

DIN EN IEC 63300

ICS 29.100.10

Einsprüche bis 2022-04-25

Entwurf

**Prüfverfahren für elektrische und magnetische Eigenschaften
magnetischer Pulverkerne
(IEC 51/1368/CD:2021);
Text Deutsch und Englisch**

Test methods for electrical and magnetic properties of magnetic powder cores
(IEC 51/1368/CD:2021);
Text in German and English

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2022-02-25 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Merianstraße 28, 63069 Offenbach am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 96 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 51/1368/CD:2021-03 „Test methods for electrical and magnetic properties of magnetic powder cores“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom IEC/TC 51 „Magnetic components, ferrite and magnetic powder materials“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und unterliegt dem Copyright der IEC . Das Dokument wurde den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf FprEN nur 6 Wochen beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

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

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DKE (www.dke.de) und DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnitsnummer, 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.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Inhalt

	Seite
EINLEITUNG.....	8
1 Anwendungsbereich.....	9
2 Normative Verweisungen.....	9
3 Begriffe und Symbole.....	9
3.1 Terms and definitions.....	9
3.2 Symbole.....	9
4 Instrument und Geräte.....	10
4.1 Allgemeine Bestimmungen.....	10
4.2 Erregungsquelle.....	10
4.2.1 Allgemeine Bestimmungen.....	10
4.2.2 Sinuswellen-Erregungsquelle.....	10
4.2.3 Rechteckwellen-Erregungsquelle.....	11
4.2.4 Berechnung der magnetischen Flussdichte.....	11
4.3 Messausrüstung.....	12
4.3.1 Allgemeine Bestimmungen.....	12
4.3.2 Spannungsmessgerät.....	12
4.3.3 Datenerfassungssystem.....	12
4.4 Sensor.....	12
4.4.1 Messwiderstand.....	12
4.4.2 Stromwandler.....	13
4.5 Weitere Beschreibung.....	13
4.5.1 Zwischenverbinder.....	13
4.5.2 Thermostat.....	13
5 Probe.....	13
5.1 Magnetischer Kern.....	13
5.2 Wicklung.....	14
5.2.1 Wicklungszustand.....	14
5.2.2 Zweischichtwicklung.....	14
5.2.3 Einschichtwicklung.....	14
5.3 Montage der Probe.....	16
6 Messbedingung.....	16
6.1 Beziehung zur Praxis.....	16
6.2 Effektive Parameter.....	17
6.3 Magnetischer Messzustand.....	17
7 Prüfverfahren für die Verlustleistung.....	17
7.1 Zusammenfassung.....	17
7.2 Wechselstromverfahren.....	18
7.3 Gleichstromverfahren.....	18

7.4	Kalorimetrisches Verfahren.....	18
8	Prüfverfahren für die effektive Permeabilität.....	18
8.1	Zusammenfassung.....	18
8.2	Großsignal-Wechselstromverfahren.....	19
8.3	Wechselstrom-Impedanzverfahren.....	19
8.4	Impulsverfahren.....	20
9	Prüfverfahren für die effektive komplexe Permeabilität.....	20
10	Prüfverfahren für den Qualitätsfaktor.....	20
11	Überprüfung der Messgenauigkeit.....	20
	Anhang A (informativ) Wechselstromverfahren.....	21
A.1	Überblick.....	21
A.2	Grundlegendes Schaltdiagramm.....	21
A.3	Messeinrichtung.....	22
A.3.1	Hochfrequente Erregungsquelle.....	22
A.3.2	Erregerwicklung N_1 und Spannungsmesswicklung N_2	22
A.3.3	Messwiderstand R	22
A.3.4	Datenerfasser.....	22
A.4	Prüfschritte.....	22
A.5	Messprinzip.....	22
A.6	Fehleranalyse.....	23
A.7	Zu behandelnde Punkte.....	24
A.7.1	Messfehler.....	24
A.7.2	Abzug des Wicklungsverlusts.....	24
A.8	Spezifische Prüfverfahren.....	24
A.8.1	Verfahren mit B-H-Analysegerät.....	24
A.8.2	Leistungsanalyseverfahren.....	24
A.8.3	Kapazitives reaktives Kompensationsverfahren.....	24
A.9	Messung für den Qualitätsfaktor.....	26
	Anhang B (informativ) Gleichstromverfahren.....	27
B.1	Überblick.....	27
B.2	Grundlegendes Schaltdiagramm.....	27
B.3	Messeinrichtung.....	27
B.3.1	Gleichspannungsquelle U_i	27
B.3.2	Gleichstrom-/Wechselstrom-Umrichter.....	27
B.3.3	Erregerwicklung N_1	27
B.3.4	Gleichstrommessgerät und Gleichspannungsmessgerät für die Messung des Mittelwerts.....	28
B.4	Prüfschritte.....	28
B.5	Messprinzip.....	28
B.6	Zu behandelnde Punkte.....	28

B.6.1	Umrichterverlust.....	28
B.6.2	Abzug des Wicklungsverlusts.....	29
Anhang C (informativ) Kalorimetrisches Verfahren.....		30
C.1	Überblick.....	30
C.2	Grundlegendes Schalt diagramm.....	30
C.3	Messeinrichtung.....	30
C.3.1	Erregungsquelle.....	30
C.3.2	Temperaturmessfühler.....	30
C.3.3	Wärmeisolierter Behälter.....	31
C.3.4	Wärmemedium.....	31
C.3.5	Probe.....	31
C.4	Prüfschritte.....	31
C.5	Messprinzip.....	31
C.6	Zu behandelnde Punkte.....	31
C.7	Spezifische Prüfverfahren.....	32
C.7.1	Kalorimetrisches Kalibrierungsverfahren.....	32
C.7.2	Vergleichendes kalorimetrisches Verfahren.....	33
Anhang D (informativ) Großsignal-Wechselstromverfahren.....		35
D.1	Überblick.....	35
D.2	Grundlegendes Schalt diagramm.....	35
D.3	Messeinrichtung.....	36
D.3.1	Hochfrequente Erregungsquelle.....	36
D.3.2	Erregerwicklung N_1 und Spannungsmesswicklung N_2	36
D.3.3	Messwiderstand R	36
D.3.4	Datenerfasser.....	36
D.4	Prüfschritte.....	36
D.5	Messprinzip.....	36
D.6	Zu behandelnde Punkte.....	37
Anhang E (informativ) Wechselstrom-Impedanzverfahren.....		38
E.1	Überblick.....	38
E.2	Grundlegendes Schalt diagramm.....	38
E.3	Messeinrichtung.....	38
E.3.1	Impedanz-Analysegerät oder LCR-Messgerät.....	38
E.3.2	Erregerwicklung N_1	38
E.4	Prüfschritte.....	38
E.5	Messprinzip.....	39
E.6	Zu behandelnde Punkte.....	39
Anhang F (informativ) Impulsverfahren.....		40
F.1	Überblick.....	40

F.2	Grundlegendes Schaltdiagramm.....	40
F.3	Messeinrichtung.....	40
F.3.1	Messwiderstand R.....	40
F.3.2	Schalter S.....	40
F.3.3	Erregerwicklung N_1	41
F.3.4	Kondensator C.....	41
F.4	Prüfschritte.....	41
F.5	Messprinzip.....	41
F.6	Zu behandelnde Punkte.....	42
Anhang G (informativ) Prüfverfahren für die Messgenauigkeit magnetischer Eigenschaften.....		43
G.1	Überblick.....	43
Anhang H (informativ) Anwendung der Gleichstrom-Vormagnetisierung auf den Kern.....		46
H.1	Überblick.....	46
H.2	Zu behandelnde Punkte.....	47
Anhang I (informativ) Verweisungen.....		48
I.1	Überblick.....	48
I.2	Der Einfluss der Anstiegszeit der Rechteckwellenerregung auf den Kernverlust.....	48
I.3	Phasenfehlergrenze.....	49
I.4	Abzug für Formel (8).....	49
I.5	SRF-Erwägung der Probe.....	50
Bilder		
Bild 1 – Bild der Rechteck-Wellenform.....		11
Bild A.1 – Diagramm des Wechselstromverfahrens.....		21
Bild A.2 – Schaltdiagramm der Blindleistungskompensation des Kondensators.....		25
Bild A.3 – Zeigerdiagramm der Blindleistungskompensation des Kondensators.....		26
Bild B.1 – Diagramm des Wechselstrommessverfahrens.....		27
Bild C.1 – Diagramm des kalorimetrischen Verfahrens.....		30
Bild C.2 – Diagramm des kalorimetrischen Kalibrierungsverfahrens.....		33
Bild C.3 – Diagramm des vergleichenden kalorimetrischen Verfahrens.....		34
Bild D.1 – Diagramm des Großsignal-Wechselstromverfahrens.....		35
Bild E.1 – Diagramm des Impedanzverfahrens.....		38
Bild F.1 – Diagramm des Impulsverfahrens.....		40
Bild F.2 – Erregungsspannung und Stromwellenform in der Erregerwicklung.....		42
Bild G.1 – Diagramm des Kerninduktors mit Luftspalt.....		44
Bild H.1 – Diagramm der Anwendung der Gleichstrom-Vormagnetisierung.....		46
Bild I.1 – Rechteckwellen-Erregungsquelle.....		49
Bild I.2 – Diagramm des Verhältnisfehlers und Phasenfehlers.....		49
Bild I.3 – Äquivalentes Schaltungsmodell der Probe.....		50

