

DIN EN 60556

ICS 29.030

Ersatz für
DIN EN 60556:2007-01
Siehe Anwendungsbeginn

**Gyromagnetische Materialien für Mikrowellenanwendungen –
Messverfahren zur Ermittlung der Eigenschaften
(IEC 60556:2006 + A1:2016);
Deutsche Fassung EN 60556:2006 + A1:2016**

Gyromagnetic materials intended for application at microwave frequencies –
Measuring methods for properties
(IEC 60556:2006 + A1:2016);
German version EN 60556:2006 + A1:2016

Matériaux gyromagnétiques destinés à des applications hyperfréquences –
Méthodes de mesure des propriétés
(IEC 60556:2006 + A1:2016);
Version allemande EN 60556:2006 + A1:2016

Gesamtumfang 78 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn für die von CENELEC am 2006-05-01 angenommene Europäische Norm und die am 2016-05-05 angenommene Änderung A1 als DIN-Norm ist 2017-02-01.

Für DIN EN 60556:2007-01 besteht eine Übergangsfrist bis 2019-05-05.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 60556/A1:2014-05.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 625 „Magnetische Bauelemente und deren Komponenten“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 51 „Magnetic components and ferrite materials“ erarbeitet.

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zu dem Datum (stability date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu dieser Publikation angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

A1

Die Änderung A1 wurde eingearbeitet und durch einen senkrechten Strich und A1 am linken Seitenrand gekennzeichnet.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden Deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 60556:2007-01 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Abschnitt 12 neu hinzugefügt;
- b) Anhang A neu hinzugefügt;
- c) Literaturhinweise ergänzt;
- d) die Deutsche Fassung wurde in den Abschnitten 2 und 3 sowie in Anhang ZA an die aktuellen Standardtexte angepasst.

Frühere Ausgaben

DIN EN 60556: 2007-01

**Gyromagnetische Materialien für Mikrowellenanwendungen –
Messverfahren zur Ermittlung der Eigenschaften**
(IEC 60556:2006 + A1:2016)

Gyromagnetic materials intended for application
at microwave frequencies –
Measuring methods for properties
(IEC 60556:2006 + A1:2016)

Matériaux gyromagnétiques destinés à des
applications hyperfréquences –
Méthodes de mesure des propriétés
(IEC 60556:2006 + A1:2016)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2006-05-01 und die A1 am 2016-05-05 angenommen. CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim CEN-CENELEC Management Centre oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem CEN-CENELEC Management Centre mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, der ehemaligen jugoslawischen Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

CEN-CENELEC Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

© 2016 CENELEC – Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den Mitgliedern von CENELEC vorbehalten.

Ref. Nr. EN 60556:2006 + A1:2016 D

Vorwort

Der Text des Schriftstücks 51/850/FDIS, zukünftige 2. Ausgabe von IEC 60556, ausgearbeitet von dem IEC/TC 51 „Magnetic components and ferrite materials“, wurde der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 2006-05-01 als EN 60556 angenommen.

Diese Norm muss in Verbindung mit IEC 60392 angewendet werden.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem dieses Dokument auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2007-02-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die diesem Dokument entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2009-05-01

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 60556:2006 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Europäisches Vorwort zu A1

Der Text des Dokuments 51/1064/CDV, zukünftige IEC 60556:2006/A1, erarbeitet vom IEC/TC 51 „Magnetic components and ferrite materials“, wurde zur parallelen IEC-CENELEC-Abstimmung vorgelegt und von CENELEC als EN 60556:2006/A1:2016 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem dieses Dokument auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2017-02-05
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die diesem Dokument entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2019-05-05

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CENELEC [und/oder CEN] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 60556:2006/A1:2016 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Inhalt

	Seite
Vorwort	2
Europäisches Vorwort zu A1	2
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Sättigungsmagnetisierung M_s	7
4.1 Allgemeines	7
4.2 Ziel	7
4.3 Theorie	8
4.4 Prüfling	9
4.5 Messeinrichtung für die Schwingspulenmethode (VCM)	9
4.6 Messeinrichtung für die Schwingprüflingsmethode (VSM)	12
4.7 Kalibrierung	15
4.8 Messverfahren	16
4.9 Berechnung	17
4.10 Genauigkeit	18
4.11 Darstellung der Daten	18
5 Magnetisierung (bei einer bestimmten Feldstärke) M_H	18
5.1 Allgemeines	18
5.2 Ziel	18
5.3 Theorie	19
5.4 Prüfling	21
5.5 Messeinrichtung	21
5.6 Kalibrierung	23
5.7 Messverfahren	24
5.8 Berechnung	24
5.9 Genauigkeit	24
5.10 Darstellung der Daten	24
6 Linienbreite der gyromagnetischen Resonanz ΔH und effektiver Landé-Faktor g_{eff} (allgemein)	25
6.1 Allgemeines	25
6.2 Ziel	25
6.3 Theorie	25
6.4 Prüflinge und Resonatoren	26
6.5 Messeinrichtung	29
6.6 Messverfahren	29
6.7 Berechnung	31
6.8 Genauigkeit	31

	Seite
6.9 Darstellung der Daten.....	31
7 Linienbreite der gyromagnetischen Resonanz ΔH_{10} und effektiver Landé-Faktor g_{10} (bei 10 GHz)	31
7.1 Allgemeines	31
7.2 Ziel	31
7.3 Theorie.....	31
7.4 Prüfling und Resonator.....	32
7.5 Messeinrichtung	33
7.6 Messverfahren.....	33
7.7 Berechnung	34
7.8 Genauigkeit	34
7.9 Darstellung der Daten.....	34
8 Linienbreite der Spinwellenresonanz ΔH_k	35
8.1 Allgemeines	35
8.2 Ziel	35
8.3 Theorie.....	35
8.4 Prüfling und Resonator.....	38
8.5 Messeinrichtung	38
8.6 Kalibrierung	39
8.7 Messverfahren.....	39
8.8 Berechnung	40
8.9 Genauigkeit	40
8.10 Darstellung der Daten.....	40
9 Effektive Linienbreite ΔH_{eff}	40
9.1 Allgemeines	40
9.2 Ziel	40
9.3 Theorie.....	40
9.4 Prüfling und Resonator.....	43
9.5 Messeinrichtung	43
9.6 Kalibrierung	44
9.7 Einstellung der Messeinrichtung	44
9.8 Messverfahren.....	45
9.9 Berechnung	46
9.10 Genauigkeit	47
9.11 Darstellung der Daten.....	47
10 Komplexe Permittivität ϵ_r	47
10.1 Allgemeines	47
10.2 Ziel	47

	Seite
10.3 Theorie	47
10.4 Prüfling und Resonator	50
10.5 Messeinrichtung	50
10.6 Messverfahren.....	51
10.7 Berechnung	51
10.8 Genauigkeit	51
10.9 Darstellung der Daten	52
11 Rohdichte ρ_{app}	52
11.1 Allgemeines.....	52
11.2 Rohdichte (Ermittlung durch Maßberechnung)	52
11.3 Rohdichte (Ermittlung durch Densimetrie)	53
12 Linienbreite der gyromagnetischen Resonanz ΔH und effektives gyromagnetisches Verhältnis γ_{eff} durch resonanzfreies Verfahren	55
12.1 Allgemeines.....	55
12.2 Ziel.....	56
12.3 Messverfahren.....	56
Anhang A (informativ) Verfahren zur Berechnung der Linienbreite unter Verwendung eines Tabellenkalkulations-Softwareprogramms.....	72
Literaturhinweise	75
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	76
Bilder	
Bild 1 – Schwingspulenmethode – Anordnung von Prüfling und Spulen	9
Bild 2 – Konfiguration des Magnetfeldes.....	10
Bild 3 – Messeinrichtung (VCM).....	12
Bild 4 – Schwingprüflingsmethode – Anordnung von Prüfling und Spulen	13
Bild 5 – Messeinrichtung (VSM).....	14
Bild 6 – Hysteresekurven für einen Magnetwerkstoff: $B(H)$ -Kurve, $M(H)$ -Kurve	19
Bild 7 – Prüfling mit Kompensationseinheit.....	20
Bild 8 – Prüfling	21
Bild 9 – Messstromkreis zur Bestimmung der Magnetisierung M_H (bei einer festgelegten Feldstärke).....	22
Bild 10 – Miller-Integrator	23
Bild 11 – Resonator für Messungen der Linienbreite der gyromagnetischen Resonanz und des effektiven Landé-Faktors.....	27
Bild 12 – Streifenleitungsresonator für Messungen der Linienbreite der gyromagnetischen Resonanz und des effektiven Landé-Faktors bei niedriger Frequenz	28
Bild 13 – Schematische Darstellung der Einrichtungen, die zur Messung der Linienbreite der gyromagnetischen Resonanz und des effektiven Landé-Faktors erforderlich sind	30
Bild 14 – Schematische Darstellung der Einrichtungen, die zur Messung der Linienbreite der gyromagnetischen Resonanz und des effektiven Landé-Faktors bei 10 GHz erforderlich sind	34
Bild 15 – Nebenabsorption und Sättigung der normalen Resonanz	36

