

Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von weichmagnetischen Werkstoffen

Allgemeines, Begriffe, Grundlagen der Prüfverfahren

DIN
50 460

Determination of the magnetic properties of soft magnetic materials; general terminology, testing

Ersatz für Ausgabe 09.80 und
DIN 50 465/09.75

Détermination des caractéristiques magnétiques des matériaux magnétiques doux; généralités, notions, méthodes d'essai

Inhalt

	Seite		Seite
1 Anwendungsbereich	2	7.2 Bestimmung der magnetischen Feldstärke	8
2 Zweck	2	7.2.1 Bestimmung der Feldstärke aus dem Magnetisierungsstrom beim geschlossenen Kreis	8
2.1 Magnetische Größen im Gleichfeld	2	7.2.2 Messung der Feldstärke mit Feldmeßspulen	8
2.2 Magnetische Größen im Wechselfeld	2	7.2.3 Direkte Messung der Feldstärke mit Feldmeßsonden	9
3 Begriffe	2	7.2.4 Bestimmung der Feldstärke aus dem Magnetisierungsstrom im offenen Kreis ohne Rückschlußjoch	9
3.1 Meßvolumen	2	7.3 Aufnahme der Kommütierungskurve	9
3.2 Wirksame Probenmasse	2	7.3.1 Abmagnetisieren der Probe	10
3.3 Probenquerschnittsfläche	2	7.3.2 Meßverfahren	10
3.4 Magnetischer Kreis	2	7.4 Permeabilitätszahl	10
3.5 Wirksame magnetische Weglänge im geschlossenen Kreis	2	7.5 Aufnahme der Hystereseschleife	11
3.6 Magnetisierungswicklung, Primärwicklung	3	7.5.1 Punktweise Aufnahme der Hystereseschleife bei geschlossenen Kreisen	11
3.7 Flußmeßwicklung, Sekundärwicklung	3	7.5.2 Aufnahme der Hystereseschleife bei offenen Kreisen	11
3.8 Feldmeßspulen und Feldmeßsonden	3	7.5.3 Kontinuierliche Aufnahme der Hystereseschleife	12
3.9 Flußspannung, Sekundärspannung	3	7.6 Ummagnetisierungsarbeit	12
4 Formelzeichen und Einheiten	3	7.7 Remanente Flußdichte oder remanente Polarisation	12
5 Hinweise für die Messung	5	7.7.1 Bestimmung aus der Hystereseschleife	12
6 Magnetische Kreise	5	7.7.2 Bestimmung im geschlossenen Kreis	12
6.1 Nur aus Probenmaterial gebildete geschlossene Kreise	5	7.8 Koerzitivfeldstärke	12
6.2 Kreise mit Rückschlußjoch	5	7.8.1 Bestimmung aus der Hystereseschleife	12
6.3 Offene Kreise	5	7.8.2 Bestimmung der auf die Polarisation bezogenen Koerzitivfeldstärke im offenen Kreis	12
6.4 Anwenderhinweis	5	7.8.2.1 Meßanordnung mit Kompensationsspule	13
7 Verfahren für Messungen im magnetischen Gleichfeld	5	7.8.2.2 Meßanordnung mit radial messenden Feldmeßsonden	13
7.1 Flußdichtebestimmung	5	7.8.2.3 Meßanordnung mit Schwingspule	14
7.1.1 Bestimmung der Flußdichte im geschlossenen Kreis	5	7.8.2.4 Justierung der Meßanordnungen für die Bestimmung der Koerzitivfeldstärke im offenen Kreis	14
7.1.1.1 Berücksichtigung des Luftflusses	6	8 Verfahren für Messungen im magnetischen Wechselfeld	14
7.1.1.2 Bestimmung der Flußmeßgerätkonstante	6	8.1 Flußdichtebestimmung	14
7.1.1.3 Messung bei schneller Änderung des Flusses ..	6	8.1.1 Augenblickswert der Flußdichte	14
7.1.1.4 Messung bei langsamer Änderung des Flusses ..	6	8.1.2 Scheitelwert der Flußdichte	14
7.1.2 Bestimmung der Flußdichte im offenen Kreis ohne Rückschlußjoch	7	8.1.3 Formfaktor der Flußspannung	15
7.1.2.1 Bestimmung der Polarisation bei großem Meßabstand	7	8.1.4 Berücksichtigung des Luftflusses	15
7.1.2.2 Bestimmung der Polarisation bei kleinem Meßabstand	8		
7.1.2.3 Bestimmung der Flußdichte nach dem Induktionsverfahren bei feststehender Probe und Flußmeßwicklung	8		
7.1.2.4 Bestimmung der Flußdichte oder der Polarisation nach dem Abziehverfahren	8		

Fortsetzung Seite 2 bis 21

Normenausschuß Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE)

Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, gestattet.

