

Amorphe Schnittbandkerne

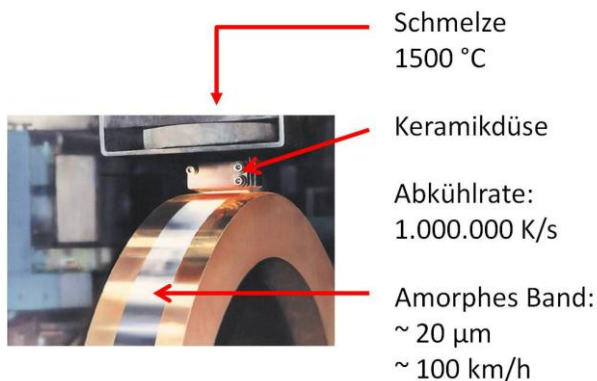
- | Hohe Sättigungsinduktion
- | Niedrige Verluste
- | Kleines Bauvolumen
- | Flexibel durch einstellbaren Luftspalt

Amorphe Fe-Basis-Legierungen

Amorphe Legierungen haben eine ungeordnete atomare Struktur ohne kristalline Bereiche („Körner“) und Korngrenzen. Dadurch haben sie a priori gute Voraussetzungen für weichmagnetisches Verhalten, da Störeinflüsse wie Kristallanisotrope und Korngrenzen-Pinning entfallen.

Amorphe Fe-Basis-Legierungen werden in Form von ca. 25 µm dicken Folien in Bandbreiten bis ca. 200 mm in einem Schritt direkt aus der Schmelze hergestellt. Zum Einstellen des (metastabilen) amorphen Zustandes sind selbst bei den geeigneten Legierungen Abkühlraten von einer Million Kelvin pro Sekunde notwendig. Dies gelingt mit Hilfe einer Rascherstarrungstechnologie, bei der die Schmelze durch eine Keramikdüse auf ein schnell rotierendes wassergekühltes Kupferrad gepresst wird.

Diese Bänder werden zu Ring- oder Schnittbandkernen weiterverarbeitet. Zum Abbau der inneren Spannungen sowie zur Einstellung spezieller Hystereseschleifen erfolgt i. d. R. eine Wärmebehandlung unterhalb der Kristallisationstemperatur. Diese liegt mit ca. 500 °C bei den meisten kommerziellen Legierungen in einem für viele Anwendungen sicheren Bereich.



Wegen der relativ hohen Magnetostriktion erreichen amorphe Fe-Basis-Legierungen nicht die exzellenten magnetischen Eigenschaften der nanokristallinen Legierungen, punkten aber mit einer höheren Sättigungsinduktion und niedrigeren Kosten.

Anwendungen

Schnittbandkerne aus amorphen Fe-Basis-Legierungen bieten eine interessante Kombination von hoher Sättigungsinduktion mit niedrigen Verlusten. Sie eignen sich daher insbesondere für PFC- oder Speicherdrosseln in Leistungsanwendungen.

Die Hauptanwendungen für amorphe Schnittbandkerne liegen im Bereich > 10 A bei ca. 20 bis 100 kHz. Die niedrigen Verluste ermöglichen die Auslegung von volumenoptimierten Drosseln auch bei höheren Stromrippeln.

Werkstoffdaten Fe-amorph

Sättigungsinduktion	B_s	RT	[T]	1,56
		130 °C	[T]	1,44
Curie-Temperatur	T_c		[°C]	399
Kristallisationstemperatur			[°C]	508
Obere Anwendungstemperatur			[°C]	ca. 130
Magnetostriktion	λ_s		ppm	27
Spez. elektrischer Widerstand	ρ_{el}	RT	[$\mu\Omega m$]	1,3
Dichte	ρ		[g/cm ³]	7,18
Typ. Füllfaktor	FF		[%]	82
Ummagnetisierungsverluste	P_{Fe}	(0,1T, 25 kHz)	[W/kg]	ca. 15
Ummagnetisierungsverluste	P_{Fe}	(0,3T, 50 kHz)	[W/kg]	ca. 300

Tabelle 1: Werkstoffdaten

Typenreihen

Wir bieten Vorzugstypen der amerikanischen AMCC Typenreihe sowie kundenspezifische Abmessungen an. Passende Spulenkörper stehen zur Verfügung. Weitere Typen auf Anfrage.

