

Formelzeichen <i>symbol</i>	Bezeichnung der Größe <i>description of parameter</i>	Einheit <i>unit</i>
U	Spannung <i>voltage</i>	V
I	Strom <i>current</i>	A
R	Widerstand <i>resistance</i>	Ω
\bar{Z}	komplexer Scheinwiderstand <i>complex impedance</i>	Ω
ρ	Spezifischer Widerstand <i>resistivity</i>	$\Omega \text{ m}$
P_V	Kernverlustleistung <i>power loss</i>	W
t	Zeit <i>time</i>	s
τ	Periodendauer <i>periodic time</i>	s
f	Frequenz <i>frequency</i>	$\text{s}^{-1} = \text{Hz}$
f_{max}	maximale Einsatzfrequenz <i>maximum application frequency</i>	Hz
ω	Kreisfrequenz ($\omega = 2 \cdot f \cdot \pi$) <i>angular frequency</i>	s^{-1}
T	Temperatur <i>temperature</i>	$^{\circ}\text{C}$
T_C	Curietemperatur <i>Curie temperature</i>	$^{\circ}\text{C}$
α_F	Temperaturfaktor <i>temperature factor</i>	10^{-6} K^{-1}
α	Temperaturkoeffizient der Permeabilität <i>temperature coefficient of permeability</i>	K^{-1}
H	Magnetische Feldstärke <i>magnetic field strength</i>	A m^{-1}
H_C	Koerzitivfeldstärke <i>coercive field strength</i>	A m^{-1}
B	Magnetische Flussdichte <i>magnetic flux density</i>	T
B_S	Magnetische Flussdichte (Induktion) nahe Sättigung <i>saturation flux density</i>	T
\hat{B}	Amplitude der magnetischen Flussdichte <i>peak flux density</i>	T
ϕ	Magnetischer Fluss <i>magnetic flux</i>	T m^2
J	Magnetische Polarisation <i>magnetic polarisation</i>	T
J_S	Magnetische Polarisation nahe Sättigung <i>saturation polarisation</i>	T

Formelzeichen <i>symbol</i>	Bezeichnung der Größe <i>description of parameter</i>	Einheit <i>unit</i>
lm	Magnetische Weglänge <i>magnetic path length</i>	m
η_B	Hysteresestoffkonstante <i>hysteresis material constant</i>	10^{-6} mT^{-1}
L	Induktivität <i>inductance</i>	H
L_0	Induktivität einer Spule <i>inductance of a coil</i>	H
μ_0	Magnetische Feldkonstante <i>magnetic constant</i>	$= 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$
μ	Permeabilität <i>absolute permeability</i>	$\text{Vs A}^{-1} \text{ m}^{-1}$
μ_r	relative Permeabilität <i>relative permeability</i>	1
μ_a	Amplitudenpermeabilität <i>amplitude permeability</i>	1
μ_i	Anfangspermeabilität <i>initial permeability</i>	1
$\bar{\mu}$	komplexe Permeabilität <i>complex permeability</i>	1
μ'	Realteil der komplexen Permeabilität <i>real part of complex permeability</i>	1
μ''	Imaginärteil der komplexen Permeabilität <i>imaginary part of complex permeability</i>	1
μ_w, μ_{app}	Wirksame Permeabilität <i>apparent permeability</i>	1
μ_e	Effektive Permeabilität <i>effective permeability</i>	1
Q	Güte <i>quality factor</i>	1
$\tan \delta$	Verlustfaktor <i>loss factor</i>	1
$\tan \delta / \mu_i$	bezogener Verlustfaktor <i>relative loss factor</i>	1
A	Querschnittsfläche <i>cross sectional area</i>	m^2
j	Imaginäre Einheit <i>imaginary unit</i>	$\sqrt{-1}$
V	Volumen <i>volume</i>	m^3
N	Windungszahl <i>number of turns</i>	1
d	Desakkommodation <i>disaccommodation</i>	1
D_F	Desakkommodationsfaktor <i>disaccommodation factor</i>	1

Einführung

NEOSID bietet eine Vielzahl von Nickel-Zink (Ni-Zn) und Mangan-Zink (Mn-Zn) -Ferriten. Diese werden in den unterschiedlichsten Applikationen eingesetzt, wie z.B. Schaltnetz- teile, Datenübertragung, Telekommunikation, Messgeräteausrüstung, Funkentstörung, Antennentechnik, induktive Sensorik, Medizintechnik, Green-Energy, Automotive, RFID und viele mehr.

Die Anwendungsgebiete für Ferromagnetika sind so zahlreich, der Frequenzbereich so groß, die Anforderungen so unterschiedlich, dass es notwendig ist, sowohl Materialsorte als auch Kern- und Spulenformen dem jeweiligen Zweck genau anzupassen. Wir verarbeiten eine Reihe von Kernmaterialien, deren wichtigste Eigenschaften auf den folgenden Seiten zusammengefasst sind.

Introduction

NEOSID is a supplier of a wide variety of nickel-zinc (Ni-Zn) and manganese-zinc (Mn-Zn) ferrites. These ferrites are used for different applications, e.g. as parts in switching power supplies, for data transmission, telecommunication, in measuring instruments, for radio interference suppression, in antennas, inductive sensors, medical equipment, green energy, automotive, RFID and many other fields.

The applications of ferrites are so manifold, the frequency range is so wide, the requirements so different that both the material grade and the core and coil shapes must be adapted to the specific purpose. We process a number of core materials whose principal characteristics are listed on the following pages.

