforschung, z. B. zur Bestimmung der Richterschen Nachwirkungserscheinungen, die besonders an Fe-Si-Blech (A3-Blech) stark störend auftreten, hat sich die Gegeninduktivitäts-Meßbrücke als sehr gut geeignet erwiesen. Eine strenge Trennung der Anwendungsgebiete zwischen Kernblechen und Masseisen als Spulenkernwerkstoffe besteht nicht, man wird

die jeweils zweckmäßigste Form suchen müssen. Aus diesem Grund besteht auch eine gewisse Parallelität zwischen den Meßverfahren, wie aus dem nächsten Abschnitt erkennbar ist.

2. Massekerne

Im Tonfrequenz- und besonders im HF-Bereich müssen die Übertragerwerkstoffe wegen der quadratisch mit der Frequenz ansteigenden Wirbelstromverluste so weit unterteilt werden, daß die Wege bzw. die Querschnitte, in denen Wirbelströme fließen können, weitgehend reduziert sind. Eine noch nicht ausgeschöpfte Möglichkeit bietet sich mittels ultradünner Bänder. Eine zweite weitgehend unbekannt gewordene Methode sind die aus isoliert verpreßten Eisenpulverteilchen bestehenden Massekerne, zu denen zweckmäßig, wenn auch physikalisch nicht vollständig, die gesinterten Ferrite zählen. Im DIN-Entwurf 41281 vom Juli 1964 sind die Begriffsbestimmungen und Meßbedingungen für Massekerne festgelegt. Der Begriff „wirksame Permeabilität“ μ_w als Quotient der Induktivität einer beliebigen Massekernspule zu der Induktivität L_0 des gleichen Spulensystems ohne Massekern. Bei magnetisch offenen Kreisen, z. B. Zylinder oder Ringkerne und bei Kreisen mit Luftspalt, z. B. Schalen- oder Topfkern, ist μ_w wegen der formbedingten äußeren Scherung kleiner als die sogenannte Werkstoffpermeabilität an geschlossenen, streuungsfreien Ringkernen. Diese Werkstoff- oder besser Kernpermeabilität enthält nun ihrerseits die innere Scherung durch den magnetisch als kleine Luftspalte wirksamen Isolierstoffanteil zwischen den einzelnen Pulverteilchen. Durch Veränderung dieses Anteils läßt sich die Ringkernpermeabilität zwischen 5 und 60 variieren.

Bei den Massekernen findet der gleiche Begriff der Induktivitätskonstante A_L wie bei Übertragern Anwendung, und für Ringkerne entsprechend DIN-Entwurf 41285 ist für die einzelnen Kerngrößen A_L/μ in Nano H festgelegt. Bestimmte Feldstärkemeßwerte wie bei Übertragern sind nicht vorgesehen, denn hier bleibt A_L mit der Feldstärke im interessierenden Gebiet kleiner Aussteuerung weitgehend konstant bzw. steigt nur linear um den Betrag der Feldstärkenzunahme. Da diese Konstanz allerdings nur vorgetäuscht ist durch den großen Unterschied zwischen der angelegten äußeren Feldstärke und der wegen der Scherung wesentlich kleineren inneren Feldstärke wird ersichtlich, wenn der Massekern bis in die Sättigung angesteuert wird. Dann zeigt sich nämlich bei etwa 5000 Gauß eine ausgeprägte Maximalpermeabilität, die z. B. bei Kernen mit $\mu_A = 60$ bei 120...150 Oe liegt. Es wirken danach die Vielzahl der kleinen gleichmäßig verteilten Luftspalte zwischen den einzelnen Pulverteilchen in einer anderen Weise als ein großer Luftspalt an einer Stelle eines magnetischen Kreises aus kompaktem Werkstoff. Ein solcher Kreis zeigt bei gleichem μ_A praktisch konstanten Permeabilitätsverlauf bis in das Gebiet der Sättigung, in dem μ dann sinkt.