	Seite
8.2 Bestimmung der magnetischen Feldstärke	15
8.2.1 Bestimmung der Feldstärke aus dem Magnetisierungsstrom	15
8.2.2 Messung der Feldstärke mit Feldmeßspulen ...	15
8.2.3 Sonstige Verfahren zur Feldstärkemessung ...	16
8.2.4 Augenblickswert der Feldstärke	16
8.2.4.1 Bestimmung aus dem Magnetisierungsstrom ..	16
8.2.4.2 Messung mit einer Feldmeßspule	16
8.2.5 Scheitelwert der Feldstärke	16
8.2.5.1 Bestimmung aus dem Magnetisierungsstrom ..	16
8.2.5.2 Messung mit einer Feldmeßspule	16
8.2.6 Effektivwert der Feldstärke	17
8.2.6.1 Bestimmung aus dem Magnetisierungsstrom ..	17
8.2.6.2 Messung mit einer Feldmeßspule	17
8.3 Bestimmung der Magnetisierungskurve und der Amplitudenpermeabilitätszahl	17
8.4 Dynamische Hystereseschleife	17
8.4.1 Messung mit phasengesteuerten Gleichrichtern	17
8.4.2 Oszilloskopische Aufnahme der dynamischen Hystereseschleife	17

	Seite
8.4.3 Digitale Meßverfahren	17
8.5 Remanente Flußdichte oder remanente Polarisation	18
8.5.1 Bestimmung aus der punktwise aufgenommenen dynamischen Hystereseschleife ...	18
8.5.2 Bestimmung nach dem oszilloskopischen Verfahren	18
8.6 Koerzitivfeldstärke	18
8.6.1 Bestimmung aus der punktwise aufgenommenen dynamischen Hystereseschleife ...	18
8.6.2 Bestimmung nach dem oszilloskopischen Verfahren	18
8.7 Verlustbestimmung	18
8.7.1 Leistungsmeßgerät-Verfahren	18
8.7.1.1 Bestimmung aus dem Magnetisierungsstrom ..	18
8.7.1.2 Bestimmung mit Feldmeßspulen	18
8.7.2 Schleifenflächenverfahren	19
8.7.3 Digitales Verfahren	19
8.7.4 Verlusttrennung	20
8.8 Bestimmung der spezifischen Scheinleistung ...	20

1 Anwendungsbereich

Der Anwendungsbereich dieser Norm erstreckt sich auf Messungen im magnetischen Gleichfeld und im Wechselfeld von 15 bis 400 Hz ohne Gleichstromkomponente bei sinusförmiger Flußdichte, bzw. sinusförmiger Polarisation.

2 Zweck

Diese Norm soll die Grundlagen der Bestimmung der magnetischen Eigenschaften weichmagnetischer Werkstoffe beschreiben, die benötigten Begriffe definieren und die Grundsätze für das Vorgehen beim Messen festlegen.

Sie behandelt die Bestimmung folgender Größen.

2.1 Magnetische Größen im Gleichfeld:

- Maximalwert der magnetischen Flußdichte $B_{\max}$ oder der magnetischen Polarisation $J_{\max}$ in Abhängigkeit vom Maximalwert der magnetischen Feldstärke $H_{\max}$ (Kommutierungskurve)
 $B_{\max} = f(H_{\max})$ oder $J_{\max} = f(H_{\max})$;
- relative Permeabilität
 $\mu_r = f(H_{\max})$;
- Wertepaare B, H oder J, H zur Darstellung der Hystereseschleife;
- Ummagnetisierungsarbeit $W_s = f(B_{\max})$ oder $W_s = f(J_{\max})$;
- remanente Flußdichte oder remanente Polarisation
 $B_r = J_r = f(B_{\max})$,
 $B_r = J_r = f(J_{\max})$ oder $B_r = J_r = f(H_{\max})$;
- Koerzitivfeldstärke $H_{CB} = f(B_{\max})$ oder $H_{CJ} = f(J_{\max})$,
 $H_{CB} = f(H_{\max})$, $H_{CJ} = f(H_{\max})$ oder H_{CB} bzw. H_{CJ} der äußersten Schleife.

2.2 Magnetische Größen im Wechselfeld:

- Scheitelwert der magnetischen Flußdichte $\hat{B}$ oder der magnetischen Polarisation $\hat{J}$ in Abhängigkeit vom Scheitelwert oder vom Effektivwert der Feldstärke $\hat{H}$ beziehungsweise $\bar{H}$
 $\hat{B} = f(\hat{H})$ oder $\hat{J} = f(\hat{H})$; $\hat{B} = f(\bar{H})$ oder $\hat{J} = f(\bar{H})$;

- relative Permeabilität im magnetischen Wechselfeld
 $\mu_r = f(\hat{H})$ oder $\mu_a = f(\bar{H})$;
- Wertepaare $B(t), H(t)$ oder $J(t), H(t)$ zur Darstellung der dynamischen Hystereseschleife;
- remanente Flußdichte oder Polarisation $B_r = J_r = f(\hat{B})$ oder
 $B_r = J_r = f(\hat{J})$;
- Koerzitivfeldstärke $H_{CB} = f(\hat{B})$ oder $H_{CJ} = f(\hat{J})$;
- spezifische Ummagnetisierungs-Verlustleistung (Ummagnetisierungsverlust) P_s
 $P_s = f(\hat{B})$ oder $P_s = f(\hat{J})$;
- spezifische Scheinleistung S_s
 $S_s = f(\hat{B})$ oder $S_s = f(\hat{J})$.

