

attempo

Magnetische Bauteile und Baugruppen

Grundlagen, Anwendungsbereiche, Hintergründe und Historie

Attempo

induktive Bauteile,
Feldbustechnik
Testhaus

Steinbruchstr. 15
72108 Rottenburg

Tel.: +49 (0) 7472 9623 90
Fax: +49 (0) 7472 9623 92

eMail: info@attempo.com
www.attempo.com



- Induktive Bauteile
Berechnung, Simulation
und Test
- Kleinserienfertigung
- Filtersysteme
- EMV –Test, Beratung
und Seminare
- Entwicklungsunter-
stützung
- Kommunikationstechnik
- Feldbusanalysen
und Komponententest
- Umweltprüfverfahren
- Information

Version 1.1 25.06.2009

Kernmaterialien

Zur Verstärkung des magnetischen Feldes wird in den Isolierkörper (Spulenkörper) ein Kern aus magnetisch leitfähigem Material eingebracht.

Dieses magnetisch leitfähige Material kann sein aus:

Eisen, Nickel, oder Kobalt bzw. Kombinationen

Mumetal 76NiFeSi

Trafoblech FeSi

massiv, oder aus einzelnen Blechen zusammengesetzt

oder Ferritkern

Mangan/Zink, (gebräuchliche Ferrite)

Nickel/Zink, (K10, M13, höhere Frequenzen, EMV)

Magnesium/Aluminium und weitere

Gesintertes Herstellungsverfahren

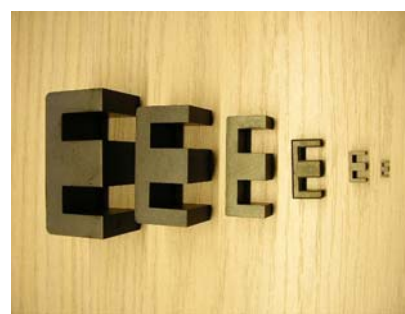
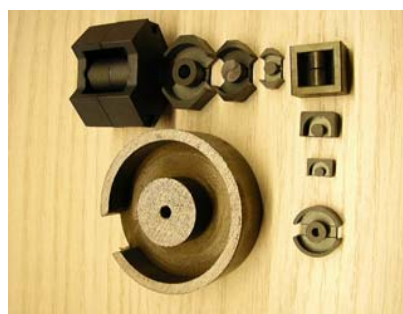
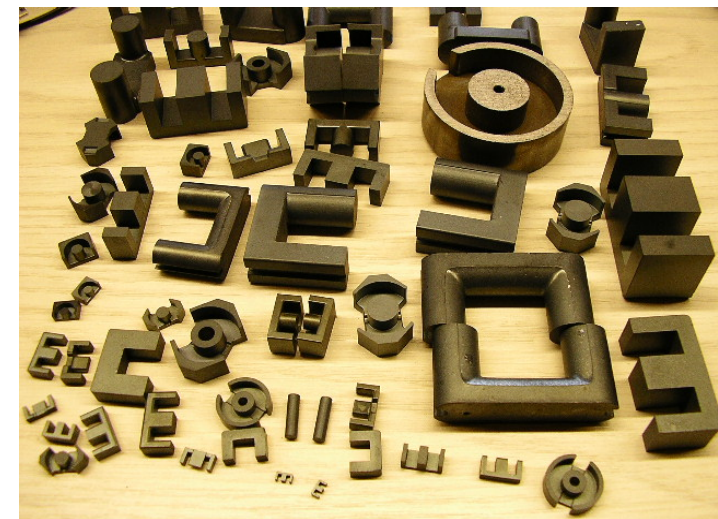
oder Kompositkerne

Bestehend aus Eisenpulver/Permalloy und Ferrit

oder Metallpulverkern mit Isolation

Reineisenpulver mit Isolation

Molybdän-Permalloy-Pulver z.B. 81Ni17Fe2Mo

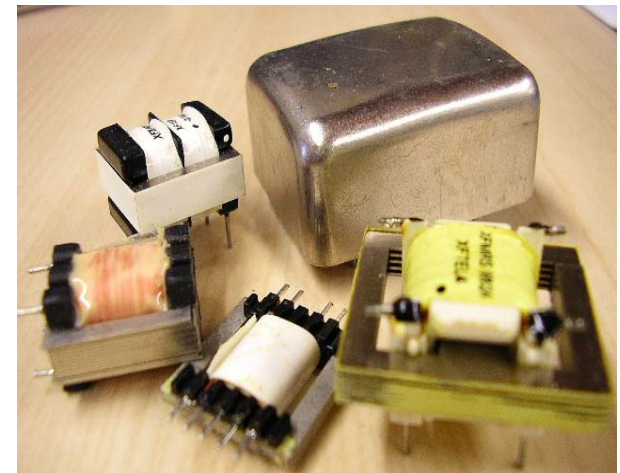


Welches Material hat sich wofür bewährt:

Eisen, Nickel, oder Kobalt bzw. Kombinationen
NF-Bereich bis 200 kHz.

Transformatoren	hohe Sättigungsmagnetisierung J_S	Fe + 0,5 – 5 Si
Motoren	geringe Koerzitivfeldstärke H_C	Fe + 30 – 35 Co
Generatoren	Permeabilität < 6000	
Bandkerne	VME111 $\mu = 15\ 000$, $\mu_i = 3\ 000$, $B_S = 1,50\ T$	
NF-Übertrager	Linearität der B/H-Kennlinie	Mumetall FeNi76
Stromsensoren	Die Arbeitsfrequenz ist von der	Fe + Ni
Drosseln	Blechdicke und Induktion abhängig	Fe + Ni + Co
Telekom	Hohe Permeabilität bis $\mu = 150\ 000$	
Audio	Fe + 76% Ni $\mu = 150\ 000$, $\mu_i = 60\ 000$, $B_S = 0,77\ T$	
Audio-Bahn (110V)	Fe + 50% Ni $\mu = 45\ 000$, $\mu_i = 5\ 000$, $B_S = 1,55\ T$	
NF-Filter	Fe + 36% Ni $\mu = 15\ 000$, $\mu_i = 3\ 000$, $B_S = 1,20\ T$	
Abschirmung	sehr hohe Anfangspermeabilität μ_i	Mumetall FeNi76
NF-Schirm	und Wirbelstromverluste	Fe + Co, Fe + Si
Dauermagnete	B+H möglichst groß	Fe+Co+Ni+Al+Cu
eigentlich Ferrite	Die Magnetisierung erfolgt einmalig bei der Herstellung.	BaO 6Fe ₂ O ₃ Sm+Co, NdFeB
Informationsspeicher	rechteckige B/H-Kennlinie	Fe + Ni, Mg-Mn-Ferrite Granatschichten

Die Verluste sind hier hauptsächlich auf Hysterese (Wandverschiebungen),
Wirbelströme (Leitfähigkeit des Kernmaterials) und Atomverschiebungen verursacht



Ferrite

Ferrite sind aufgrund ihrer Flexibilität universell einsetzbar. Durch den Effektivitätsvorteil werden konventionelle Netzteile durch Schaltnetzteile ersetzt. Wirkungsgrad von linearen Netzteilen ab 20-40 %. Auch die Gewichtseinsparung ist ein wichtiges Kriterium. Die Permeabilität der Ferrite ist so hoch verfügbar, dass auch hochwertige NF-Trafos anstatt mit Mumetal, mit Ferriten (z.B.T38) realisiert werden können. Die Anwendungsmöglichkeiten, Formen und Eigenschaften sind sehr umfangreich. Ein weiterer Vorteil ist der relativ hohe ohm'sch Widerstand (< Wirbelstromverluste). Die Curie-Temperatur muss ab ca. 100°C beachtet werden.