Die Erreichung einer möglichst hohen Spulengüte $Q = \frac{\omega L}{R_{\text{Wirk}}}$ ist nicht nur von den magnetischen Verlusten des Kerns, sondern mit steigender Frequenz immer mehr auch von den Wirbelstrom- und den dielektrischen Verlusten abhängig. Die Trennung der Verlustanteile ist darum zur Bestimmung des Wirkstoffes von Wichtigkeit. Hierzu hat Jordan eine grafische Trennungsmethode für die Verluste des magnetischen Kerns in Hysteresis-, Wirbelstrom- und dielektrischen

4.1

Die genaueste durch Messung bei zwei Feldstärken und zwei Frequenzen empfangene Messung der Spulengüte selbst kann mit einfachen Resonanzverfahren durch die Messung des Verlustwinkels des Kondensators mit für praktische Zwecke hinreichender Genauigkeit durchgeführt werden. Hierzu sind fabrikationsgerechte Geräte, wie L -Messgerätee für Frequenzen von 2 kHz bis 3,5 MHz und LCR -Messgerätee, greifbar. Moderne Gütefaktormesser arbeiten mit direkter Q -Anzeige bis zu 50 MHz, dabei nach dem Quotientenverfahren aus überhöhter und ein- gespeister Spannung, und eine Variationsmöglichkeit der Feldstärke erlaubt eine angenäherte Jordansche Verlusttrennung. Als Brückenverfahren sind die bereits erwähnte Maxwell-Wien-Brücke oder ähnliche Verfahren für den Frequenzbereich von 0,1 ... 1000 kHz zweckmäßig einsetzbar. Für das HF-Gebiet steht die Differentialmeßbrücke nach *Jaumann* zur Verfügung, die bei verhältnismäßig einfachem Aufbau und höherer Empfindlichkeit wesentlich genauere Messungen einschließ- lich der Verlusttrennung ermöglicht. Eine Differentialmeßbrücke mit einfacher Ansteuerung für acht Festfrequenzen von 20 ... 100 kHz bei fest einstellbaren Feldstärkewerten von 15 ... 600 A/cm wird in der Deutschen Demokratischen Re- publik gefertigt. Der sehr überstromempfindliche Thermounformter ist hier durch ein Voltmeter ersetzt. Zur schnellen direkten Permeabilitätsbestimmung von Magneten werden Permeabilitätsplättchen verwendet, die für die verschiedenen Magneten geeignete Maßstäbe benutzen, so daß der unbewickelte Kern bei z. B. 100 A/cm gemessen werden kann.

Zur Beurteilung des magnetischen Pulvers ein Ferrograph be- nutzt, die Schleifenform in Abhängigkeit von der Aussteuerung bei 50 Hz mit einem zylindrischen Rohr anzeigt.

1.2. Transformatorbleche

Die Eigenschaften der Übertrager und Drosseln, die bei hohen Induktionen arbeiten, werden durch die Werkstoffkennwerte die Magnetisierbarkeit, ausgedrückt in Induktion B in Gauß bei festgelegten Feldstärkewerten, und besonders die Ummagnetisierungs- verluste in W/kg für die zwei festgelegten Induktionswerte B 10000 und 15000 Gauß. Im Normenentwurfblatt DIN 46400 „Dynamo- und Transformatorenblech“, Ent- wurf Januar 1953, das neu überarbeitet demnächst verbindlich wird, sind die ver- schiedenen legierten Blecharten mit Blechdicken 0,5 und 0,35 mm nach den Wattverlusten V_{10} und V_{15} , also für 10 und 15 kG, geordnet. Dieses Normblatt ist hauptsächlich auf die Gegebenheiten der Starkstromtechnik zugeschnitten; die Nachrichtentechnik wird fast ausnahmslos von den vier warmgewalzten Blech- arten das hochlegierte Dynamoblech IV einsetzen. Die hierbei oft gewünschten Blechdicken $< 0,35$ mm ebenso wie das in der Entwicklung stehende kaltgewalzte Blech mit Kornorientierung sind normenmäßig nicht berücksichtigt. Als Meß- verfahren gilt hier 50 Hz, d. h., die Werte der Magnetisierbarkeit entsprechen, wie sie in den Übertragerblechen gezeigt, den statischen Werkstoffkennwerten. Der Ummagnetisierungsverlust enthält jedoch neben dem reinen Hystereseverlust einen erheblichen Wirbelstromverlustanteil, der bei Dynamoblech IV und 0,35 mm Blech- dicke etwa 0,3 bis 0,4 W/kg, d. h. bis zu 40 % des Gesamtverlustes, ausmacht. Für die Messung der Verlustwerte ist zur Zeit nur der Epstein-Apparat, ein bereits seit über 20 Jahren bestehendes Meßverfahren an Streifenbündeln von 10 kg Ge- wicht, normenmäßig anerkannt, trotzdem spätere Untersuchungen zeigten, daß z. B. durch die Stoßstellen zwischen den in einem Viereck angeordneten Bündeln