Tabellen

Tabelle 1 – Vergleich der Messverfahren für die Verlustleistung.....	18
Tabelle I.1 – k , α , β und andere Parameter.....	48
Tabelle I.2 – Kernverlustfehler bei verschiedenen Werten für t_r	48
Tabelle I.3 – Kernverlust-Messfehler und Verhältnisfehler für den Phasenfehler.....	49
Tabelle I.4 – Wert von ΔL für verschiedene Frequenzen.....	50

EINLEITUNG

Magnetische Pulverkerne sind durch eine geringe relative Permeabilität, eine hohe gesättigte Flussdichte und geringen Verlust gekennzeichnet. Aus diesem Grund ist die äquivalente Impedanz einer Probe des magnetischen Pulverkerns im Vergleich zu Ferrit ohne Luftspalt sehr viel geringer und der Magnetisierungsstrom sehr hoch, sodass die erforderliche Erregungsquelle eine hohe Frequenz und eine Leistungskapazität benötigt, was in der Praxis schwer zu erreichen ist. Darüber hinaus liegt der Impedanzwinkel eines geprüften magnetischen Pulverkerns sehr nahe an 90° und dies erschwert die genaue Messung der Verlustleistung erheblich.

Die Normenreihe IEC 62044 bietet Messverfahren für magnetische Eigenschaften bei geringen und hohen Erregungsgraden für magnetische Kerne aus magnetischen Oxiden oder metallischen Pulvern. Die in IEC 62044 vorgestellten Verfahren können die Messanforderungen für die magnetischen Eigenschaften magnetischer Pulverkerne jedoch nicht vollständig erfüllen. Aus diesem Grund wird eine Norm für geeignete Messverfahren für die magnetischen Eigenschaften magnetischer Pulverkerne benötigt.

Neue Prüfverfahren mit Impulswellenerregung und Gleichstromverfahren, die die Eigenschaften von magnetischen Pulverkernen berücksichtigen, werden in dieser Norm zusätzlich zu einigen Änderungen der bisherigen Prüfverfahren vorgestellt. Darüber hinaus wird in der Norm ein Luftkern-Induktor mit Einschichtwicklung oder Zweischichtwicklung aufgrund seiner linearen Eigenschaften eingeführt, um die Genauigkeit von Prüfverfahren für die magnetischen Eigenschaften magnetischer Pulverkerne zu überprüfen oder zu kalibrieren.

Prüfverfahren für elektrische und magnetische Eigenschaften magnetischer Pulverkerne

1 Anwendungsbereich

Diese Norm bietet die besten Prüfverfahren für die elektrischen und magnetischen Eigenschaften magnetischer Pulverkerne für induktive Bauteile in elektronischen Geräten, Schaltnetzteile und Stromwandler und präsentiert Messprinzipien, den Anwendungsbereich und die bei jedem Verfahren zu beachtenden Punkte.

Die folgenden Parameter werden zur Charakterisierung magnetischer Pulverkerne verwendet: effektive Permeabilität, komplexe relative Permeabilität, Temperaturkoeffizient der Permeabilität, Frequenzkoeffizient der Permeabilität, Vormagnetisierungseigenschaften, Verlustleistung und Qualitätsfaktor. Diese Norm dient als Grundlage für die Bestimmung der charakteristischen Parameter magnetischer Pulverkerne.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)-Chapter 221: Magnetic materials and components*

IEC 63182-2, *Magnetic powder cores - Guidelines on dimensions and the limits of surface irregularities – Part 2: Ring-cores*

IEC 62044-1, *Cores made of soft magnetic materials-Measuring methods - Part 1: Generic specification*

IEC 62044-2, *Cores made of soft magnetic materials-Measuring methods - Part 2: Magnetic properties at low excitation level*

IEC 62044-3, *Cores made of soft magnetic materials-Measuring methods - Part 3: Magnetic properties at high excitation level*

IEC 61007, *Transformers and inductors for use in electronic and telecommunication equipment - Measuring methods and test procedures*

3 Begriffe und Symbole

3.1 Terms and definitions

No terms and definitions are listed in this document.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.2 Symbole

Alle Formeln in dieser Norm verwenden die grundlegenden SI-Einheiten. Wenn Vielfache oder Subvielfache verwendet werden, muss die entsprechende Zehnerpotenz eingeführt werden.

f	Frequenz in Hertz (Hz);
T_s	Zyklus in Sekunden (s);

B_m	der Scheitelwert der effektiven magnetischen Flussdichte, in Tesla (T);
H_m	der Scheitelwert der effektiven magnetischen Feldstärke, in Ampere je Meter (A/m);
P_c	die von dem Kern absorbierte Verlustleistung in Watt (W);
P_w	der Wicklungsverlust in Watt (W);
P_{cv}	die von dem Kern absorbierte Leistungsdichte in Watt je Kubikmeter (W/m ³);
A_e	die effektive Querschnittsfläche des Kerns in Quadratmetern (m ²);
l_e	die effektive magnetische Pfadlänge des Kerns in Metern (m);
V_e	das effektive Volumen des Kerns in Kubikmetern (m ³);
φ	die Phase in Radian (rad);
$\Delta\varphi$	der absolute Phasenverschiebungsfehler in Radian (rad);
N_2	die Anzahl der Windungen der Spannungsmesswicklung;
ΔT	der Temperaturanstieg in Grad Celsius (°C);
N_1	die Anzahl der Windungen der Erregungswicklung;
μ_0	die magnetische Konstante (die Permeabilität des Vakuums), etwa $4 \times \pi \times 10^{-7}$ H/m;
μ_{ea}	die effektive Amplituden-Permeabilität;
$\mu_{e\Delta}$	die effektive inkrementelle Permeabilität.

4 Instrument und Geräte

4.1 Allgemeine Bestimmungen

Ein geeigneter Stromkreis (siehe Anhänge) und geeignete Instrumente müssen für die Messung ausgewählt werden.

4.2 Erregungsquelle

4.2.1 Allgemeine Bestimmungen

Die von den Herstellern angegebenen Eigenschaften magnetischer Pulverkerne basieren üblicherweise auf einer Sinuswellen-Erregungsquelle, da diese Messung die höchste Wiederholpräzision bietet und einfach zu replizieren ist. Die Anwendungen umfassen zahlreiche verschiedene nicht-sinusförmige Bedingungen, sodass Verfahren für die Prüfung mit anderen Wellenformen für bestimmte Fällen benötigt werden. Auf Sinuswellen basierende Daten sind als allgemeiner Bezugspunkt für die Charakterisierung von Materialien, den Vergleich von Materialien, Korrelationsprüfungen zwischen Laboren und die Festlegung klarer Spezifikationsgrenzen besonders nützlich. Die Erregungsquellen in dieser Norm umfassen Sinuswellen- und Rechteckwellenquellen. Es ist zu beachten, dass die Wellenform einer Spannungsquelle (die die magnetische Flussdichte bestimmt) nicht notwendigerweise der Wellenform des damit verbundenen Stroms entspricht (da die magnetische Flussdichte durch die induktiven Eigenschaften des zu prüfenden Bauelements bestimmt wird). Gleichmaßen entspricht die Wellenform einer Stromquelle (die die magnetische Feldstärke bestimmt) nicht notwendigerweise der Wellenform der damit verbundenen Spannung (aus der induzierten Flussdichte). Die Erregungsquelle muss eine geringe innere Impedanz mit einem stabilen Frequenz- und Amplitudenwert innerhalb von $\pm 0,1$ % während der Messung aufweisen.