3 Begriffe

3.1 Meßvolumen

Das Meßvolumen V_m ist der durch die Messung erfaßte Volumenteil der Probe.

3.2 Wirksame Probenmasse

Die wirksame Probenmasse m_a ist die Masse des Probenteils, in dem die Ummagnetisierungsverluste entstehen.

3.3 Probenquerschnittsfläche

Die Probenquerschnittsfläche A ist die am Ort der Messung vorhandene Fläche, durch die der Probenfluß durchtritt.

3.4 Magnetischer Kreis

Der magnetische Kreis stellt den Weg des gesamten Flusses dar, der durch den Strom in der Magnetisierungswicklung erzeugt wird.

3.5 Wirksame magnetische Weglänge im geschlossenen Kreis

Die wirksame magnetische Weglänge l_m ist gleich der Länge eines geradlinigen, homogen magnetisierten Ersatzleiters mit konstantem Querschnitt, über den bei gleicher Feldstärke wie im geschlossenen Kreis eine der elektrischen Durchflutung dieses Kreises gleiche magnetische Spannung abfällt.

3.6 Magnetisierungswicklung, Primärwicklung

Die Magnetisierungswicklung dient zur Magnetisierung der Probe. Bei transformatorartigen Anordnungen wird die Magnetisierungswicklung auch Primärwicklung genannt.

3.7 Flußmeßwicklung, Sekundärwicklung

Die Flußmeßwicklung ist die zur Bestimmung der Flußdichte oder der Polarisierung in der Probe dienende Wicklung um das Meßvolumen. Sie umfaßt den magnetischen Fluß im Probenquerschnitt und in einem zusätzlichen unvermeidbaren Luftquerschnitt. Bei transformatorartigen Anordnungen wird sie auch Sekundärwicklung genannt. Die einzelnen Windungen der Flußmeßwicklung stehen senkrecht zur Probenachse.

3.8 Feldmeßspulen und Feldmeßsonden

Die Feldmeßspulen und Feldmeßsonden dienen zur Messung der Feldstärke dicht an der Oberfläche der Probe oder bei mehrteiliger Probe zwischen den Teilen, wo die Feldstärke mit guter Näherung gleich der im Innern der Probe gesetzt werden kann.

3.9 Flußspannung, Sekundärspannung

Die Flußspannung (Sekundärspannung) wird durch die Änderung des gesamten Flusses in der Flußmeßwicklung (Sekundärwicklung) erzeugt.

4 Formelzeichen und Einheiten

Die verwendeten Formelzeichen und Einheiten sind in der nachfolgenden Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1.

Formelzeichen	Größe	Einheit
A	Probenquerschnittsfläche	m^2
A_F	Gesamtwindungsfläche der Feldmeßspule	m^2
A_t	Querschnittsfläche der Flußmeßwicklung	m^2, mm^2
a	halber Durchmesser des Rotationsellipsoids	m
B	Magnetische Flußdichte	T
$B_{\max}$	Maximalwert der magnetischen Flußdichte	T
B_1	Augenblickswert der magnetischen Flußdichte zur Zeit t_1	T
B_r	Remanente Flußdichte	T
$\hat{B}$	Scheitelwert der magnetischen Flußdichte	T
b	Halbe Länge des Rotationsellipsoids	m
d_1	Außendurchmesser einer Ringprobe	m
d_2	Innendurchmesser einer Ringprobe	m
F	Formfaktor der Flußspannung	1 ¹⁾

Formelzeichen	Größe	Einheit
f	Frequenz	Hz
H	Magnetische Feldstärke	A/m
H_1	Augenblickswert der magnetischen Feldstärke zur Zeit t_1	A/m
H_{cB}	Koerzitivfeldstärke der magnetischen Flußdichte	A/m
H_{cJ}	Koerzitivfeldstärke der magnetischen Polarisierung	A/m
$H_{\max}$	Maximale magnetische Feldstärke der Hystereseschleife (Gleichfeld)	A/m
H_z	Axialkomponente der Streufeldstärke	A/m
H_{z1}	Axialkomponente der magnetischen Feldstärke am Ort der Feldmeßsonde 1	A/m
H_{z2}	Axialkomponente der magnetischen Feldstärke am Ort der Feldmeßsonde 2	A/m
$\hat{H}$	Scheitelwert der magnetischen Feldstärke (Wechselfeld)	A/m
$\tilde{H}$	Effektivwert der magnetischen Feldstärke	A/m
H'	Äußere magnetische Feldstärke	A/m
H_{β}	Magnetische Feldstärke zum Zeitpunkt des Scheitelwertes der magnetischen Flußdichte	A/m
H_j	Magnetische Feldstärke zum Zeitpunkt des Scheitelwertes der magnetischen Polarisierung	A/m
I_1	Magnetisierungsstromstärke	A
$\tilde{I}_1$	Effektivwert der Magnetisierungsstromstärke	A
i_1	Augenblickswert der Magnetisierungsstromstärke	A
I_n	Stromstärke in der Primärwicklung der Gegeninduktivität M_n	A
J	Magnetische Polarisierung	T
$J_{\max}$	Maximalwert der magnetischen Polarisierung (Gleichfeld)	T
J_r	Remanente Polarisierung	T
J_z	magnetische Polarisierung in axialer Richtung	T
$\hat{J}$	Scheitelwert der magnetischen Polarisierung (Wechselfeld)	T

