



Noyaux de bande de coupe amorphe

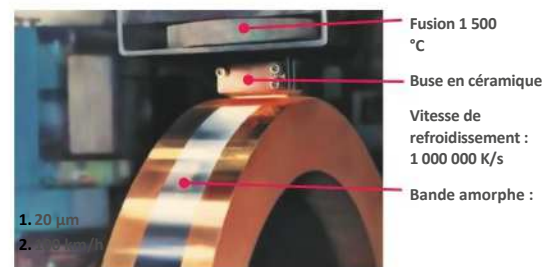
- | Induction à haute saturation
- | Faibles pertes
- | Petit volume de construction
- | Flexible grâce à l'entrefer réglable

Alliages amorphes à base de Fe

Les alliages amorphes ont une structure atomique désordonnée sans régions cristallines (« grains ») ni joints de grains. En conséquence, ils ont de bonnes conditions préalables a priori pour le soft magnetic comportement, car les influences d'interférence telles que l'anisotropie cristalline et l'épinglage des limites de grain sont éliminées.

Les alliages amorphes à base de Fe sont produits directement à partir de la masse fondue en une seule étape sous la forme de feuilles d'environ 23 µm d'épaisseur dans des largeurs de bande allant jusqu'à environ 200 mm. Pour régler l'état amorphe (métastable), des vitesses de refroidissement d'un million de kelvins par seconde sont nécessaires, même avec des alliages appropriés. Ceci est réalisé à l'aide de la technologie de solidification rapide, dans laquelle la masse fondue est pressée à travers une buse en céramique sur une roue en cuivre refroidie à l'eau à rotation rapide.

Ces bandes sont ensuite transformées en noyaux en anneaux ou en bandes coupées. Afin de réduire les contraintes internes et d'ajuster les boucles d'hystérésis spéciales, le traitement thermique est généralement effectué en dessous de la température de cristallisation. C'est



avec environ 500 °C dans la plupart des administrations commerciales dans une plage de sécurité pour de nombreuses applications. En raison de la magnétostriction relativement élevée, les alliages amorphes à base de Fe n'ont pas les excellentes propriétés magnétiques des alliages nanocristallins, mais ils se distinguent par une induction de saturation plus élevée et des coûts inférieurs.

Propriété	Symbole	Condition	Unité	Valeur
Induction à saturation	Bs	Température ambiante (RT)	[T]	1,56
Induction à saturation	Bs	130 °C	[T]	1,44
Température de Curie	Tc		[°C]	399
Température de cristallisation			[°C]	508
Température maximale d'utilisation			[°C]	env. 130
Magnétostriction	λs		[ppm]	27
Résistivité électrique spécifique	ρel	Température ambiante (RT)	[µΩ·m]	1,3
Densité	ρ		[g/cm³]	7,18
Pertes d'hystérésis (magnétisation)	PFe	(0,1 T, 25 kHz)	[W/kg]	env. 15
Pertes d'hystérésis (magnétisation)	PFe	(0,3 T, 50 kHz)	[W/kg]	env. 300

Tab. 1 :
Données du matériau et propriétés du noyau (pertes)

Conception mécanique

Les noyaux enroulés et traités thermiquement sont imprégnés d'un système de résine époxy pour la stabilisation mécanique. Les noyaux de ruban de découpe amorphe sont donc un « système composite » avec une teneur en métal d'environ 80 %.

Il faut tenir compte des différents **coefficients de dilatation thermique** entre le métal et le plastique, ainsi que de l'**expansion fluide** typique des résines époxy à partir d'environ 90 °C. Ces deux effets peuvent entraîner une modification de la forme et donc de l'**entrefer**, ce qui modifie l'**inductance** de la bobine.

Pour une **stabilisation mécanique**, on utilise généralement une **bande de serrage métallique (non magnétique)** ainsi qu'un **collage supplémentaire de la cale d'entrefer**. Une **pression d'appui** d'environ **0,8 N/mm²** entre les deux moitiés du noyau est recommandée.

Une stabilisation mécanique fiable peut également être obtenue par un **moulage complet** de la bobine, par exemple dans un boîtier en aluminium. Lorsqu'on utilise des **matières de moulage souples**, comme la **résine polyuréthane (PU)**, le **bruit de fonctionnement** est en outre réduit.