Nickel/Zink, NiZn ($\rho > 10^2 \Omega\text{m}$) $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 50\%$, $\text{NiO} > 10\%$, $\text{ZnO} > 10\%$
 Relativ niedrige Wirbelstromverluste, Die Magnetostriktion ist bei Nickel stärker
 Frequenzbereich bis $> 1 \text{ GHz}$

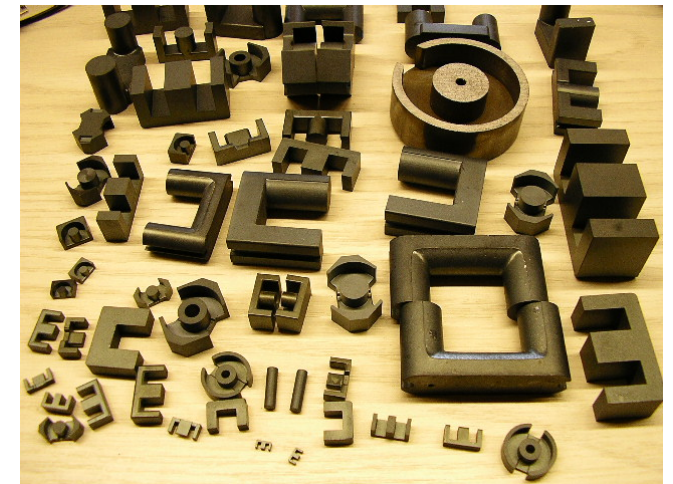
- Leitungsdämpfung und Unterdrückung von HF-Schwingungen/Störungen
- MW/UKW-Filter
- Baluns, Hochfrequenzübertrager
- HF-Enstörbauteile
- Abschirmplatten

Mangan/Zink, MnZn

Frequenzbereich bis ca. 40 MHz

Relativ hohe Wirbelstromverluste (spezi. Widerstand $\rho < 20 \Omega\text{m}$)

- Breitbandübertrager
- Leistungsübertrager
- Impedanz und Anpassungsübertrager
- Drosseln
- Stromkompensierte Drosseln
- Stromwandler



Die Verluste werden hauptsächlich durch Wirbelströme (Leitfähigkeit des Kernmaterials) und Elektronenplatzwechsel im Kristall verursacht. Auch beim Kernmaterial tritt der Skineneffekt auf (Verdrängung an die Oberfläche=>Eisenpulver)

Magnetische Bauteile von G.Schindler

Komposit-Kerne, FPC-Kerne

Diese Kerne bestehen aus 2 Komponenten – Ferrit und Eisenpulver.

Das bietet eine hohe Permeabilität (Induktivität) bei kleiner Aussteuerung und niedriger Frequenz durch den Ferritanteil und hohe Feldstärken durch den isolierten Eisenpulveranteil.

Die Alterung ist temperatur- und feldstärkeabhängig !

Eisenpulverkerne

Metallpulver mit isolierendem Bindemittel gepresst, erlaubt hohe Sättigungsmagnetisierung und Feldstärken. Die Wirbelströme (Skineneffekt) sind durch die elektrisch, isolierten Pulverteile, wie bei sehr dünnen Blechen gering – geringe Leitfähigkeit.

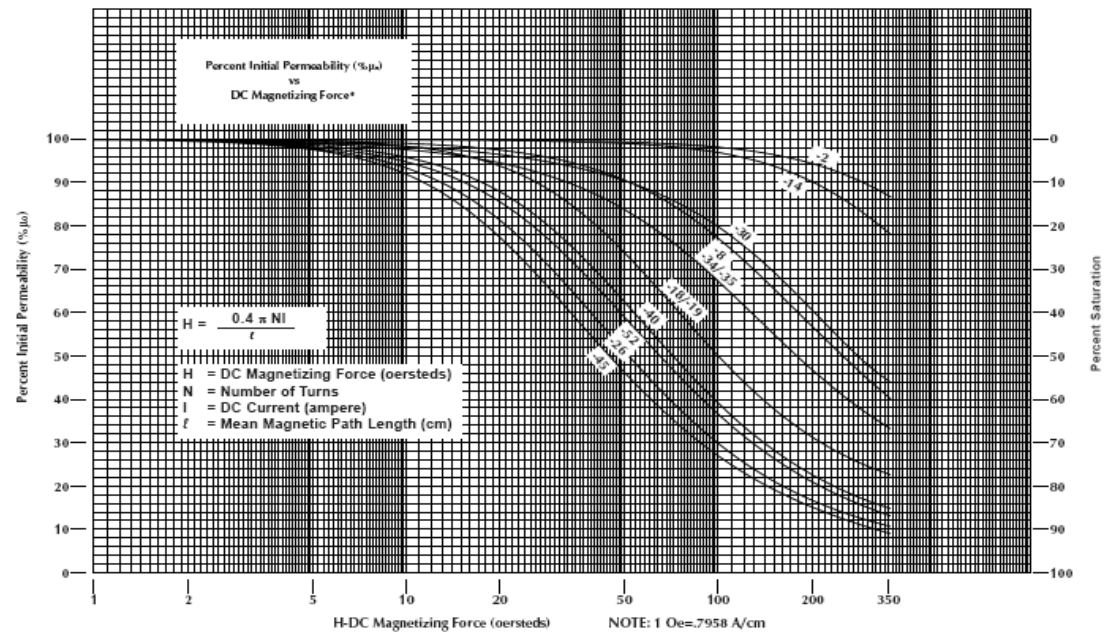
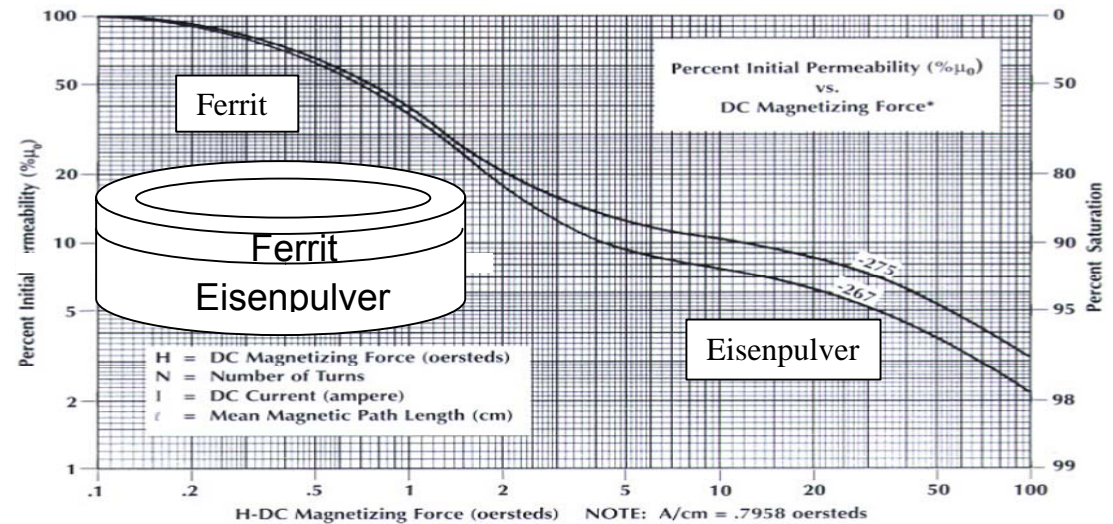
Die Alterung ist temperatur- und feldstärkeabhängig !

Weitere Ferritmaterialien müssen passend zur Applikation nach technischen Daten ausgewählt werden. Dies sind FeO₃, Al-Mischungen, Granate usw. Auch FPC Verbundwerkstoffe aus Kunststoff und Ferrit sind für unterschiedliche Applikationen verfügbar.

Luftspulen (ohne Kernmaterial)

Bei Luftspulen sind hohe Güten (Q bis 400) erreichbar Keine Sättigung durch Kernmaterialien

Der Strom ist durch den Draht begrenzt (Querschnitt, Temperatur, Wirbelströme, Skin-, Proximityeffekt usw.)