¹⁾ 1 steht für das Verhältnis zweier gleicher Einheiten

Tabelle 1. (Fortsetzung)

Formelzeichen	Größe	Einheit
k	Flußmeßgerätkonstante	Wb
j	Summationsindex bei Gleichungen (61) und (62)	
k_B	Flußmeßgerätkonstante für die Flußdichtebestimmung	Wb
k_H	Flußmeßgerätkonstante für die Feldstärkebestimmung	Wb
l	Länge eines Probestreifens; Länge der Zylinderspule	m
l_m	Wirksame Weglänge des magnetischen Kreises	m
M_c	Gegeninduktivität zur Luftflußkompensation	H
M_D	Differentiations-Gegeninduktivität	H
M_n	Präzisions-Gegeninduktivität für die Flußmeßgerätkalibrierung	H
m_a	Wirksame Masse der Probe	kg
N	Entmagnetisierungsfaktor	1 ¹⁾
N_1	Windungszahl der Magnetisierungswicklung	
N_2	Windungszahl der Flußmeßwicklung	
n	Windungszahl durch Länge der Zylinderspule	1/m
n	Anzahl der Punkte je Periode bei Gleichungen (61) und (62)	
P_c	Berechnete Ummagnetisierungs-Verlustleistung der Probe	W
P_e	Wirbelstromverlust	W/kg
P_h	Hystereseverlust	W/kg
P_m	Am Leistungsmeßgerät abgelesene Leistung	W
P'_m	gemessene Verlustleistung	W
P_s	Spezifische Ummagnetisierungs-Verlustleistung (Ummagnetisierungsverlust) der Probe	W/kg
p	Halbachsenverhältnis des Ellipsoids	1 ¹⁾
R_i	Gesamtwiderstände der Meßgeräte im Flußmeßkreis	Ω

¹⁾ 1 steht für das Verhältnis zweier gleicher Einheiten

Formelzeichen	Größe	Einheit
R_n	Meßwiderstand im Magnetisierungsstromkreis	Ω
R_u	Verhältnis Eingangsspannung/Ausgangsstrom des Spannungs-Stromumsetzers	Ω
R_{s1}	Stellwiderstand	Ω
R_{s2}	Zusätzlicher Stellwiderstand	Ω
R_t	Gesamtwiderstand der Flußmeßwicklung und der Sekundärwicklung von M_c	Ω
r	Kugelradius; Radius der einlagigen Zylinderspule	m
S_s	Spezifische Scheinleistung	VA/kg
T	Periodendauer = $1/f$	s
$\bar{U}_2$	Effektivwert der Flußspannung	V
$\bar{U}_2$	Halbschwingungs-Mittelwert der Flußspannung	V
$\bar{U}_D$	Halbschwingungs-Mittelwert der Sekundärspannung von M_D	V
$\bar{U}_H$	Halbschwingungs-Mittelwert der Spannung an der Feldmeßspule	V
u_2	Augenblickswert der Flußspannung	V
u_D	Augenblickswert der Sekundärspannung von M_D	V
u_H	Augenblickswert der in Feldmeßspulen induzierten Spannung	V
u_n	Augenblickswert der Spannung am Widerstand R_n	V
u_s	Augenblickswert der Spannung am Ausgang des Integrators	V
V_m	Meßvolumen	m ³
W	Ummagnetisierungsarbeit	Ws
W_s	Spezifische Ummagnetisierungsarbeit	Ws/kg
z	Entfernung auf der Achse vom Mittelpunkt des Rotationsellipsoids; Entfernung vom Ende einer Zylinderspule auf der Achse	m
α	Anzeige des Flußmeßgerätes in Skalenteilen	1 ¹⁾
α_B	Anzeige des Flußmeßgerätes für die Flußdichtebestimmung	1 ¹⁾
α_H	Anzeige des Flußmeßgerätes für die Feldstärkebestimmung	1 ¹⁾

Tabelle 1. (Fortsetzung)

Formelzeichen	Größe	Einheit
α_k	Anzeige des Flußmeßgerätes bei der Kalibrierung	1 ¹⁾
μ_a	Amplitudenpermeabilitätszahl	1 ¹⁾
μ_0	Magnetische Feldkonstante $= 4 \pi \cdot 10^{-7}$	H/m
μ_r	Permeabilitätszahl	1 ¹⁾
ϱ_m	Dichte des Probenmaterials	kg/m ³
τ_i	Zeitkonstante des Integrators	s
Φ_L	Luftfluß	Wb
Φ_P	Probenfluß	Wb
Φ_R	Rückflußanteil durch die Fläche zwischen Rotationsellipsoid und Flußmeßspule	Wb
$\cos \varphi$	Leistungsfaktor	1 ¹⁾
χ_m	relative Suszeptibilität	1 ¹⁾
1) 1 steht für das Verhältnis zweier gleicher Einheiten		

5 Hinweise für die Messung

5.1 Die magnetischen Eigenschaften der Probe innerhalb des Meßvolumens müssen repräsentativ für die der gesamten Probe sein.