Typ	Länge		Breite		Höhe (Bandbreite)		Länge innen	Breite innen	Wickelhöhe	
	a [mm]	±	b [mm]	±	f [mm]	±	e [mm]	g [mm]	c [mm]	±
AMCC 20	72	2,0	35	1,0	30	0,5	50	13	11	0,8
AMCC 32	82	2,0	41	1,0	30	0,5	56	15	13	0,8
AMCC 50	102	3,0	52	1,0	25	0,5	70	20	16	1,0
AMCC 80	102	3,0	52	1,0	40	1,0	70	20	16	1,0
AMCC 100	102	3,0	52	1,0	45	1,0	70	20	16	1,0
AMCC 125	121	3,0	63	1,0	35	1,0	83	25	19	1,0
SU 75b	125	+3,5 -2,0	72,4	+3,0 -2,0	40	1,0	78	25	23,7	1,0

Tabelle 2: Abmessungen (Auswahl)

Typ	l_{Fe}	A_{Fe}	m_{Fe}	$A_{Cu, 50\%}$	l_{Cu}	Hüllquader- Oberfläche O
	[cm]	[cm ²]	[g]	[cm ²]	[cm]	[cm ²]
AMCC 20	17,5	2,7	337	3,3	13,4	≈ 172
AMCC 32	20,0	3,2	454	4,2	14,6	≈ 216
AMCC 50	24,9	3,3	586	7,0	16,2	≈ 303
AMCC 80	25,4	5,2	938	7,0	19,2	≈ 356
AMCC 100	25,0	5,9	1055	7,0	20,2	≈ 373
AMCC 125	30,2	5,5	1166	10,4	20,8	≈ 464
SU 75b	31,0	7,7	1764	9,8	22,7	≈ 533

Tabelle 3: Kenngrößen

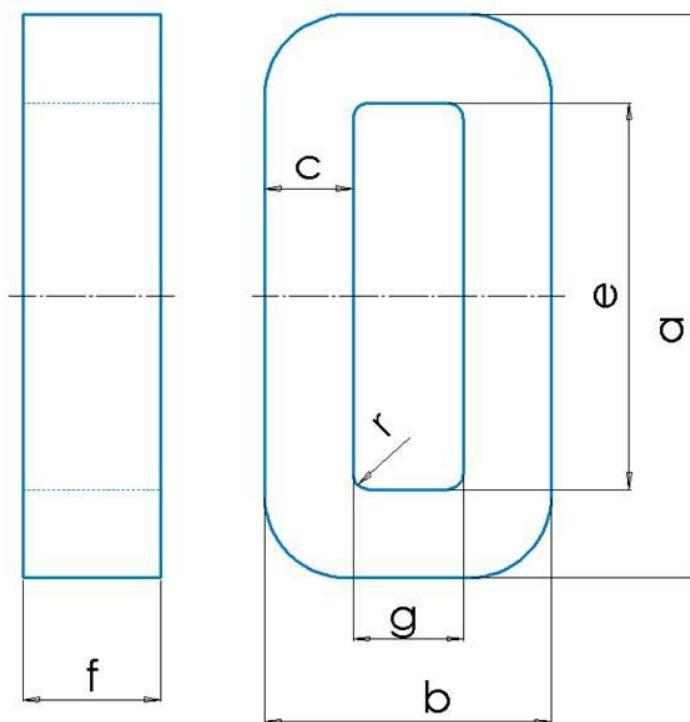


Abbildung 1: Mechanische Kenngrößen

Das amorphe Band ist nach der Wärmebehandlung spröde. Bei der Handhabung der Kerne sind Schutzmaßnahmen (Augenschutz, Handschuhe) gegen evtl. abplatzende Splitter unbedingt einzuhalten.

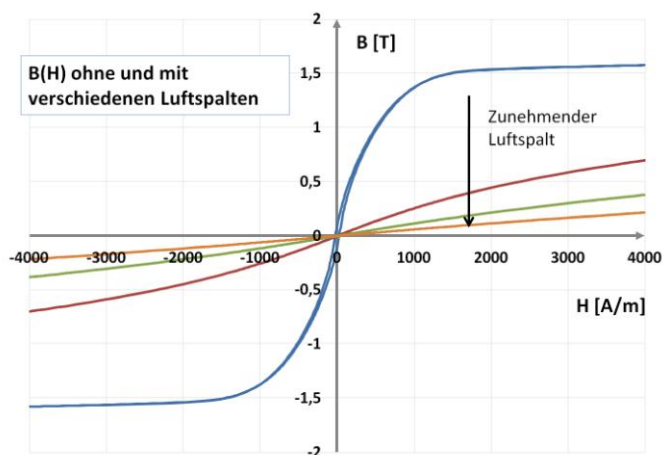
Beschädigte innere und äußere Bandlagen haben keine Auswirkungen auf die magnetischen Eigenschaften. Sie sind beim Fertigungsprozess nicht sicher zu vermeiden und sind daher kein Beanstandungskriterium.

Hinweise zur Anwendung von Drosseln

Bei der Auslegung von Drosseln wird ausgenutzt, dass die Induktivität L proportional zum Quadrat der Windungszahl N ist, die Feldstärke H im Kern jedoch nur linear mit der Windungszahl ansteigt.