4.2.2 Sinuswellen-Erregungsquelle

Wenn die Sinuswellenerregung festgelegt ist, muss der gesamte Oberschwingungsanteil der Erregungsquelle weniger als 1 % betragen. Im Fall der sinusförmigen Erregungsspannung wird die magnetische Flussdichte anhand der Formel (1) berechnet.

$$B_m = \frac{\sqrt{2} \times U_{rms}}{2 \times \pi \times f \times A_e \times N_1} \quad (1)$$

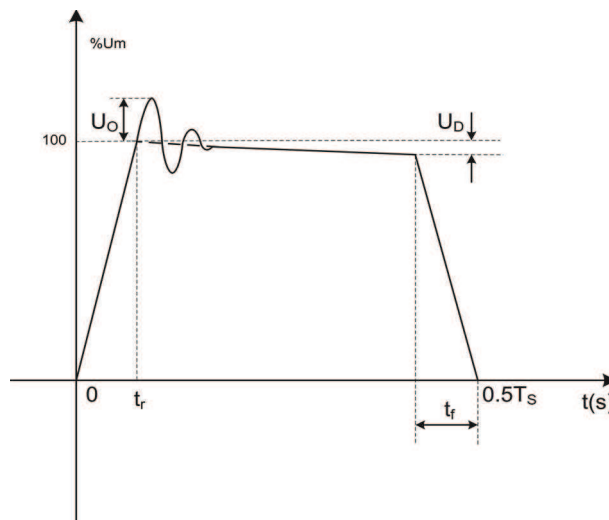
Dabei ist:

U_{rms} der Effektivwert der Erregungsspannung in Volt (V).

4.2.3 Rechteckwellen-Erregungsquelle

Wenn die Rechteckwellen-Erregung (die PWM-Wellenform mit einem Arbeitszyklus von 0,5) wie in Bild 1 gezeigt festgelegt ist (die negative Halbwelle entspricht der Form der positiven Halbwelle), muss die Überschwingweite U_o weniger als 5 % der Spitzenimpulsamplitude U_m betragen, die Regeldifferenz U_D weniger als 2 % der Spitzenimpulsamplitude U_m betragen und die Impulsanstiegsdauer t_r und die Impulsabfalldauer t_f müssen weniger als 1 % des Zyklus der Rechteckwelle betragen. Im Fall einer Rechteckwellen-Erregungsspannung wird die magnetische Flussdichte anhand der Formel (2) berechnet.

$$B_m = \frac{U_m}{4 \times f \times A_e \times N_1} \quad (2)$$



Dabei ist

U_m die Spitzenimpulsamplitude, der Höchstwert auf einer glatten Kurve, extrapoliert durch das Impulsdach des Impulses, alle anfänglichen „Spitzen“ und „Überschwinger“ außer Betracht lassend, deren Dauer kleiner als 10 % der Impulsdauer ist. In Volt (V). [QUELLE: IEC 61007-2020, 3.3]

t_r Anstiegsdauer des Impulses;

t_f Abfalldauer des Impulses;

U_D Regeldifferenz;

U_o Überschwingweite.

Bild 1 – Bild der Rechteck-Wellenform

4.2.4 Berechnung der magnetischen Flussdichte

Die magnetische Flussdichte mit beliebiger Wellenform-Erregungswechselspannung kann anhand der Formel (3) berechnet werden.

$$B_m = \frac{U}{4 \times f \times A_e \times N_1} \quad (3)$$

Dabei ist

U der mittlere Korrekturwert (ARV) der beliebigen Wellenform-Erregungswechselspannung in Volt (V).

4.3 Messausrüstung

4.3.1 Allgemeine Bestimmungen

Spannungsmessgerät oder Spannungsmesseinrichtung müssen eine hohe innere Impedanz haben. Um Messfehler zu reduzieren, müssen die Messfühler eine hohe Eingangsimpedanz haben. Auf der anderen Seite muss die Bandbreite des Spannungsmessgeräts oder der Spannungsmesseinrichtung die Oberschwingungsfrequenz abdecken, deren Amplitude 1 % der Grundschriftungsamplitude entspricht.

4.3.2 Spannungsmessgerät

Um den Effektivwert, den Mittelwert und den Spitzenwert der Erregungsspannung zu messen, wird ein Spannungsmessgerät mit einer Genauigkeit von 0,2 % empfohlen.

4.3.3 Datenerfassungssystem

Um den Effektivwert, den Mittelwert und den Spitzenwert der Erregungsspannung genau zu messen, darf die Abtastrate des Datenerfassungssystems nicht weniger als 256 Punkte je Zyklus betragen und die Auflösung nicht weniger als 12 Bit.

4.4 Sensor

4.4.1 Messwiderstand

Der Widerstandsfehler des Messwiderstands muss weniger als 0,1 % betragen (einschließlich Temperaturdrift des Widerstands). Die Parasitärinduktivität des Messwiderstands muss der Formel (4) und der Formel (5) entsprechen.

$$L \leq \frac{R}{2 \times \pi \times f} \sqrt{2 \times \delta_a} \quad (4)$$

$$L \leq \frac{R \times \tan(\delta_\varphi)}{2 \times \pi \times f} \quad (5)$$

Dabei ist

L	die Parasitärinduktivität des Messwiderstands in Henry (H);
R	der Widerstand des Messwiderstands in Ohm (Ω);
δ_a	der zulässige relative Fehler des Spannungsabfalls über dem Messwiderstand bei der Prüffrequenz (ohne Maßeinheit);
δ_φ	die Phasendifferenz der Spannung und des Stroms am Messwiderstand bei der Prüffrequenz in Radian (rad).

Beispiel:

Für $\delta_a = 0,1 \%$, $\delta_\varphi = 4,363 \times 10^{-4} \text{ rad} = 0,025^\circ$, $R = 1 \Omega$, $f = 500 \text{ kHz}$, dann gilt:

$$L \leq \frac{1}{2 \times \pi \times 500 \times 10^3} \sqrt{2 \times 0,001} = 14,2 \text{ nH} \quad (6)$$

$$L \leq \frac{1 \times \tan(0,025^\circ)}{2 \times \pi \times 500 \times 10^3} = 0,1389 \text{ nH} \quad (7)$$

Die Parasitärinduktivität des Messwiderstands bei 500 kHz muss daher: $L \leq 0,1389 \text{ nH}$ entsprechen.

4.4.2 Stromwandler

Der Amplitudenfehler (Fehlerrate) des Stromwandlers muss weniger als 0,5 % betragen. Die Phasenverschiebung (Phasenfehler) muss weniger als 0,000 436 3 Radian oder $0,025^\circ$ betragen.

4.5 Weitere Beschreibung

4.5.1 Zwischenverbinder

Der Störwiderstand, die Induktivität und die Kapazität, die durch die Verbinder in dem Messstromkreis erzeugt werden, müssen eine geringe Amplitude und wenige Phasenfehler innerhalb des Messfrequenzbereichs aufweisen.

Alle Anschlüsse in dem Stromkreis müssen so kurz wie möglich sein und Phasenfehler zwischen den Prüfkanälen müssen die Bedingungen der Formel (8) innerhalb des Messfrequenzbereichs erfüllen.

$$\Delta \varphi = \pm \frac{\delta_p}{Q_C} \quad (8)$$

Dabei ist

δ_p der relative Verlustleistungsfehler in Verbindung mit der Phasenverschiebung $\Delta \varphi$;

$Q_C = \frac{f \times B_m \times H_m}{2 \times P_{cv}}$ der Qualitätsfaktor der Probe.

Beispiel

Für $\delta_p = \pm 1 \%$, $Q_C = 5$, dann gilt:

$$\Delta \varphi = \pm \frac{0,01}{5} = \pm 0,002 \text{ radian} \quad (9)$$

Wenn die Erregung nicht sinusförmig ist, muss der Phasenfehler jeder Oberschwingung berücksichtigt werden.

4.5.2 Thermostat

Um die magnetischen Eigenschaften bei einer bestimmten Temperatur zu messen, muss eine Wärmekammer vorgesehen werden, die mit einer Temperaturregelung mit einem Temperaturfehler von weniger als $\pm 2^\circ \text{C}$ ausgestattet ist.

5 Probe

5.1 Magnetischer Kern

Der für die Messung verwendete Kern muss aus der normalen Produktion stammen und einen geschlossenen magnetischen Stromkreis bilden. Für die Bewertung der Materialeigenschaften muss der magnetische Ringpulverkern mit einem Verhältnis zwischen Außen- und Innendurchmesser von weniger als 2 verwendet werden. Es wird empfohlen, die Größe des magnetischen Ringpulverkerns ohne Fase oder Beschichtung (Außendurchmesser x Innendurchmesser x Höhe) anzuwenden: 26,9 mm x 14,7 mm x 11,2 mm.