Les bruits sont dus aux **forces d'attraction entre les deux moitiés du noyau** ainsi qu'aux **variations de longueur et de volume dues à la magnétostriction** du matériau.

En cas de problème, il est recommandé de **désaccoupler mécaniquement** le noyau de la **carte de circuit imprimé** ou du **boîtier de l'appareil**.

Les **noyaux en ruban amorphe** se composent, comme les **noyaux en ruban FeSi**, essentiellement de fer et sont donc également **sensibles à la corrosion**. Cela ne pose généralement qu'un **problème optique**, mais des **tests appropriés** doivent être effectués. Des **essais de température et d'humidité** (également sur des ensembles complets) peuvent être réalisés comme **service proposé**.

Le **ruban amorphe** devient **cassant après traitement thermique**. Lors de la manipulation des noyaux, il est impératif de prendre des **mesures de protection** (lunettes, gants) pour éviter tout **éclat détaché**.

Les **couches internes et externes endommagées** du ruban n'ont **aucune influence sur les propriétés magnétiques**. Ces dommages sont inévitables lors du **processus de fabrication** et ne constituent donc **pas un critère de rejet**.



Exemple : **Accélérateur avec enroulement vertical**
52 tours,
10 x 2,5 mm² avec mandrin de bande de
découpe SU 75b pour une application avec
des
Faible fréquence d'ondulation

Taille

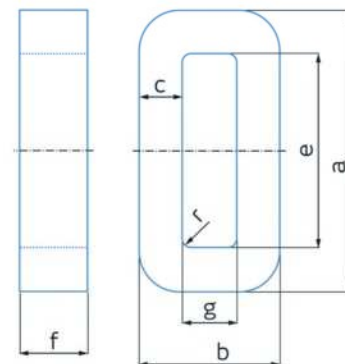
Tolérances et paramètres

Les noyaux à bande coupée en alliages magnétiques doux amorphes produits par le processus de solidification rapide sont généralement proposés dans les dimensions de la série de type américain AMCC. Entre-temps, les types européens « IEC 329 » sont de plus en plus nombreux, par exemple dans la série SU.

Tableau :
Désignation des dimensions et indication des tolérances selon la norme CEI 329 et pour la série de type AMCC

Les **noyaux en ruban** sont des enroulements constitués d'une **feuille métallique très fine**, présentant des **tolérances d'épaisseur** et de **légères différences de rugosité de surface**. De ce fait, il en résulte inévitablement des **tolérances nettement plus importantes** par rapport aux **pièces fraisées ou tournées**.

La **désignation des différentes dimensions** dans cette brochure est conforme à la **norme IEC 329**. Tu trouveras ci-dessous une **correspondance avec la nomenclature AMCC**.



Dimensions IEC 329

Désignation	IEC 329	AMCC	Tolérance
Longueur extérieure	a	(f)	±X
Largeur extérieure	b	(e)	±X
Hauteur d'enroulement	c	(a)	-X
Longueur de fenêtre	e	(c)	min
Hauteur de noyau	f	(d)	±X
Largeur de fenêtre	g	(b)	min
Rayon intérieur d'enroulement	r	(n.d.)	max

Les paramètres magnétiques sont calculés comme suit :

Dimensions selon CEI 329

$$A_{Fe, \min} = C_{\min} \cdot f_{\min} \cdot FF$$

$$l_{Fe} \approx a + b + e + g - 1,72 \cdot (r + c/2)$$

$$m_{Fe} = A_{Fe} \cdot l_{Fe} \cdot L$$

Série de type AMCC

$$A_{Fe, \min} = a_{\min} \cdot d_{\min} \cdot FF$$

$$l_{Fe} \approx 2 (f_{\max} - 2a) + 2 (e_{\max} - 2a) + \pi \cdot a_{\max}$$

$$m_{Fe} = A_{Fe} \cdot l_{Fe} \cdot L$$

A_{Fe} : section transversale du fer basée sur l'effet ; m_{Fe} :

Poids nominal du noyau ; l_{Fe} : longueur moyenne du

trajet du fer ; FF : Facteur de remplissage $\approx 0,82$;

ρ : Masse volumique = 7,18 g/cm³

Serie de Types

Le tableau suivant présente des exemples des séries de types AMCC et SU. Stock et autres types sur demande.