Übersicht über weichmagnetische Werkstoffe

Material	Zusammensetzung	Satt.-Induktion B_S T, Vs/m ²	Koer.Feldstärke H_C A/m	Permeabilität μ_{max}	
reines Eisen	Fe (100 %)	2,15	80	5 000	
Fe-Si nicht kornorientiert	Fe (96 %) Si (4 %)	1,95	40	7 000	
Fe-Si kornorientiert	Fe (97 %) Si (3 %)	2,0	8	40 000	
Permalloy 78	Ni (78 %) Fe (22 %)	1,08	4	100 000	
Superpermalloy	Ni (79 %) Fe (16 %) Mo (5 %)	0,8	0,16	500 000	
Mumetal	Ni (77 %) Fe (16 %) Cu (5 %) Cr (2 %)	0,65	4	150 000	
Permendur	Fe (50 %) Co (50 %)	2,45	160	5 000	
Eisenpulver	Fe, Ni, Mo... Bindemittel	< 1,5	100 -1000	300	
Ferrit	NiZn MnZn	0,15 – 0,3 0,20 – 0,5	10 – 2 000 5 – 100	10 – 3 500 300 – 18 000	

Warum werden Ferrite verwendet?

Keramisch hergestellte magnetische Werkstoffe finden immer weitere Einsatzgebiete. Ferrite oder Ferrospinelle (alte Bezeichnung) sind universell einsetzbar. Weichmagnetische Ferrite kommen als Kernwerkstoff für Spulen, Übertrager, Sensoren und zahlreichen andere Anwendungen in Frage, die früher hochpermeablen und fein lamellierten Blechen und Pulverkernen vorbehalten waren. Hartmagnetische Verbindungen finden als Dauermagnete Anwendung.

Das Einsatzgebiet weichmagnetischer Werkstoffe reicht von der Nieder- bis zur Hochfrequenztechnik. Die allgemeinen **Forderungen** sind **niedere Verluste** und **hohe Permeabilität**.

Bei metallischen Kernmaterialien treten starke frequenzabhängige Wirbelstromverluste auf. Sie entstehen durch Ströme, die das magnetische Wechselfeld in den leitenden Bereichen des Kerns induziert. Die Grenzfrequenz f_g hängt vom spezifischen Widerstand ρ , der Blechdicke d und der Permeabilität μ ab.

Zusammenhang:

$$f_g := \frac{\rho \cdot 10^8}{\mu \cdot d^2}$$

f_g = Grenzfrequenz
 ρ = spezifischer Widerstand (rho) $\Omega \text{ cm}$
 μ = Permeabilität Vs/Am bzw. $\Omega\text{s/m}$
 d = Blechdicke in cm

Durch feinere Lamellierung, Verkleinerung von d , kann man zwar die Grenzfrequenz heraufsetzen, aber Bleche, dünner als 0,03 mm kann man nicht mehr wirtschaftlich herstellen. Auch nimmt wegen der notwendigen Isolation zwischen den Lamellen der Füllfaktor und damit die auf den Kern-Gesamtquerschnitt bezogene Permeabilität stark ab.

Das Prinzip der Unterteilung führte folgerichtig zu den Pulver- und Permalloykernen. Bei diesen Kernen wird hauptsächlich Karbonyleisen o.ä. durch Bindemittel zusammengehalten. Es lassen sich kugelige Teilchen von etwa 1 μm Durchmesser herstellen, die gut voneinander isoliert (Luftspalte) werden können. Hierdurch ist aber eine Scherung der Permeabilität und eine Verkleinerung des Füllfaktors verbunden. Daher wirkt sich eine Vergrößerung der Kornpermeabilität erst bei großen Füllfaktoren merklich auf die Permeabilität eines Kerns aus. Da wegen der Isolation die Größe des Füllfaktors begrenzt ist liegt die höchste erreichbare Permeabilität μ bei Pulverkernen in der Größenordnung von ca. 300.

Magnetische Bauteile von G.Schindler

Ein weiterer Weg zur Erhöhung der Grenzfrequenz wäre eine Vergrößerung des spezifischen Widerstandes ρ . Dieser beträgt bei reinem Eisen etwa $10^{-5} \Omega\text{cm}$. Durch Herstellung einer Eisen-Chrom-Aluminium-Legierung konnte man jedoch nur eine Verbesserung um den Faktor 15 erzielen. Bereits 1909 wurde von Hilbert erkannt, dass gewisse Ferrite, also nichtmetallische, oxydische Stoffe, einen hohen spezifischen Widerstand (ρ bis zu $10^8 \Omega\text{cm}$) besitzen.

Das ist ein Faktor von 10^{13} größer, als bei Eisen. Allerdings dauerte es noch Jahrzehnte, bis für die Industrie wirklich brauchbare Ferrite verfügbar waren. Diese Stoffe sind dann bei hohen Frequenzen verwendbar, vor allen durch wesentlich geringere Wirbelstromverluste (eddy current).

Heute werden hauptsächlich MnZn - und NiZn-Ferrite eingesetzt. Diese Kerne sind von unterschiedlichen Herstellern mit ähnlichen technischen Daten austauschbar verfügbar => second Source.

Allgemeine physikalische Eigenschaften von Ferriten:

- Gewicht: 2-5g/cm³
- Zugfestigkeit: 15 – 30 N/mm²
- Druckfestigkeit: 50- 200 N/mm²
- Vickershärte HV: 500 – 10000 N/mm²
- Elastizitätsmodul E: 10 – 20 • 10⁴ N/mm²
- Bruchzähigkeit K: 0,5 – 1,5 N/m²
- Curietemperatur: 100 – 500°C
- Spezifische Wärme: 0,5 – 0,9 J/g • K
- Wärmeleitfähigkeit 3 – 8 • 10⁻³ J • s • K
- Linearer Ausdehnungskoeffizient: 5 – 10 • 10⁻⁶/ K
- Spezifischer Widerstand ρ : 10¹ – 10⁹ Ωcm frequenzabhängig
- Dielektrische Konstante ε : 10¹ - 10⁶ frequenzabhängig
- Elektrische Durchschlagsfestigkeit 0,1 - 2 kV/mm frequenzabhängig
- Beständigkeit gegen Strahlen (Gamma, Neutronen)

Elektrische Verluste magnetischer Bauteile

Die Verluste sind abgesehen vom ohmschen Widerstand R_{CuDC} des Drahtes **frequenzabhängig**.

Die Kupferverluste werden bestimmt durch:

Draht, Temperatur, Wickeltechnik, Spannung, Strom

Kupferverluste:

Wicklungsverluste ($f = 0$, ohmscher Widerstand R_{CuDC})

Wirbelstromverluste der Wicklung (Skineneffekt, Proximity) $R_{Cu(f)}$
temperaturabhängige Verluste

Die Kernverluste werden bestimmt durch:

Kernmaterial, Kernform, Luftspalt, Temperatur, Lage der Wicklung

Abstand der Wicklung zum Kern, Feldstärke, Induktion, Signalform, Umgebung(Einbauart)

Kernverluste: $R_{K(f)}$

Hystereseverluste

Wirbelstromverluste R_W

temperaturabhängige Verluste

Nachwirkungsverluste

Zusätzliche Verluste

Dielektrische Verluste $R_{(De)}$

Gyromagnetische Verluste

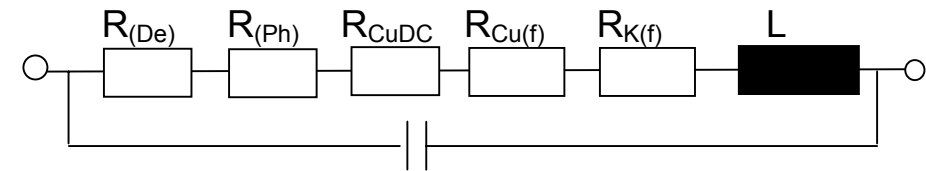
Verluste durch Abschirmung $R_{(As)}$

Verluste durch Peripherie (R_{Ph})

Dielektrische, Verluste, Verluste durch Wirbelströme in der Abschirmung

Der Verlustfaktor $\tan \delta$ für Kernmaterialien in Abhängigkeit von der Frequenz fasst diese Verluste zusammen und stellt einen Anhaltspunkt dar. Mit steigender Temperatur nehmen die Verluste, je niedriger die Curietemperatur ist, stärker zu. Auch müssen bei nicht perfekter Sinus-Welle, die Oberwellen separat betrachtet werden.