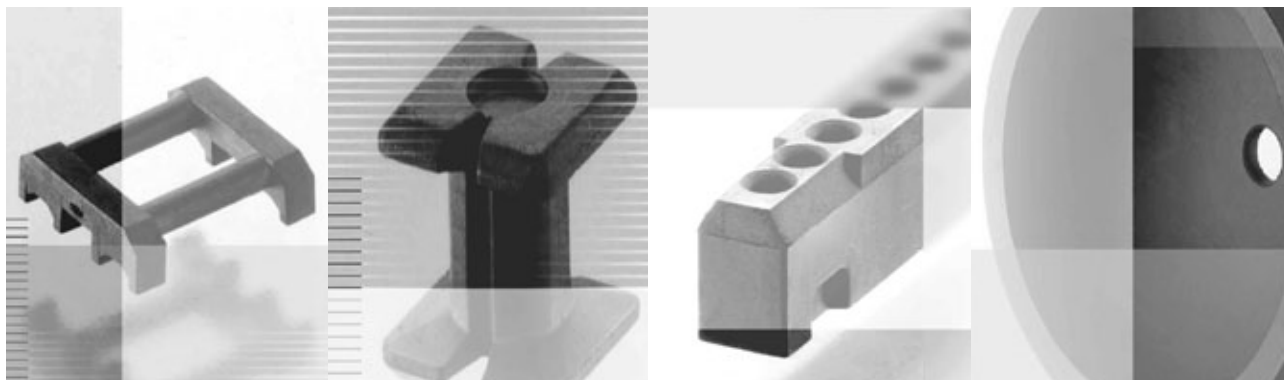
Formgebung

NEOSID verfügt über eine Vielfalt an Möglichkeiten, den Ferriten eine Form zu geben. Bei der Auswahl ist das Ferritmaterial mitbestimmend.

i. Spritzverfahren

Der technische Fortschritt macht es nötig, dass Ferrite in immer ungewöhnlichere Formen gebracht werden müssen. Ob asymmetrisch, extrem klein, besonders dünnwandig – ist die Form zu anspruchsvoll, um durch das Pressverfahren hergestellt zu werden, dann fertigen wir mit unserem speziellen Spritzgussverfahren. Bei diesem Verfahren ist der Schlankheitsgrad unkritisch. Ein Verhältnis von Länge zum Durchmesser von 20 ist möglich. Ein Blick auf die weiteren technischen Daten:

- Wandstärke: ab 0,25 mm
- Volumen: ab 3 mm³ bis ca. 25 cm³
- Grundtoleranzen $\pm 2\%$. Einzelmaß $\pm 1\%$ bei erhöhtem Aufwand



ii. Pressverfahren

Die meisten weichmagnetischen Kerne für Hochfrequenzspulen werden wegen ihrer relativ einfachen Gestalt im Pressverfahren hergestellt. Aus fertigungstechnischen Gründen soll dabei der Schlankheitsgrad, d.h. das Verhältnis von Länge zum Durchmesser, den Wert 6 nicht überschreiten. Bei dünnwandigen Bauformen wie z.B. Rohrkernen hängt der Schlankheitsgrad auch noch von der Wandstärke ab.

iii. Strangziehverfahren

Im Strangziehverfahren können Zylinderkerne mit einem Durchmesser bis 16 mm und einer Länge bis 200 mm standardmäßig angeboten werden.

iv. Isostatisches Pressen

Im Verfahren des isostatischen Pressens können großvolumige Ferritblöcke erzielt werden.

Shaping

NEOSID has a number of possibilities for shaping ferrites. The ferrite material is important for the choice made.

i. Injection moulding

Technical progress requires that ferrites take on every more uncommon shapes. Whether asymmetrical, extremely small, very thin-walled – whenever the shape is too complex to be produced by application of dry pressing, we take recourse to our special injection moulding process. This method does not depend on the slimness of the shape. A length to diameter ratio of 20:1 is possible. Other specifications at a glance:

- Wall thicknesses: from 0.25 mm
- Volumes: from 3 mm³ to approx. 25 cm³
- General tolerances: $\pm 2\%$. Individual dimension of $\pm 1\%$ with extra effort

ii. Dry pressing technique

Most soft magnetic cores for high-frequency coils are of fairly simple shape and are therefore made by the dry pressing technique. For manufacturing reasons, the slimness, i.e. the ratio of length and diameter, should not exceed the value of 6. With some products, e.g. tubular cores, the slimness also depends on the wall thickness.

iii. Extrusion process

As a standard, cylinder cores up to 16 mm diameter and 200 mm length are produced by extrusion process.

iv. Isostatic pressing

Large-volume ferrite blocks can be obtained by isostatic pressing.

v. Mechanische Bearbeitung

Die Ferritbauteile können nachträglich mechanisch bearbeitet werden. Wir bieten Ihnen für Bauteile mit einem Außendurchmesser bis 30 cm folgende Bearbeitungstechniken an: Schleifen von außen und innen, Oberflächenschleifen, planparalleles Schleifen, Gleitschleifen, Schneiden und Gewindeschleifen. Weitere Bearbeitungstechniken auf Anfrage.



v. Machining

Ferrite parts can be machined in a subsequent process. We offer the following machining methods for parts up to 30 cm outside diameter: Grinding inside and outside, surface grinding, plane-parallel grinding, barrel finishing, cutting and thread grinding. Other methods are available on request.

Beschichtungen

Zur Einhaltung der Isolationsspannung und Durchschlagsfestigkeit nach VDE, ebenso wie als Schutz des Wickeldrahtes gegen Beschädigung der Isolation stehen Beschichtungen aus Parylene, Epoxidharz und Polyurethan zur Verfügung.