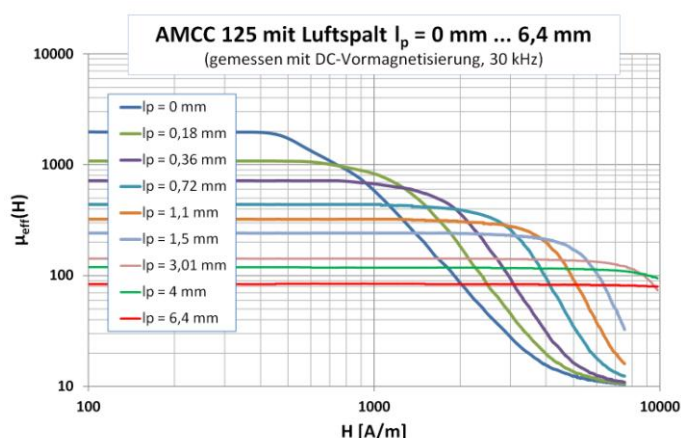
Es werden also Werkstoffe mit niedrigen Permeabilitäten (also hohen zulässigen Feldstärken ohne dass der Kern in Sättigung geht) eingesetzt und die gewünschte Induktivität L durch die Windungszahl eingestellt.

Amorphe Werkstoffe sind hochpermeabel, die Strombelastbarkeit von Drosseln mit amorphen Schnittbandkernen wird deswegen über eine Luftspalteinlage eingestellt.



Die Kennlinie „ohne Luftspalt“ wurde an einem geschnittenen Kern ohne Luftspalteinlage gemessen. Durch Vergrößerung des Luftspaltes wird die Kennlinie zunehmend „gescherft“ und die Strombelastbarkeit nimmt zu.

Abbildung 2: B(H)-Kennlinie von amorphen Schnittbandkernen



Mit zunehmendem Luftspalt sinkt die effektive Permeabilität und die Strombelastbarkeit steigt. Es sind höhere Windungszahlen zum Erreichen der Soll-Induktivität notwendig. Zudem steigen auch zusätzliche Verluste in Kern und Wicklung durch Stromverdrängung und Feldverzerrungen.

Abbildung 3: Effektive Permeabilität für verschiedene Luftspalte

Hinweise zur Dimensionierung

Geringe Baugrößen (und somit niedrige Kosten) werden durch eine maximale Ausnutzung des Kupfer-Wickelraumes bei gleichzeitig maximaler Aussteuerung erreicht.

Die Energiespeicherkapazität bzw. die in einer Drossel gespeicherte Energie wird über die Induktivität L und dem Quadrat des Stromes I definiert. Sie entspricht der Arbeit die notwendig ist, um die Drossel entsprechend zu magnetisieren:

$$E_{\text{Drossel}} = \frac{1}{2} LI^2$$

Dieser Zusammenhang gilt, solange die Drossel bzw. der magnetische Kern nicht gesättigt wird. Für Speicher oder PFC-Drosseln lässt sich der Zusammenhang zwischen LI^2 und den Drosselkenngrößen herleiten:

$$LI_{\text{eff}}^2 \approx S * A_{\text{Cu}} * A_{\text{Fe}} * \frac{B_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

Unter Annahme von typischen Werten für die Stromdichte S und der maximal nutzbaren Induktion B_{max} des Werkstoffes lässt sich LI^2 für jede Kernabmessung berechnen und ermöglicht somit eine Vorauswahl. Die in Tabelle 4 ebenfalls dargestellten Werte für Nennstrom $I_{\text{N,eff}}$, Windungszahl N und effektive Permeabilität μ_{eff} wurden mit den Formeln des nachfolgenden Kapitels ermittelt. Angenommen wurde ein Stromripple von ca. 10 % (bezogen auf die Effektivwerte) und ein Induktivitätsabfall von max. ca. 20 %. Bei abweichenden Induktivitätsvorgaben müssen die Windungszahl und der maximale Strom entsprechend angepasst werden.

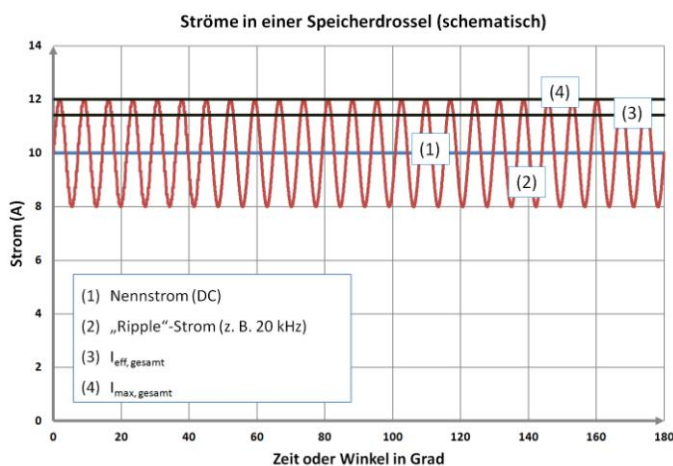
Richtwerte für $B_{\text{max}} = 1,3 \text{ T}$, $L = 0,5 \text{ mH}$						
Typ	LI_{eff}^2	$I_{\text{N,eff}}$	N	μ_{eff}	I_p	S
	[VAs]	[A]	(gerundet)	(ca.)	[mm]	[A/mm ²]
AMCC 20	0,20	20	44	133	2,0	2,7
AMCC 32	0,29	24	44	127	2,5	2,5
AMCC 50	0,43	29	53	108	3,75	2,2
AMCC 80	0,59	34	39	127	3,0	1,9
AMCC 100	0,65	35	37	130	3,0	1,85
AMCC 125	0,81	40	44	115	4,25	1,7
SU 75b	1,0	45	33	142	3,25	1,5