Bei einem Rechtecksignal muss noch die 7. Oberwelle (K7) mit relativ geringen Verlusten übertragen werden.



Ersatzbild

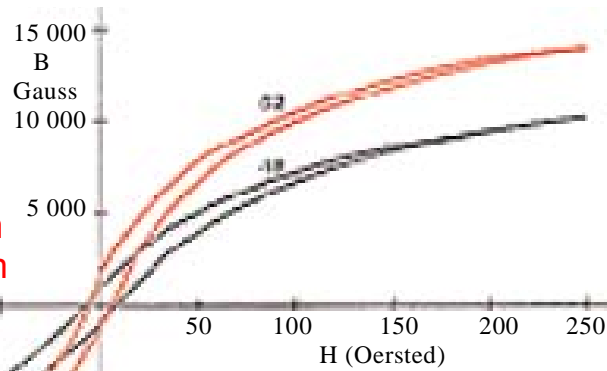
C (Summe)
Parallelresonanzkreis

Magnetisierungskurven von Industrie-Kernmaterialien (MicroMetals, FerroxCube, Epcos, VAC)

Micrometals

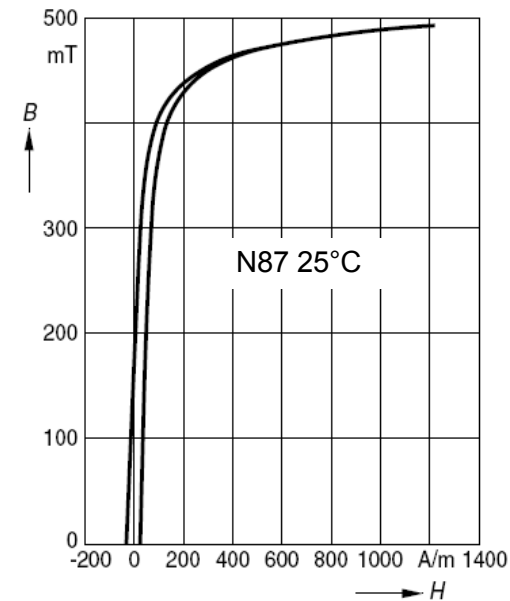
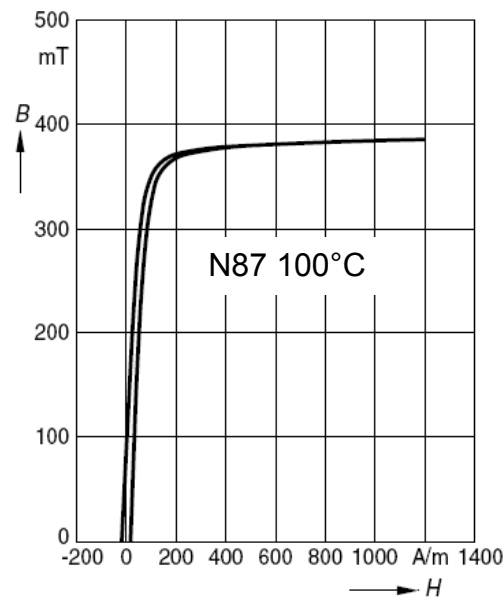
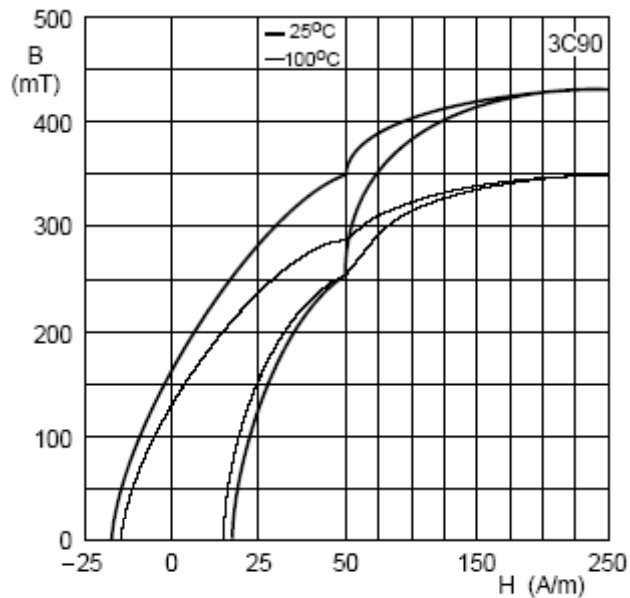
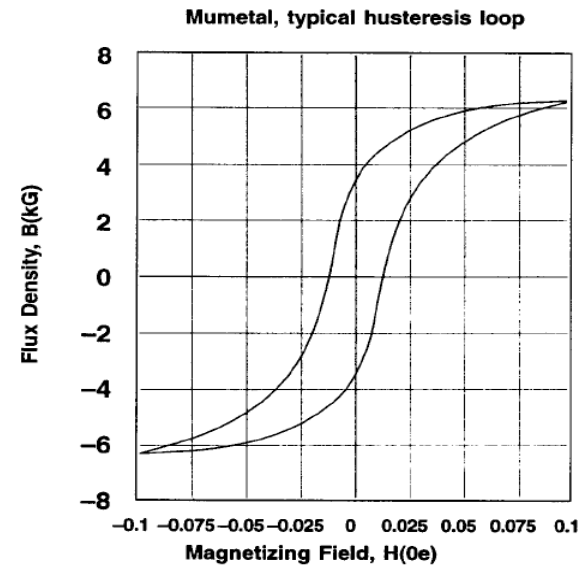
Material 52

$B_m = 14\ 000\ \text{G} / 1,4\ \text{T}$
 $B_r = 1\ 450\ \text{G} / 145\ \text{mT}$
 $H_m = 250\ \text{Oe} / 20\ \text{kA/m}$
 $H_c = 6.3\ \text{Oe} / 500\ \text{A/m}$



Material 18

$B_m = 10\ 300\ \text{G} / 1,03\ \text{T}$
 $B_r = 940\ \text{G} / 94\ \text{mT}$
 $H_m = 250\ \text{Oe} / 20\ \text{kA/m}$
 $H_c = 8,1\ \text{Oe} / 640\ \text{A/m}$