Typ	a	b	f		e	g	c		l_{Fe}	A_{Fe}	m_{Fe}	$A_{Cu, 50\%}$	l_{Cu}	O ca.	LI^2 typ
AMCC	[mm] max	[mm] max	[mm]	±	[mm] min	[mm] min	[mm]	±	[cm]	[cm ²]	[g]	[cm ²]	[cm]	[cm ²]	[VAs]
4	52,5	29,5	15	0,5	32,8	10	9	0,5	12,2	1,1	99	1,64	8,8	85	0,08
6.3	55	33	20	0,5	33	11	10	0,5	12,8	1,6	154	1,82	10,4	110	0,12
8	54	36	20	0,5	30	13	11	0,8	13,0	1,8	172	1,95	11,4	120	0,14
10	64	36	20	0,5	40	13	11	0,8	15,0	1,8	198	2,60	11,4	135	0,17
16A	64	36	25	0,5	40	13	11	0,8	15,0	2,3	248	2,60	12,4	145	0,22
16B	74	36	25	0,5	50	13	11	0,8	17,0	2,3	281	3,25	12,4	165	0,26
20	74	36	30	0,5	50	13	11	0,8	17,0	2,7	337	3,25	13,4	170	0,30
25	84	42	25	0,5	56	15	13	0,8	19,4	2,7	379	4,20	13,6	200	0,37
32	84	42	30	0,5	56	15	13	0,8	19,4	3,2	454	4,20	14,6	220	0,44
40	84	42	35	0,5	56	15	13	0,8	19,4	3,7	530	4,20	15,6	235	0,51
50	105	53	25	0,5	70	20	16	1,0	24,4	3,3	586	7,00	16,2	310	0,66
63	105	53	30	0,5	70	20	16	1,0	24,4	3,9	703	7,00	17,2	330	0,75
80	105	53	40	1,0	70	20	16	1,0	24,4	5,2	938	7,00	19,2	350	0,95
100	105	53	45	1,0	70	20	16	1,0	24,4	5,9	1 055	7,00	20,2	370	1,1
125	124	64	35	1,0	83	25	19	1,0	29,2	5,5	1 166	10,4	20,8	460	1,35
160	124	64	40	1,0	83	25	19	1,0	29,2	6,2	1 333	10,4	21,8	495	1,4
200	124	64	50	1,0	83	25	19	1,0	29,8	7,8	1 670	10,4	23,8	540	1,75
250	131	64	60	1,0	90	25	19	1,0	30,8	9,3	2 095	11,25	25,8	595	2,2
320	133	80	50	1,0	85	35	22	1,0	32,8	9,0	2 167	14,9	28,4	700	2,6
400	129	79	65	1,0	85	35	22	1,0	30,2	11,7	2 658	14,9	31,4	780	3,2
500	139	91	55	1,0	85	40	25	1,0	35,0	11,3	2 890	17,00	32,0	850	3,4
630	139	91	70	1,0	85	40	25	1,0	35,0	14,4	3 678	17,00	35,0	930	4,0
800A	139	91	85	1,5	85	40	25	1,0	35,0	17,4	4 466	17,00	38,0	1010	4,6
800B	159	101	85	1,5	95	40	30	1,0	39,0	20,9	5 972	19,00	39,0	1175	5,7
1000	176	107	85	1,5	105	40	33	1,0	42,2	23,0	7 109	21,00	39,6	1290	6,4
SU	[mm] max	[mm] max	[mm]	-	[mm] min	[mm] min	[mm]		[cm]	[cm ²]	[g]	[cm ²]	[cm]	[cm ²]	[VAs]
75b	128,6	75	41,1	1,1	78	25	24,7	1,0	27,9	7,7	1 539	9,75	23,2	550	2,2
90a	155,8	90	30,9	1,4	95	30	29,6	1,1	33,9	6,9	1 678	14,25	24,1	700	2,8
90b	155,8	90	50,9	1,4	95	30	29,6	1,1	33,9	11,6	2 824	14,25	28,1	800	4,8

Tableau : Valeurs nominales/standard mécaniques et magnétiques des types standard. O est la surface de l'enveloppe d'un noyau de ruban de coupe enroulé sans la surface de base. Le produit énergétique LI^2 peut varier considérablement en fonction de l'application.