4

erhebliche Feldstärkenunterschiede und damit inhomogene Magnetisierung auftreten. Moderne Verfahren, z. B. das Ferrimeter und der Vektormesser, gestatten, aus der Messung der Wirkkomponente des Magnetisierungsstromes und der induzierten Spannung, schnell und sicher die Bestimmung der Verlustzahlen an beliebigen Probenformen mit geschlossenem Eisenweg, z. B. an Ringen, Bandkernen und geschichteten Kernpaketen. Wegen des stärkeren Einflusses der Schnitt- oder Stanzhärtung auf diese Probenformen stiegen die hieran ermittelten Werte ein bis zwei Zehntel Watt höher als die für Epsteinbündel. Neben diesen Verfahren bestehen noch verschiedene zerstörungsfreie Vergleichsmethoden an ganzen Blechtafeln, z. B. in Form von Aufsetzjochen (Bügeleisen), die wegen der vernachlässigten Streuverhältnisse nur als Sortiergeräte dienen können. Neuerdings verwendet man auch absolut messende Ganztafelmeßgeräte und Spezialmeßjochs, die die Kernformeffekte der relativen Methode durch besondere Feldmeßjochs mit direkter Feldstärkemessung an der Probenoberfläche vermeiden.

Die Messung der Leerlaufstromaufnahme im Sättigungsgebiet ist besondere Beachtung der genauen Gewichtsbestimmung der Blechpakete zu widmen. Eine Querschnittsbestimmung aus der Blechzahl ist wegen der schwankenden Blechdicken besonders unsicher. Bereits kleine Unterschreitung des Sollgewichts aus der Berechnung gibt bei Einstellung des Sollspannungswertes wegen des flachen Verlaufs der Magnetisierungskurve im Sättigungsgebiet eine starke Leerlaufstromzunahme. Ferner ist zu berücksichtigen, daß im Gebiet mittlerer Induktionen die normenmäßig angegebenen Induktionswerte an Kernpaketen nicht immer mit den festgelegten Feldstärken erreichbar sind. Hier werden z. B. bei Mantelkernen die beiden Querschnittseinschnürungen an den Luftspaltstellen bei wechselseitiger Schichtung vorzeitig übersättigt und setzen damit durch ihre kleinere Permeabilität den magnetischen Kreiswiderstand herauf. Es liegen Messungen vor, bei denen an M-42-Kernpaketen und normaler Mittelstegmagnetisierung für 10000 Gauß eine 5fach höhere Feldstärke erforderlich ist, bzw. der B -Wert für 10 A/cm 30 % unter dem Sollwert liegt. Am gleichen Kernpaket lassen sich durch gleichsinnige Rahmenmagnetisierung die tatsächlichen Werkstoffwerte in Übereinstimmung mit den DIN-Werten ermitteln, d. h., es ist dies ein reiner Kernformeffekt.