Tabelle 4: Dimensionierungskenngrößen (Richtwerte)

Hinweise zur Berechnung von Drosseln

Die nachfolgenden Formeln zeigen die grundsätzlichen physikalischen Zusammenhänge bei Drosseln und ermöglichen eine Abschätzung der wichtigsten Parameter.

Vorgegeben sind die Ströme, die sich entweder aus einem Gleichstromanteil mit Stromripple oder einer 50-100 Hz Grundfrequenz und einem überlagerten höherfrequenten Stromripple zusammensetzen. Der maximale Spitzenstrom, den die Drossel „sieht“, ist

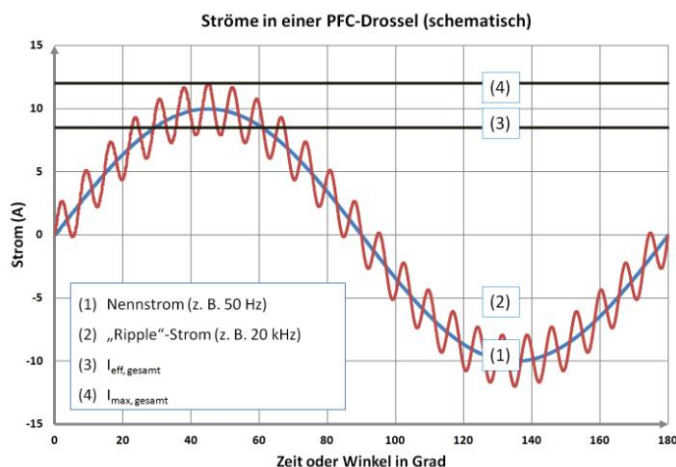


bei Speicherdrosseln:

$$\hat{I}_{max} = I_{N,DC} + \frac{I_{R,SS}}{2}$$

$$I_{eff,ges} = \sqrt{(I_{N,DC})^2 + \left(\frac{1/2 * I_{R,SS}}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

Abbildung 4: Ströme in einer Speicherdrossel (schematisch)



bei PFC-Drosseln:

$$\hat{I}_{max} = I_{N,eff} * \sqrt{2} + \frac{I_{R,SS}}{2}$$

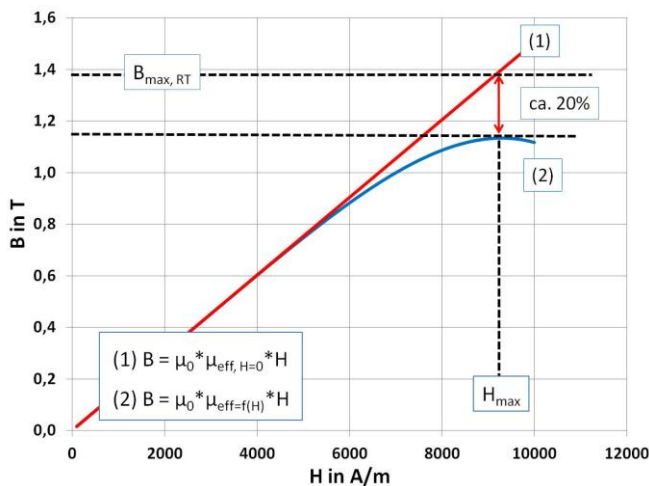
$$I_{eff,ges} = \sqrt{(I_{N,eff})^2 + \left(\frac{1/2 * I_{R,SS}}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

Abbildung 5: Ströme in einer PFC-Drossel (schematisch)

Abschätzung der maximalen Aussteuerung \hat{H}_{max}

Die maximale Aussteuerung von amorphen Schnittbandkernen ist von der Größe des Luftspaltes abhängig. Zu beachten ist der Permeabilitäts- bzw. Induktivitätsabfall in der Nähe der Sättigungsinduktion.

In Abbildung 6 ist das typische Sättigungsverhalten von amorphen Schnittbandkernen für typische Luftspalte als B(H)-Kennlinie dargestellt. Die über einen konkreten Luftspalt eingestellte effektive Permeabilität μ_{eff} ist von der Aussteuerung abhängig (und nähert sich bei sehr hohen Aussteuerungen asymptotisch dem Wert 1). Dadurch verringert sich in dieser Darstellung scheinbar die Induktion B (blaue Kurve). Tatsächlich nähert sich der Kern der Sättigungsinduktion B_s .



Verallgemeinerte Darstellung des Sättigungsverhaltens von amorphen Schnittbandkernen mit Luftspalt. Die durch den Luftspalt eingestellt zunächst konstante Permeabilität reduziert sich in der Nähe der Sättigungsinduktion.