Vous trouverez ci-dessous des explications et des informations sur ces paramètres.

Remarques sur l'utilisation des chokes

Les noyaux de bande coupés en alliages amorphes à base de Fe offrent une combinaison intéressante d'induction à haute saturation et de faibles pertes. Ils sont donc particulièrement adaptés aux PFC ou aux bobines de stockage dans les applications d'alimentation.

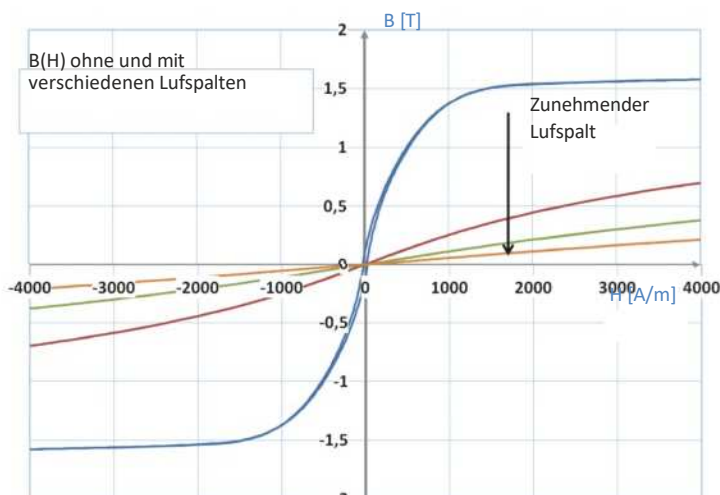


Fig. 3 : Courbe caractéristique typique B(H) des noyaux de bandes coupées amorphes

Dans la conception des bobines, on exploite que l'inductance L est proportionnelle au carré du nombre de tours N , mais que l'intensité de champ H dans le noyau n'augmente que linéairement avec le nombre de tours.

Des matériaux à faible perméabilité (c'est-à-dire des intensités de champ admissibles élevées sans que le noyau n'entre en saturation) sont utilisés et l'inductance souhaitée L est définie par le nombre de tours.

Les matériaux amorphes sont très perméables, de sorte que la capacité de charge actuelle des bobines d'arrêt avec des noyaux de bande de coupe amorphe est ajustée via un insert d'entrefer.

La courbe caractéristique « sans entrefer » a été mesurée sur une carotte coupée sans insert d'entrefer d'air. En élargissant l'entrefer la courbe caractéristique est de plus en plus « cisailée » et la capacité de charge actuelle augmente.

Au fur et à mesure que l'entrefer augmente, la perméabilité effective diminue et la capacité de charge du courant augmente. Un nombre plus élevé de tours est nécessaire pour atteindre l'inductance cible. De plus, les pertes supplémentaires dans le noyau et l'enroulement dues au déplacement du courant et aux distorsions de champ.

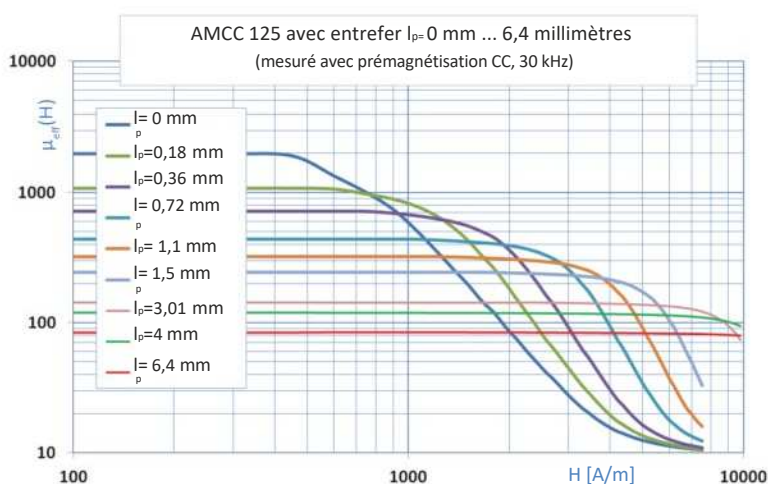


Figure : Perméabilité effective typique pour différents espaces d'air

Remarques sur la taille

Les petites tailles (et donc les faibles coûts) sont obtenues grâce à une utilisation maximale de la chambre d'enroulement en cuivre avec un contrôle maximal en même temps.