Coatings

Coats of parylene, epoxy resin or polyurethane can be applied for maintaining the insulation voltage and the dielectric strength prescribed by VDE (German Electrical Engineering Association) and also to protect the winding wire from damage of the insulation.

Werkstoffe

NEOSID verfügt über eine Vielzahl verschiedener Materialien. Je nach Wunsch des Kunden können sie sowohl einzeln, als auch im Verbund oder auch als kompletter Bausatz hergestellt werden.

Materials

NEOSID uses a wide variety of materials. Depending on the customer's needs, a single material or material composites or complete sets can be made.

i. Mangan-Zink-Ferrite (Mn-Zn)

Die Anfangspermeabilität der Mangan-Zink-Ferrite liegt typischerweise im Bereich von 700 bis 15 000, mit einer Curietemperatur von bis zu 280°C. Typische Anwendungsgebiete für Mangan-Zink-Ferrite sind die niederfrequenten Bereiche, wie Antennen, Transponder, Schaltnetzteile, Stromsensoren, Näherungsschalter, Datenübertragung, Funkentstörung, Planartransformatoren und Drosseln für allgemeine Anwendungen.

i. Manganese-zinc ferrites (Mn-Zn)

The initial permeability of manganese-zinc ferrites is typically between 700 and 15000, with a Curie temperature of up to 280°C. Typical applications of manganese-zinc ferrites include low-frequency products, such as antennas, transponders, switch-mode power supplies, current sensors, proximity switches, high-voltages transformers, data transmission, radio interference suppression, planar transformers and chokes for general applications.

ii. Nickel-Zink-Ferrite (Ni-Zn)

Die Nickel-Zink-Ferrite besitzen eine Anfangspermeabilität von 10 bis 3000, sowie eine Curietemperatur von bis zu 450°C. Typische Anwendungsgebiete für Nickel-Zink-Ferrite liegen in den hochfrequenten Bereichen, wie HF-Filter, HF-Übertrager, Breitbandübertrager, Antennen, Transponder und Drosseln für allgemeine Anwendungen.

ii. Nickel-zinc ferrites (Ni-Zn)

Nickel-zinc ferrites have an initial permeability between 10 and 3000 and a Curie temperature of up to 450°C. Typical applications of nickel-zinc ferrites are high-frequency areas such as HF filters, HF transformers, broadband transformers, antennas, transponders and chokes for general applications.

iii. Plastoferrite

Der Plastoferrit PF1s ist ein Kompositwerkstoff aus thermoplastischem Material und Ferrit. Teile aus PF1s können direkt nach dem Spritzguss ohne anschließende Sinterung eingesetzt werden. Da also kein Arbeitsschritt mit signifikanter Schwindung erfolgt (wie sonst das Sintern) sind sehr enge mechanische Toleranzen erreichbar. Eine nachträgliche Bearbeitung mit für Kunststoffe üblichen Verfahren ist möglich. Dadurch sind sehr spezielle Bauteildesigns realisierbar, beispielsweise in Form von Spulenträgern, Mehrlochkernen sowie auch in Form von Gehäusen, Steckern und Folien. Typische Anwendungsgebiete für Plastoferrite sind die Abschirmung, Entstörung, als Datenleitungsdrosseln sowie als flexible Antennen.

iv. Kunststoffteile

NEOSID bietet eine große Vielfalt an thermoplastischen Materialien an. So kann für Ihren jeweiligen speziellen Anwendungsbereich der Kunststoff gewählt werden, der Ihre hohen Ansprüche an die Eigenschaften und an die Qualität der Bauteile erfüllt. Eine Auswahl einsetzbarer thermoplastischer Materialien mit der Beschreibung ihrer Eigenschaften findet sich im Teil 3 dieses Kataloges.

Magnetische Flussdichte nahe Sättigung

Die magnetische Flussdichte nahe Sättigung B_s wird in der Regel an einem schlanken Ringkern mit einer magnetischen Weglänge l_m (sie entspricht dem mittleren Umfang des Ringes) und einer Querschnittsfläche A bestimmt. Der Ringkern wird mit 2 Wicklungen N_1 und N_2 versehen. Fließt durch N_1 ein sinusförmiger Primärstrom I , ergibt sich im Ringkern eine magnetische Feldstärke H .

$$H = \frac{N_1 I}{l_m}$$

Diese induziert in der Wicklung N_2 eine Spannung U_{in} . Sie ist ein Maß für die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses Φ im Ring. Den Fluss pro Querschnittsfläche A nennt man die magnetische Flussdichte B .

$$U_{in} = - \frac{d\Phi}{dt} = - N_2 A \frac{dB}{dt}$$

iii. Plastoferrites

Plastoferrite PF1s is a composite material of a thermoplastic material and ferrite. Parts made of PF1s can be used directly after injection moulding without sintering. Because no processing with significant shrinkage follows (as is otherwise common when parts are sintered) very close mechanical tolerances can be obtained. Additional processing by methods common with plastics is possible. Therefore, parts of very specific design can be made, for example, coil formers, multi-aperture cores and also housings, connectors and foils. Typical applications of plastoferrites are shielding, interference suppression, data line chokes or flexible antennas.

iv. Plastic parts

NEOSID offers a wide variety of thermoplastic materials. This allows to choose the material which meets the properties and the quality you demand. A selection of thermoplastic materials that can be used and descriptions of their properties are contained in part 3 of this catalogue.