	Seite
Bild 16 – Impulsverschlechterung beim Einsetzen von Seitenresonanz	36
Bild 17 – Gemessene kritische HF-Feldstärke als Funktion der Impulsdauer t_d	37
Bild 18 – Typischer TE ₁₀₄ -Resonator für die Messung der Linienbreite der Spinwellenresonanz bei etwa 9,3 GHz	38
Bild 19 – Schematische Darstellung der Prüfeinrichtung zur Prüfung der Linienbreite der Spinwellenresonanz	39
Bild 20 – Schnittansicht des Resonators mit Prüfling	42
Bild 21 – Maße des Resonators, der für eine Resonanz bei einer Frequenz von 9,1 GHz ausgelegt ist	42
Bild 22 – Schematische Darstellung der Einrichtungen zur Messung der effektiven Linienbreite ΔH_{eff}	44
Bild 23 – Bestimmung von Q_0	46
Bild 24 – Idealer Resonanzraum mit Prüfling für die theoretische Berechnung (Schnittansicht)	48
Bild 25 – Maße des Resonanzraumes mit Prüfling	50
Bild 26 – Schematische Darstellung der Einrichtungen zur Messung der komplexen Dielektrizitätskonstante	51
Bild 27 – Schematische Darstellung der Vorrichtung mit kurzgeschlossener Mikrostreifenleitung mit Prüfling	57
Bild 28 – Ersatzschaltung einer kurzgeschlossenen Mikrostreifenleitung	57
Bild 29 – Querschnittszeichnung einer vollständig geschirmten kurzgeschlossenen Mikrostreifenleitung mit Prüfling	58
Bild 30 – Schematische Darstellung des Messsystems	59
Bild 31 – Beobachtete Absorptionskurve des Imaginärteils $\eta\mu''L_0$ einer Induktivität für einen quadratischen 5-mm-Granat-Prüfling mit einer Dicke von 0,232 mm und $M_s = 0,08$ T	61
Bild 32 – Angenommene Ersatzschaltung der Prüfvorrichtung	62
Bild 33 – Aufbau der Prüfvorrichtung zur Messung der Linienbreite der Resonanz durch Übertragung	63
Bild 34 – Modell zur Messung der Linienbreite der Resonanz durch Übertragung	64
Bild 35 – Prüfvorrichtung zur Messung der Linienbreite der Resonanz durch Übertragung	65
Bild 36 – Beispiel einer Prüfvorrichtung (Grenzabweichung: Klasse f)	66
Bild 37 – Blockdiagramm der Einrichtungen zur Messung der Linienbreite der Resonanz	67
Bild 38 – Messverfahren	68
Bild 39 – Schritte zur Ermittlung der Linienbreiten der Resonanz durch numerische Analyse	70
Tabellen	
Tabelle 1 – Typische Maße der Prüfvorrichtung	58
Tabelle 2 – Form der Prüflinge und typische Maße	58
Tabelle 3 – Die Vorrichtungskonstanten für Prüflinge der Länge 5 mm	63
Tabelle A.1 – Beispiel für die Linienbreitenberechnung unter Verwendung des Tabellenkalkulations-Softwareprogramms	74

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm beschreibt Messverfahren zur Ermittlung der Eigenschaften zur Spezifikation von polykristallinen Mikrowellenferriten nach IEC 60392 und für allgemeine Anwendungen in der Ferrittechnik. Mit diesen Messverfahren werden Werkstoffe zur Anwendung bei Mikrowellenfrequenzen untersucht, die allgemein als Ferrite bezeichnet werden.

Einkristalle und Dünnschichtbeschichtungen gehören generell nicht zum Anwendungsbereich dieser Norm.

ANMERKUNG 1 Für die Anwendung dieser Norm werden die Begriffe „Ferrit“ und „Mikrowellen“ im weitesten Sinn benutzt:

- Der Begriff „Ferrit“ bezieht sich nicht nur auf magneto-dielektrische chemische Elemente mit einer Spinellstruktur, sondern auch auf Werkstoffe mit Granat- und Hexagonalstruktur;
- der Bereich der „Mikrowellen“ umfasst Wellenlängen von etwa 1 m bis 1 mm, das Hauptinteresse richtet sich auf den Bereich von 0,3 m bis 10 mm.

ANMERKUNG 2 Beispiele für Bauelemente mit Mikrowellenferriten sind nichtreziproke Geräte wie Zirkulatoren, Isolatoren und nichtreziproke Phasenschieber. Diese Bauelemente bilden das Hauptanwendungsgebiet, die Werkstoffe können aber auch in reziproken Geräten wie beispielsweise Modulatoren und (reziproken) Phasenschiebern eingesetzt werden. Andere Anwendungen sind gyromagnetische Filter, Begrenzer und komplexere Geräte wie parametrische Verstärker.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60050-221, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 221: Magnetic materials and components*

IEC 60205:2006, *Calculation of the effective parameters of magnetic piece parts*

IEC 60392:1972, *Guide for the drafting of specifications for microwave ferrites*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60050-221.

4 Sättigungsmagnetisierung M_s

4.1 Allgemeines

Die Sättigungsmagnetisierung ist ein charakteristischer Parameter von Ferritwerkstoffen. Sie wird häufig bei theoretischen Berechnungen wie z. B. bei der Berechnung der Komponenten des Permeabilitätstensors (siehe IEC 60050-221) benutzt. Bei einer Vielzahl von Mikrowellenanwendungen bestimmt die Sättigungsmagnetisierung die untere Grenzfrequenz des Bauelementes, die hauptsächlich auf das Auftreten von sogenannten Niederfeldverlusten im ungesättigten Werkstoff zurückzuführen ist.

4.2 Ziel

Das Ziel ist die Angabe von zwei ähnlichen Verfahren zur Messung der Sättigungsmagnetisierung, und zwar der Schwingspulenmethode (vibrating coil method, VCM) und der Schwingprüflingsmethode (vibrating sample method, VSM).

Bei der Schwingspulenmethode [1] [2]¹⁾ besteht der Vorteil in der einfacheren Befestigung des Prüflings und im einfacheren mechanischen Aufbau, wenn Messungen über einem Temperaturbereich besonders bei geringen Temperaturen erforderlich sind.

Die Schwingprüflingsmethode ist bei einem gleichen Grad der elektronischen Ausrüstung genauer.

Die bei beiden Methoden erforderlichen Einrichtungen sind sehr ähnlich und die Kalibrierverfahren identisch. Für beide Methoden können die gleichen Prüflinge verwendet werden.

4.3 Theorie

Wird eine Kugel aus einem isotropen Magnetwerkstoff in ein homogenes Magnetfeld gebracht, wird die Kugel parallel zur Richtung des angelegten Feldes homogen magnetisiert. Jetzt erzeugt die Kugel ihr eigenes äußeres Magnetfeld, das dem eines magnetischen Dipols in der Mitte der Kugel gleicht und parallel zur Magnetisierungsrichtung ausgerichtet ist.

Wird dann nahe der Prüfkugel und in einer Richtung rechtwinklig zum angelegten Feld eine kleine Nachweisspule (in der Praxis ein Spulenpaar mit entgegengesetzter Wickelrichtung) mit einer kleinen Amplitude in Schwingung versetzt, wird in der Spule proportional zur Änderungsgeschwindigkeit des Flusses φ_s , die auf den Prüfling in der mittleren Lage der Spule x_0 bezogen ist, eine Spannung e_s induziert, die folgender Gleichung genügt:

$$e_s = -N \cdot \left(\frac{d\varphi_s}{dx} \right)_{x_0} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

Dabei ist N die Anzahl der Windungen auf der Spule.

Die Bewegung der Spule in x -Richtung wird wie folgt angegeben:

$$x = x_0 + \delta \sin \omega t \quad (2)$$

Dabei ist

x die Verschiebung zum Zeitpunkt t ;

ω die Kreisfrequenz;

δ die Schwingungsamplitude.

Wenn der unbekannte Prüfling jetzt durch ein Kalibriermuster mit bekannter Sättigungsmagnetisierung M_c und bekanntem Volumen V_c ersetzt wird, das eine Spannung e_c induziert, kann die Magnetisierung des Prüflings M_s durch Vergleich ermittelt werden:

$$\frac{M_s}{M_c} = \frac{e_s}{e_c} \cdot \frac{V_c}{V_s} \quad (3)$$

Wenn die induzierten Spannungen e_s und e_c zur Anzeige der Werte E_s und E_c an der Messeinrichtung führen, dann gilt:

$$M_s = M_c \cdot \frac{E_s}{E_c} \cdot \frac{d_c^3}{d_s^3} \quad (4)$$

Dabei sind d_s und d_c die Durchmesser des Prüflings bzw. der Kalibrierkugel.

¹⁾ Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf die Literaturhinweise.

Für die VSM gelten die gleichen Gleichungen, wobei der Prüfling in Schwingung versetzt wird, während die Spule unbeweglich bleibt.