Abbildung 6: Typ. Sättigungsverhalten von amorphen Schnittbandkernen mit Luftspalt

In erster Näherung kann also von einer „optimalen“ Aussteuerung von ca. 1,4 T bei Raumtemperatur, bzw. ca. 1,3 T bei Temperaturen von 120 - 130 °C ausgegangen werden. Darauf basieren kann für den maximal anliegenden Strom \hat{I}_{max} die effektive Permeabilität in Abhängigkeit von der Windungszahl (oder umgekehrt) gerechnet werden:

$$\hat{B}_{max} \approx 1.3 = \mu_0 * \mu_{eff} * \frac{\hat{I}_{max} * N}{l_{Fe}}$$

μ_{eff} ist die durch den Luftspalt eingestellte effektive Permeabilität im linearen Bereich.

Bestimmung der Windungszahl

Eine zu niedrige Windungszahl wird den Kern „magnetisch überfahren“, da eine zu hohe Permeabilität für die gewünschte Induktivität notwendig ist. Zu hohe Windungszahlen wiederum können zu thermischen Problemen führen.

Wie gezeigt kann unter Annahme einer konstanten Permeabilität mit einer maximalen Induktion B_{max} von 1,3 T näherungsweise gerechnet werden. Damit kann die „magnetisch“ mögliche Windungszahl abgeschätzt werden zu:

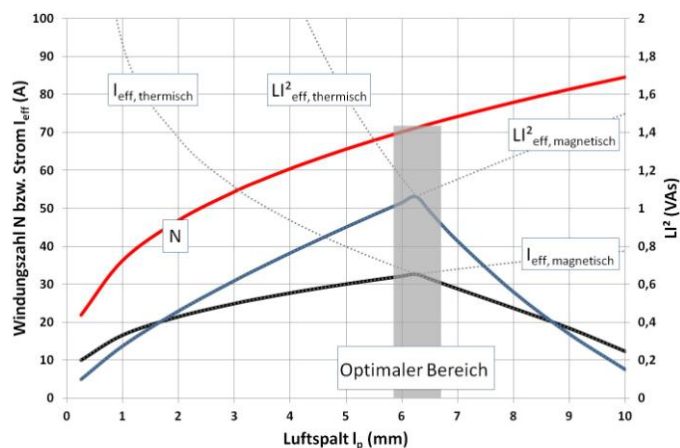
$$N_{mag} \approx \frac{\hat{B}_{max} * l_{Fe}}{\mu_0 * \mu_{eff} * \hat{I}_{max}}$$

Aus dem zur Verfügung stehenden effektiven Wickelraum A_{Cu} kann die je nach möglicher Stromdichte S die „thermisch“ maximal möglich Windungszahl N für einen konkreten Anwendungsfall berechnet werden.

$$N_{therm} \approx S_{eff} * \frac{A_{Cu}}{I_{eff,therm}}$$

Typische Stromdichten liegen zwischen ca. 1 A/mm² für große Ströme und freie Konvektion bis ca. 5 - 10 A/mm² für kleinere Ströme und zusätzliche Kühlmaßnahmen.

Die für jede Kernabmessung optimale Windungszahl ergibt sich, wenn der Kern weder magnetisch noch thermisch überfahren wird. Diese Zusammenhänge sind in Abb. 7 dargestellt.



Abschätzung der zulässigen thermischen und magnetischen Ströme für eine PFC-Drossel mit AMCC 125-Kern und $L = 0,6$ mH. Annahmen: ca. 20 % Stromripple mit $f = 20$ kHz, ca. 75 K Übertemperatur.

Abbildung 7: Bestimmung der optimalen Windungszahl und des optimalen Luftspaltes

Aus den dargestellten Zusammenhängen lässt sich für jeden Kerntyp unter Vorgabe der Stromdichte S die notwendige effektive Permeabilität berechnen:

$$\mu_{eff} \approx \frac{\hat{B}_{max} * l_{Fe} * I_{eff,therm}}{\mu_0 * \hat{I}_{max} * S_{eff} * A_{Cu}}$$

Für B_{max} können entweder 1,3 T eingesetzt werden, oder niedrigere Werte falls ein lineareres Verhalten notwendig ist.