Saturation flux density

As a rule, the saturation flux density B_s is measured at a slim toroidal core of magnetic path length l_m (corresponding to the mean circumference of the ring) and a cross-sectional area A . The toroidal core is provided with two windings N_1 and N_2 . If a sinusoidal primary current I passes through N_1 , magnetic field strength H is obtained in the toroidal core.

$$H = \frac{N_1 I}{l_m}$$

This induces voltage U_{in} in winding N_2 . This voltage provides a measure of the time-related change of the magnetic flux Φ in the ring. The flux per unit of cross-sectional area A is referred to as flux density B .

$$U_{in} = - \frac{d\Phi}{dt} = - N_2 A \frac{dB}{dt}$$

Durch Integrieren erhält man:

$$B = \frac{\int U_{in} dt}{N_2 A}$$

In einer Luftspule ist die magnetische Flussdichte B über die magnetische Feldkonstante μ_0 ($\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ Vsec/Am) mit der magnetischen Feldstärke H verknüpft.

$$B = \mu_0 H$$

Für eine Spule mit Kern wird durch die magnetische Polarisation J des Kerns die magnetische Flussdichte um J erhöht. Bei geringen Feldstärken wird die Erhöhung durch die Anfangspermeabilität μ_i beschrieben.

$$B = J + \mu_0 H = \mu_i \mu_0 H$$

Nahe der Sättigung nähert sich die Polarisation jedoch einem oberen Grenzwert J_s an. Dieser kann auch durch weitere Steigerung von H nicht überschritten werden. Die magnetische Flussdichte nahe der Sättigung B_s ist dann nicht mehr proportional zu H und wird wie folgt beschrieben:

$$B_s = J_s + \mu_0 H$$

Die magnetische Flussdichte nahe der Sättigung B_s wird gemäß DIN EN 60401-3 bei 1kHz und Raumtemperatur und einer μ_i -abhängigen magnetischen Feldstärke gemessen, z.B. für Materialien mit einem $\mu_i > 1000$ bei $H = 1200$ A/m.

Integration yields:

$$B = \frac{\int U_{in} dt}{N_2 A}$$

In an air core coil, the magnetic flux density B is related to the magnetic field strength H by the magnetic constant μ_0 ($\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ Vsec/Am)

$$B = \mu_0 H$$

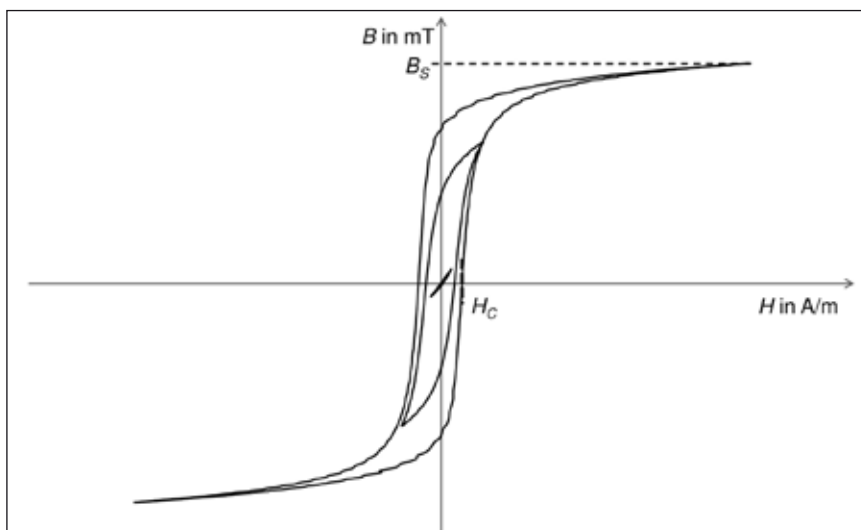
In a coil with a core, the magnetic polarisation J of the core increases the magnetic flux density by J . For low field strengths, this increase is characterised by the initial permeability μ_i .

$$B = J + \mu_0 H = \mu_i \mu_0 H$$

Near saturation point, polarisation approaches an upper limit J_s . This upper limit cannot be exceeded even if H is increased further. In this situation, the saturation flux density B_s is no longer proportional to H and is characterised by the following equation:

$$B_s = J_s + \mu_0 H$$

With reference to DIN EN 60401-3, the saturation flux density B_s is measured at 1kHz and room temperature and a μ_i -dependent magnetic field strength, e.g. for materials with $\mu_i > 1000$ with $H = 1200$ A/m.



Typische Hysteresekurven bei verschiedenen magnetischen Feldstärken bis zur Sättigung
Typical hysteresis graphs for different magnetic field strengths up to saturation

B_s : Magnetische Flussdichte nahe Sättigung
saturation flux density

H_c : Koerzitivfeldstärke
coercive field strength

Kernverlustleistung

Für die Leistungsferrite wird die auf das Volumen V bezogene Kernverlustleistung P_V abhängig von Temperatur und Frequenz angegeben. Es wird über die Periodendauer τ integriert und der Mittelwert berechnet.

$$P_V = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{N_1 I U_{in}}{N_2 V} d\tau$$

Hysteresestoffkonstante

Die Hysteresestoffkonstante η_B beschreibt die Änderung der Hystereseverluste in Abhängigkeit von der magnetischen Flussdichte. Entsprechend DIN EN 62044-2 wird die Hysteresestoffkonstante aus der Differenz der Hystereseverlustfaktoren $(\tan \delta)_B$ bei zwei unterschiedlichen Flussdichten \widehat{B}_2 und \widehat{B}_1 . η_B wird auf die effektive Permeabilität μ_e bezogen und ist somit eine scherungsunabhängige Größe.

$$\eta_B = \frac{(\tan \delta)_{\widehat{B}_2} - (\tan \delta)_{\widehat{B}_1}}{(\widehat{B}_2 - \widehat{B}_1)\mu_e}$$

Permeabilität

Die Permeabilität μ beschreibt die Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte B (auch als magnetische Induktion bezeichnet) von der magnetischen Feldstärke H , entsprechend

$$\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \mu_r \mu_0$$

Dabei ist μ das Produkt der magnetischen Feldkonstante μ_0 und der relativen Permeabilität μ_r .