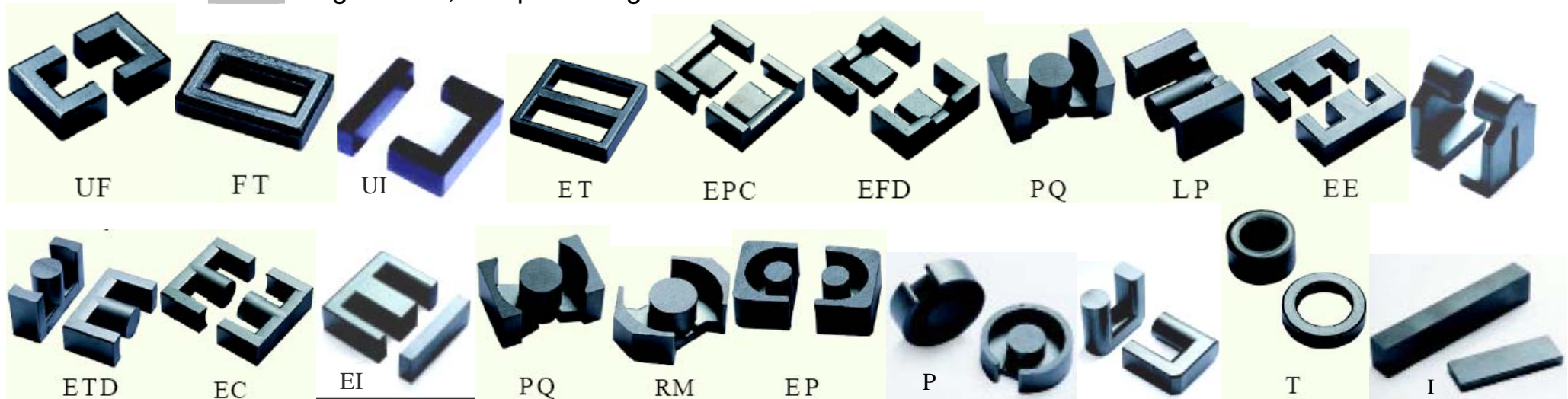
Werkstofftabellen nach EPCOS

Bevorzugte Anwendung			Resonanz- kreise	Leitungs- dämpfung	Leistungs-Übertrager			Breitband-Übertrager	
Werkstoff			K1	M33	N27	N87	N41	T38	T46
Material			NiZn	MnZn	MnZn	MnZn	MnZn	MnZn	MnZn
	Symbol	Einheit							
Anfangspermeabilität (T = 25°C)	μ_i		80 ± 25%	750 ± 25%	2 000 ± 25%	2 200 ± 25%	2 800 ± 25%	10 000 ± 30%	15 000 ± 30%
Messfeldstärke Induktion (nahe Sättigung) 10 kHz	H	A/m	5 000	2 000	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
	B_s 25°C	mT	310	400	500	480	490	380	400
	B_s 100°C	mT	280	310	410	380	390	240	240
Koerzitivfeldstärke (f = 10kHz)	H_c 25°C	A/m	380	80	23	16	22	9	7
	H_c 100°C	A/m	350	65	19	9	20	6	6
Günstiges Frequenzgebiet	1/s	kHz	1 500 ... 12 000	200 ... 1 000	25... 150	25... 500	25... 150	-- --	
Bezogener bei f_{min} Verlustfaktor bei f_{max}	$\tan \delta / \mu_i$	10^{-6} 10^{-6}	< 40 < 120	< 12 < 20					
Hysteresematerialkonstante	η_B	$10^{-6} / \text{mT}$	< 36	< 1,8	< 1,5	< 1,4	< 1,4	< 1,4	< 2,0
Curietemperatur	T_C	°C	> 400	> 200	> 220	> 220	> 220	> 130	> 130
Bezogener Temperaturbeiwert Bei 25 ... 55°C Bei 5 ... 25°C	α_F	$10^{-6} / \text{K}$	2 ... 8 7 ... 1	0,5...2,6 --					
Mittelwert von α_F Bei 25 ... 55 °C		$10^{-6} / \text{K}$	4	1,6	3	4	4	-0,4	-0,6
Dichte (Richtwert)	ρ	Kg/m^3	4650	4 500	4 750	4 800	4 800	4 900	5 000
Desakkomodationfaktor Bei 25 °C	DF	10^{-6}	20	8					
Spezifischer Gleichstromwiderstand	ρ	Ωm	10^5	5	3	8	2	0,1	0,01

Vergleichsliste Ferritmaterialien

Materialgruppe	kleine Verluste (Resonanzdrosseln)			hoch permeabel (Drosseln, Datenübertragung)					Leistung (Standardanwendungen für Schaltnetzteile)					
Permeabilität μ_i	750	2200	2200	4300	6000	10000	12000	15000	3000	2000	2300	2200	2200	1300
Epcos	M33	N26	N48	N30	T35	T38	T42	T46	N41	N27	N67	N87	N97	N49
Ferroxcube	3D3	3H1	3H3	2C11	3E25	3E5	3E6	3E7	3C81	3C80	3C85	2C90	3C96	3F35
Iskra	10G	16G	26G	19G	22G	12G	32G	52G	25G	15G	45G	35G	65G	75G
Magnetics	A	D	G	T	J	W			F		P			K
TDK	H6F	H6B	H6K	5H5	H5B	H5C2					PC30	PC40		PC47
FDK	3H1	3H21	3H20	2H04	2H06	2H10		2H15			6H10	6H20	6H40	
Würth											TP3	TP4		

 vergleichbar, entspricht ungefähr



Kernformen

Analogien zwischen elektrischem Stromkreis, elektrischem Feld und magnetischem Feld

Stromkreis	Einheit	Elektrisches Feld	Einheit	Magnetisches Feld	Einheit
Spannung Strom Widerstand	 V A Ω; V/A	Ladung Spannung Kapazität	 As V F; As/V	Durchflutung Magn. Fluss M. Widerstand	 A Vs A/Vs; 1/Ωs
Spannung Strom Ohm. Widerstand $R=I/A; R=U/I$	U I R Ω; V/A	Spannung Ladung Kapazität $C=\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A/d; C = Q / U$	U Q C F; As/V; s/Ω	Durchflutung Magn. Fluss Magn. Widerstand $R_m=I/ \mu_0 \cdot \mu_r \cdot A_e$ Induktivität $L = N^2/R_m ; L = (N \cdot \Phi) / I$ Magn. Induktion Magn. Leitwert Feldstärke $H = N \cdot I / l; \Phi / l$ Magn. Induktion $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \Phi / A$ Magn. Feldkonstante Relative Permeabilität Zeitkonstante $\tau = L/R$ Ringspule $L = (N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot A_e) / l$ Teildurchflutungen im Kreis $\Theta = R_m \cdot \Phi$	A Vs A/Vs; 1/Ωs H; Vs/A; Ωs Vs/m ² , T, G Vs/A; Ωs A/m; Oe Vs/m ² , T; G Vs/Am, 4·π nH/cm -- s H; Vs/A A; Ωs;
Stromdichte Ohm. Leitwert	S G A/m ² S; A/V; 1/Ω	Verschiebungsdichte Feldstärke $E = U / d$ Fussdichte $D = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E = Q/A$ Elektr. Feldkonstante Relativitätszahl Zeitkonstante $\tau=R C$ Plattenkondensator $C = (\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A) / d$	D E D ε ₀ ε _r τ C F; As/V	Magn. Induktion Magn. Leitwert Feldstärke Magn. Induktion Magn. Feldkonstante Relative Permeabilität Zeitkonstante Ringspule Teildurchflutungen im Kreis $\Theta = R_m \cdot \Phi$	Vs/m ² , T, G Vs/A; Ωs A/m; Oe Vs/m ² , T; G Vs/Am, 4·π nH/cm -- s H; Vs/A A; Ωs;
Spezifischer Widerstand ρ	Ωm	Elektr. Feldkonstante Relativitätszahl Zeitkonstante $\tau=R C$ Plattenkondensator $C = (\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A) / d$	ε ₀ ε _r τ C F; As/V	Magn. Feldkonstante Relative Permeabilität Zeitkonstante Ringspule Teildurchflutungen im Kreis $\Theta = R_m \cdot \Phi$	Vs/Am, 4·π nH/cm -- s H; Vs/A A; Ωs;
Teilspannungen im Kreis $U = R \cdot I$	V; Ω; A	Feldenergie $W = \frac{1}{2} C \cdot U^2 = \frac{1}{2} Q \cdot U$ $W = \frac{1}{2} E^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot d$	W J; Ws	Feldenergie $W = \frac{1}{2} L \cdot I^2 = \frac{1}{2} \Phi \cdot I_{ges}$ $W = \frac{1}{2} H^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot A \cdot l$	J; Ws