5.2 Die Flußdichte oder die Polarisierung im Meßvolumen muß so homogen wie möglich sein.

5.3 Bei Messungen im Wechselfeld muß der zeitliche Verlauf der Flußdichte oder der der Polarisierung sinusförmig sein. Dazu ist der Scheinwiderstand des Primärkreises ohne Probe klein zu halten. Falls die induzierte Spannung trotzdem noch verzerrt ist, sollte die Sinusform mit Hilfe einer Regelschleife erzwungen werden. Zur Kontrolle wird der Formfaktor der induzierten Spannung bestimmt. Er darf höchstens um $\pm 1\%$ von 1,111 abweichen.

5.4 Formfaktor, Frequenz, Leistung, Spannung, Strom, Zeitintegrale der Spannung und geometrische Daten müssen so genau gemessen werden, daß die Unsicherheiten der Meßergebnisse noch innerhalb der vorgegebenen Grenzen bleiben.

5.5 Die Messungen sollen unter Einhaltung festgelegter Bezugswerte der Bezugsgrößen (z. B. $\hat{B} = 1,5 \text{ T}$, $\hat{H} = 500 \text{ A/m}$) vorgenommen werden.

6 Magnetische Kreise

6.1 Nur aus Probenmaterial gebildete geschlossene Kreise

6.1.1 Solche Kreise sind Ringproben aus gewickelten Bändern, geschnittenen Blechringen oder massivem Material, oder

6.1.2 Viereckproben (allgemein Vieleckproben), aus geschnittenen Streifen zu einem Viereck (Vieleck) zusammen-

gesetzt, z. B. Proben für den 25-cm-Epsteinrahmen nach DIN 50 462 Teil 1 oder Proben aus massivem Material.

6.2 Kreise mit Rückschlußjoch

Rückschlußjochs werden für Streifen-, Tafel-, Band- und Stabproben verwendet. Die verschiedenen Jochtypen sind das Streifenjoch, das Tafeljoch, das Leitpaketjoch, das Ganztafeljoch und das Permeameter.

6.3 Offene Kreise

Diese arbeiten ohne Rückschlußjoch, der Flußkreis schließt sich über den Luftraum.

6.4 Anwenderhinweis

Die magnetischen Eigenschaften der Elektrobleche und -bänder werden im 25-cm-Epsteinrahmen nach DIN 50 462 Teil 1 bis 6 oder im Ganztafeljoch nach IEC 404-3 (1982) gemessen. Ausnahmen hiervon kann es für laborinterne Anwendungen in folgenden Fällen geben. Kleine Proben werden als einzelne Streifen im Streifenjoch gemessen. Inhomogenitäten einer Blechtafel können mit einem partiell messenden Tafeljoch nachgewiesen werden, das Leitpaketjoch dient dazu, den Eckeneinfluß des Epsteinrahmens zu umgehen. Hochpermeable Nickeleisenbleche werden als Ringkernproben gemessen; diese Probenform ist auch für amorphe Bänder geeignet.

Massive Materialien werden mit der geringsten Unsicherheit in Form von Ringproben gemessen. Ein schnelleres, aber nicht so genaues Verfahren ist die Messung von Stabproben mit dem Permeameter.

Orientierte Einkristallproben werden als Stabproben oder als Rahmenproben gemessen.

Ein offener Kreis wird praktisch nur zur Bestimmung der Koerzitivfeldstärke nach DIN IEC 404 Teil 7 von hochpermeablen Werkstoffen und der Suszeptibilität von schwachmagnetischen Werkstoffen verwendet. Die Messung einer vollständigen statischen Hystereseschleife im offenen Kreis ist sehr aufwendig. Sie erfordert schwierig herzustellende Probenformen und wird daher nur sehr selten durchgeführt.

7 Verfahren für Messungen im magnetischen Gleichfeld

7.1 Flußdichtebestimmung

7.1.1 Bestimmung der Flußdichte im geschlossenen Kreis

Eine zeitlich konstante magnetische Flußdichte im geschlossenen Kreis ist einer Messung nicht direkt zugänglich. Es können nur Flußdichteänderungen aus der in der Flußmeßwicklung induzierten Spannung, der Flußspannung ermittelt werden. Diese Spannung ist bei konstanter Probenquerschnittsfläche

$$u_2 = -N_2 \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

Die Flußdichteänderung zwischen zwei verschiedenen Magnetisierungszuständen im Gleichfeld ist also dem Zeitintegral der Flußspannung proportional

$$\Delta B = - \frac{1}{N_2 \cdot A} \int_{t_1}^{t_2} u_2 dt \quad (2)$$

t_1 = Zeitpunkt zu Beginn der Änderung

t_2 = Zeitpunkt am Ende der Änderung.

Um aus der Flußdichteänderung ΔB absolute Werte für die Flußdichte zu erhalten, muß der Magnetisierungszustand der Probe eine symmetrische Hystereseschleife zyklisch durchlaufen. In diesem Falle sind die Maximalwerte für die Flußdichte $+B_{\max}$ und $-B_{\max}$ dem Betrage nach gleich und können als Bezugspunkte für alle anderen innerhalb dieser Grenzen zu messenden Flußdichten dienen.