Die relative Permeabilität μ_r ist für die technische Anwendung eines magnetischen Materials eine wesentliche Größe. Sie ist abhängig von der Frequenz, der Amplitude sowie der Zeit. Je nach betrachtetem Anwendungsbereich des magnetischen Materials wird die relative Permeabilität weiter differenziert. Für unsere Ferrite sind einige Permeabilitätsarten von Bedeutung, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Power loss

The power loss P_V of power ferrites is specified in relation to volume V as a function of temperature and frequency. It is integrated across the periodic time τ and the mean calculated.

$$P_V = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{N_1 I U_{in}}{N_2 V} d\tau$$

Hysteresis material constant

The hysteresis material constant η_B characterises the changes of the hysteresis loss as a function of the magnetic flux density. According to DIN EN 62044-2, the hysteresis material constant is obtained from the difference between the hysteresis loss factors $(\tan \delta)_B$ of two different flux densities \widehat{B}_2 and \widehat{B}_1 . η_B is related to the effective permeability μ_e and as such is a value that does not depend on any gap in a core.

$$\eta_B = \frac{(\tan \delta)_{\widehat{B}_2} - (\tan \delta)_{\widehat{B}_1}}{(\widehat{B}_2 - \widehat{B}_1)\mu_e}$$

Permeability

Permeability μ characterises the dependence of the magnetic flux density B (also referred to as magnetic induction) on the magnetic field strength H , according to the following equation:

$$\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \mu_r \mu_0$$

In this equation, μ is the product of the magnetic constant μ_0 and the relative permeability μ_r .

The relative permeability μ_r is an important dimension for the technical application of a magnetic material. It depends on frequency, amplitude and time. Depending on application for which the magnetic material is intended, the relative permeability is differentiated further. Some permeability types are of importance to our ferrites and will be described in more detail in the following.

Anfangspermeabilität μ_i

Für die Klassifizierung der Ferrite ist die Anfangspermeabilität μ_i eine wichtige Materialgröße. Die Anfangspermeabilität gibt das Verhältnis der magnetischen Induktion zur magnetischen Feldstärke für kleine Feldstärken an ($H \rightarrow 0$). Die Messung von μ_i erfolgt an einem Ringkern bei Raumtemperatur (Induktion $< 0,25$ mT; Messfrequenz 1 MHz bzw. 100 kHz).

$$\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \right)$$

Amplitudenpermeabilität μ_a

Das Verhältnis der Amplituden von magnetischer Induktion zur magnetischen Feldstärke wird durch die Amplitudenpermeabilität μ_a beschrieben. Dieser Wert kann bei großen Feldstärken deutlich von μ_i abweichen.

$$\mu_a = \frac{1}{\mu_0} \frac{\hat{B}}{\hat{H}}$$

Effektive Permeabilität μ_e

Die effektive Permeabilität μ_e wird bei der Betrachtung von Kernen mit uneinheitlichem Material bzw. bei gescherten Kernen (Kernen mit Luftspalt) herangezogen. Für jeden Abschnitt des Bauteils wird das Verhältnis der magnetischen Weglänge lm und dessen Querschnittsfläche A gebildet und über den gesamten Flussweg summiert. Die effektive Permeabilität ergibt sich daraus wie folgt:

$$\mu_e = \frac{1}{\mu_0} \frac{L}{N^2} \sum \frac{lm}{A}$$

Dabei stellt L die Induktivität und N die Windungszahl dar.

Initial permeability μ_i

The initial permeability μ_i is a major material characteristic for the classification of ferrites. The initial permeability characterises the ratio between the magnetic flux density and the magnetic field strength for low field strengths ($H \rightarrow 0$). The initial permeability is measured at a toroidal core at room temperature (flux density < 0.25 mT; test frequency 1 MHz and 100 kHz respectively).

$$\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \right)$$

Amplitude permeability μ_a

The ratio of the amplitudes of magnetic flux density and magnetic field strength is characterised by the amplitude permeability μ_a . This value can deviate substantially from μ_i with high field strengths.

$$\mu_a = \frac{1}{\mu_0} \frac{\hat{B}}{\hat{H}}$$

Effective permeability μ_e

The effective permeability μ_e is a factor considered for cores with heterogeneous material and cores with a gap respectively. The ratio of the magnetic path length lm and its cross sectional area A is calculated for every section of the part and the sum calculated for the entire flux path. The effective permeability is obtained by the following equation:

$$\mu_e = \frac{1}{\mu_0} \frac{L}{N^2} \sum \frac{lm}{A}$$

in which L is the inductance and N the number of turns.