Es bleibt als Variable die Stromdichte S . Mit einem gewählten Startwert und der damit berechneten effektiven Permeabilität kann dann mit Hilfe von

$$N \approx \frac{\hat{B}_{max} * l_{Fe}}{\mu_0 * \mu_{eff} * \hat{I}_{max}}$$

die magnetisch zulässige Windungszahl bestimmt und überprüft werden, ob damit die gewünschte Permeabilität erreicht wird:

$$L \approx N^2 * \mu_0 * \mu_{eff} * \frac{A_{Fe}}{l_{Fe}}$$

Der Luftspalt kann näherungsweise aus der effektiven Permeabilität abgeschätzt werden. Die nachfolgende Formel wurde aus Messungen mit dem Typ AMCC 125 interpoliert. Für andere Abmessungen weichen die Werte stärker ab. Eine empirische Überprüfung ist unabdingbar. Nachteilig bei größeren Luftspalten sind zusätzliche Kupfer- und Eisenverluste durch Streufelder. Bei Betrieb der Drossel zu nahe an der Sättigung werden Strom und Spannung durch die abfallende Induktivität verzerrt.

$$l_p \approx l_{Fe} \left(\frac{\mu_{eff}}{5,03} \right)^{-\frac{1}{0,733}}$$

Wird die gewünschte Induktivität L gut erreicht, kann entweder die Stromdichte S reduziert werden, oder ein kleinerer Kern verwendet werden. Umgekehrt kann entweder, falls möglich, die Stromdichte erhöht werden, oder es muss ein größerer Kern eingesetzt werden.

Zunächst sollten jedoch die für die angenommene Stromdichte geltende thermische Beanspruchung abgeschätzt werden. Die Verlustmechanismen sind relativ komplex und hängen stark vom konkreten Wicklungsaufbau, dem Luftspalt sowie den Kühlmöglichkeiten ab. Die im nächsten Kapitel beschriebenen Näherungsformeln können daher nur Richtwerte bzw. Anhaltspunkte liefern.

Verluste und Übertemperatur

Die Kupferverluste hängen von Frequenz und konkretem Wickelaufbau ab, sowohl Kupfer- als auch Kernverluste hängen zusätzlich durch den Streufeldeinfluss vom Luftspalt ab. Die nachfolgenden Formeln ermöglichen die näherungsweise Bestimmung der Übertemperatur aus Kupfer- und Kernverlusten.

Die Kupferverluste setzen sich aus den ohmschen Anteilen sowie frequenzabhängigen Verlusterhöhungen durch Skin- und Proximityeffekten zusammen:

$$P_{Cu} \approx \left(\frac{\rho_{el} * I_{Cu} * N^2 * I_{eff}^2}{A_{Cu}} \right) * K_{Prox}$$

Der Korrekturfaktor K_{Prox} hängt von der Frequenz, dem verwendeten Draht (Litze oder Massivdraht) und dem konkreten Wicklungsaufbau (ein- bzw. mehrlagig) ab. Typische Werte im mittleren Frequenzbereich von ca. 20 kHz liegen um ca. den Faktor 2-3.

Für die Kernverluste von amorphen Schnittbandkernen findet man in der Literatur die nachfolgende Näherungsformel, die im Bereich von ca. 10 - 30 kHz bei kleinen Aussteuerungen (Stromripple ca. 10 - 30 %) ohne Luftspalt gültig ist:

$$P_K \approx m_{Fe} * 6,5 * f^{1,51} * \hat{B}_{ripple}^{1,74}$$

Die Frequenz f ist in dieser Formel in kHz einzusetzen. Die maximale Ripple-Induktion berechnet sich zu:

$$\hat{B}_{Ripple} = \frac{\mu_0 * \mu_{eff} * 0,5 * N * I_{R,SS}}{l_{Fe}}$$

Durch das Streufeld des Luftspaltes ergeben sich sowohl in der Wicklung als auch im Kern zusätzliche Verluste, die je nach Luftspalt und Wickelaufbau (Massivdraht, Litze, Anzahl der Lagen) sehr unterschiedlich ausfallen können. Als grobe Näherung kann die folgende Formel verwendet werden:

$$P_{Gesamt} \approx (P_K + P_{Cu}) * K_L$$

$$K_L \approx 100 * (\mu_{eff})^{-0,8}; K_L \geq 1$$

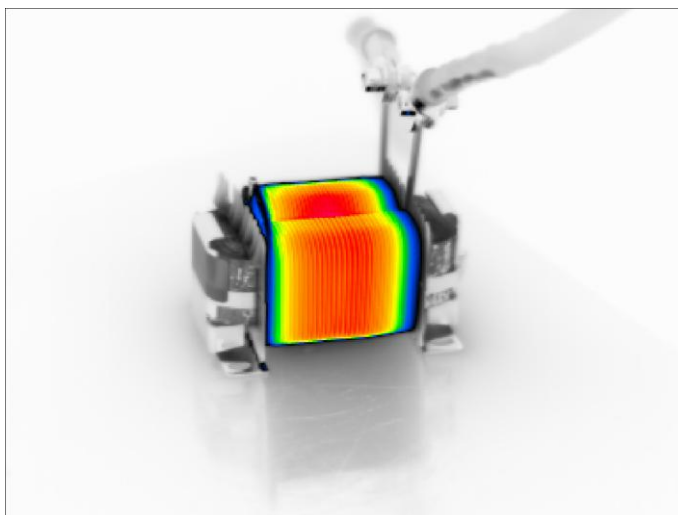
Der Korrekturfaktor K_L für den Luftspalteinfluss wurde experimentell im Bereich μ_{eff} zwischen ca. 50 - 250 und Litze ermittelt. Je nach Wickelaufbau und Frequenzbereich können die Gesamtverluste deutlich von dieser Näherung abweichen. Eine sorgfältige experimentelle Überprüfung ist unabdingbar.