La **capacité de stockage d'énergie** E_{Drossel} , ou l'énergie stockée dans une inductance, est définie par l'**inductance L** et le **carré du courant**.

Elle correspond au travail nécessaire pour **magnétiser l'inductance** :

$$E_{\text{Drossel}} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

Cette relation reste valable tant que la **saturation de l'inductance** ou du **noyau magnétique** reste dans la zone linéaire.

Pour les inductances de stockage ou les inductances PFC, on peut déduire la relation suivante entre $L \cdot I^2$ et les caractéristiques du noyau de l'inductance :

$$L \cdot I^2 \approx S_{\text{eff}} \cdot A_{\text{Cu}} \cdot A_{\text{Fe}} \cdot \hat{B}_{\text{max}}$$

Dans cette analyse, la valeur I_L^2 résulte de deux composantes :

la **capacité thermique maximale en courant** $I_{\text{eff,max}}$ (valeur efficace) et le **courant magnétique maximal** $I_{\text{B,max}}$ (valeur de crête), sans que le noyau ne sature (chute de l'inductance).

Les grandeurs correspondantes dans la formule sont :

- la **densité de courant** S_{eff} ,
- l'**induction magnétique maximale** \hat{B}_{max} du matériau du noyau,
- et la **perméabilité effective** μ_{eff} , déterminée par l'entrefer.

La **densité de courant maximale** dépend de la **taille du composant**, des **possibilités de refroidissement** et des **pertes dans le cuivre**.

Ces pertes se composent de **composantes ohmiques**, ainsi que de **pertes supplémentaires dues aux effets de peau et de proximité**, et des **influences de fuite de champ** causées par l'entrefer.

Les **relations et méthodes de conception** sont relativement complexes.

Cependant, le chapitre suivant tente de proposer des **formules empiriques simplifiées** permettant une **estimation rapide (dimensionnement préliminaire)**.

En raison de la **grande diversité des cas pratiques**, une **vérification expérimentale approfondie** reste indispensable.

Nous signalons expressément que **nous n'assumons aucune garantie ni responsabilité** quant à la **validité des formules d'approximation**.

Definition der Ströme in Drosseln

Die Maximalwerte des Effektivstromes und desiSpitzenstromes
 .sind die Eckwerte für die thermische und magnetische
 Auslegung der Drossel

Les courants indiqués sont ceux qui se composent soit d'une composante de courant continu avec un courant d'ondulation (« ripple »), soit d'une fréquence fondamentale de 50–100 Hz avec un courant d'ondulation de fréquence plus élevée superposé. Le courant de pointe maximal ainsi que le courant efficace maximal doivent être pris en compte pour les selfs de stockage.

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

$$I_{\text{eff, ges}} = \sqrt{\left(I_{N,DC}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{R,ss}}{2}\right)^2}$$

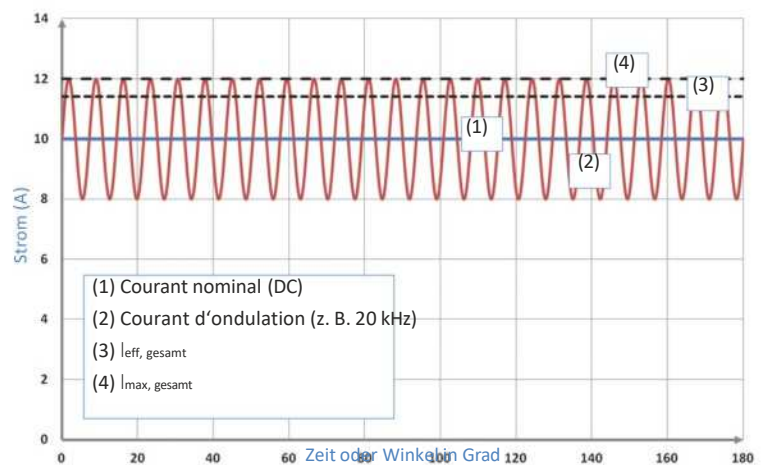


Figure : Courants dans une bobine de stockage (schéma)