4. Relais

Für Relaisisen ist im Oktober 1954 ein erster Normenentwurf zur Debatte gestellt worden. In diesem sind für acht unlegierte eisen- und sieben nickel- bzw. siliziumlegierte Werkstoffe Richtwerte für die Induktion bei Feldstärken zwischen 6,3 und 125 Oe und Sollwerten der Koerzitivkraft zwischen 1,5 und 0,03 Oe vorgegeben. Mit dem Induktionswert soll das Ansprechverhalten der Relais gewährleistet werden, während die Koerzitivkraft das Abfallverhalten bestimmt. Aus der Tatsache, daß die Induktion nur in Richtwerten angegeben ist, läßt sich erkennen, daß diese gegenüber der Koerzitivkraft weniger kritisch ist. Dies trifft besonders für die nickelhaltigen Werkstoffe kleiner Koerzitivkraft zu. Da bei Relais massive oder stark lamellierte Probenformen benutzt werden, kommt für diese Verfahren allgemein nur Gleichfeldmagnetisierung in Betracht. Die Messung der Induktion kann absolut an mitgegluhten Ringen des gleichen Werkstoffes sehr sicher erfolgen, da hier homogene Magnetisierung bei definierter Feldstärkebestimmung vorliegt. Serienprüfungen der fertigen Relais Teile sind jedoch relativ durchzuführen. Es gibt dazu weitgehend automatisierte Anordnungen.

398

4.1

hoher Sortiergeschwindigkeit, die trotzdem nicht zufriedenstellend sicher arbeiten. Auch Jochanordnungen tragen den teilweise erheblichen Fehler, der sich aus schwankender Größe der Berührungsluftspalte zwischen Joch und Prüfling infolge unplaner Auflage ergibt, in sich. Das Problem liegt hierbei, wie zu erkennen ist, in der Schwierigkeit der Bestimmung der inneren Feldstärke, die an kurzen Proben auch mit physikalischen Geräten nicht einfach ist. Ähnliche Schwierigkeiten hat übrigens der Großmaschinenbau mit der Prüfung von Baustählen für Gleichstrom-Schweißnähte, die zur Zeit auch nur in gestreckten, längeren Proben mit physikalischen Messverfahren, z. B. mit magnetischem Spannungsmesser, möglich ist. Für eine schnelle Prüffeldmethode, die beiden Verwendungszwecken geeignet werden, sind in Bearbeitung.

Die Koerzitivkraft ist im Gegensatz zur Induktionsbestimmung auf einfache Weise meßbar, da in Punkt H_c , d. h. im Durchgang der Hystereseschleife durch den Nullpunkt bei $B = \text{Null}$, die innere Feldstärke H_i der angelegten äußeren Feldstärke H_e entspricht. Es gibt dazu eine Reihe von Schnellverfahren, z. B. Tauch-, Tauch- oder Drehspulkoerzimeter, die alle als Nullmethoden unabhängig von der zu messenden Größe der Induktionsanzeige deren Nulldurchgang beobachten und die entsprechende Feldstärke in freier Spule als H_c -Kriterium einzusetzen gestatten. Es sind hierbei folgende Punkte zu beachten:

1. ausreichende Sättigungsfeldstärke, die bei kurzen, gedrunenen Formen ein Vielfaches der Werkstoff-Sättigungsfeldstärke betragen kann;
2. langsames Abschalten dieser Feldstärke bis zur scheinbaren Remanenz zur Vermeidung von entmagnetisierenden Wirbelstromeffekten in der Probe, deren entmagnetisierende Wirkung bei schnellem Abschalten zu großen Fehlern (bis zur negativen Remanenz) führen kann;
3. Vermeidung von Fremdfeldeinflüssen; das Erdfeld macht sich z. B. bei Werkstoffen kleiner Koerzitivkraft bereits sehr erheblich durch einseitige Verschiebung des H_c -Kriteriums bemerkbar. In besonderen Fällen genügt nicht die Ausrichtung der Probe und Spulenchse in die Ost-West-Richtung; hier muß H_c über beide Magnetisierungsäste gemessen und dann gemittelt werden.