In der Literatur findet man für Drosseln mit amorphen Schnittbandkernen die folgende Näherungsformel für die Übertemperatur:

$$\Delta T[\text{K}] \approx \left(\frac{1000 * P_{\text{Gesamt}}}{O} \right)^{0,85}$$

O ist in dieser Näherung die Hüllquaderoberfläche der Drossel ohne Boden in cm^2 . Näherungswerte hierzu siehe Tab. 3.

Unverzichtbar ist eine experimentelle Überprüfung dieser Abschätzung da je nach Aufbau und Umgebungsverhältnissen auch deutlich höhere Temperaturen erreicht werden können.



Die Wärmebildaufnahme einer Drossel mit Hochkant-Kupferwickel $7,1 \times 2 \text{ mm}^2$ zeigt bei einem Gleichstrom von 52 A eine deutliche thermische Überlastung.

Abbildung 8: Wärmebildaufnahme

Spulenkörper und Spannbänder

Passend zu den aufgeführten Kerntypen bieten wir Spulenkörper und Spannbänder an. Die Spulenkörper sind aus glasfasergefülltem Polyamid 66 (Nylon). Die Abmessungen sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Typ	A	B	C	D	E	F	G
AMCC 20	51	47	12	24	44	30,5	1,8
AMCC 32	57	53	14	28	49	30,5	2,5
AMCC 50	71	67	17	36	49	25,5	2,5
AMCC 80	71	67	17	35,5	63	41	2,5
AMCC 100	71	67	18	35,5	70	47	2,5
AMCC 125	84	79,2	20	40	54	35,5	2,5

Tabelle 6: Nenn-Abmessungen von Standard-Spulenkörpern (in mm)

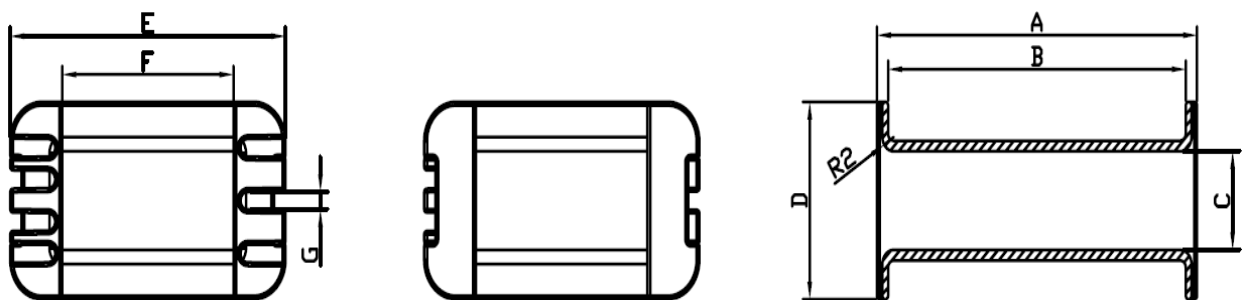


Abbildung 10: Bemaßung der Spulenkörper



Abbildung 11: Spannbänder

Spannbänder aus unmagnetischem Stahl bieten wir in einer Bandbreite von 6,2 mm und Verschluss mit Inbusschrauben an. Siehe hierzu die nebenstehende Skizze.

Mechanische Ausführung

Die nachfolgenden Hinweise sollen helfen nach erfolgreicher Dimensionierung einen mechanisch stabilen Aufbau zu realisieren.

Die gewickelten und wärmebehandelten Kerne werden zur mechanischen Stabilisierung mit einem Epoxidharzsystem getränkt. Amorphe Schnittbandkerne sind also ein „Verbund“ aus ca. 80 - 90 % Metall und Epoxidharz.

Zu beachten sind die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Metall und Kunststoff sowie die für Epoxidharze typische „schleichende“ Erweichung ab ca. 90 °C. Beide Effekte können zu einer Änderung der Form und damit des Luftspaltes führen, wodurch sich die Induktivität der Drossel ändert.

Für eine mechanische Stabilisierung sorgt i. d. R. ein metallisches Spannband (nichtmagnetisch) sowie eine zusätzliche Verklebung der Luftspalteinlage. Empfohlen wird ein Anpressdruck der beiden Kernhälften von ca. 0,8 N/mm².



Beispiel einer Drossel mit Hochkantwicklung, 52 Windungen, 10x2,5 mm² mit Schnittbandkern SU 75b für eine Anwendung mit relativ niedrigen Ripple-Frequenzen.

Abbildung 9: Drossel mit Schnittbandkern SU 75

Eine sichere mechanische Stabilisierung wird durch einen Kompletverguss der Drossel z. B. in einem Aluminiumgehäuse erreicht. Bei Verwendung von „weichen“ Vergussmitteln wie z. B. Polyurethan-Harze (PU) wird zudem die Geräuschentwicklung positiv beeinflusst.