Pour les selfs PFC :

$$\hat{I}_{\max} = I_{N,\text{eff}} \cdot \sqrt{2} + \frac{I_{R,ss}}{2}$$

$$I_{\text{eff, ges}} = \sqrt{\left(I_{N,\text{eff}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{R,ss}}{2}\right)^2}$$

D'autres fréquences d'ondulation doivent être prises en compte en conséquence.

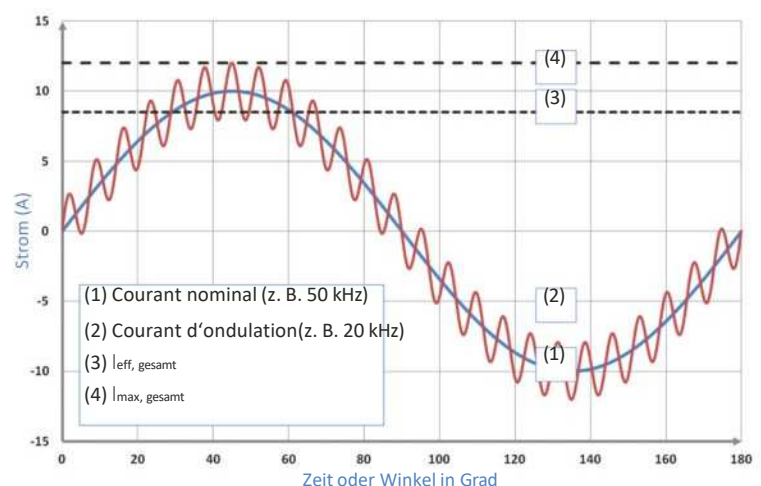


Figure : Courants dans une bobine PFC (schéma)

Estimation du gain maximal

Le contrôle maximal des étranglements dépend de l'induction du sciage du matériau de la chute de perméabilité ou d'inductance avec la charge actuelle.

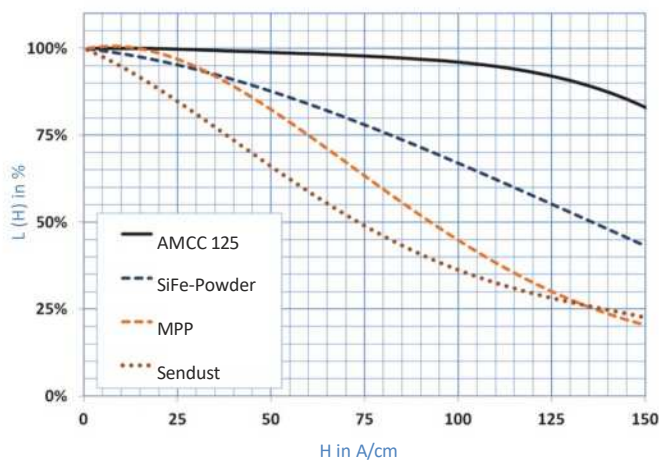


Figure : Dépendance de l'inductance vis-à-vis de la Contrôle de différents matériaux d'accélérateur avec perméabilité $\mu_{eff} \approx 60$ (comportement typique)

Un avantage des noyaux amorphes découpés à bande avec entrefer par rapport aux noyaux en poudre est une diminution nettement plus marquée de l'inductivité lorsque l'excitation augmente. Cela permet de réaliser des selfs optimisées en volume avec une plus grande « rigidité ».

Le maximum d'énergie d'une self se situe au point culminant de la courbe

$$E = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{eff}(H) \cdot H^2 \cdot V.$$

À cet endroit, la perméabilité ou l'inductivité a chuté d'environ 30 % par rapport à sa valeur initiale et, en raison de la chute abrupte caractéristique des noyaux amorphes, se trouve déjà relativement proche de l'induction de saturation. Une conception plus prudente se situe autour d'une baisse de l'inductivité d'environ 20 %.