4.4 Prüfling

Für die Annahme eines Dipols muss der Prüfling eine Kugel mit einer Rundheitsabweichung von höchstens 0,5 % sein. Die prozentuale Abweichung von der Rundheit ist definiert als:

$$\left(\frac{\text{größter Durchmesser} - \text{kleinster Durchmesser}}{\text{kleinster Durchmesser}} \right) \times 100$$

Für die meisten Ferritwerkstoffe ist ein Durchmesser von etwa 2,5 mm geeignet. Ist der Durchmesser kleiner als 1 mm, ist es schwierig, ein angemessenes Signal-Rausch-Verhältnis zu erzielen, besonders bei einem geringen Wert von M_s . Kugeln mit einem größeren Durchmesser als etwa 4 mm sind schwierig herzustellen, und es ist kompliziert, ein homogenes Feld über dem Volumen der Kugel aufrechtzuerhalten.

Es ist zulässig, andere Formen als runde Prüflinge zu benutzen, sofern nachgewiesen werden kann, dass die induzierte Spannung eine lineare Funktion der Magnetisierung mit der geforderten Genauigkeit ist und dass das Kalibriermuster gleiche Maße wie der zu messende Prüfling hat.

4.5 Messeinrichtung für die Schwingspulenmethode (VCM)

4.5.1 Anordnung von Nachweisspulen und Prüfling

Bild 1 enthält eine schematische Darstellung der Anordnung der Nachweisspulen und des Prüflings. Bild 2 zeigt die Richtungen des angelegten Feldes und des Feldes des Prüflings.

Der Prüfling wird so zwischen den Polstücken eines Elektromagneten starr befestigt, dass seine Lage bezogen auf die Nachweisspulen in jeder Richtung auf $\pm 0,1$ mm genau reproduzierbar ist. Sämtliche Teile der Haltevorrichtung des Prüflings müssen aus nichtmagnetischem Werkstoff bestehen.

Die Nachweisspulen bestehen aus einem identischen Spulenpaar mit entgegengesetzter Reihenwicklung. Sie sind mit einem starren nichtmagnetischen Arm am Schwingungserzeuger befestigt und möglichst nahe am Prüfling angeordnet. Ihre Achsen verlaufen gewöhnlich parallel zur Schwingungsrichtung, es sind aber auch andere Anordnungen möglich.

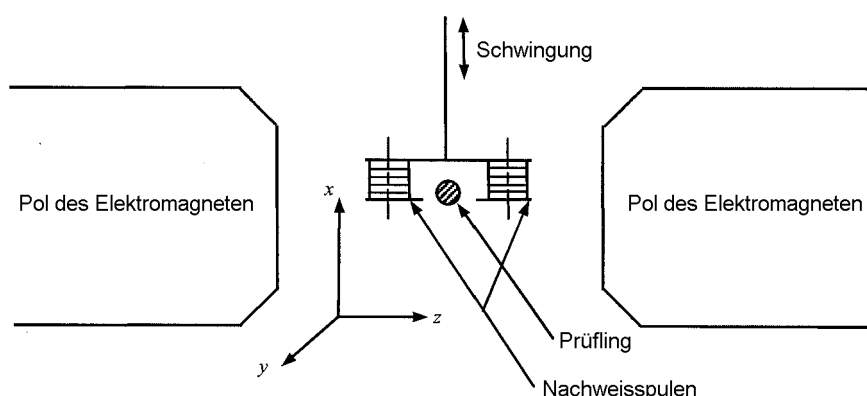


Bild 1 – Schwingspulenmethode – Anordnung von Prüfling und Spulen

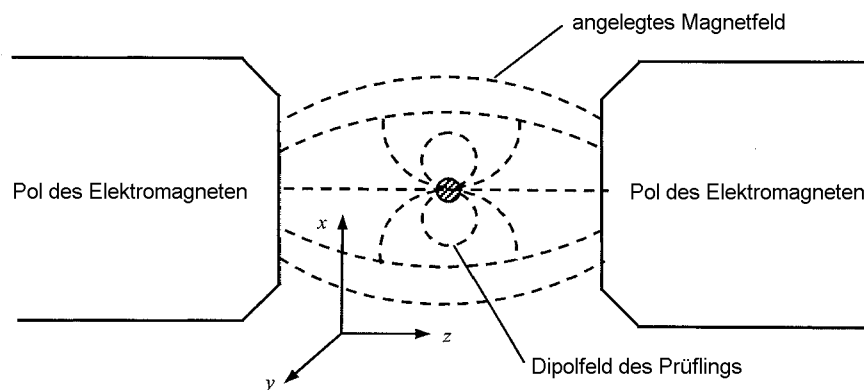


Bild 2 – Konfiguration des Magnetfeldes

Die Schwingungsrichtung (die x -Richtung) verläuft in einem Winkel von 90° zur z -Achse des Elektromagneten (Bild 1), d. h. senkrecht zur Richtung des magnetostatischen Feldes, und die Amplitude muss in der Größenordnung von 0,05 mm bis 0,5 mm liegen. Die Frequenz ist unkritisch, liegt aber gewöhnlich zwischen 20 Hz und 200 Hz, aber es sind auch Frequenzen außerhalb dieses Bereiches zulässig. Die Bewegung der Spulen in z - und y -Richtung muss durch eine geeignete Befestigung auf höchstens 1 % der Bewegung in x -Richtung beschränkt werden. Gegebenenfalls können Mittel zur Stabilisierung der Schwingungsamplitude unter Anwendung einer Rückkopplungsschleife eingebaut werden.

4.5.2 Der Elektromagnet

Mit dem Magnetfeld muss ein kugelförmiger Prüfling aus dem zu messenden Werkstoff vollständig gesättigt werden können. Für die meisten Mikrowellenferrite ist ein Feld von 300 kAm^{-1} ausreichend, für hexagonale Ferrite auf Bariumbasis kann aber ein Feld von bis zu 500 kAm^{-1} erforderlich sein. Die Stromversorgung des Elektromagneten muss das Feld mit einer Abweichung von 0,5 % stabil halten.

In der mittleren Lage der Nachweisspulen darf das Querfeld höchstens 1 % des Längsfeldes (H_z) betragen.

Da die Homogenität des Feldes von der Feldstärke abhängt, müssen Messungen immer mit dem angelegten Feld vorgenommen werden, mit dem die Kalibrierung und die Nullpunkteinstellung (siehe 4.8) erfolgt ist.

4.5.3 Beseitigung von Wirkungen des angelegten Feldes

Wenn das angelegte Feld vollkommen homogen wäre und keine radialen Anteile hätte, während die Schwingungsrichtung genau rechtwinklig zum angelegten Feld verlaufen würde, könnte die Theorie nach 4.3 direkt auf den Versuchsaufbau nach Bild 1 angewendet werden.

Wie jedoch im Bild 2 angegeben, ist das angelegte Feld nicht homogen und seine Richtung und sein Betrag schwanken von Punkt zu Punkt. Darüber hinaus ist es praktisch unmöglich, ein identisches Paar von Nachweisspulen herzustellen. Der Winkel der Schwingung weicht von 90° ab, und es wird immer eine Restbewegung in y - und z -Richtung vorhanden sein.

Aus diesem Grund werden durch die Inhomogenität des angelegten Feldes in den Spulen Spannungen induziert. Die Wirkung von H_z wird durch die entgegengesetzte Wicklung der Spulen beträchtlich verringert, so dass die Spannungen durch H_z aufgehoben werden, während sich die Spannungen durch das Dipolfeld des Prüflings addieren.

Eine vollständige Beseitigung kann jedoch im Allgemeinen nicht mit einem Spulenpaar allein erreicht werden. Deshalb wird ein zweites Spulenpaar, die Kompensationsspulen, verwendet. Diese werden auf die gleichen Wickelkörper wie die Prüfspulen, aber in Reihe gewickelt, so dass sich die durch H_z induzierten Spannungen überlagern. Damit wird dann eine Kompensationsspannung erhalten, deren Amplitude und Phase so eingestellt werden können, dass die in den Prüfspulen durch H_z induzierte Spannung ausgeglichen wird.

Die Wirkung von H_x ist schwerer zu beseitigen, weil die in den Prüfspulen induzierten Spannungen genauso addiert werden wie die Spannungen durch das Dipolfeld. Im Allgemeinen weicht jedoch die Schwankung von H_x mit x von der Schwankung des Dipolfeldes des Prüflings ab. Die beiden Signale sind deshalb nicht phasengleich und können mit einem phasenempfindlichen Empfänger erkannt werden.

4.5.4 Ausstattung mit elektronischen Geräten

Bild 3 enthält eine schematische Darstellung der Messeinrichtung. Der Schwingungserzeuger wird von einem niederfrequenten Oszillator (9), der abstimbar sein kann, und einem Leistungsverstärker angesteuert. Die Amplitude am Oszillatorausgang und die Verstärkung des Leistungsverstärkers müssen ausreichend stabil sein, damit der Schwingungserzeuger nach dem Einlaufen mit einer Abweichung von $\pm 0,3$ % konstant angesteuert wird. Ist das nicht der Fall, muss die Amplitude des Schwingungserzeugers mit geeigneten Mitteln stabilisiert werden. Die Frequenz des Oszillators muss nach dem Einlaufen mit einer Abweichung von 0,05 % stabil sein.