5.2 Wicklung

5.2.1 Wicklungszustand

Die Wicklung muss aus Draht mit minimalem Verlust bestehen und die Schicht muss dem Kern so nah wie möglich sein. Im Fall des Ringkerns müssen die Windungen gleichmäßig um den Kernumfang verteilt sein. Ist der Kern nicht ringförmig, muss der Magnetfluss gleichmäßig in dem Kern verteilt sein. Der mit der Erregungswicklung verbundene Verbinder muss isoliert sein und es muss sichergestellt werden, dass die Isolierung nicht beschädigt ist.

Die Eigenschwingungsfrequenz der Probe muss mindestens 10-mal höher sein als die Messfrequenz, damit die Störkapazität der Wicklung nur wenig Einfluss auf die Prüfergebnisse hat.

5.2.2 Zweischichtwicklung

Zweischicht- und parallele Bifilarwicklungen werden für Kernverlustmessungen bevorzugt. Die beiden Wicklungen sind die Erregungswicklung und die Spannungsmesswicklung. Der Kopplungskoeffizient zwischen der Erregungswicklung und der Spannungsmesswicklung muss möglichst hoch sein, was aufgrund der geringen Materialpermeabilität der Pulverkerne schwierig ist.

5.2.3 Einschichtwicklung

Wenn das Messinstrument die magnetische Eigenschaft der Probe mit Zweischichtwicklung nicht messen kann, kann eine Probe mit Einschichtwicklung verwendet werden. Wenn der Wicklungsverlust der Probe im Vergleich zum Kernverlust sehr gering ist, kann der Wicklungsverlust vernachlässigt werden. Andernfalls müssen einige Maßnahmen getroffen werden, um den Wicklungsverlust abzuziehen. Die folgenden Maßnahmen werden empfohlen:

- a) Wenn die Erregung eine Sinuswellenform hat und der Drahtdurchmesser weniger als das Doppelte der Eindringtiefe beträgt (Skinneffekt-Tiefe), entsprechend der Prüffrequenz, entspricht der AC-Widerstand ungefähr dem DC-Widerstand und die Eindringtiefe wird anhand der Formel (10) berechnet und der Wicklungsverlust anhand der Formel (11) geschätzt.

$$d = \sqrt{\frac{1}{\mu_r \times \mu_0 \times \gamma \times \pi \times f}} \quad (10)$$

$$P_w = I_{\text{rms}}^2 \times R_{\text{dc}} \quad (11)$$

Dabei ist

d	die Eindringtiefe in Metern (m);
μ_r	die relative Permeabilität des Drahts;
γ	die Leitfähigkeit des Drahts in Siemens/Meter (S/m);
I_{rms}	der Effektivwert des Magnetisierungsstroms in Ampere (A);
R_{dc}	der DC-Widerstand der Wicklung in Ohm (Ω).

- b) Wenn die Erregung eine Sinuswellenform hat und der Drahtdurchmesser weniger als das Doppelte der Eindringtiefe beträgt, werden der AC-Widerstand und der Wicklungsverlust anhand der Formel (12) und der Formel (13) geschätzt.

$$R_{\text{ac}} = \frac{(D/(2 \times \Delta))^2}{(D/(2 \times \Delta))^2 - (D/(2 \times \Delta) - 1)^2} \times R_{\text{dc}} \quad (12)$$

$$P_w = I_{\text{rms}}^2 \times R_{\text{ac}} \quad (13)$$

Dabei ist

D	der Durchmesser des Wicklungsleiters in Metern (m);
Δ	die Eindringtiefe für den Skinneffekt in Metern (m);
I_{rms}	der Effektivwert des Magnetisierungsstroms in Ampere (A);
R_{ac}	der AC-Widerstand der Wicklung in Ohm (Ω).

- c) Wenn die Erregung eine Rechteckwellenform hat, kann der Wicklungsverlust auf der Grundlage der FFT-Oberschwingungsanalyse für die lineare Eigenschaft des Wicklungsverlusts geschätzt werden. Die Formeln entsprechen (14) und (15).

$$i(t) = \sum_{k=1}^n I_{\text{rmsk}} \times \sqrt{2} \cos(k \times 2 \times \pi \times f \times t + \varphi_k) \quad (14)$$

$$P_w = \sum_{k=1}^n I_{\text{rmsk}}^2 \times R_{\text{ack}} \quad (15)$$

Dabei ist

$i(t)$	der Momentanwert des Erregungsstroms in Ampere (A);
I_{rmsk}	der Effektivwert des Stroms mit der k -ten Oberschwingungsfrequenz in Ampere (A);
φ_k	die erste Phase des Stroms mit der k -ten Oberschwingungsfrequenz in Radian (rad);
R_{ack}	der AC-Widerstand mit der k -ten Oberschwingungsfrequenz in Ohm (Ω);
n	der Wert von n wird empfohlen, dass die Amplitude der n -ten Oberschwingungsfrequenz 1 % der Amplitude der Grundschiebungsfrequenz entspricht.

- d) Wenn eine Ringkernprobe bewertet wird und die Wicklungswindungen gleichmäßig gewunden sind, kann der AC-Widerstand der Wicklung jeder Oberschwingung mit dem Impedanzanalysegerät oder LCR-Messgerät mit einer Kernprobe mit Luftspalt mit derselben Wicklung wie der Ringkern geprüft werden.

5.3 Montage der Probe

Aufgrund des Einflusses der hochfrequenten magnetischen Streustrahlung der Probe auf nahegelegene metallische Objekte muss der Abstand zwischen der Probe und den metallischen Objekten so groß sein, dass nahegelegene metallische Objekte nur wenig Einfluss auf die Messung haben.

Die effektive Querschnittsfläche A_e , die effektive magnetische Pfadlänge l_e und das effektive Volumen V_e einer Prüfprobe können dem relevanten Abschnitt von IEC 63182-2 entnommen werden.

Die Wicklung für die Verlustleistungsmessung sollte den Wicklungsverlust mehr berücksichtigen und die Wicklung für die Permeabilitätsmessung sollte die Eigenschwingungsfrequenz mehr berücksichtigen.

6 Messbedingung

6.1 Beziehung zur Praxis

Da es Herstellern nicht möglich ist, Kerne für jede der unzähligen möglichen Anwendungsbedingungen zu prüfen, besteht der Zweck der werkseitigen Produktionsqualifizierungsprüfung darin, die konsistente Leistung und Übereinstimmung mit den Spezifikationen zu überprüfen und nicht notwendigerweise darin, die Anwendungsbedingungen des zu prüfenden Teils zu duplizieren. Dies erklärt auch, warum Wareneingangsqualitätsprüfungen beim Anwender nicht praktikabel sind. In besonderen Fällen, in denen eine festgelegte Prüfbedingung kritisch ist, sollte dies in einer ausführlichen Spezifikation zwischen dem Lieferanten und dem Anwender vereinbart werden.

Die Messbedingungen, Methoden und Verfahren müssen so gewählt werden, dass die gemessenen Ergebnisse für die Vorhersage der Leistung der Kerne unter den tatsächlichen Anwendungsbedingungen geeignet sind. Die Messbedingungen (und insbesondere die Erregungsbedingungen) müssen jedoch nicht genau mit den tatsächlichen Anwendungsbedingungen konsistent sein.

6.2 Effektive Parameter

Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung des Magnetfelds in dem Kern sind die in dieser Norm enthaltenen Prüfverfahren dafür vorgesehen, den Effektivwert der magnetischen Eigenschaften magnetischer Pulverkerne zu messen.

6.3 Magnetischer Messzustand

Die Proben müssen unter stabilen und wiederholbaren magnetischen Bedingungen gemessen und die Remanenz- und Zeiteinflüsse der Materialien beseitigt werden. Jede Messung muss zum Zeitpunkt $t_m = t_c + \Delta t$ nach dem Einsetzen der magnetischen Bedingungen erfolgen. t_c ist die Dauer des Erregungszyklus und Δt der Zeitpunkt, ab dem der Betriebszustand nach Hinzufügen eines Erregungszeitraums stabil gehalten wird. Die Ausführungsdauer darf nicht mehr als 10 Sekunden betragen und die Erregungsquelle muss rechtzeitig getrennt werden, um ein Überhitzen des Kerns zu vermeiden.

7 Prüfverfahren für die Verlustleistung

7.1 Zusammenfassung

Die Prüfverfahren für die Verlustleistung beinhalten drei Klassifizierungen: das Wechselstromverfahren, das Gleichstromverfahren und das kalorimetrische Verfahren.

Das Wechselstromverfahren kann angewendet werden, um die Verlustleistung magnetischer Pulverkerne unter einer beliebigen Wechselstromerregung zu messen und den Verlust mit dem Wechselstrommessgerät zu bestimmen. Üblicherweise wird eine Wechselstromquelle mit hoher Frequenz und hoher Stromkapazität benötigt. Da der Impedanzwinkel der Probe mit dem magnetischen Pulverkern sehr nahe an 90 Grad liegt, kann ein winziger Phasenfehler zwischen dem Spannungsmesskanal und dem Strommesskanal zu einem hohen Verlustleistungsfehler führen.