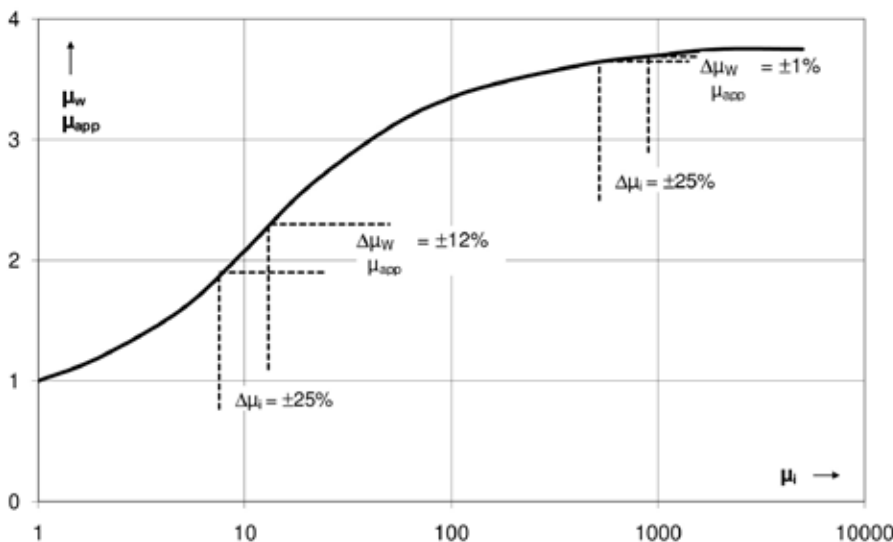
Wirksame Permeabilität μ_w

Den Begriff der wirksamen Permeabilität μ_w (z.T. auch als μ_{app} bezeichnet) benutzt man meist bei Spulenaufbauten mit Zylinder-, Gewinde-, Nippelkernen oder sonstigen Kernformen mit größerer magnetischer Streuung, beispielsweise verursacht durch einen Luftspalt im magnetischen Flussweg. Die Induktivität einer Spule L_0 wird durch einen magnetisierbaren Kern erhöht, es resultiert die Induktivität L . Der Faktor, um den sich die Induktivität erhöht, ist die wirksame Permeabilität. Sie ist messtechnisch direkt zugänglich als Verhältnis von L und L_0 .

$$\mu_w = \frac{L}{L_0}$$

Die Größe und Toleranz von μ_w ist abhängig von Spulenaufbau, Kernform, Position des Kernes in der Spule und dem Ferritmaterial. Die Toleranz liegt üblicherweise im Bereich von $\pm 3\%$ bis $\pm 10\%$ bezogen auf einen Vergleichskern. Die Messung erfolgt in einer geeigneten Messspule. Bei Ringkernen ist die wirksame Permeabilität gleich der effektiven Permeabilität.

Die nachfolgende Grafik stellt die wirksame Permeabilität μ_w als Funktion der Anfangspermeabilität μ_i dar. Sie zeigt, dass eine Änderung des μ_i um z.B. $\pm 25\%$ bei kleinen Werten von μ_i (z.B. bei F100b mit $\mu_i = 10$) eine relativ große Änderung von μ_w bewirkt, bei großen Werten von μ_i (z.B. bei F08 mit $\mu_i = 700$) sich μ_w jedoch dadurch kaum ändert.



Wirksame Permeabilität in Abhängigkeit von der Anfangspermeabilität, dargestellt anhand Spule W4,2.

Apparent permeability as a function of the initial permeability shown for coil W4.2.

Apparent permeability μ_w

The term apparent permeability μ_w (sometimes also referred to as μ_{app}) is mostly used for coil designs with cylinder cores, thread cores, nipple cores or other core shapes of higher magnetic leakage caused, for example, by a an air gap in the magnetic flux path. The inductance of a coil L_0 is increased by a magnetisable core, which yields inductance L . The factor by which the inductance increases is the apparent permeability. It is measured directly as the ratio of L and L_0 .

$$\mu_w = \frac{L}{L_0}$$

The magnitude and the tolerance of μ_w depend on the coil design, core shape, position of the core in the coil, and ferrite material. Normally, the tolerance is within $\pm 3\%$ to $\pm 10\%$ in relation to a reference core. The measurement is made with a suitable measuring coil. For toroidal cores, the apparent permeability is equal to the effective permeability.

The graph below shows the apparent permeability μ_w as a function of the initial permeability μ_i . It will be seen that changes of μ_i e.g., of $\pm 25\%$ with small values of μ_i (e.g. at F100b with $\mu_i = 10$) cause a relative high change of μ_w , whereas with high values of μ_i (e.g. at F08 with $\mu_i = 700$) μ_w hardly changes.

Komplexe Permeabilität $\bar{\mu}$

Die Permeabilität kann als komplexe Größe $\bar{\mu}$ ausgedrückt werden. Sie ergibt sich aus dem bislang betrachteten Realteil μ' und dem imaginären Anteil der Permeabilität μ'' mit j als imaginärer Einheit. μ' beschreibt den rein induktiven Anteil, μ'' den reinen Verlustanteil der Permeabilität, welcher vor allem bei hohen Frequenzen zu tragen kommt.

$$\bar{\mu} = \mu' - j\mu''$$

Der Realteil sowie der Imaginärteil der Permeabilität werden oft gemeinsam in einem Graphen als Funktion der Frequenz dargestellt. Anhand dieses Graphen lassen sich Aussagen über den anwendbaren Frequenzbereich eines Ferrits oder eines daraus gefertigten Bauteils treffen.

Ein verlustbehaftetes induktives Bauelement (Spule) lässt sich als eine Reihenschaltung von Induktivität und Widerstand darstellen. Wie die Permeabilität kann auch der Scheinwiderstand \bar{Z} komplex beschrieben werden,

$$\bar{Z} = R + j\omega L$$

mit dem Widerstand R und der Kreisfrequenz ω .