Die Prinzipschaltung für die Messung des Zeitintegrals der Flußspannung mit Hilfe eines Flußmeßgerätes zeigt Bild 1:

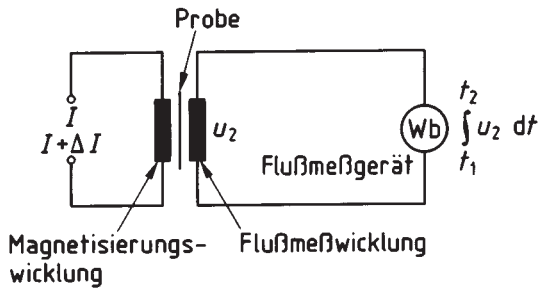


Bild 1. Messung des Zeitintegrals der Flußspannung

7.1.1.1 Berücksichtigung des Luftflusses

Die Messung erfaßt nicht den Probenfluß allein, sondern den gesamten durch die Flußmeßwicklung gehenden Fluß. Von diesem ist der Luftfluß, d. h. der durch den Zwischenraum zwischen Flußmeßwicklung und Probe gehende Fluß, abzuziehen:

$$\Delta B \cdot A = - \frac{1}{N_2} \int_{t_1}^{t_2} u_2 dt - (A_t - A) \mu_0 \Delta H. \quad (3)$$

Hieraus ergibt sich die Flußdichtekorrektur zu:

$$\Delta B = - \frac{1}{N_2 \cdot A} \int_{t_1}^{t_2} u_2 dt - \left(\frac{A_t - A}{A} \right) \mu_0 \Delta H \quad (4)$$

Der Einfluß des Luftflusses läßt sich auch selbsttätig durch eine Kompensationsschaltung berücksichtigen. Dabei wird von der Flußspannung eine der Änderung der Feldstärke proportionale Spannung subtrahiert, die die von der Leerflußänderung induzierte Spannung kompensiert. Der Leerfluß ist derjenige Fluß, der nach Entfernung der Probe und unverändertem magnetischen Feld im Querschnitt der Flußmeßwicklung vorhanden ist: Leerfluß = $\mu_0 \cdot H \cdot A_t$.

In diesem Fall ergibt sich statt der Gleichung (4) die Änderung der magnetischen Polarisierung

$$\Delta J = - \frac{1}{N_2 \cdot A} \int_{t_1}^{t_2} u_2 dt \quad (5)$$

Bei Ring- und Vieleckproben wird die Kompensationsspannung von einer vom Magnetisierungsstrom durchflossenen Gegeninduktivität M_c (siehe Bild 2), bei Joch- und Permeametergeräten von einer im Feldmeßraum angeordneten Kompensationswicklung (siehe Bild 3) erzeugt.

7.1.1.2 Bestimmung der Flußmeßgerätkonstante

Für jede Meßbereichseinstellung ist die Konstante k des Flußmeßgerätes mit Hilfe einer Präzisions-Gegeninduktivität M_n zu bestimmen. Wird in der Primärwicklung von M_n ein Gleichstrom I_n kommutiert, so hat das an die Sekundärwicklung angeschlossene Flußmeßgerät eine Anzeige α_k , aus der sich die Konstante k ergibt:

$$k = \frac{2 \cdot M_n \cdot I_n}{\alpha_k} \quad (6)$$

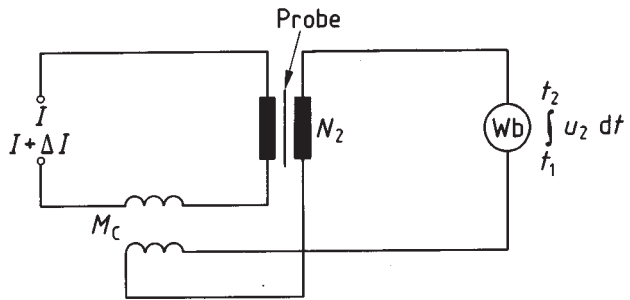


Bild 2. Kompensation des Leerflusses durch eine Gegeninduktivität M_c

Hiermit gilt dann für die Änderung der Flußdichte

$$\Delta B = \frac{k \cdot \alpha}{N_2 \cdot A} \quad (7)$$

7.1.1.3 Messung bei schneller Änderung des Flusses

Eine schnelle Änderung des magnetischen Flusses wird durch Änderung des Magnetisierungsstroms mit Hilfe von Schaltern erreicht. In diesem Fall erhält man einen induzierten Spannungstoß von kurzer Dauer und großer Amplitude. Zur Messung dieser Spannungsschübe eignen sich Flußmeßgeräte, ballistische Galvanometer und elektronische Analogintegratoren, die auch große Spannungsspitzen verarbeiten können. Die Drift der Anzeige während der gesamten Meßzeit muß kleiner als die gewünschte Meßunsicherheit sein. Bei magnetischen Kreisen nach Abschnitt 6.2 soll der magnetische Widerstand des Rückschlußjoches auch bei schneller Flußänderung klein bleiben. Das Joch soll daher lamelliert sein.