Das Gleichstromverfahren kann angewendet werden, um die Verlustleistung magnetischer Pulverkerne, die besser für die Rechteckwellen- oder PWM-Wellen-Erregung mit einstellbarem Arbeitszyklus geeignet sind, zu messen. Die Konstantspannungs-Gleichstromquelle und der Gleichstrom-/Wechselstromumrichter werden für die PWM-Wellenerregung der Probe benötigt und um den Verlust nur mit dem Gleichstrommessgerät zu bestimmen. Die Messgenauigkeit wird durch die zusätzliche Verlustleistung des Wechselstrom-/Gleichstromumrichters beeinflusst und die zusätzliche Verlustleistung kann durch bestimmte Maßnahmen ausgeschlossen oder kalibriert werden.

Das kalorimetrische Verfahren kann angewendet werden, um die Verlustleistung magnetischer Pulverkerne unter einer beliebigen Erregung zu messen und den Verlust durch Prüfen der Wärmeabgabe oder des Temperaturanstiegs in dem Gefäß des Kalorimeters zu bestimmen. Der Messprozess ist jedoch langwierig und aufwändig.

Die Anwendungen dieser drei Verfahren sind in Tabelle 1 angegeben. Der Hersteller konsultiert den Kunden bezüglich des anzuwendenden Verfahrens.

Tabelle 1 – Vergleich der Messverfahren für die Verlustleistung

Messverfahren	Erregungs- wellenform	Quelle erforderlich	Trennung der Quel- lenverluste	Trennung der Wick- lungs- verluste	Einfluss des Impe- danzwinkels	Einfluss der Fre- quenz	Anhang
Wechsel- stromver- fahren	beliebig	hohe Fre- quenz und hohe Wechselstrom- kapazität	nein	ja (mit Zwei- schichtwick- lungen)	ja	ja	Anhang A
Gleich- stromver- fahren	Rechteck oder PWM	Konstant- gleich- spannung	ja	nein	nein	ja	Anhang B
Kalorime- trisches Verfahren	beliebig	jeder	nein	nein	nein	nein	Anhang C

7.2 Wechselstromverfahren

Die hochfrequente Wechselstrom-Erregungsquelle wird angewendet und erzeugt ein auf die Probe einwirkendes erforderliches Magnetfeld durch die Erregungswicklung, der Momentanwert der Erregungsspannung und des Erregungsstroms und der Mittelwert des Produkts der Erregungsspannung und des Erregungsstroms in einem Zyklus sind die Verlustleistung. Der ausführliche Messprozess ist in Anhang A enthalten.

7.3 Gleichstromverfahren

Die Gleichspannungsquelle wird verwendet und durch den Gleichstrom-/Wechselstrom-Umrichter in die erforderliche PWM-Wellenspannung umgewandelt und auf die Probe angewendet. Die Ausgangsleistung der Gleichspannung wird gemessen, um die Verlustleistung der Probe durch Ausschließen oder Kalibrieren des zusätzlichen Leistungsverlusts des Umrichters zu bestimmen. Der ausführliche Messprozess ist in Anhang B dargestellt.

7.4 Kalorimetrisches Verfahren

Das kalorimetrische Verfahren besteht darin, die Wärmeabgabe der Verlustleistung der Probe durch Messen des Temperaturanstiegs in dem kalorimetrischen Gefäß zu bestimmen, und kann verwendet werden, um die Verlustleistung bei jeder beliebigen Erregung zu messen. Der ausführliche Messprozess ist in Anhang C dargestellt.

8 Prüfverfahren für die effektive Permeabilität

8.1 Zusammenfassung

Der festgelegte Spitzenwert der effektiven magnetischen Flussdichte oder der magnetischen Feldstärke und bestimmten Frequenz- und Temperaturbedingungen muss gemessen werden. Die Prüfverfahren sind: Großsignal-Wechselstromverfahren, Impedanzverfahren und Impulsverfahren.

Der Temperaturkoeffizient ist das Verhältnis zwischen den Permeabilitätsschritten des magnetischen Pulverkerns bei verschiedenen Temperaturen zu den Temperaturschritten bei der Bezugstemperatur wie in Formel (16). Der Frequenzkoeffizient ist das Verhältnis zwischen der Permeabilität des durch eine Sinuswelle mit verschiedenen Frequenzen erregten magnetischen Pulverkerns und der Permeabilität des durch die Sinuswelle mit der Bezugsfrequenz erregten magnetischen Pulverkerns wie in Formel (17). Die Gleichstrom-Vormagnetisierungseigenschaft ist das Verhältnis zwischen der Permeabilität des magnetischen

Pulverkerns mit Gleichstrom-Vormagnetisierung und der Permeabilität ohne Gleichstrom-Vormagnetisierung wie in Formel (18). Hierdurch können der Temperaturkoeffizient, der Frequenzkoeffizient und die Gleichstrom-Vormagnetisierung durch Prüfverfahren für die effektive Permeabilität gemessen werden.

$$\alpha_{\mu} = \frac{\mu_{\theta} - \mu_{\text{ref}}}{\mu_{\text{ref}} \times (\theta - \theta_{\text{ref}})} \quad (16)$$

$$k_f = \frac{\mu_f}{\mu_{\text{ref}}} \times 100 \quad (17)$$

$$k_{\text{DCB}} = \frac{\mu_{\text{DC}}}{\mu_{\text{no_DC}}} \times 100 \quad (18)$$

Dabei ist

α_{μ}	der Temperaturkoeffizient der Permeabilität in 1/°C;
k_f	der Frequenzkoeffizient der Permeabilität;
k_{DCB}	die Gleichstrom-Vormagnetisierungseigenschaft der Permeabilität;
μ_{θ}	die Permeabilität des Magnetpulverkerns bei verschiedenen Temperaturen;
μ_{ref}	die Permeabilität des Magnetpulverkerns bei der Bezugstemperatur wie etwa 20 °C;
μ_f	die Permeabilität des durch die Sinuswellen mit verschiedenen Frequenzen erregten Magnetpulverkerns;
μ_{ref}	die Permeabilität des durch die Sinuswelle mit der Bezugsfrequenz erregten Magnetpulverkerns;
μ_{DC}	die Permeabilität des Magnetpulverkerns bei verschiedenen Gleichstrom-Vormagnetisierungen;
$\mu_{\text{no_DC}}$	die Permeabilität des Magnetpulverkerns ohne Gleichstrom-Vormagnetisierung.

Eine Erregungsquelle mit hoher Frequenz und hoher Stromkapazität ist erforderlich, wenn die effektive Permeabilität des größeren B_m durch das Großsignal-Wechselstromverfahren gemessen wird, die Messdauer kann länger sein und dies kann zu einer erheblichen Erwärmung der Erregungswicklung führen. Wenn die effektive Permeabilität bei größerer Gleichstrom-Vormagnetisierung durch das Impedanzmessverfahren gemessen wird, wird der hohe Vormagnetisierungsstrom aufgrund der längeren Messdauer ebenfalls zu einer erheblichen Erwärmung der Wicklung führen. Die Dauer der Messung der effektiven Permeabilität durch das Impulsmessverfahren ist kürzer, sodass die effektive Permeabilität bei höherem B_m und hoher Gleichstrom-Vormagnetisierung durch das Impulsmessverfahren gemessen werden kann.

8.2 Großsignal-Wechselstromverfahren

Die hochfrequente Erregungsquelle übt durch die Erregungswicklung ein bestimmtes Magnetfeld auf die Probe aus. Die Momentanwerte der magnetischen Flussdichte und der magnetischen Feldstärke werden durch die Messung der Momentanwerte der induzierten Spannung und des Magnetisierungsstroms und anschließende Ableitung der B-H-Schleife berechnet. Die Linie, die jeden Spitzenwertpunkt der B-H-Schleife für jede einzelne Spitzenmagnetfeldstärke verbindet, bildet die Magnetisierungskurve. Anschließend kann die effektive Permeabilität aus der Magnetisierungskurve bestimmt werden. Wenn die Erregungsfrequenz gering genug ist, kann die Magnetisierungskurve als statische oder Gleichstrom-B-H-Schleife und Magnetisierungskurve angesehen werden. Der ausführliche Messprozess ist in Anhang D enthalten.

8.3 Wechselstrom-Impedanzverfahren

Die Probe ist als Reihenmodell des Widerstands und der Induktivität modelliert. Die Induktivität der Probe unter Gleichstrom-Vormagnetisierung und eine sinusförmige Kleinsignaleregung werden mit einem Impedanz-

Analysegerät oder LCR-Messgerät gemessen. Die effektive Permeabilität wird aus der Induktivität berechnet. Der ausführliche Messprozess ist in Anhang E enthalten.