Der induktive Anteil des Scheinwiderstandes \bar{Z} beschreibt die induktive Wirkung von Kern und Spule, während im Widerstand die Kern- und Kupferverluste enthalten sind. Im Modell der Spule als Reihenschaltung von Induktivität und Widerstand berechnet sich der Real- und sowie der Imaginärteil der komplexen Permeabilität wie folgt:

$$\mu' = \frac{L}{L_0}$$

und

$$\mu'' = \frac{R}{\omega L_0}$$

Complex permeability $\bar{\mu}$

Permeability can be expressed as complex dimension $\bar{\mu}$. It is obtained from the real part μ' considered so far and the imaginary part of the permeability μ'' with j as imaginary unit. μ' characterises the purely inductive part, μ'' the purely loss part of the permeability, which is noted especially with high frequencies.

$$\bar{\mu} = \mu' - j\mu''$$

The real part and the imaginary part of the complex permeability are often represented together in a graph as function of frequency. This graph yields information on the applicable frequency range of a ferrite or a part made of the ferrite.

A lossy inductive part (coil) can be presented as a series connection of inductance and resistance. Like the permeability, the impedance \bar{Z} can be characterised as complex impedance by the following equation,

$$\bar{Z} = R + j\omega L$$

with the resistance R and the angular frequency ω .

The inductive part of the impedance \bar{Z} describes the inductive effect of core and coil, while the resistance contains the core and copper losses. In the model of the coil as series connection of inductance and resistance, the real and the imaginary parts of the complex permeability are determined by the following equations:

$$\mu' = \frac{L}{L_0}$$

and

$$\mu'' = \frac{R}{\omega L_0}$$

Verlustfaktor

Der Verlustfaktor $\tan \delta$ ergibt sich aus dem Verhältnis des realen und imaginären Anteils der Permeabilität:

$$\tan \delta = \frac{\mu''}{\mu'}$$

Der Verlustfaktor ist abhängig von der Frequenz und der Feldstärke. Durch einen Luftspalt im Kern erniedrigt sich der Verlustfaktor.

Der Verlustfaktor wird bei kleinen Wechselfeldamplituden mit einer Induktion unter 0,1 mT gemessen.

Bezogener Verlustfaktor

Für den Vergleich von Werkstoffen wird meist die luftspaltunabhängige, d.h. scherungsunabhängige Größe verwendet – der bezogene Verlustfaktor $\tan \delta / \mu_i$.

Er ist auf die Anfangspermeabilität bezogen und wird bei einer Induktion kleiner 0,1 mT gemessen:

$$\frac{\tan \delta}{\mu_i} = \frac{\mu''}{\mu_i \mu'}$$

Wird der bezogene Verlustfaktor mit der effektiven Permeabilität μ_e multipliziert, erhält man den Verlustfaktor des Kerns.

Güte

Der reziproke Wert des Verlustfaktors wird als Güte Q bezeichnet. Für ein verlustbehaftetes induktives Bauelement (Spule), betrachtet als Reihenersatzschaltung von Induktivität und Widerstand gilt:

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{\omega L}{R}$$

Loss factor

The loss factor $\tan \delta$ is obtained from the ratio of the real and the imaginary parts of the permeability:

$$\tan \delta = \frac{\mu''}{\mu'}$$

The loss factor depends on the frequency and the field strength. An air gap in a core reduces the loss factor.

The loss factor is measured with small alternating fields with inductance below 0.1 mT.

Relative loss factor

Materials are often compared with reference to the relative loss factor $\tan \delta / \mu_i$ which is independent of any air gap. It is related to the initial permeability and is measured at inductance of less than 0.1 mT:

$$\frac{\tan \delta}{\mu_i} = \frac{\mu''}{\mu_i \mu'}$$

If the relative loss factor is multiplied by the effective permeability μ_e , the loss factor of the core is obtained.

Quality factor

The reciprocal value of the loss factor is referred to as quality factor Q . For a lossy inductive part (coil) considered as series connection of inductance and resistance, the following equation applies:

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{\omega L}{R}$$

Temperaturfaktor

Die Temperaturabhängigkeit der Anfangspermeabilität μ_i wird durch α , dem Temperaturkoeffizienten der Permeabilität, für die Temperaturen T_1 und T_2 angegeben.

$$\alpha = \frac{\mu_i(T_2) - \mu_i(T_1)}{\mu_i(T_1)} \frac{1}{T_2 - T_1}$$

Für den Vergleich von Ferritwerkstoffen wird meist der Temperaturfaktor α_F verwendet. Der Temperaturkoeffizient α wird hierbei auf $\mu_i(T_1)$ bezogen. T_1 entspricht der Bezugstemperatur (Raumtemperatur). Der Temperaturfaktor α_F ist eine scherungsunabhängige Größe.

$$\alpha_F = \frac{\alpha}{\mu_i(T_1)} = \frac{\mu_i(T_2) - \mu_i(T_1)}{\mu_i^2(T_1)} \frac{1}{T_2 - T_1}$$

Curietemperatur

Die Curietemperatur T_C ist die Temperatur, oberhalb der die magnetische Domänenstruktur aufgehoben wird und das Material nur noch ein paramagnetisches Verhalten zeigt. Je nach Zusammensetzung der Ferrite steigt die Permeabilität im Bereich von ca. 100°C bis 500°C bis zu einem Maximum an und fällt dann stark ab. Die Temperatur, bei der die Permeabilität auf weniger als 10% ihres Wertes bei +23°C abgesunken ist, wird als Curietemperatur angegeben.

Spezifischer Widerstand

Der spezifische Gleichstromwiderstand ρ wird gemessen bei Feldstärken unter 100 V/m, bei Stromstärken unter 20 A/m² und bei Raumtemperatur. Je nach Ferrit ergeben sich spezifische Widerstände ρ von 10⁰ bis 10⁷ Ωm. Zum Vergleich: Kupfer $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ωm; Teflon (PTFE) $\rho = 10^{16}$ Ωm.