Cette valeur résulte (avec une dépendance relativement faible vis-à-vis de la géométrie et de l'entrefer) de la représentation

$$B = \mu_0 \cdot \mu(H) \cdot H.$$

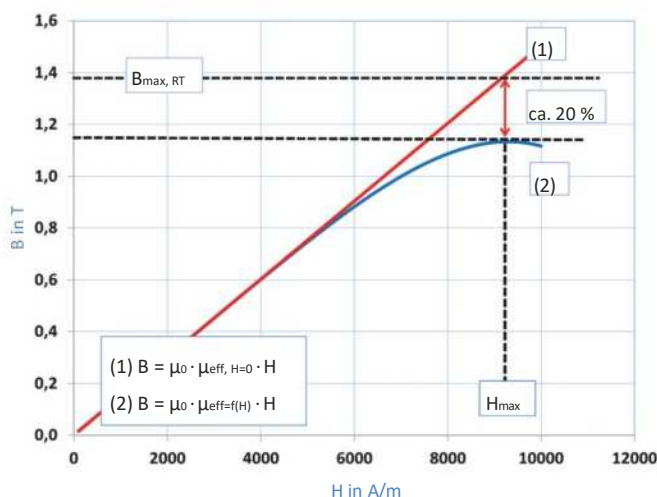


Figure : Comportement typique de « quasi » saturation des noyaux de bande coupée amorphe avec entrefer $\mu_{eff, H=0}$ est la perméabilité de l'effet dans la plage linéaire définie par l'entrefer.

Si l'on utilise pour $\mu(H)$ la perméabilité différentielle (au lieu de la perméabilité absolue physiquement correcte), on obtient un maximum « virtuel » de B correspondant à cette baisse d'environ 20 % de la perméabilité. Sans cette diminution de perméabilité, les noyaux seraient excités à environ 1,3 T à ce point.

Cette relation est illustrée dans la figure. En première approximation, on peut donc parler d'une « excitation optimale » théorique d'environ 1,4 T à température ambiante, ou d'env. 1,3 T pour des températures comprises entre 120 et 130 °C. Cela permet — indépendamment des différences habituelles entre jeux de caractéristiques pour chaque matériau de noyau et des variantes d'entrefers — une estimation directe de la perméabilité effective maximale pour le courant maximal appliqué \hat{I}_{max} en fonction du nombre de spires N (ou inversement) :

$$\hat{I}_{max} \approx 1,3 \text{ T} = \mu_0 \cdot \mu_{eff} \cdot \frac{N \cdot \hat{I}}{l_e}$$

Détermination le nombre de tours

Le nombre optimal de tours pour une inductance donnée doit être aussi faible que possible afin d'exercer le moins de contraintes thermiques possible sur l'enroulement sans entraîner magnétiquement le noyau.

Comme indiqué, on peut, en supposant une perméabilité constante, effectuer un calcul approximatif avec une induction maximale \hat{B}_{max} de 1,3 T. Cela permet d'estimer le nombre de spires « magnétiquement » possible N_{mag} .

À partir de la section efficace disponible du conducteur A_{Cu} , on peut, selon la densité de courant admissible S_{eff} , calculer le nombre de spires « thermiquement » maximal possible N_{therm} pour un cas d'application concret.

Ces relations sont représentées dans la figure en fonction de l'entrefer (et donc de la perméabilité effective). Comme on peut s'y attendre, il existe une plage optimale pour la densité d'énergie d'une self. Le nombre de spires optimal pour une dimension de noyau donnée résulte lorsque le noyau n'est ni magnétiquement ni thermiquement surchargé.

$$N_{mag,max} = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_{eff} \cdot \frac{I_{fe}}{l_e}}$$

$$N_{therm,max} = \frac{A_{Cu}}{l_{eff,cu} \cdot S_{eff}}$$

Si l'on pose $N_{opt} = N_{mag,max}$, il en résulte la relation suivante :

$$\mu_{eff} = \frac{B}{\mu_0 \cdot l_{max} \cdot \frac{I_{fe}}{A_{Cu}}}$$

Pour \hat{B}_{max} , on peut utiliser 1,3 T. Si un comportement linéaire est nécessaire, il faut utiliser des valeurs plus faibles.