8.4 Impulsverfahren

Ein großer Kondensator wird mit der gewünschten Erregungsspannung vorgeladen. Die Impulserregung wird auf die Probe angewendet, wenn der Kondensator durch sie entladen wird. Die effektive Permeabilität wird durch Messung des Momentanwerts der Erregungsspannung und des Erregungsstroms berechnet. Der ausführliche Messprozess ist in Anhang F enthalten.

9 Prüfverfahren für die effektive komplexe Permeabilität

Das Stromkreismodell der Probe entspricht der komplexen Impedanz und diese wird mit dem Impedanz-Analysegerät oder dem LCR-Messgerät gemessen. Anschließend kann die effektive komplexe Permeabilität anhand der komplexen Impedanz berechnet werden. Der ausführliche Messprozess ist in Anhang E enthalten.

10 Prüfverfahren für den Qualitätsfaktor

Der Qualitätsfaktor bezieht sich auf das Verhältnis zwischen der gespeicherten magnetischen Spitzenenergie und der in der durch das Magnetfeld mit einer gegebenen Frequenz erregten Probe verbrauchten Verlustleistung. Der Qualitätsfaktor einer spezifischen Kombination aus Kern und Spule kann durch das Wechselstromverfahren gemessen werden. Der ausführliche Messprozess ist in Anhang A enthalten.

ANMERKUNG Der Qualitätsfaktor wird direkt durch das Messinstrument, die Windungen und das genaue Layout der gewickelten Spule beeinflusst. Pulverkerne alleine haben keine inhärenten Qualitätsfaktoren. Der Prüfzweck besteht oftmals darin, den Einfluss der Kernvariabilität auf die Variabilität des gemessenen Q-Faktors einer gegebenen Spule zu ermitteln.

11 Überprüfung der Messgenauigkeit

Da die Verlustleistung eines Kern-Induktors mit Luftspalt nur der Wicklungsverlust ist. Der entsprechende AC-Widerstand ist linear und kann mit einem Impedanz-Analysegerät präzise geprüft werden. Die effektive Permeabilität des Kerninduktors mit Luftspalt entspricht genau der Permeabilität des Vakuums μ_0 . Aus diesem Grund wird der Kerninduktor mit Luftspalt in dieser Norm als Verfahren zur Kalibrierung des Prüfinstruments und Überprüfung der Genauigkeit der Prüfung der magnetischen Eigenschaft präsentiert. Einzelheiten hierzu können Anhang G entnommen werden.

Anhang A (informativ)

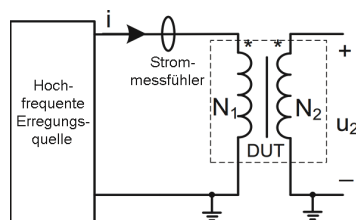
Wechselstromverfahren

A.1 Überblick

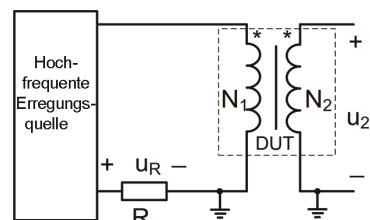
Dieser Anhang behandelt das Wechselstromverfahren für die Messung der Verlustleistung. Die Spannung der Spannungsmesswicklung und die Spannung des Messwiderstands oder der Erregungsstrom an der Erregungswicklung werden durch den Datenerfasser gemessen, um die Verlustleistung magnetischer Pulverkerne zu bestimmen. Die Erregungsspannung der zu prüfenden Probe kann eine beliebige Wechselstrom-Wellenform sein. Die Gleichstrom-Vormagnetisierung kann eine beliebige Wechselstrom-Wellenform sein. Die Anwendung der Gleichstrom-Vormagnetisierung ist in Anhang H dargestellt.

A.2 Grundlegendes Schaltbild

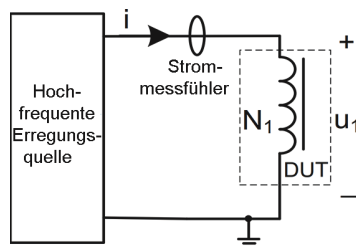
Der grundsätzliche Stromkreis des Wechselstromverfahrens ist in Bild A.1 dargestellt.



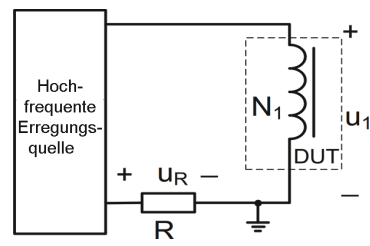
a) Probe der Zweischichtwicklung und des Strommessfühlers für die Messung des Erregungsstroms



b) Probe der Zweischichtwicklung und des Widerstands für die Messung des Erregungsstroms



c) Probe der Einschichtwicklung und des Strommessfühlers für die Messung des Erregungsstroms



d) Probe der Einschichtwicklung und des Strommessfühlers für die Messung des Erregungsstroms

- R Widerstand für die Messung des Erregungsstroms
- N_1 Erregerwicklung
- N_2 Spannungsmesswicklung

Bild A.1 – Diagramm des Wechselstromverfahrens

A.3 Messeinrichtung

A.3.1 Hochfrequente Erregungsquelle

Die hochfrequente Erregungsspannungsquelle kann eine Wechselspannungsquelle oder ein Gleichstrom-/Wechselstrom-Umrichter sein.

A.3.2 Erregerwicklung N_1 und Spannungsmesswicklung N_2

Die Windungszahl der Erregerwicklung N_1 wird entsprechend der erforderlichen Frequenz und magnetischen Flussdichte zusammen mit den Spannungs- und Stromkapazitäten der Erregungsquelle festgelegt. Die Windungen der Spannungsmesswicklung N_2 sollten vorzugsweise den Windungen der Erregerwicklung N_1 entsprechen und bifilar gewickelt sein, und der Drahtdurchmesser der Spannungsmesswicklung N_2 kann sehr klein sein.

A.3.3 Messwiderstand R

Der Widerstand ist ein nichtinduktiver Widerstand, dessen Widerstand durch die Größe des gemessenen Stroms bestimmt wird und der die Leistungsanforderungen sowie die Anforderungen in 4.4.1 erfüllen muss. Ein koaxialer Nebenwiderstand kann ebenfalls verwendet werden.

A.3.4 Datenerfasser

Der Datenerfasser muss die Anforderung von 4.3.3 erfüllen.

A.4 Prüfschritte

Die Prüfschritte stellen sich wie folgt dar:

- Die Messschaltung wird nach a), b), c) oder d) von Bild A.1 angeschlossen.
- Die induzierte Spannung der Spannungsmesswicklung und die Spannung des Messwiderstands oder die Erregungsspannung und der Erregungsstrom an der Erregungswicklung werden durch den Datenerfasser gemessen.
- Jede Messung muss von der geringen magnetischen Flussdichte zur hohen magnetischen Flussdichte erfolgen.

A.5 Messprinzip

Die Festlegung der Verlustleistung des magnetischen Kerns erfolgt anhand der Formel (A.1).

$$P_{\text{core}} = \frac{W_{\text{core}}}{T_S} = \frac{A_e \times l_e}{T_S} \times \int_{t=0}^{t=T_S} H(t) \cdot dB(t) \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist

W_{core}	die Joule-Wärme des magnetischen Materials, das über einen Zykluszeitraum T_S magnetisiert, in Joule (J);
$H(t)$	der Momentanwert der magnetischen Feldstärke in Ampere je Meter (A/m);
$B(t)$	der Momentanwert der magnetischen Flussdichte in Tesla (T).

Der Momentanwert der magnetischen Feldstärke wird entsprechend dem Ampere-Schleifentheorem anhand der Formel (A.2) berechnen.

$$H(t) = \frac{N_1 \cdot i(t)}{l_e} \quad (\text{A.2})$$

Dabei ist

$i(t)$ der Momentanwert der Erregungsspannung in Ampere (A).

Falls die Probe eine Einschichtwicklung ist wie in c) und d) von Bild A.1 gezeigt, wird die Spannung über der Probe anhand der Formel (A.3) berechnet.

$$u_1(t) = i(t) \times R_{\text{copper}} + N_1 \times A_e \times \frac{dB(t)}{dt} \quad (\text{A.3})$$

Dabei ist

$u_1(t)$ der Momentanwert der Erregungsspannung in Volt (V);

R_{copper} der äquivalente Widerstand des Wicklungsverlusts in Ohm (Ω).