Das Ausgangssignal der Kompensationsspulen (1(c)) wird mithilfe eines einstellbaren Dämpfungsgliedes (2) und eines Phasenschiebers (3) durch den Differenzverstärker (4) mit dem Ausgang der Prüfspulen (1(s)) abgeglichen. Der Phasenschieber muss über 360° einstellbar sein, und seine Auflösung muss mindestens $\pm 0,1^\circ$ betragen. Weder der Phasenschieber noch das Dämpfungsglied muss kalibriert werden.

Der Rauschpegel des Differenzverstärkers muss bei niedrigen Frequenzen so gering sein, dass eine genaue Nullpunkteinstellung möglich ist. Die genauen Anforderungen hängen von der Konstruktion der Spulen und der anderen Einrichtungen ab. Es kann eine einstellbare Verstärkungsregelung integriert werden.

Ein Tiefpass (5) muss alle Oberschwingungen um mindestens 20 dB bezogen auf die Grundschiwingung verringern.

Der selektive Verstärker, der auf die Oszillatorfrequenz abgestimmt ist, muss eine Bandbreite in einer Größenordnung von 1 % besitzen, und er muss abstimbar sein, wenn der Oszillator nicht abstimbar ist.

Der phasenempfindliche Empfänger (7) muss eine höhere Auflösung als 3° besitzen, und die Phase entweder des Referenz- oder des Signalkanals muss um 360° einstellbar sein. Die Phaseeinstellung muss unabhängig von der Eingangsamplitude beider Kanäle sein.

Das Messgerät (8) kann analog oder digital sein. Wenn Messungen über einem Temperaturbereich auszuführen sind, kann das Messgerät durch einen X-Y-Schreiber ersetzt werden, wobei eine Achse eine lineare Funktion der Magnetisierung aufzeichnet und die andere eine lineare Funktion der Temperatur. Beide Achsen müssen auf die geforderte Genauigkeit kalibriert werden. Die Temperaturmesseinrichtung, gewöhnlich ein Thermoelement, muss in einem engen thermischen Kontakt mit dem Prüfling stehen.

Alle elektronischen Geräte müssen eine angemessene Temperaturstabilität aufweisen, damit die geforderte Genauigkeit im Bereich der im Gebrauch vorliegenden Umgebungstemperaturen sichergestellt ist.

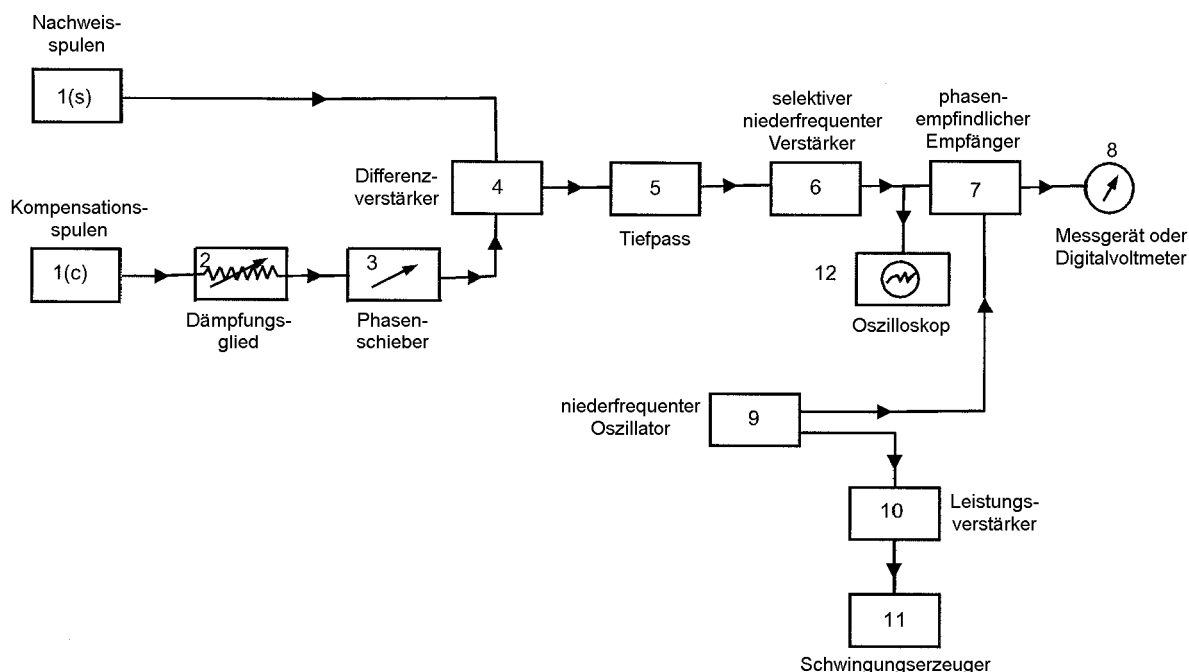


Bild 3 – Messeinrichtung (VCM)

4.6 Messeinrichtung für die Schwingprüflingsmethode (VSM)

4.6.1 Anordnung von Nachweisspulen und Prüfling

Bei der Schwingprüflingsmethode werden die Nachweisspulen (Bild 4) zwischen den Polstücken des Elektromagneten starr befestigt, aber in einer Weise, dass häufige kleine Einstellungen möglich sind. Gewöhnlich verlaufen ihre Achsen im rechten Winkel zum angelegten Feld und parallel zur Schwingungsrichtung, es sind aber andere Anordnungen [5] zulässig. Die mittlere Lage des Prüflings befindet sich auf der Achse des Elektromagneten und ist in Bezug auf die Nachweisspulen normalerweise symmetrisch. Sie muss mit einer Abweichung von $\pm 0,1$ mm reproduzierbar sein. Der Prüfling wird an einem nichtmagnetischen Schwingarm, der an einem Schwingungserzeuger angebracht ist, starr befestigt und möglichst nahe an den Nachweisspulen angeordnet.

Die Schwingungsrichtung (die x -Richtung) verläuft in einem Winkel von 90° zur z -Achse des Elektromagneten (Bild 4), d. h. senkrecht zur Richtung des magnetostatischen Feldes, und die Amplitude muss in der Größenordnung von 0,05 mm bis 0,5 mm liegen. Die Frequenz ist unkritisch, liegt aber gewöhnlich zwischen 20 Hz und 200 Hz, aber es sind auch Frequenzen außerhalb dieses Bereiches zulässig. Die Bewegung des Prüflings in z - und y -Richtung muss durch eine geeignete Montage auf höchstens 1 % der Bewegung in x -Richtung beschränkt werden. Gegebenenfalls können Mittel zur Stabilisierung der Schwingungsamplitude unter Anwendung einer Rückkopplungsschleife eingebaut werden.

Am Schwingarm wird ein kleiner Dauermagnet angebracht, aber so weit vom Elektromagneten entfernt, dass er von diesem unbeeinflusst bleibt. An beiden Seiten dieses Magneten werden zwei kleine Spulen starr befestigt, um dessen Feld nachzuweisen. Anstelle des Magneten kann eine kleine Spule benutzt werden, die einen genau geregelten Gleichstrom führt.

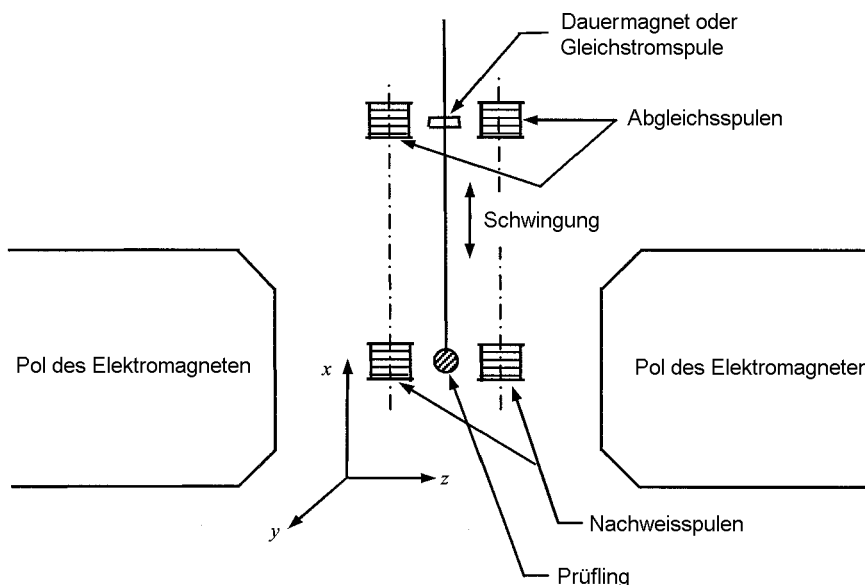


Bild 4 – Schwingprüflingsmethode – Anordnung von Prüfling und Spulen

4.6.2 Der Elektromagnet

Es müssen keine Maßnahmen ergriffen werden, um der Krümmung und der Inhomogenität des angelegten Feldes entgegenzuwirken, sofern eine Homogenität von 3 % über dem Volumen des Prüflings eingehalten wird. Ein Radialfeld von bis zu 1 % des Längsfeldes ist zulässig.

Mit dem magnetostatischen Feld muss ein kugelförmiger Prüfling aus dem zu messenden Werkstoff vollständig gesättigt werden können. Für die meisten Mikrowellenferrite ist ein Feld von 300 kA m^{-1} ausreichend, für hexagonale Ferrite auf Bariumbasis kann aber ein Feld von bis zu 500 kA m^{-1} erforderlich sein. Die Stromversorgung muss das Feld mit einer Abweichung von etwa 0,5 % stabil halten.