Eine Verschleifung der Spannungsschübe, wie sie bei einem nicht lamellierten Joch auftritt, führt außerdem zu Fehlern bei der Messung mit ballistischen Galvanometern. Besteht die Probe selbst aus massivem Material, so läßt sich eine Verbreiterung der Spannungsschübe nicht ganz vermeiden. Die Dauer des Spannungsimpulses hängt dann von der elektrischen Leitfähigkeit, der Permeabilität und bei zylindrischen Proben vom Durchmesser bzw. bei Proben mit rechteckigem Querschnitt hauptsächlich von der kleineren Dimension ab. Ein ballistisches Galvanometer läßt sich dann nur mit der Einschränkung einsetzen, daß seine Schwingungsdauer sehr groß gegen die Impulslänge ist. Bei der Messung mit Flußmeßgeräten und elektronischen Analogintegratoren muß nach der Änderung des Magnetisierungsstroms bis zur Ablesung des Integrals der induzierten Spannung so lange gewartet werden, bis sich der Magnetisierungszustand der Probe nicht mehr ändert.

7.1.1.4 Messung bei langsamer Änderung des Flusses

Der Zustand einer Gleichfeldmagnetisierung kann angenähert werden, wenn der magnetische Fluß so langsam geändert wird, daß Wirbelströme und Nachwirkungseffekte keinen meßbaren Einfluß haben. Dieses wird durch langsame Änderung des Magnetisierungsstromes mit Hilfe eines von der Flußänderung gesteuerten Stromversorgungs-

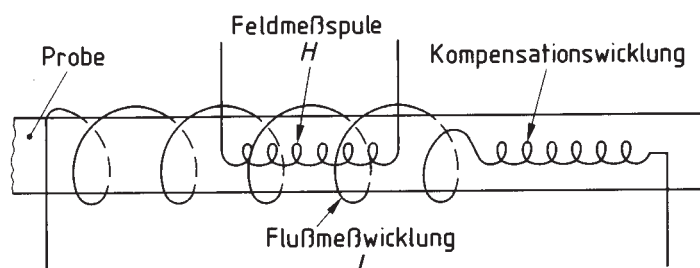


Bild 3. Kompensation des Leerflusses durch eine Kompensationswicklung im Feldmeßraum (nur schematische, nicht räumliche Darstellung)

gerätes, oder falls ein solches nicht verfügbar ist, mit Hilfe veränderlicher Widerstände erreicht. Im Gegensatz zu Abschnitt 7.1.1.3 können jetzt auch Meßwerte aufgenommen werden, während der Fluß sich ändert. Die in die Flußmeßwicklung induzierte Spannung ist bei diesem Verfahren klein, während das Zeitintervall, in dem die Spannung auftritt, groß ist. Deshalb sind nur Flußmeßgeräte und elektronische Integratoren mit hoher Spannungsempfindlichkeit und sehr geringer Drift für die Messung des Integrals der Flußspannung geeignet. Diese müssen entsprechend Abschnitt 7.1.1.2 kalibriert werden. Bei Flußmeßgeräten, die keine hohen Spannungsspitzen verarbeiten können, muß dabei der Gleichstrom I_n kontinuierlich von der positiven zur negativen Polarität oder umgekehrt verändert werden, so daß keine Übersteuerung eintritt.

Anstelle eines Analogintegrators kann auch ein Spannungs-Frequenz-Umsetzer mit angeschlossenem Zähler benutzt werden. Da sich die Flußdichte während der Messung ständig ändert, ist eine momentane Registrierung der Meßwerte erforderlich, entweder analog mit einem Kurvenschreiber oder digital mit einem Drucker, Lochstreifen oder Speicher.

Die Messungen bei schneller und langsamer Änderung des Flusses können bei massiven Proben mit größerem Querschnitt auf Grund des Wirbelstromeinflusses bei schneller Änderung unterschiedliche Ergebnisse liefern. Daher ist in jedem Fall anzugeben, nach welchem Verfahren gemessen wurde. Für die Kommutierungswerte (siehe Abschnitt 7.3) von Elektroblechen ist nach DIN 50 462 Teil 5 die schnelle Änderung des Flusses vorgeschrieben. Ebenfalls werden die Kommutierungswerte an massiven Ringproben und an Stäben im Permeameter, falls nicht anders vereinbart, mit schneller Änderung des Flusses gemessen. Soll eine vollständige Hystereseschleife (siehe Abschnitt 7.5) gemessen werden, so ist die langsame Änderung des Flusses vorzuziehen. Da die gesamte Kurve in einem Zug gemessen werden kann, ist dieses Verfahren schneller und führt zu Ergebnissen mit einer besseren Wiederholbarkeit.

7.1.2 Bestimmung der Flußdichte im offenen Kreis ohne Rückschlußjoch

Hierbei wird die Probe im homogenen Teil des Magnetfeldes einer Zylinderspule ohne Rückschlußjoch magnetisiert. Der magnetische Fluß tritt aus der Probe aus und wird im Luft-raum geschlossen. Im Gegensatz zum geschlossenen Kreis ist die Probe bei einer solchen Meßanordnung den magnetischen Störfeldern im Meßraum und dem Erdfeld sehr stark ausgesetzt. Besonders bei hochpermeablen Werkstoffen können die Messungen verfälscht werden. Es ist deshalb erforderlich, Störfelder im Meßraum zu vermeiden und die Meßanordnung in Ost-West-Richtung senkrecht zum Erdfeld auszurichten. In einigen Fällen ist es notwendig, das Erdfeld mit Hilfe von Helmholtz-Spulen zu kompensieren.