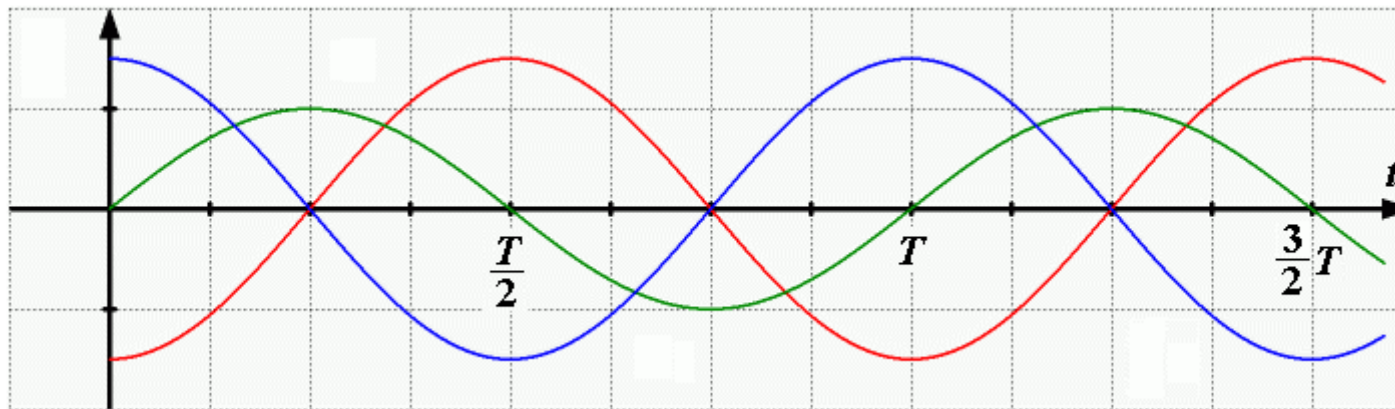
Weitere Vergleiche sind möglich!

Vergleich elektrischer Schwingkreis mit mechanischem Pendel

Dieser Vergleich zeigt, dass die magnetische Größen mit den entsprechenden elektrischen Größen durch den Austausch von zumeist V und A übereinstimmen. Das ist der enge Zusammenhang. Ähnliche Zusammenhänge finden wir aber auch bei anderen Gebieten wie Kinematik, Dynamik, Thermodynamik, Gravitation und Atomphysik.

Kondensatorspannung (bzw. **elektrischer Feldstärke**), **Spulenspannung** und **mechanische Schwingung** und **Stromstärke** (bzw. **magnetischer Flussdichte**) bei der elektrischen Schwingung:

Die gleichen Graphen gelten im mechanischen Fall für **Elongation**, **Geschwindigkeit** und **Beschleunigung** (bzw. **Kraft**).



Einheiten:

elektrischer Schwingkreis

Induktivität: $L = \text{H}; \text{Vs/A}; \Omega\text{s}$

Kapazität: $C = \text{F}; \text{As/V}; 1/\Omega\text{s}$

Physikalisches Pendel

Länge: $l = \text{m}$

Schwere: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

-beschleunigung

Schwingkreis elektrisch

$$f_0 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad t_0 := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$$

Schwingkreis Pendel

$$f_0 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}} \quad t_0 := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Kernverluste unterschiedlicher Ferritmaterialien bei 100 °C

Applikationen für Schaltregler ab 100 kHz

Frequenz	Material	f _o kHz	μ _e , μ _i 25°C	B _{sat} mT bei 1200 A/m	T _c °C	Kernverluste in mW/cm ³ , B _s in mT								
						200	100	80	60	40	20	10	5	
100 kHz	Ferroxcube 3C90	< 200	2300	≈470	≥ 220									
	Ferroxcube 3C30	< 200	2100	≈500	≥ 240									
	Ferroxcube 3C92	< 200	1500	≈520	≥ 280									
	Ferroxcube 3C91	< 300	3000	≈470	≥ 220									
	Ferroxcube 3C93	< 300	1800	≈500	≥ 240									
	Ferroxcube 3C94	< 300	2300	≈470	≥ 220									
	Ferroxcube 3C34	< 300	2100	≈500	≥ 240									
	Ferroxcube 3C96	< 400	2000	≈500	≥ 240	370	45	22						
	Ferroxcube 3F3	< 700	2000	≈440	≥ 200	500	72	40	20					
	Ferroxcube 3F35	< 1000	1400	≈500	≥ 240									
	Ferroxcube 3F4	< 2000	900	≈410	≥ 220		200	100	40					
	Ferroxcube 3F45	< 2000	900	≈420	≥ 300									
	Ferroxcube 3F5	< 4000	650	≈380	≥ 300									
	Ferroxcube 4F1	<10000	80	≈320	≥ 260									
	EPCOS N67	< 200	2100											
	EPCOS N87	< 300	2200			370	50		10		1			
	EPCOS N92					400	55		9					
	EPCOS N97					300	41		8					
	EPCOS N49					720	82		15		1			
	Magnetics K					700	95	42	20	5				
	Magnetics F					700	110	65	30	9				
	TDK PC40					400	70	42	20					

Frequenz	Material	f _o kHz	μ _e , μ _i 25°C	B _{sat} mT bei 1200 A/m	T _c °C	Kernverluste in mW/cm ³ , Bs in mT								
						200	100	80	60	40	20			
200 kHz	Ferroxcube 3C90	< 200	2300	≈470	≥ 220									
	Ferroxcube 3C30	< 200	2100	≈500	≥ 240									
	Ferroxcube 3C92	< 200	1500	≈520	≥ 280									
	Ferroxcube 3C91	< 300	3000	≈470	≥ 220									
	Ferroxcube 3C93	< 300	1800	≈500	≥ 240									
	Ferroxcube 3C94	< 300	2300	≈470	≥ 220									
	Ferroxcube 3C34	< 300	2100	≈500	≥ 240									
	Ferroxcube 3C96	< 400	2000	≈500	≥ 240		170	95	42					
	Ferroxcube 3F3	< 700	2000	≈440	≥ 200		210	120	60	22				
	Ferroxcube 3F35	< 1000	1400	≈500	≥ 240									
	Ferroxcube 3F4	< 2000	900	≈410	≥ 220		430	230	100	30				
	Ferroxcube 3F45	< 2000	900	≈420	≥ 300									
	Ferroxcube 3F5	< 4000	650	≈380	≥ 300									
	Ferroxcube 4F1	<10000	80	≈320	≥ 260									
	EPCOS N67	< 200	2100											
	EPCOS N87	< 300	2200			1200	180		35		4			
	EPCOS N92					1100	200		35		3			
	EPCOS N97					900	140		40		4			
	EPCOS N49					2000	200		30		3			
	Magnetics K													
	Magnetics F					2000	380	200	95	30				
	TDK PC40					1100	200	100	40					
	TDK PC50					3000	340	160	80	22				

Frequenz	Material	f _o kHz	μ _e , μ _i 25°C	B _{sat} mT bei 1200 A/m	T _c °C	Kernverluste in mW/cm ³ , B _s in mT								
						200	100	80	60	40	20	10	8	6
500 kHz	Ferroxcube 3C96	< 400	2000	≈500	≥ 240		1400	800	380	135				
	Ferroxcube 3F3	< 700	2000	≈440	≥ 200		800	480	220	90	18			400 kHz
	Ferroxcube 3F35	< 1000	1400	≈500	≥ 240									
	Ferroxcube 3F4	< 2000	900	≈410	≥ 220		1000	520	250	70				
	Ferroxcube 3F45	< 2000	900	≈420	≥ 300		900	450	200	62				
	Ferroxcube 3F5	< 4000	650	≈380	≥ 300									
	Ferroxcube 4F1	<10000	80	≈320	≥ 260									
	EPCOS N87	< 300	2200				1100		280		35			
	EPCOS N92						1100		300		35	10		
	EPCOS N97						950		300		35	8		
	EPCOS N49						740		100		12	2		
	Magnetics K						900	410	180	42	5			
	Magnetics F						1500	900	500	180	35	8		
	TDK PC40						1100	670	320					
	TDK PC50						1500	620	230	55	5			
700 kHz	Ferroxcube 3F35	< 1000	1400	≈500	≥ 240									
	Ferroxcube 3F4	< 2000	900	≈410	≥ 220		2000	1000	350	53				
	Ferroxcube 3F45	< 2000	900	≈420	≥ 300		1050	500	180	30				
	Ferroxcube 3F5	< 4000	650	≈380	≥ 300		1050	500	180	28				
	Ferroxcube 4F1	<10000	80	≈320	≥ 260									
	EPCOS N92						5500		1500		200	50		
	EPCOS N97								1000		200	45		
	EPCOS N49						2500		500		60	14		
	Magnetics K							2050	950	250	30			
	Magnetics F								1850	750	180	40	22	12