Die genannten Koerzimeterverfahren sind zu ausgereiften Prüfverfahren entwickelt worden, die bei Herstellern und Verbrauchern vielfach im Einsatz sind. Die Meßgeschwindigkeit je Probe beträgt 1 bis 3 min.

5. Dauermagnete

Hörerkapseln, Wecker, polarisierte Relais usw. zählen ebenfalls zu den Bauelementen der Nachrichtentechnik, und damit entsteht für uns die Notwendigkeit einer Prüfung der dazugehörigen Dauermagnete. Im Normenentwurf 17410 sind die physikalischen Werkstoffeigenschaften: die Remanenz, Koerzitivkraft und das $(B-H)_{\text{max}}$ -Produkt der verschiedenen Werkstoffe festgelegt, die mit verhältnismäßig komplizierten Meßverfahren an bestimmten, geeigneten Probenformen meßbar sind. Es werden deshalb diese Kennwerte zweckmäßig vom Hersteller nur stichprobenweise durch Messung der Entmagnetisierungskurve ermittelt. Da nun aber Dauermagnetbauteile auf Grund ihrer besonderen Herstellungstechnologie stärkeren Güteschwankungen unterliegen als z. B. Transformatorenbleche, ist hier die Prüfung jedes einzelnen Magneten durch Messung bestimmter Funktionswerte beim

4

Hersteller und beim Verbraucher unbedingt zu fordern. Wichtig ist dabei, daß die Prüfung an dem Punkt der Entmagnetisierungskurve erfolgt, der dem späteren Arbeitspunkt entspricht, d. h., es müssen die Luftspaltverhältnisse und der magnetische Rückschluß durch Polschuhe der endgültigen Verwendungsanordnung weitgehend nachgebildet sein. Weiterhin muß der Prüfling nach Einsetzen in diese Nachbildung vor der Messung aufmagnetisiert werden.

Ein einfaches, viel angewandtes Prüfverfahren ist die Messung der Induktion durch Abziehen einer einfachen Flußpule von einem definierten Ort oder mittels einer Sondenspule mit bekannter Windungsfläche. Zur Anzeige dieses Wirkflusses, z. B. der Luftspaltinduktion, dient gewöhnlich ein Kriechgalvanometer in der gebräuchlichen Form eines Zeigerinstrumente, der sogenannte Flußmesser. Wegen der verhältnismäßig geringen Empfindlichkeit der Flußmesser, die mit 10 bis 15000 Maxwell-Windungen/Skalenteil bzw. $1,0$ bis $1,5 \cdot 10^{-6}$ Voltsek/Skalenteil nur etwa den 50. Teil der der ballistischen Galvanometer beträgt, lassen sich räumlich kleine Fehler bereits schwierig messen. Ein häufig verwandtes Verfahren ist weiterhin die Messung in einem hilfstromdurchflossenen Drehpulssystem, bei dem der Prüfling als Systemmagnet eingesetzt wird.

Mit diesen Verfahren läßt sich also die Gleichmäßigkeit der Fabrikation überwachen, jedoch gestatten die gemessenen Funktionswerte keine Aussage über die optimale Güte des Werkstoffes, wenn nicht die einzelnen Konstruktionen an den optimalen Energiewert $(BH)_{\max}$ des verwandten Magnetwerkstoffes angepaßt sind. Diese Anpassung, die kleinstes Magnetvolumen für gegebene Spaltinduktion bedeutet, erfordert die Kenntnis des nur empirisch bestimmbareren Streufaktors für jede Konstruktion. Für die Prüfung besonders kleiner Magnete, z. B. für Hörsprechkapseln, sind die geschilderten Verfahren nicht befriedigend, hauptsächlich wegen der zu geringen Empfindlichkeit. Hier müssen noch besondere Methoden entwickelt werden. Immer wieder auftretende Fabrikationsausfälle, die sich erst am fertig montierten Gerät bemerkbar machen und dadurch große Verluste hervorrufen, fordern dringend eine Prüfmethode kleiner Magnete.