Bei zylindrischen und prismatischen Probenformen bietet das Offen-Kreis-Verfahren gegenüber dem geschlossenen Kreis nur dann Vorteile, wenn die Kenntnis des Entmagnetisierungsfaktors nicht erforderlich ist. Proben, die von vornherein in Form von Kugeln oder langgestreckten Rotationsellipsoiden vorliegen, müssen im offenen Kreis gemessen werden.

Das Magnetfeld außerhalb der Probe setzt sich aus dem Feld der Magnetisierungsspule und dem Streufeld der Probe zusammen, wobei die Feldstärke des letzteren proportional der Polarisation der Probe ist. Die Polarisation der Probe ist jedoch nur dann homogen, wenn die Probe die Form eines Rotationsellipsoids hat, dessen Längsachse mit der Magnetisierungsspulenachse zusammenfällt.

Die Polarisation des Ellipsoids kann aus der Feldstärke des magnetischen Steufeldes und der Geometrie der Anordnung bestimmt werden. Es gilt nämlich für einen Punkt auf der Achse eines gestreckten Rotationsellipsoids mit dem Halbachsenverhältnis $p = \frac{a}{b} > 1$ in der Entfernung z vom Mittelpunkt des Ellipsoids:

$$H_z = \frac{p \cdot J_z}{\mu_0 \cdot \sqrt{p^2 - 1}^3} \cdot \left[\frac{\frac{z}{a} \cdot p \cdot \sqrt{p^2 - 1}}{p^2 \left(\frac{z^2}{a^2} - 1 \right) + 1} + \frac{1}{2} \ln \frac{\frac{z}{a} \cdot p - \sqrt{p^2 - 1}}{\frac{z}{a} \cdot p + \sqrt{p^2 - 1}} \right] \quad (8)$$

Für eine Kugel $a = b = r$, $p = 1$ geht Gleichung (8) durch Grenzwertbildung in

$$H_z = \frac{2}{3} \cdot \frac{r^3 \cdot J_z}{\mu_0 \cdot z^3} \quad (9)$$

über.

Bei großem Abstand der Feldmeßsonde von der Probe (Meßabstand) wird der Mittelwert der Polarisation über die ganze Probe gebildet, bei kleinem Meßabstand wird hauptsächlich der der Meßsonde zugewandte Teil der Probe erfaßt. Bei vom Rotationsellipsoid abweichenden Probenformen und bei Proben, die nicht vollständig homogen sind, liefert nur die Messung bei großem Meßabstand genaue Ergebnisse. Der kleine Meßabstand wird für schwachmagnetische Werkstoffe oder für Messungen in einer Umgebung benutzt, in der die Störfeldstärke zu hoch für eine Messung mit großem Meßabstand ist.

7.1.2.1 Bestimmung der Polarisation bei großem Meßabstand

Hier befindet sich die Feldmeßsonde außerhalb der Magnetisierungsspule. Die Feldstärke, die von der Magnetisierungsspule auf die Feldmeßsonde wirkt, wird durch eine zweite, gegensinnig erregte Spule kompensiert (siehe Bild 4). Dadurch erfaßt die Feldmeßsonde nur noch das Streufeld der Probe. Die beiden Spulen müssen soweit voneinander entfernt sein, daß das Feld in der Magnetisierungsspule nicht merklich vom Feld der Kompensationsspule verzerrt wird.

Die Streufeldstärke nimmt mit der 3. Potenz der Entfernung von der Probe ab. Die zu messenden Streufeldstärken sind daher bei großem Meßabstand sehr klein, es sind deshalb Feldmeßvorrichtungen von hoher Empfindlichkeit, z.B. Saturationskernmagnetometer oder Torsionsfadenmagnetometer zu verwenden. Wenn das Erdfeld nicht mit Spulen kompensiert wird, muß sein Einfluß auf die Feldmeßsonde

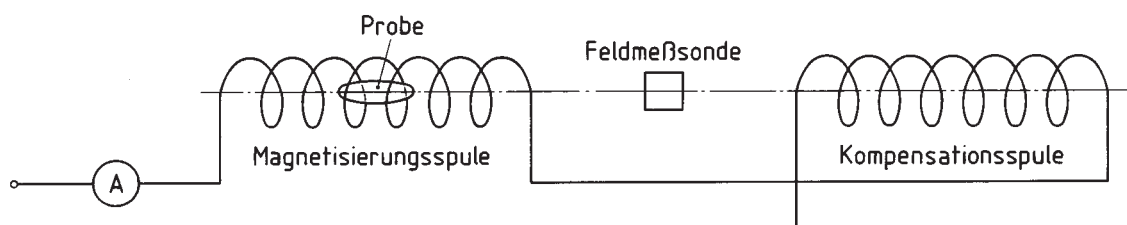


Bild 4. Anordnung zur Bestimmung der Polarisation aus dem Streufeld