Frequenz	Material	f _o kHz	μ _e , μ _i 25°C	B _{sat} mT bei 1200 A/m	T _c °C	Kernverluste in mW/cm ³ , Bs in mT								
						200	100	80	60	40	20			
	TDK PC50						7500	3500	1800	500	60	8		
1 MHz	Ferroxcube 3F4	< 2000	900	≈410	≥ 220					2000	400	85	52	27
	Ferroxcube 3F45	< 2000	900	≈420	≥ 300					1100	250	55	32	18
	Ferroxcube 3F5	< 4000	650	≈380	≥ 300					710	150	32	20	
	Ferroxcube 4F1	<10000	80	≈320	≥ 260					4200	500	70	30	12
	Magnetics K													
3 MHz	Ferroxcube 3F4	< 2000	900	≈410	≥ 220						1200	290	180	100
	Ferroxcube 3F45	< 2000	900	≈420	≥ 300									
	Ferroxcube 3F5	< 4000	650	≈380	≥ 300					1750	400	100	60	35
	Ferroxcube 4F1	<10000	80	≈320	≥ 260						650	150	100	55
	Magnetics K										3200	450	210	90
5 MHz	Ferroxcube 4F1	<10000	80	≈320	≥ 260						1200	300	180	100
10 MHz	Ferroxcube 4F1	<10000	80	≈320	≥ 260									
												850	450	220

Liste wird erweitert

Abkürzungen

A	magnetische Fläche bzw. Spulenquerschnitt	[mm ² ; cm ² , m ² , inch ²]
A _e	effektiver magnetischer Querschnitt	[mm ² , cm ² , m ² , inch ²]
A _L	Induktivitätsfaktor, AL = L/N ²	[nH, Vs/A x 10 ⁻⁹]
A _{L1}	Mindestinduktivitätswert bei vorgegebener Aussteuerung B = Applikationsabhängig, aber Standard ist Sinus	[nH, Vs/A x 10 ⁻⁹]
A _{min}	Minimaler Kernquerschnitt	[mm ² ; cm ² , m ² , inch ²]
A _N	Wickelquerschnitt	[mm ² ; cm ² , m ² , inch ²]
A _R	Widerstandsfaktor, AR = R _{cu} /N ²	[μΩ, 10 ⁻⁶ Ω]
a	Dämpfung	[Verhältnis; dB]
a	Beschleunigung	[m/ s ²]
α	Temperaturbeiwert TK	[1/K]
α _F	bezogener Temperaturbeiwert des Werkstoffs	[1/K]
α _E	Temperaturbeiwert der effektiven Permeabilität	[1/K]
B	Stromverstärkung	[Verhältnis; dB]
B	Bandbreite	[Hz]
B	magnetische Flussdichte / magnetische Induktion 1 T (Tesla) = 1 Vs/m ² = 10 ⁻⁴ Vs/cm ² = 10 ⁴ G 1 G (Gauss) = 100 μT = 10 ⁻⁸ Vs/cm ²	[T, Vs/m ² ; Vs/cm ²] [T (Tesla), mT, Vs/m ² , G(Gauss)]
ΔB	Hub der Flussdichte	[T (Tesla), mT, Vs/m ² , G(Gauss)]
B [^]	Scheitelwert der magn. Flussdichte, Induktion	[T (Tesla), mT, Vs/m ² , G(Gauss)]
ΔB [^]	Scheitelwert der Hubs der Flussdichte, Induktion	[T (Tesla), mT, Vs/m ² , G(Gauss)]
B ₋	Gleichfeldflussdichte, Gleichstrommagnetisierung	[T (Tesla), mT, Vs/m ² , G(Gauss)]
B _R	Remanente Flussdichte, Induktion	[T (Tesla), mT, Vs/m ² , G(Gauss)]
B _S	Sättigungsmagnetisierung, Sättigungsinduktion	[T (Tesla), mT, Vs/m ² , G(Gauss)]
B	Blindleitwert	[S; A/V; 1/Ω]

Magnetische Bauteile von G.Schindler

B_C	kapazitiver Blindleitwert	[S; A/V; $1/\Omega$]
B_L	induktiver Blindleitwert	[S, A/V; $1/\Omega$]
C_0	Wicklungskapazität	[F, As/V]
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum $c_0 = 2,99792458 * 10^8$ [m/s]	[m/s]
CDF	Klirrfaktor	
D	elektrische Flussdichte, Verschiebungsdichte	[C/m ² (Coulomb)]
DF	Desakkommodationsbeiwert $DF=d/\mu_i$	
e	Elektrische Elementarladung; $e = 1,6021892 * 10^{-19}$	[As]
E	Elektrische Feldstärke	[V/m]
E_a	Aktivierungsenergie	[J, Ws, VAs]
ET	Feldstärke in Oe, Angabe in amerikanischen Unterlagen	[Oe, 79,58 A/m]
ET100	Feldstärke in Oe bei einer Induktion von 100 Gauss bzw. 10mT	[Oe, 79,58 A/m]
ϵ_0	absolute Dielektrizitätszahl im Vakuum $8,85418782 * 10^{-12}$ F/m	[F/m; As/Vm]
$\overline{\epsilon} \quad \epsilon' \quad \epsilon''$	komplexe Dielektrizitätskonstante, Real- und Imaginärteil	
ϵ_r	relative Dielektrizitätskonstante	
\vec{F}	Kraft zwischen zwei parallelen Leitern	[N; kg*m/s ²]
F	Kraft auf einen Leiter im homogenen Magnetfeld	[N; kg*m/s ²]
F	Faraday-Konstante, $F = 9,648456 * 10^4$	[C/mol]
F_{Cu}	Kupferfüllfaktor	
f	Frequenz	[Hz, 1/s]
f_0, f_R	Resonanzfrequenz	[Hz, 1/s]
f_{grenz}	Grenzfrequenz	
$f_{max}, f_{gro}, f_{go}, f_o$	obere Grenzfrequenz	[Hz, 1/s]
$f_{min}, f_{gru}, f_{gu}, f_u$	untere Grenzfrequenz	[Hz, 1/s]
G Gauss	Magnetische Flussdichte, Induktion 1 Gauss = 10^{-4} T = $10^{-4} \cdot Vs/m^2$	[Gauss, $10^{-4} \cdot Vs/m^2, T \cdot 10^{-4}$]
G	Ohm'scher Leitwert, elektrischer Leitwert, Wirkleitwert	[S; A/V; $1/\Omega$]