4.6.3 Ausstattung mit elektronischen Geräten

Bild 5 enthält eine schematische Darstellung der elektronischen Messausrüstung. In der einfachsten Anordnung werden nur die Positionen 1 bis 8 verwendet, und es sind Punkt-für-Punkt-Messungen bei festgelegten Temperaturen möglich. Der kalibrierte Spannungsteiler (3) wird zum Abgleich der in den Abgleichsspulen induzierten Spannung mit der Spannung in den Prüfspulen benutzt. Der Nullpunkt wird mit dem Oszilloskop (5) abgelesen. Die Magnetisierung wird aus den Einstellungen des Spannungsteilers errechnet.

Alternativ kann der Nullabgleich mit der ordnungsgemäß angebrachten leeren Prüflingshaltevorrichtung durchgeführt werden. Das unsymmetrische Signal nach dem Einsetzen eines Prüflings ist dann proportional zur Magnetisierung. Dieses Signal kann direkt am Messgerät (5) oder am Oszilloskop abgelesen werden. Für eine ununterbrochene Aufzeichnung von M_s als Funktion der Temperatur kann das Oszilloskop durch einen X-Y-Schreiber ersetzt werden. Eine größere Empfindlichkeit und bessere Stabilität kann mit einem phasenempfindlichen Empfänger (9) erreicht werden, der das Signal empfängt, das dann mit einem Messgerät oder Schreiber angezeigt bzw. aufgezeichnet wird.

Wenn anstelle eines Dauermagneten zum Erreichen der Abgleichspannung eine Gleichstromspule (12) verwendet wird, kann ein automatischer Nullabgleich durchgeführt werden, indem das Ausgangssignal des phasenempfindlichen Empfängers in die Gleichstromspule eingespeist wird. Der Strom in der Spule ist dann direkt proportional zur Magnetisierung.

Der Spulenstrom kann mit einem Gleichstrommessgerät in Reihenschaltung mit der Spule gemessen werden oder mit einem hochohmigen Spannungsmessgerät in Parallelschaltung mit der Spule. Im zweiten Fall müssen Schwankungen des Spulenwiderstandes aufgrund von Temperaturänderungen den für M_s geforderten Genauigkeitsgrad einhalten.

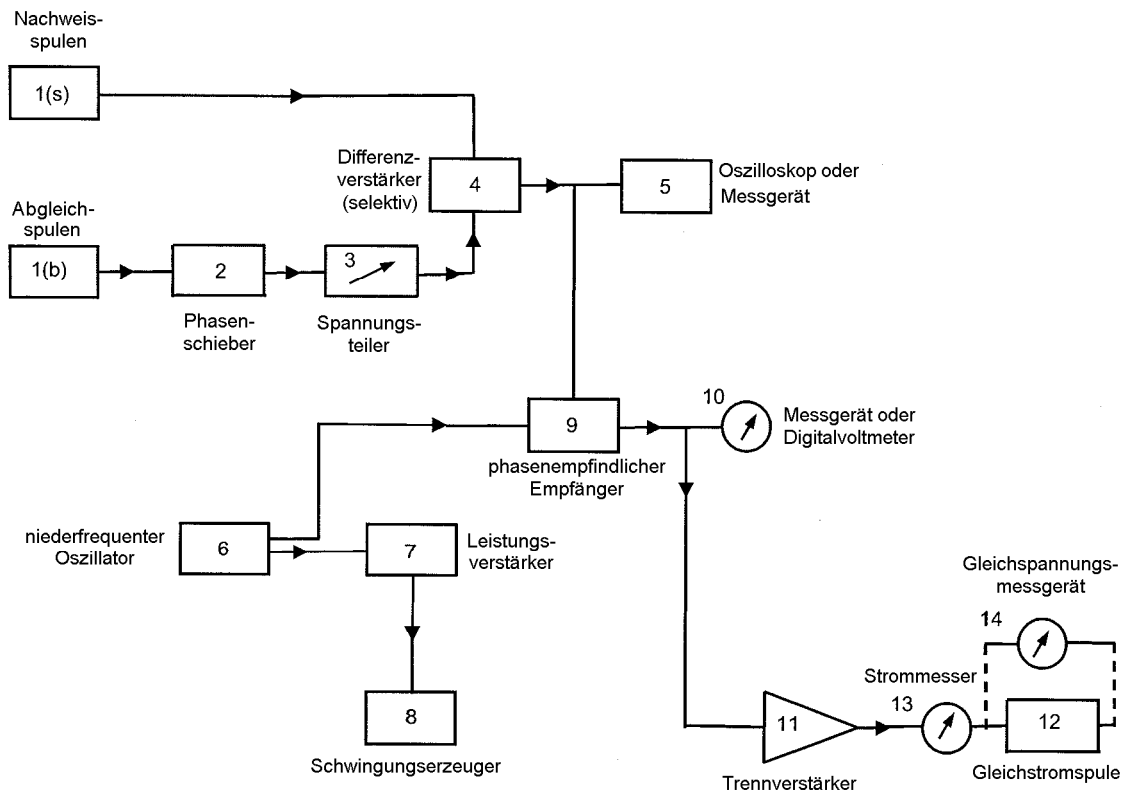


Bild 5 – Messeinrichtung (VSM)

Der Schwingungserzeuger wird von einem niederfrequenten Oszillator, der abstimbar sein kann, und einem Leistungsverstärker angesteuert. Die Amplitude am Oszillatorausgang und die Verstärkung des Leistungsverstärkers müssen ausreichend stabil sein, damit der Schwingungserzeuger nach dem Einlaufen mit einer Abweichung von 0,3 % konstant angesteuert wird. Ist das nicht der Fall, muss die Amplitude des Schwingungserzeugers mit geeigneten Mitteln stabilisiert werden. Die Frequenz des Oszillators muss nach dem Einlaufen mit einer Abweichung von 0,05 % stabil sein.

Der Spannungsteiler muss mit einer Auflösung von 0,01 % oder besser stetig einstellbar und auf die geforderte Genauigkeit kalibriert sein.

Der Rauschpegel des Differenzverstärkers muss ausreichend gering sein, und er muss einen integrierten selektiven Verstärker mit einer Bandbreite in der Größenordnung von 3 % besitzen, der auf die Oszillatorfrequenz abgestimmt ist, oder ein solcher muss dem Differenzverstärker unmittelbar folgen. Die Selektivstufe muss abstimmbar sein, wenn der Oszillator nicht abstimmbar ist.

Anforderungen an den phaseneempfindlichen Empfänger sind nicht festgelegt. Eine Auflösung von 10° ist ausreichend. Die Phaseeinstellung muss unabhängig von der Eingangsamplitude beider Kanäle sein.

Die Messgeräte können analog oder digital sein. Wenn Messungen über einem Temperaturbereich auszuführen sind, kann das Messgerät durch einen X-Y-Schreiber ersetzt werden, wobei eine Achse eine lineare Funktion der Magnetisierung aufzeichnet und die andere eine lineare Funktion der Temperatur. Beide Achsen müssen auf die geforderte Genauigkeit kalibriert werden. Die Temperaturmesseinrichtung, gewöhnlich ein Thermoelement, muss in einem engen thermischen Kontakt mit dem Prüfling stehen.

Alle elektronischen Geräte müssen eine angemessene Temperaturstabilität aufweisen, damit die geforderte Genauigkeit im Bereich der im allgemeinen Gebrauch vorliegenden Umgebungstemperaturen sichergestellt ist.

4.7 Kalibrierung

4.7.1 Vergleichsverfahren

Dieses Verfahren, das für die Schwingspulenmethode und die Schwingprüflingsmethode gleichermaßen anwendbar ist, verlangt ein Prüfnorm mit genau bekannter Sättigungsmagnetisierung. Der gebräuchlichste Werkstoff für das Normal ist reines Nickel, es dürfen aber auch andere Werkstoffe verwendet werden, wenn deren Sättigungsmagnetisierung ausreichend genau bekannt ist.

Der Kalibrierprüfling muss eine Kugel mit einer vergleichbaren Größe sein (wenn die Prüflinge Kugeln sind). (Wenn andere Prüflinge als Kugeln zu messen sind, müssen Kalibrierprüflinge mit identischen Maßen verwendet werden.) Die Kalibrierkugel darf eine Rundheitsabweichung von höchstens 0,5 % besitzen, und ihr mittlerer Durchmesser muss bis auf 0,1 % genau bekannt sein. Metallische Kugelnormale müssen vor der Anwendung getempert werden.

Zunächst muss die Dichte des als Normal benutzten Werkstoffes bestimmt werden. Der allgemein anerkannte Wert für die Sättigungsmagnetisierung von Nickel mit einer Reinheit von 99,995 % mit einer Dichte von $8,90 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ist bei $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $485,6 \text{ kAm}^{-1}$. Für Werkstoffe mit geringerer Dichte gilt:

$$M_s = \frac{485,6 \times \text{Dichte}}{8,90} \text{ (kAm}^{-1}\text{)} \quad (6)$$

Der tatsächliche Wert für einen bestimmten Prüfling kann jedoch abhängig von der Reinheit, vom Spannungszustand, vom angelegten Feld oder der Umgebungstemperatur von diesem Wert bis zu 1 % abweichen [3]. Die Genauigkeit des Vergleichsverfahrens ist daher beschränkt.