Wenn $i(t) \times R_{\text{copper}}$ sehr klein ist und vernachlässigt werden kann, dann:

$$dB(t) = \frac{1}{N_1 \times A_e} u_1(t) \times dt \quad (\text{A.4})$$

Die Verlustleistungsdichte des Kerns mit Einschichtwicklung wird daher anhand der Formel (A.5) berechnet, die den Wicklungsverlust der Probe enthält.

$$P_{\text{cv}} = \frac{P_{\text{core}}}{V_e} = \frac{1}{T_S} \int_{t=0}^{t=T_S} H(t) \times dB(t) = \frac{1}{T_S \times V_e} \int_{t=0}^{t=T_S} u_1(t) \times i(t) dt \quad (\text{A.5})$$

Wenn die Probe über eine Zweischichtwicklung verfügt, beinhaltet die gemessene Verlustleistung nicht den Wicklungsverlust wie in a) und b) von Bild A.1 gezeigt. Die Verlustleistungsdichte wird anhand der Formel (A.6) berechnet.

$$P_{\text{cv}} = \frac{1}{T_S \times V_e} \times \frac{N_1}{N_2} \int_{t=0}^{t=T_S} u_2(t) \times i(t) dt \quad (\text{A.6})$$

A.6 Fehleranalyse

Entsprechend der Berechnungsformel der Verlustleistung kann die relative Fehlerformel (A.7) erhalten werden, wenn die Erregungsspannung eine Sinuswellenform hat.

$$\left| \frac{\Delta P}{P} \right| = \left| \frac{\Delta U}{U} \right| + \left| \frac{\Delta I}{I} \right| + |\tan \varphi \cdot \Delta \varphi| \quad (\text{A.7})$$

Der relative Fehler besteht aus drei Teilen:

- a) dem relativen Fehler des Effektivwerts der Spannung;
- b) dem relativen Fehler des Effektivwerts des Stroms;
- c) das Produkt des Phasenverschiebungsfehlers $\Delta \varphi$ und der Tangente des Impedanzwinkels φ oder der Phasendifferenz zwischen der Spannung und dem Strom werden gemessen.

A.7 Zu behandelnde Punkte

A.7.1 Messfehler

Wenn der Impedanzwinkel der Probe sehr nahe bei 90° liegt, wie im Fall der Pulverkerne mit geringer Permeabilität, tendiert die Tangente des Impedanzwinkels zu einem großen Wert, sodass selbst ein kleiner Phasenverschiebungsfehler auch sehr große Kernverlust-Messfehler verursacht.

A.7.2 Abzug des Wicklungsverlusts

Wenn die Probe über eine Einschichtwicklung verfügt, muss der Wicklungsverlust bewertet und ausgeschlossen werden (siehe 5.2.3).

A.8 Spezifische Prüfverfahren

A.8.1 Verfahren mit B-H-Analysegerät

Das Verfahren mit B-H-Analysegerät entspricht im Prinzip dem Wechselstromverfahren. Dieses Verfahren berechnet die magnetische Flussdichte und die magnetische Feldstärke durch Messung des Erregungsstroms und der induzierten Spannung mit dem Datenerfasser, anschließend werden die B-H-Schleife und die Verlustleistung ermittelt.

ANMERKUNG Wenn die Spannungs- und Strommesskanäle des B-H-Analysegeräts einen Massenschluss haben, müssen die gestrichelten Anschlussklemmen der Erregerwicklung und der Spannungsmesswicklung wie in Bild A.1 angeschlossen werden, andernfalls treten Messfehler aufgrund der Zwischenwicklungskapazität auf.

A.8.2 Leistungsanalyseverfahren

Bei dem Leistungsanalyseverfahren werden die induzierte Spannung und der Erregungsstrom mit dem Datenerfasser gemessen und der Mittelwert der Produkte der induzierten Spannung und des Erregungsstroms in einem Zyklus entspricht der Verlustleistung.

ANMERKUNG Für Leistungsanalysegeräte mit isolierten Messkanälen führt der Anschluss an die gestrichelten Anschlussklemmen nicht zu Messfehlern. Bei Leistungsanalysegeräten mit nicht-isolierten Messkanälen müssen die gestrichelten Anschlussklemmen der Erregerwicklung und der Spannungsmesswicklung wie in Bild A.1 angeschlossen werden, um den Einfluss der Zwischenwicklungskapazität zu reduzieren.

A.8.3 Kapazitives reaktives Kompensationsverfahren

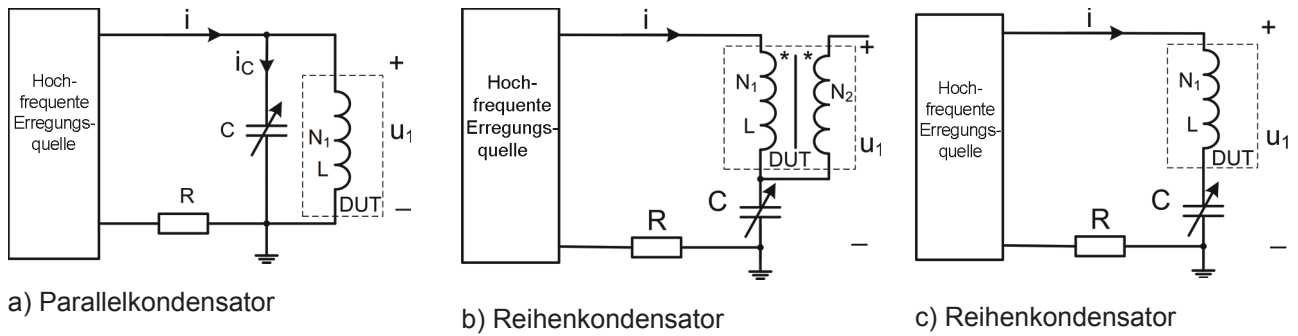
Bei dem kapazitiven reaktiven Kompensationsverfahren wird die kapazitive Blindleistung eines Ausgleichskondensators genutzt, um die induktive Blindleistung der Probe zu nutzen und so die Phasendifferenz zwischen dem geprüften Strom und der Spannung zu reduzieren, um Verlustleistungsmessfehler durch das Wechselstromverfahren zu reduzieren. Das reaktive Kompensationsverfahren hilft außerdem, die Erregungsleistungskapazität als Spannung oder Strom zu messen. Die Schaltungen des reaktiven Kompensationsverfahrens sind in Bild A.2 und die Zeigerdiagramme in Bild A.3 dargestellt. Die Berechnung der Verlustleistung der Kerne erfolgt anhand der Formel (A.8).

Für die parallele Kondensatorkompensation wie in Bild A.2 a) gezeigt kann der Nennstromwert der Erregungsquelle reduziert werden, während die Nennspannung der Erregungsquelle bei der Reihen-kondensatorkompensation nach Bild A.2 b) und c) reduziert werden kann. Bei der Reihen-kondensatorkompensation kann der DUT eine Einschichtwicklung oder Zweischichtwicklung haben. Wenn der DUT eine Einschichtwicklung hat, muss der Wicklungsverlust berücksichtigt werden; im Fall einer Zweischichtwicklung müssen die Windungen der Erregerwicklung den Windungen der Spannungsmesswicklung entsprechen. Bei der parallelen Kondensatorkompensation kann der DUT nur eine Einschichtwicklung besitzen.

$$P_{cv} = \frac{1}{T_S \times V_e} \times \int_{t=0}^{t=T_S} u_1(t) \times i(t) \cdot dt \quad (\text{A.8})$$

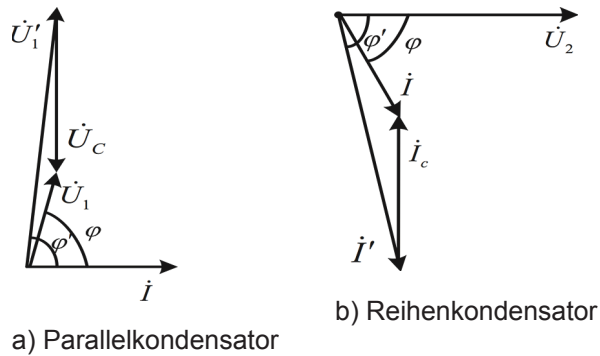
Dabei ist

$u_1(t)$ der Momentanwert der Spannung in Volt (V).