Magnetische Bauteile von G.Schindler

g		Luftspalt	[mm, inch]
η	eta	Wirkungsgrad eines Trafos	
η_B	eta	Hysteresematerialkonstante	[1/mT, 1/10G]
η_i	eta	Hysterekernkonstante	[A ⁻¹ H ^{-1/2}]
H		magnetische Feldstärke	[A/m, A/cm, Oe]
		1 A/m = 10 ² A/cm, 1 Oe = (1/0,4 · π) · 10 ² = 79,554 A/m	
		1 A/m = 0,4 · π · 10 ⁻² = 0,01257 Oe	
H [^]		Scheitelwert der magn. Feldstärke	[A/m, A/cm, Oe]
H ₋		Gleichfeldstärke Gleichstrommagnetisierung	[A/m, A/cm, Oe]
H _C		Koerzitivfeldstärke	[A/m, A/cm, Oe]
h		Hysteresebewert des Materials	[10 ⁻⁶ cm/A]
h/ μ_i^2		bezogener Hysteresebewert	[10 ⁻⁶ cm/A]
Θ	theta	Durchflutung	[A]
I		Stromstärke	[A]
I ₋		Gleichstromanteil	[A]
I [^]		Scheitelwert des Stromes	[A]
J		Polarisation	[Vs/m ² , T (Tesla)]
J, S		elektrische Stromdichte	[A/m ² , A/mm ² · 10 ⁻⁶]
K	Kelvin	thermodynamische Temperatur	[K]
		Absoluter Nullpunkt 0 K = -273,16 °C	
k		Bolzmannkonstante, k = 1,380662 * 10 ⁻²³	[J/K; Ws/K]
k		Gesamtklirrfaktor	
k ₁		Grundschiwingung, Grundwelle	
k ₂ ; k ₃ ... k _n		Teilkirrfaktoren, x. Harmonische	
		k bzw. k ₁ = Grundwelle, k ₂ , k ₃ ... = Oberwellen	
L		Induktivität (frequenzabhängig)	[H, Vs/A, Ω s, Wb/A]
$\Delta L/L$		relative Änderung der Induktivität	
L ₀		Induktivität der Spule ohne Kern	[H, Vs/A, Ω s]
L _H		Hauptinduktivität	[H, Vs/A, Ω s]

Magnetische Bauteile von G.Schindler

L_p		Primärinduktivität, Hauptinduktivität	[H, Vs/A, Ω s]
L_p		Parallelinduktivität	[H, Vs/A, Ω s]
L_{rev}		reversible Induktivität	[H, Vs/A, Ω s]
L_s		Streuinduktivität	[H, Vs/A, Ω s]
L_s		Serieninduktivität	[H, Vs/A, Ω s]
l_e		effektive magn. Weglänge, wirksame Feldlinienlänge	[m, cm, mm, inch]
l_N		mittlere Windungslänge	[m, cm, mm, inch]
Lw/DC		Induktivität mit Gleichstrombelastung	[H, Vs/A, Ω s]
Lw/oDC		Induktivität ohne Gleichstrombelastung	[H, Vs/A, Ω s]
Λ	lamda	magnetischer Leitwert	[1/H, A/V, 1/ Ω s]
λ, λ_0	lamda	Wellenlänge, Vakuumwellenlänge Bezogen auf Lichtgeschwindigkeit c/f	[m]
λ_s	lamda	Magnetostriktion bei Sättigungsmagnetisierung	
μ	my	relative komplexe Permeabilität	
μ_0	my	Magnetische Feldkonstante, Induktionskonstante $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 1,25663706 \cdot 10^{-6}$	[Vs/Am; T·m/A; Vs/Am] [Vs/Acm·10 ² , H/m]
μ_{app}		relative wirksame Permeabilität	
μ_a		relative Anfangspermeabilität	
μ_i		relative Anfangspermeabilität	
μ_e		relative effektive Permeabilität	
μ'_p		relativer Real-(Induktivitäts-)Anteil von $\bar{\mu}$	
μ''_p		relativer Imaginär-(Verlust-)Anteil von $\bar{\mu}$	
μ_r		relative Permeabilität – Faktor	
μ_{rev}		relative reversible Permeabilität	
μ'_s		relativer Real-(Induktivitäts-)Anteil von $\bar{\mu}$	
μ''_s		relativer Imaginär-(Verlust-)Anteil von $\bar{\mu}$	
μ_p, μ_n		Beweglichkeit von Ladungsträgern	[cm ² /Vs]

Magnetische Bauteile von G.Schindler

μ_{tot}		relative totale Permeabilität abgeleitet aus der statischen B/H.Magnetisierungskurve	
N		Windungszahl	
η	eta	Wirkungsgrad $\eta = P_a / P_i$	
η_B	eta	Hysterese materialkonstante	[10^{-6} /mT]
P		Leistung	[W, VA, J/s, Nm/s]
P_{Cu}		Kupferverlustleistung	[W, VA, J/s, Nm/s]
P_{trans}		übertragbare Leistung	[W, VA, J/s, Nm/s]
PF		Leistungsfaktor	
P_V		Kernverlustleistung	[W/g, mW/g]
ρ		spezifischer Gleichstromwiderstand	
Oe	Oersted	Feldstärke in Oersted $1 \text{ Oe} = 79,58 \text{ A/m} = (1/0,4 \cdot \pi) \cdot 10^2$	[Oe, A/m]
Q		Güte, Gütefaktor ($Q = \omega L / R_s = 1 / \tan \delta_L$)	
Q		Ladung im elektrischen Feld	[As, C Coulomb]
Q		Wärmemenge	[J, Nm, Ws]
Φ	phi	magnetischer Fluss	[Vs, W(Weber)]
σ	sigma	Dichte, Richtwerte zumeist für Kernmaterial	[g/cm ³ ; kg/m ³]
R		Widerstand	[Ω , V/A]
R_{Cu}		Kupferwiderstand (DC; $f = 0$) $R_{\text{Cu}} \text{ mm}^2/\text{m} = 0,01724 \text{ } \Omega \text{ bei } 20^\circ\text{C}$	[Ω]
R_h		Hysterese-Verlustwiderstand eines Kerns	[Ω]
ΔR_h		Änderung von R_h Hysterese-Verlustwiderstand eines Kerns	[Ω]
R_i		Innenwiderstand	[Ω]
R_P		Parallel-Verlustwiderstand eines Kerns	[Ω]
R_P		Parallelwiderstand allgemein	[Ω]
R_S		Serien-Verlustwiderstand eines Kerns	[Ω]
R_S		Serienwiderstand allgemein (Stromquelle, Spannungsquelle, Generator)	[Ω]

Magnetische Bauteile von G.Schindler

R_{th}		thermischer Widerstand	[K/W, K/VA]
R_V		effektiver Verlustwiderstand einer Spule	[Ω]
S		Stromdichte	[A/m ²]
s		Luftspalt	[mm]
$\Sigma I/A$		magnetischer Formfaktor	[1/mm]
T	Tesla	Magnetische Flussdichte, Induktion 1 T = 10 ⁴ Gauss, 1 Gauss = 10 ⁻⁴ Vs/m ² = 10 ⁻⁴ T	[T, Vs/m ² , Gauss · 10 ⁴]
ΔT		Temperaturdifferenz, °C ist proportional zu °K	[K]
T_C		Curietemperatur	[°C , K , R]
t		Zeit	[s]
t_V		Tastverhältnis	
$\tan \delta$	delta	Verlustfaktor	
$\tan \delta_e$		bezogener Verlustfaktor	
$\tan \delta_h$		Hysteresse-Verlustfaktor	
$\tan \delta_L$		Verlustfaktor der Spule	
$\tan \delta_r$		(Rest-)Verlustfaktor bei H -> 0	
$\tan \delta/\mu_i$		bezogener Verlustfaktor des Materials bei H -> 0	
τ		Zeitkonstante	[s]
τ_{Cu}		Gleichstrom Zeitkonstante $\tau_{Cu} = L/R_{cu} = A_L/A_R$	[s]
U		Effektivwert der elektrischen Spannung	[V, RI, W/A]
U [^]		Scheitelwert der Spannung	[V]
v		Geschwindigkeit 1 m/s = 3,6 km/h, 100 km/h ≈ 28 m/s	[m/s, km/h]
V _e		effektives magnetisches Volumen	[mm ³ , cm ³ , m ³]
W		Energie, Arbeit	[J, Nm, Ws]
X		Blindwiderstand	[Ω]
Z		komplexer Scheinwiderstand, komplexe Impedanz	[Ω]
Z		Betrag des Scheinwiderstandes	[Ω]

Z_0		Innenwiderstand einer Messspannungsquelle	[Ω]
Z_E		Abschlusswiderstand Messempfängers	[Ω]
Z_n		spezifischer Widerstand $ Z _n = Z /N^2 \times \varepsilon(l_e/A_e)$	[Ω/mm]
ω	omega	Kreisfrequenz; $2 \times \pi \times f$	[s^{-1}]