4.7.2 „Anstiegs“verfahren

Dieses Verfahren, das für die Schwingspulenmethode und die Schwingprüflingsmethode gleichermaßen anwendbar ist, beruht auf der Beobachtung, dass die in den Nachweisspulen durch einen kugelförmigen Prüfling induzierte Spannung im unteren Bereich der Magnetisierungskurve direkt proportional zum angelegten Feld ist [4]. Darüber hinaus ist die Proportionalitätskonstante unabhängig von der Permeabilität, sofern diese ausreichend hoch ist.

Nach 4.3 kann die Anzeige des Spannungsmessgerätes E_x für einen beliebigen Prüfling x wie folgt angegeben werden:

$$E_x = k M_x d_x^3 \quad (7)$$

Dabei ist

M_x die Magnetisierung des Prüflings bei einem (niedrigen) Wert der angelegten magnetostatischen Feldstärke H_0 ;

d_x der Prüflingsdurchmesser;

k die Konstante.

Im Bereich unterhalb der Sättigung genügt die (lineare) Beziehung zwischen M_x und H_0 folgenden Gleichungen:

$$M_x = (\mu_x - 1) H_i \quad (8)$$

$$H_i = H_0 - N M_x \quad (9)$$

Dabei ist

H_i die magnetostatische Feldstärke innerhalb des Prüflings;

μ_x die relative Permeabilität des Prüflings;

N der Entmagnetisierungsfaktor, der für eine perfekte Kugel gleich ein Drittel beträgt.

Durch Einsetzen von H_i und Umstellen der Gleichungen (8) und (9) ergibt sich:

$$H_0 = \left(\frac{1}{\mu_x - 1} + N \right) M_x \quad (10)$$

Durch Einsetzen von M_x und Umstellen der Gleichungen (7) und (10) ergibt sich:

$$E_x = k \frac{H_0}{1/(\mu_x - 1) + N} d_x^3 \quad (11)$$

Der lineare Teil der Kurve von E_x als Funktion von H_0 besitzt einen Anstieg, der sich nach Gleichung (11) wie folgt berechnen lässt:

$$\frac{\Delta E_x}{\Delta H_0} = \frac{k d_x^3}{1/(\mu_x - 1) + N} \quad (12)$$

Wenn μ_x ausreichend hoch ist, z. B. 2 000, kann der erste Term im Nenner gegenüber N vernachlässigt werden, und der Parameter k kann angegeben werden mit:

$$k = \frac{\Delta E_x / \Delta H_0}{3 d_x^3} \quad (13)$$

mit einem Fehler von 0,15 %.

Eine Rundheitsabweichung von 0,25 % führt zu einem größten Fehler bei N von 0,25 % [3].

Der so mit einem Kalibrierprüfling mit hoher Permeabilität ermittelte Wert für k kann in Gleichung (7) eingesetzt werden, die dann für den unbekannten Prüfling bei Sättigung angewendet wird. Die Sättigungsmagnetisierung des unbekannten Prüflings M_{su} wird mit einer Abweichung von 0,4 % angegeben mit:

$$M_{su} = \frac{E_{su}}{k d_u^3} = E_{su} \frac{3 d_c^3}{(\Delta E_c / \Delta E_0) d_u^3} \quad (14)$$

Dabei ist

E_{su} der Anzeigewert des Spannungsmessgerätes für den gesättigten unbekannten Prüfling, und

die Indizes c und u bezeichnen den Kalibrierprüfling bzw. den unbekannten Prüfling.

Dieses Verfahren erfordert kein absolutes Kalibriernormal.

4.8 Messverfahren

4.8.1 Nullpunkteinstellung – Schwingspulenmethode

Der Strom für den Elektromagneten wird mit der leeren Prüflingshaltevorrichtung zwischen den Polen eingeschaltet. Die Nachweisspulen werden in Schwingungen versetzt. Das Dämpfungsglied und der Phasenschieber werden so eingestellt, dass am selektiven Verstärker das kleinste Ausgangssignal, das am Oszilloskop beobachtet wird, erzielt wird.

Das angelegte Feld wird dann verändert, und die Einstellungen des Dämpfungsgliedes und des Phasenschiebers werden überprüft. Wenn sich diese wesentlich verändert haben, wird die Lage der Spulen nachgestellt und erneut der Nullpunkt eingestellt, bis eine Lage ermittelt wird, bei der die Nullpunkteinstellung über dem betreffenden Bereich ausreichend unabhängig vom angelegten Feld ist.

In die Haltevorrichtung wird ein Kalibrierprüfling eingesetzt, und der phasenempfindliche Empfänger wird so eingestellt, dass am Spannungsmessgerät der größte Wert angezeigt wird.

4.8.2 Nullpunkteinstellung – Schwingprüflingsmethode

Die Abgleichspulen werden zunächst in eine Lage gebracht, in der sie gegenüber der genauen Lage des Referenzmagneten (oder der Gleichstromspule) möglichst unempfindlich sind. Wenn von den Nachweispulen kein Signal abgegeben wird, werden die Abgleichspulen um die x -Achse gedreht, bis sich das größte Ausgangssignal ergibt. Anschließend werden sie so eingestellt, dass sich in z -Richtung das kleinste Eingangssignal, in y -Richtung das größte Ausgangssignal und in x -Richtung das größte (bei kurzen Spulen) oder das kleinste (bei langen Spulen) Ausgangssignal ergibt. Der Ausgang ist nun unabhängig von kleinen Lageänderungen des Magneten.

Die Abgleichspulen werden dann in dieser Lage befestigt, und im Normalfall brauchen die angegebenen Einstellungen nicht wiederholt zu werden.

In die Haltevorrichtung wird ein Prüfling eingesetzt, und für die Prüfspule werden ohne Signal von den Abgleichspulen die gleichen Einstellungen vorgenommen.

4.8.3 Messung

Sämtliche elektronischen Geräte müssen mindestens 30 min vor Beginn der Messungen eingeschaltet werden, damit sie sich bei Umgebungstemperatur stabilisieren. Der Anzeigewert des Nullpunktes wird mit der leeren Prüflingshaltevorrichtung überprüft und die Einrichtung gegebenenfalls nachgestellt.

In die Haltevorrichtung wird ein Kalibrierprüfling eingesetzt, und der Anzeigewert wird überprüft, um sicherzustellen, dass er für diesen besonderen Prüfling bei Umgebungstemperatur richtig ist.

Der Durchmesser des kugelförmigen Prüflings wird mindestens fünfmal einzeln mit einer Bügelmessschraube oder mikroskopisch gemessen. Die Abweichung von der Rundheit wird nach Gleichung (5) berechnet.

Der Prüfling wird in der Haltevorrichtung befestigt und das angelegte Feld auf den geforderten Wert eingestellt.

Bei der VSM wird der Spannungsteiler so eingestellt, dass auf dem Oszilloskop der Nullpunkt abgelesen wird, oder alternativ wird der Anzeigewert des Messgerätes aufgezeichnet, wenn sich mit der leeren Prüflingshaltevorrichtung der Nullpunkt eingestellt hat. Bei einem automatischen Nullabgleich mit einer Gleichstromspule wird der Spulenstrom abgelesen.

Bei der VCM wird der Anzeigewert des Messgerätes nicht aufgezeichnet.

Außerdem wird die Temperatur des Prüflings beobachtet. Wenn Messungen über einem Temperaturbereich durchzuführen sind, wird die Temperatur zunächst auf den geringsten vorkommenden Wert eingestellt, die Klimakammer wird in einer ausreichenden Zeit stabilisiert, und dann wird die Temperatur um höchstens 3 °C/min erhöht, bis der gesamte betreffende Temperaturbereich durchlaufen wurde.

4.9 Berechnung

Die Anzeigewerte werden in Abhängigkeit vom Kalibrierverfahren nach 4.7.1 oder 4.7.2 entweder mit Gleichung (4) oder mit Gleichung (14) in Magnetisierungswerte umgerechnet.

4.10 Genauigkeit

Die Genauigkeit von VCM oder VSM hängt vom Kalibrierverfahren ab. Wird das Vergleichsverfahren benutzt, kann aufgrund der Unsicherheit der Magnetisierung des Kalibrierprüflings ein systematischer Fehler von bis zu 1 % eingeführt werden. Das Anstiegsverfahren ist etwas günstiger, weil kein Absolutwert von M_c benötigt wird. In diesem Fall kann der Fehler aufgrund der Unsicherheit bei der Kalibrierung auf weniger als 0,5 % gehalten werden.

Der relative Fehler für VCM beträgt gewöhnlich ± 3 %.

Der relative Fehler für VSM beträgt gewöhnlich $\pm 1,5$ %.

Die relativen Fehler hängen vom M_s -Wert ab und sind bei niedrigen Werten der Sättigungsmagnetisierung größer.