- R Strommesswiderstand
- N_1 Erregerwicklung
- N_2 Induktionswicklung
- C Kompensationskondensator

Bild A.2 – Schaltdiagramm der Blindleistungskompensation des Kondensators



Beschreibung:

- φ' ist der Phasenwinkel zwischen dem geprüften Strom und der geprüften Spannung ohne Kompensation;
- φ ist der Phasenwinkel zwischen dem geprüften Strom und der geprüften Spannung ohne Kompensation;
- i ist der Zeiger des Erregungsstroms ohne Parallelkondensator;
- i' ist der Zeiger des Erregungsstroms mit Parallelkondensator;
- I_C ist der Zeiger des Stroms durch den Parallelkondensator;
- $\dot{U}_1$ ist der Zeiger der Erregungsspannung mit Reihenkondensator;
- $\dot{U}_1'$ ist der Zeiger der Erregungsspannung ohne Reihenkondensator;
- $\dot{U}_2$ ist der Zeiger der induzierten Spannung.

ANMERKUNG Da der reaktive Kompensationskondensator zu zusätzlichen Verlusten führen wird, muss ein Kondensator mit ausreichend geringen Verlusten bei Betriebsfrequenz verwendet werden. Andernfalls muss der Verlust des Kondensators entsprechend seinem ESR und EPR abgezogen werden.

Bild A.3 – Zeigerdiagramm der Blindleistungskompensation des Kondensators

A.9 Messung für den Qualitätsfaktor

Der Qualitätsfaktor kann mithilfe des Wechselstromverfahrens gemessen werden. Die Messschaltung wird nach a) und b) von Bild A.1 angeschlossen. Der Qualitätsfaktor Q_C wird anhand der Formel (A.9) berechnet.

$$Q_C = \frac{f \times B_m \times H_m}{2 \times P_{cv}} \quad (\text{A.9})$$

Anhang B (informativ)

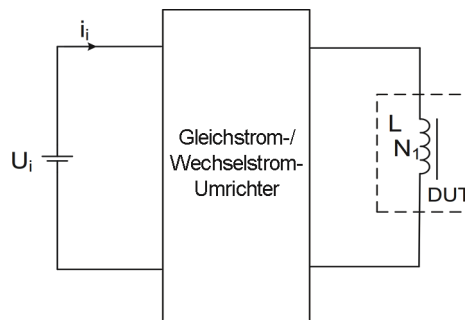
Gleichstromverfahren

B.1 Überblick

Dieser Anhang behandelt das Gleichstromverfahren für die Messung der Kernverluste bei Rechteckwellen-/PWM-Wellenerregung. Die Gleichspannung wird durch einen Gleichstrom-/Wechselstrom-Umrichter in eine gewünschte Rechteckwellen-/PWM-Wellenspannung umgerichtet, die auf die zu prüfende Probe angewendet wird, und die DUT-Verluste werden durch die Messung der Ausgangswirkleistung der Gleichspannungsquelle ermittelt. Das Gleichstromverfahren kann angewendet werden, um die Kernverluste bei Rechteckwellen-/PWM-Wellenerregung mit oder ohne Vormagnetisierung zu messen. Die Anwendung der Gleichstrom-Vormagnetisierung ist in Anhang H dargestellt.

B.2 Grundlegendes Schalt diagramm

Die grundlegende Schaltung des Gleichstromverfahrens ist in Bild B.1 dargestellt.



U_i	Gleichspannungsquelle
Gleichstrom-/Wechselstrom-Umrichter	Umrichter mit Vollbrücken- oder Halbbrückenschaltung Gleichstrom-/Wechselstrom-Umrichter

Bild B.1 – Diagramm des Wechselstrommessverfahrens

B.3 Messeinrichtung

B.3.1 Gleichspannungsquelle U_i

Eine Gleichspannungsquelle mit geeigneter Leistung und stabiler Spannung muss verwendet werden.

B.3.2 Gleichstrom-/Wechselstrom-Umrichter

Ein Umrichter mit Vollbrücken- oder Halbbrückenschaltung kann verwendet werden.

B.3.3 Erregerwicklung N_1

Die Windungszahl der Erregerwicklung N_1 wird entsprechend der erforderlichen Frequenz und magnetischen Flussdichte zusammen mit der Leistungskapazität der Gleichspannungsquelle festgelegt. Der Drahtdurchmesser der Probe wird entsprechend der Amplitude des Erregungsstroms festgelegt.

B.3.4 Gleichstrommessgerät und Gleichspannungsmessgerät für die Messung des Mittelwerts

Der Messfehler für die Prüfung des Mittelwerts bei der Prüffrequenz muss weniger als 0,1 % betragen.

B.4 Prüfschritte

Die Prüfschritte stellen sich folgend dar:

- Die Messschaltung wird wie in Bild B.1 angeschlossen.
- Die Spannung der Gleichspannungsquelle und die Gleichspannungskomponente des Eingangsstroms werden durch das Gleichspannungsmessgerät und das Gleichstrommessgerät für die Mittelwerte gemessen. Die Erregungsspannung wird für die erforderliche magnetische Flussdichte überwacht.
- Jede Messung muss von der geringen magnetischen Flussdichte zur hohen magnetischen Flussdichte erfolgen.

B.5 Messprinzip

Die Gleichspannungs-Erregungsquelle U_i wird in eine Rechteckwellen/PWM-Wellen-Erregungsspannung umgewandelt und durch eine Gleichstrom-/Wechselstrom-Umrichterschaltung auf die Probe angewendet. Die Ausgangsleistung der Gleichspannungs-Erregungsquelle U_i entspricht der gesamten Leistungsaufnahme der Umrichterschaltung und der Probe. Sie wird anhand der Formel (B.1) und (B.2) berechnet. Da die Erregungsspannungsquelle Gleichstrom ist, wird nur die Gleichstromkomponente des Ausgangsstroms i_i gemessen, um die Ausgangsleistung der Erregungsquelle zu bestimmen. Der Einfluss des Impedanzwinkels auf den Verlustleistungsfehler in dem Wechselstromverfahren kann so vermieden werden. Die Gleichstromkomponente des Ausgangsstroms i_i kann einfach und mit guter Genauigkeit gemessen werden.

$$P_{in} = U_i \times I_{i-DC} \quad (B.1)$$

$$P_{in} = P_{inverter} + P_c + P_w \quad (B.2)$$

Dabei ist

P_{in}	die Ausgangswirkleistung der Gleichstromerregungsquelle U_i in Watt (W);
$P_{inverter}$	der zusätzliche Verlust des Umrichters in Watt (W);
P_c	der Kernverlust der Probe in Watt (W);
P_w	der Wicklungsverlust der Probe in Watt (W);
U_i	die Eingangsspannung der Gleichstromerregungsquelle in Volt (V);
I_{i-DC}	die Gleichstromkomponente oder der Mittelwert des Eingangsstroms i_i in Amp (A).

Falls $P_{inverter}$ relativ klein im Vergleich zu P_c ist, entspricht die Ausgangsleistung der Gleichstromerregungsquelle der Verlustleistung der Probe.

B.6 Zu behandelnde Punkte

B.6.1 Umrichterverlust

$P_{inverter}$ muss so gering wie möglich sein. Er kann darüber hinaus durch theoretische Berechnung der Umrichterverluste oder das Kalibrierungsverfahren mit dem Kerninduktor mit Luftspalt ausgeschlossen werden. Das Verfahren stellt sich wie folgt dar:

- a) Die Gleichstrom-/Wechselstrom-Umrichterschaltung wird von den Herstellern der Prüfinstrumente optimiert, um ihre Verluste zu minimieren. Beispiel: Schalter und Dioden mit geringerem Einschaltwiderstand und Kondensatoren mit geringerem ESR werden ausgewählt, um Leitungsverluste der Gleichstrom-/Wechselstrom-Umrichterschaltung zu reduzieren. Die Steuerungsstrategie ist so ausgelegt, dass die Schalter im Nullspannungsschaltbetrieb (ZVS) funktionieren, um den Einschaltverlust der Schalter usw. zu reduzieren.
- b) Um die Genauigkeit noch weiter zu erhöhen, kann P_{inverter} ebenfalls auf der Grundlage einer theoretischen Formel, die eine Funktion aus Spannungsamplitude, Stromamplitude und Frequenz ist, ausgeschlossen werden.

Der Verlust des Kerninduktors mit Luftspalt, der genau durch präzise Impedanzanalysegeräte gemessen werden kann (siehe Anhang G) wird anhand des Gleichstromverfahrens gemessen. Anschließend kann der Wert von P_{inverter} verschiedener Erregungsspannungen und -frequenzen anhand der Formel (B.1) und (B.2) berechnet werden. Die theoretische Formel für P_{inverter} kann als Funktion der Erregungsspannungen, -ströme und -frequenzen durch ein numerisches Datenanpassungsverfahren angepasst werden.

B.6.2 Abzug des Wicklungsverlusts

Der Wicklungsverlust wird unter Bezugnahme auf 5.2.3 abgezogen.