Geräusche entstehen durch die Anziehungs- und Abstoßungskräfte der beiden Kernhälften sowie durch magnetostriktive Längen- und Volumenänderung des Werkstoffes. Bei Problemen ist eine mechanische Entkopplung mit der Leiterplatte oder dem Gehäuse des Gerätes zu empfehlen.

Amorphe Schnittbandkerne bestehen wie SiFe-Schnittbandkerne im Wesentlichen aus Eisen und sind daher ähnlich korrosionsanfällig. Meist ist das nur ein optisches Problem, jedoch sollten entsprechende Tests durchgeführt werden. Entsprechende Temperatur-Feuchte-Prüfungen werden von uns als Dienstleistung angeboten.

Begriffe und Definitionen

Nachfolgend finden Sie eine Zusammenfassung der verwendeten Formelzeichen mit einer kurzen Beschreibung.

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
B	T (= Vs/m ²)	Magnetische Flussdichte (Induktion) in Tesla (1 T = 10.000 Gauß = 1000 mT = 1000.000 µT = 1.000.000.000 nT)
H	A/m	Magnetische Feldstärke (1 A/m = 4π/1000 Oerstedt)
μ_{eff}		Effektiv wirksame relative magnetische Permeabilität eines magnetischen Kerns mit Luftspalt
μ₀	Vs/Am	Magnetische Feldkonstante = 4π*10 ⁻⁷
B = μ ₀ H in einem magnetischen Material bzw. B = μ ₀ H an Luft		
B_s	T	Sättigungsinduktion bei hohen Feldstärken und μ _{eff} ≈ 1
T_c	°C	Curie-Temperatur (Verschwinden der spontanen Magnetisierung durch Wärmebewegung)
λ_s	ppm	Sättigungsmagnetostriktion (relative Längen- oder Volumenänderung)
ρ_{el}	Ωm	Spezifischer elektrischer Widerstand
ρ	Kg/m ³	Spezifische Materialdichte
A_{Fe}	m ²	Effektiver magnetischer Eisenquerschnitt eines Magnetkernes
l_{Fe}	m	Mittlere magnetische Weglänge
FF	%	Verhältnis des magnetischen zum geometrischen Eisenquerschnitt
A_{Cu}	m ²	Effektiver Kupferquerschnitt
l_{Cu}	m	Mittlere Windungslänge der Kupferbewicklung
O	cm ²	Hüllquader-Oberfläche der bewickelten Drossel ohne Bodenfläche
E_{Drossel} bzw. LI²	VAs	Energiespeicherkapazität bzw. die in der Drossel gespeicherte Energie
L	H (= Vs/A)	Induktivität einer Drossel. Eine Spule hat eine Induktivität von 1 H (Henry), wenn bei gleichförmiger Stromänderung von 1 Ampere in 1 Sekunde eine Selbstinduktionsspannung von 1 Volt entsteht.
î_{max}	A	Maximaler Spitzenwert aller überlagerten Ströme
I_{eff,ges}	A	Thermisch wirksamer Effektivwert aller überlagerten Ströme
N		Windungszahl der Kupferwicklung
S	A/m ²	Stromdichte bezogen auf den Effektivwert
l_p	m	Gesamt-Luftspalt des Schnittbandkernes
P_{Cu}	W	Kupferverluste
P_{Fe}	W	Eisenverluste
K_{Prox} K_L		Korrekturfaktoren für Kupfer- und Gesamtverluste
π		Kreiszahl (≈ 3,14159)

Wir über uns

Die SEKELS GmbH entwickelt, fertigt und handelt technische Produkte im Umfeld des Magnetismus. Mit ca. 25 Mitarbeitern (darunter mehr als die Hälfte Physiker und Ingenieure) bedient SEKELS derzeit über 500 Kunden weltweit.

Wir sind seit über 25 Jahren vertraut mit amorphen und nanokristallinen Legierungen und deren Anwendungen und bieten unseren Kunden sowohl eine umfangreiche Lagerhaltung als auch eine ausführliche technische Beratung.

SEKELS entwickelt, konstruiert und fertigt kundenspezifische Kernbleche und Blechpakete, magnetische Abschirmungen und Abschirmsysteme, induktive Bauelemente und Magnetsysteme - vom Prototyp bis zur Serienlieferung. SEKELS ist DIN EN ISO 9001:2008 zertifiziert.

*SEKELS GmbH
Dieselstrasse 6
61239 Ober-Mörlen
Germany*

*Tel.: +49 (0) 6002 9379-0
Fax: +49 (0) 6002 9379-79*

*mail@sekels.de
www.sekels.de*

Diese Informationen wurden mit größter Sorgfalt zusammengestellt und werden ohne Übernahme von Garantien oder Gewährleistungen zur Verfügung gestellt. Herausgeber ist die SEKELS GmbH. Alle Rechte vorbehalten.