4.11 Darstellung der Daten

Die mit einem der beiden Verfahren bestimmten M_s -Werte sind wie folgt anzugeben:

Sättigungsmagnetisierung bei einer Temperatur von θ °C: $M \text{ kAm}^{-1} \pm$ geschätzter Fehler, wobei die Zahl M mit drei signifikanten Stellen angegeben wird.

Wenn M_s als Funktion der Temperatur grafisch dargestellt wird, muss die tatsächliche Kurve zusammen mit einer Schätzung der Genauigkeit sowohl der M_s -Messung als auch der Temperaturmessung angegeben werden.

Der Bericht muss außerdem eine eindeutige Beschreibung des Prüflings umfassen.

5 Magnetisierung (bei einer bestimmten Feldstärke) M_H

5.1 Allgemeines

Für theoretische Berechnungen der Komponenten des Permeabilitätstensors ist die Kenntnis der Sättigungsmagnetisierung des Werkstoffes notwendig (siehe IEC 60050-221). Im Allgemeinen ist der Ferritwerkstoff in einem Mikrowellenbauelement jedoch nicht vollständig gesättigt.

So befindet sich beispielsweise in den kürzlich entwickelten sogenannten magnetischen Verklümpungseinrichtungen das Ferrit in einem Remanenzzustand. Aus diesem Grunde wurde ein Verfahren gesucht, mit dem allgemeinere Informationen über die Eigenschaften der Hystereseschleife eines Werkstoffes ermittelt werden können. Die Anwendbarkeit dieses Verfahrens wird etwas durch die Tatsache beschränkt, dass der Prüfling ein Toroid sein muss oder wenigstens ein geschlossener magnetischer Kreis, der mit ausreichender Genauigkeit als ein äquivalenter Toroid beschrieben werden kann.

5.2 Ziel

Das beschriebene Messverfahren wurde in erster Linie zur Messung der Magnetisierung entwickelt. Gleichzeitig ist aber auch die Messung einer Anzahl anderer magnetischer Eigenschaften möglich, z. B. der remanenten Magnetisierung und der Koerzitivität, wenn sich der Werkstoff in einem zyklischen magnetischen Zustand befindet. Das „Rechteckigkeitsverhältnis“ M_r/M_H des Werkstoffes kann berechnet werden, und während der Messung kann die Hystereseschleife ununterbrochen auf einem Oszilloskop dargestellt werden. Anhand dieser Darstellung kann die Empfindlichkeit des Werkstoffes gegen mechanische Beanspruchung qualitativ geprüft werden.

Durch Anordnung des Prüflings in einer programmierten Temperaturprüfkammer können alle Größen als Funktionen der Temperatur ermittelt werden. Mit einem ausreichenden Temperaturdurchlaufbereich können die Curie-Temperatur und bei bestimmten Werkstoffen die Kompensationstemperatur bestimmt werden.

5.3 Theorie

Für ein Ferrit-Toroid gilt folgende Beziehung zwischen der Flussdichte B , der Magnetisierung M und der Feldstärke H :

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (15)$$

Dabei ist μ_0 die magnetische Feldkonstante.

Ist das Verhältnis des Außendurchmessers zum Innendurchmesser des Toroids annähernd Eins, kann angenommen werden, dass alle Feldgrößen über dem Querschnitt des Toroids ziemlich konstant sind.

Ändert sich H periodisch und symmetrisch, und gleichzeitig wird B gemessen und als Funktion von H in einem kartesischen Koordinatensystem grafisch dargestellt, ergibt sich eine dynamische $B(H)$ -Schleife (Bild 6a). Diese Kurve kann in eine $M(H)$ -Schleife umgewandelt werden, indem von B die Größe $\mu_0 H$ abgezogen wird und durch μ_0 dividiert wird (Bild 6b). Ist die Schwankung von H ausreichend groß, wird die Höhe der Kurve unabhängig von jeder weiteren Erhöhung von H und ist gleich M_s . In diesem Fall entsprechen die Schnittpunkte der Schleife mit der H -Achse der zyklischen Koerzitivität H'_{cJ} .

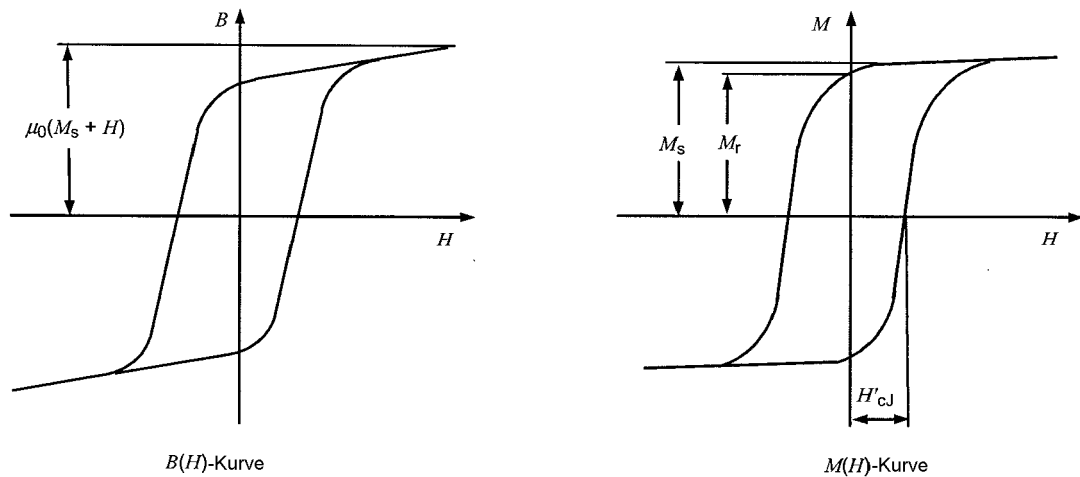


Bild 6 – Hysteresekurven für einen Magnetwerkstoff: $B(H)$ -Kurve, $M(H)$ -Kurve

Wenn eine Wicklung aus N_1 Windungen gleichmäßig auf einen Ringkern mit rechteckigem Querschnitt gewickelt wird, führt ein Strom I durch diese Wicklung zu einem Magnetfeld innerhalb des Kerns, dessen Mittelwert folgender Gleichung genügt:

$$H = \frac{N_1 I}{2\pi r_m} \quad (16)$$

Dabei ist r_m der mittlere Radius des Kerns und wird wie folgt berechnet:

$$r_m = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{(1/r_1) - (1/r_2)} \quad (17)$$

Dabei sind r_1 und r_2 der Innen- bzw. der Außenradius des Toroids (siehe IEC 60205).

Wenn eine Sekundärwicklung aus N_2 Windungen gleichmäßig auf denselben Kern gewickelt wird, wird proportional zur Zeitableitung der Flussdichte im Kern eine elektromotorische Kraft E in dieser Wicklung induziert:

$$E = -k \frac{dB}{dt} \quad (18)$$

Dabei ist

$k = N_2 A_e$, wobei

A_e der wirksame Querschnitt des Prüflings nach 5.5 ist.

Würden sich die beiden Wicklungen auf einem nichtmagnetischen Kern befinden, wäre die induzierte Spannung proportional zur Zeitableitung der Feldstärke:

$$E' = -k \mu_0 \frac{dH}{dt} \quad (19)$$

Die angegebenen Anordnungen entsprechen einem Transformator mit Ferritkern bzw. einem Transformator mit Luftkern. Werden jeweils zwei dieser verschiedenen Transformatorarten, wie im Bild 7 dargestellt, mit entgegengesetzter Wicklung in Reihe geschaltet, genügt die gesamte Ausgangsspannung U folgender Gleichung:

$$U = E - E' = -k \left(\frac{dB}{dt} - \mu_0 \frac{dH}{dt} \right) \quad (20)$$

Daraus folgt

$$U = -k \mu_0 \frac{dM}{dt} \quad (21)$$

Durch Integration der Spannung U ergibt sich ein Spannung-Zeit-Integral, das proportional zu M ist. Da H proportional zu I ist, gibt es somit zwei elektrische Größen, mit denen eine analoge Darstellung der $M(H)$ -Schleife erfolgen kann.

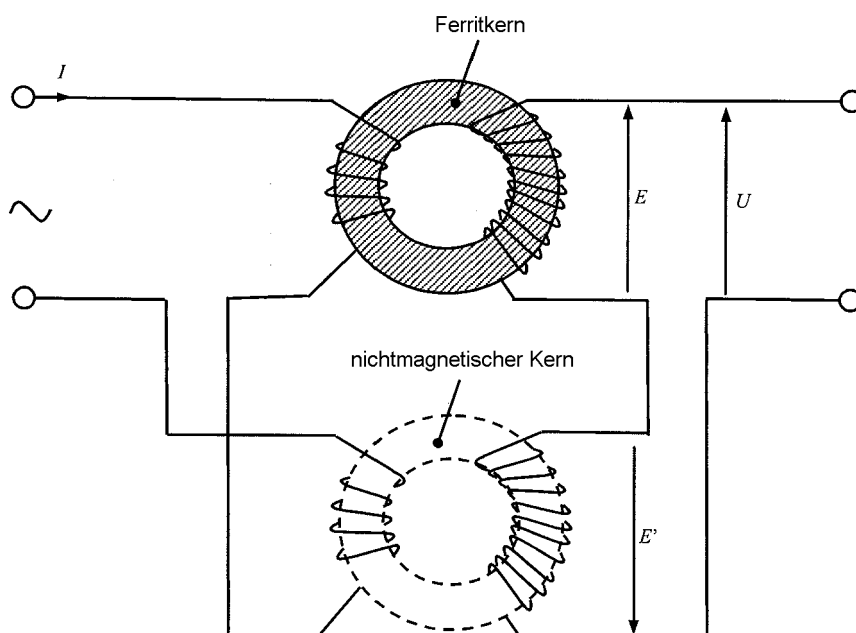


Bild 7 – Prüfling mit Kompensationseinheit

5.4 Prüfling

Der Toroid wird aus dem zu untersuchenden Werkstoff hergestellt. Bild 8 zeigt ein Beispiel für geeignete Maße des Toroids. Die Maße dürfen leicht verändert werden, aber das Verhältnis von Innen- zu Außendurchmesser muss immer größer als 0,7 sein.