Temperature factor

The temperature dependence of the initial permeability μ_i is expressed by α the temperature coefficient of the permeability, for the temperatures T_1 and T_2 .

$$\alpha = \frac{\mu_i(T_2) - \mu_i(T_1)}{\mu_i(T_1)} \frac{1}{T_2 - T_1}$$

Comparisons of ferrite materials mostly refer to the temperature factor α_F . In this case, the temperature coefficient α is related to $\mu_i(T_1)$. T_1 represents the reference temperature (room temperature). The temperature factor α_F is a dimension that does not depend on any air gap in the core:

$$\alpha_F = \frac{\alpha}{\mu_i(T_1)} = \frac{\mu_i(T_2) - \mu_i(T_1)}{\mu_i^2(T_1)} \frac{1}{T_2 - T_1}$$

Curie temperature

The Curie temperature T_C is the temperature above which the magnetic domain structure is no longer active and the material has only paramagnetic properties. Depending on the composition of the ferrites, the permeability increases to a maximum level in the temperature range from approximately 100°C to 500°C and then drops dramatically. The temperature at which the permeability drops to less than 10% of the level at +23°C is referred to as Curie temperature.

Resistivity

The specific electrical resistance ρ is measured at field strengths below 100 V/m, current levels below 20 A/m² and at room temperature. Depending on the ferrite, resistivity ρ from 10⁰ to 10⁷ Ωm can be obtained. For comparison: copper $\rho = 1.7 \cdot 10^{-8}$ Ωm; Teflon (PTFE) $\rho = 10^{16}$ Ωm.

Desakkommodation

Ein Ferrit erfährt unter Einfluss von Temperaturen oberhalb des Curiepunkts, durch Abmagnetisierung mit einem kontinuierlichen Wechselfeld über die Sättigung oder durch mechanische Erschütterung eine Entmagnetisierung. Diese zeigt sich in einer sprunghaften Erhöhung der Anfangspermeabilität sowie des Verlustfaktors, gefolgt von einer zeitlichen Abnahme dieser Größen. Die Abnahme der Permeabilität erfolgt logarithmisch. Dieses Phänomen wird durch die Desakkommodation d wie folgt beschrieben:

$$d = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 \log \frac{t_2}{t_1}}$$

mit der Permeabilität μ_1 zum Zeitpunkt t_1 und der Permeabilität μ_2 zum Zeitpunkt t_2 .

Desakkommodationsfaktor

Der Desakkommodationsfaktor D_F beschreibt die Desakkommodation d normiert auf die Anfangspermeabilität μ_1 . Der Desakkommodationsfaktor D_F ist eine scherungsunabhängige Größe.

$$D_F = \frac{d}{\mu_1}$$

Die Bestimmung des D_F erfolgt nach DIN EN 62044.

Disaccommodation

A ferrite undergoes demagnetisation due to exposing to temperature above the Curie point, due to demagnetisation by a continuous alternating field beyond its point of saturation, or due to mechanical vibration. This can be seen as a sudden increase in the initial permeability and of the loss factor, followed by a time-related drop in these characteristics. The decrease in permeability is a logarithmic process. This phenomenon is characterised by the disaccommodation d as follows:

$$d = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 \log \frac{t_2}{t_1}}$$

with the permeability μ_1 at time t_1 and the permeability μ_2 at time t_2 .

Disaccommodation factor

The disaccommodation factor D_F characterises the disaccommodation d normalised to the initial permeability μ_1 . The disaccommodation factor D_F is independent of the presence of any gap in a core.

$$D_F = \frac{d}{\mu_1}$$

The disaccommodation factor D_F is defined according to DIN EN 62044.

Bedeutung für den Anwender

Werden Ferrite, wie zuvor beschrieben, über die Sättigungsmagnetisierung ausgeregt, so steigt die Induktivität (wie auch der Verlustfaktor) sprunghaft an. Die Desakkommodation d gibt den zeitlichen Verlauf der relativen Permeabilitätsänderung nach erfolgter magnetischer Idealisierung an. Die Daten hierzu sind in der Werkstoffübersicht angegeben.

Viele Nickel-Zink-Ferrite, wie z.B. F100b, verbleiben in dem Zustand, der bei der Übersteuerung erreicht wurde. Dies spiegelt sich in den kleinen Desakkommodationswerten wider. Nur eine Temperung kann den Effekt rückgängig machen. Es empfiehlt sich daher, bei der Verarbeitung und der Anwendung derartiger Ferrite, diese von Magnetfeldern, Temperaturen um und über dem Curiepunkt sowie von mechanischen Erschütterungen fernzuhalten.

Die Desakkommodation d von F02 und F08 ist sehr groß. D.h. diese Ferrite erholen sich in außergewöhnlich kurzer Zeit selbsttätig von den Auswirkungen einer solchen Magnetisierung.

What the above means to the user

If ferrites, as described above, are actuated by saturation magnetisation, the inductance (and also the loss factor) increases suddenly. The disaccommodation d indicates the time progression of the relative permeability change after magnetic idealisation. The relevant data can be obtained from the material data sheet.

Many nickel-zinc ferrites, e.g. F100b, remain in this state obtained by overdriving. This reflects in the small disaccommodation levels. Only annealing can reverse this effect. So when such ferrites are processed or applied, it is recommended not to expose them to magnetic fields, temperatures around or above the Curie point or mechanical shock.

The disaccommodation d of F02 and F08 is very large. This means that these ferrites will recover automatically from the effects of this kind of magnetisation after an extraordinarily short time.