Ein kleiner Teil einer der flachen Seiten des Prüflings wird mit Silber beschichtet. Nach der Aushärtung sollte die geeignete Silberbeschichtung eine gute Haftung und Lötbarkeit aufweisen.

Maße in Millimeter

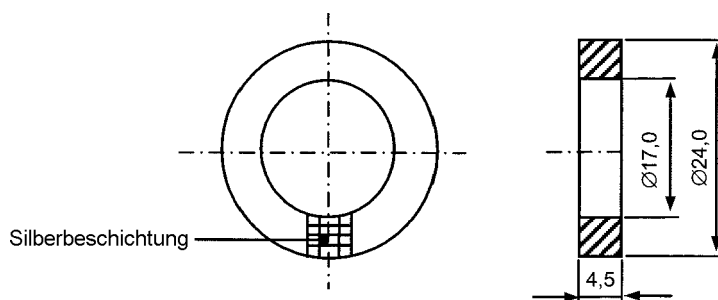


Bild 8 – Prüfling

Aus einer Legierung mit etwa 90 % Gewichtsanteil Blei und dem Rest Zinn wird ein Lot mit hohem Schmelzpunkt (etwa 310 °C) hergestellt. Diese Legierung, die auf die gleiche Weise benutzt wird wie herkömmliches Lot, wird zur Befestigung eines Thermoelementes (Kupfer-Konstantan) am mit Silber beschichteten Teil der Kernoberfläche verwendet. Mit diesem Thermoelement wird die tatsächliche Kerntemperatur mit ausreichender Genauigkeit gemessen. Auf die Verbindungsstelle mit dem Thermoelement kann eine bestimmte Schutzbeschichtung aufgebracht werden, um eine direkte Aufnahme der Wärmestrahlung auf ein Mindestmaß zu beschränken.

Eine Erwärmung (wie bei der Aushärtung des Silbers oder beim Löten) kann sich auf bestimmte Ferritwerkstoffe schädlich auswirken. In diesem Fall sollten andere Mittel zur Sicherung eines guten thermischen Kontaktes mit dem Thermoelement in Betracht gezogen werden.

Der nächste Schritt ist das Aufbringen von zwei Wicklungen auf den Kern: Die erste Wicklung ist die Suchspule und besteht aus einer einzigen Lage mit 200 Windungen aus Kupferdraht mit einem Durchmesser von 0,2 mm, die mit einem wärmebeständigen Lack wie Polyamid isoliert ist. Die Wicklung sollte mit Ausnahme des mit Silber beschichteten Teils möglichst gleichmäßig über dem Kern aufgebracht werden. Anschließend wird die Ansteuerungsspule über die Suchspule gewickelt. Die Ansteuerungsspule besteht aus 70 Windungen aus Kupferdraht mit einem Durchmesser von 0,5 mm, die mit einem wärmebeständigen Lack isoliert sind. Die angegebenen Zahlen sollten nur als Beispiel angesehen werden; sofern bei den Berechnungen berücksichtigt, dürfen andere gleichermaßen geeignete Windungszahlen benutzt werden.

5.5 Messeinrichtung

Der Prüfling und ein gleichartiger Transformator (Kompensationseinheit), die auf einen nichtmagnetischen Kern mit den gleichen Maßen wie der Ferrit-Toroid gewickelt sind, werden wie im Bild 9 dargestellt mit einem Messstromkreis verbunden. An die Primärwicklung wird über einen Widerstand R_i eine Sinus-Spannungsquelle angeschlossen, die 0 V bis 5 V Effektivwert mit einer Frequenz kleiner oder gleich 60 Hz liefert. Der Widerstand besteht aus einer kurzen Länge Konstantandraht und hat im hier angegebenen Beispiel einen Widerstandswert von 0,0963 Ω . (Mit etwas Vorsicht darf der Widerstand etwas erhöht werden, um die Empfindlichkeit des X-Eingangs des Oszilloskops zu senken.) Der Spannungsabfall über dem Widerstand U_x wird in den Horizontaleingang eines Oszilloskops eingespeist.

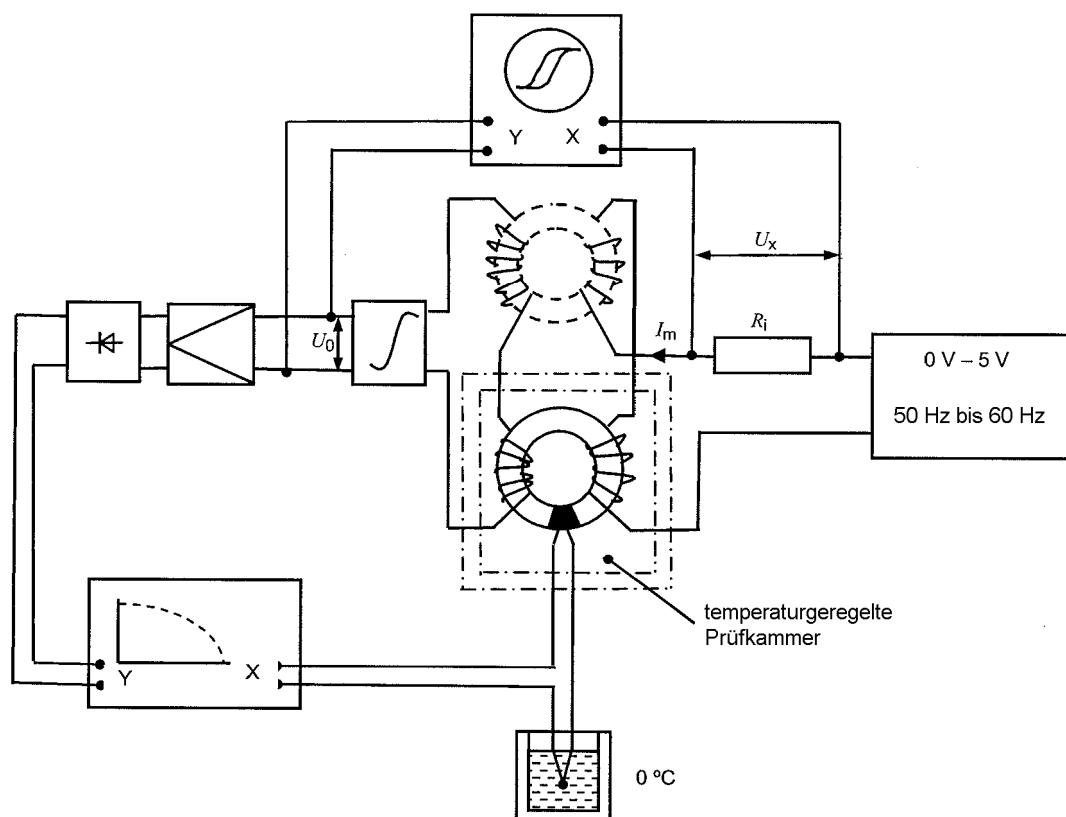


Bild 9 – Messstromkreis zur Bestimmung der Magnetisierung M_H (bei einer festgelegten Feldstärke)

Diese Spannung ist proportional zum Ansteuerungsstrom I_m und folglich zur magnetischen Feldstärke H_m . Sie genügt folgender Gleichung:

$$U_x = I_m R_i = \frac{H_m l_m}{N_1} R_i \quad (22)$$

Dabei ist

l_m die mittlere Länge des Flussweges;

N_1 Anzahl der Primärwindungen.

Ein Eingangssignal von 1 V entspricht einer Feldstärke von

$$H_m = \frac{N_1}{I_m R_i} \quad (23)$$

oder mit den im Beispiel angegebenen Zahlen $11,51 \times 10^3 \text{ Am}^{-1}$.

Daher entspricht eine Eingangsspannung am Oszilloskop von 1 mV einer Feldstärke von $11,51 \text{ Am}^{-1}$.

Die Ausgangsspannung der Sekundärwicklung, die in Reihe angeschlossen ist, ist proportional der Zeitableitung von M . Um ein zu M proportionales Signal zu erhalten, muss integriert werden, was mit einem Miller-Integrator erfolgt.

Ein Miller-Integrator kann nach Bild 10 unter Anwendung eines Operationsverstärkers aufgebaut werden.