Il reste comme « inconnue » la densité de courant S_{eff} . Les densités de courant typiques se situent entre env. < 1 A/mm² pour de forts courants et une convection naturelle, jusqu'à env. 5–10 A/mm² pour des courants plus faibles et des mesures de refroidissement supplémentaires.

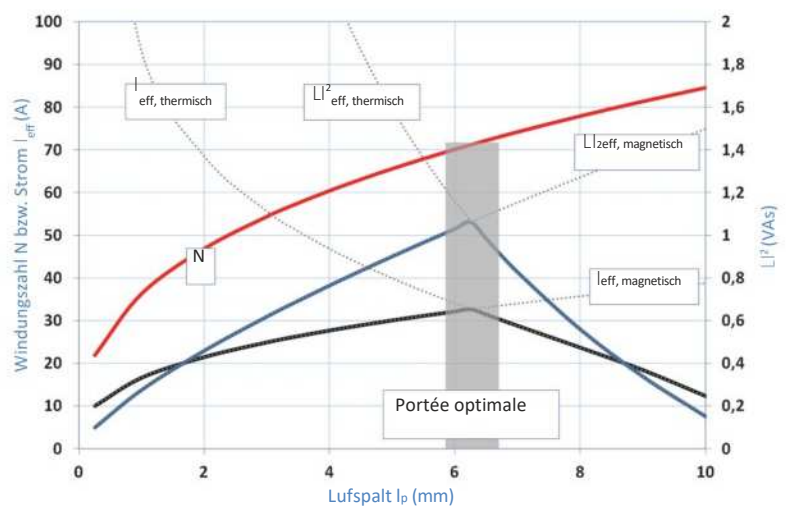


Figure : Estimation des courants thermiques et magnétiques admissibles pour un starter PFC avec noyau AMCC 125 et L = 0,6 mH. Hypothèses : ondulation du courant d'environ 20 % avec f = 20 kHz, surchauffe d'environ 75 K

Vous pouvez utiliser pour la densité de courant soit des valeurs empiriques, soit une valeur initiale estimée avec l'approximation suivante (pour la convection naturelle) :

$$S_{\text{eff}} \approx \sqrt{\frac{v \cdot O \cdot \Delta T}{c_1} + \frac{O}{c_2}} \text{ avec } c_1 \cdot \rho_{\omega} \cdot l_{\omega} \cdot A_{\omega}$$

S_{eff} : densité de courant effective en A/m²

v : part des pertes cuivre dans les pertes totales, p. ex. 0,5 pour des parts égales, p. ex. 0,7 pour une conception « orientée cuivre »

O : surface d'enveloppe de la self sans le fond, en m²

ΔT : surtempérature en K pour la convection naturelle

ρ_{ω} : résistivité électrique spécifique de l'enroulement (cuivre ou aluminium) en Ωm

l_{ω} : longueur moyenne du chemin du courant en m (cf. tableau 3)

A_{ω} : surface efficace du conducteur en m² (cf. tableau 3)

kWv : facteur correctif dépendant de la fréquence et du type de fil pour les pertes cuivre. Valeurs typiques : env. 2–3 à 20 kHz (cf. chapitre « Pertes et surtempérature »)

c_1, c_2 : facteurs correctifs provenant de la relation empirique pour la surtempérature en fonction de la surface d'enveloppe et des pertes.
 $c_1 \approx 0,1 \text{ m}^2/\text{W}$ et $c_2 = 1 \text{ K}$ (K = Kelvin)

Avec une valeur initiale choisie pour S_{eff} et la perméabilité effective μ_{eff} calculée à partir de celle-ci, on peut ensuite déterminer :

$$N \approx \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_{\text{eff}}} \cdot \frac{l_e}{I_{\text{fe}}}$$

le nombre de spires admissible du point de vue magnétique, puis vérifier si l'inductivité souhaitée L est atteinte :

$$L \approx N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_{\text{eff}} \cdot \frac{A_{\text{cu}}}{l_e}$$

L'entrefer l_k (= entrefer total) peut être approximativement estimé à partir de la perméabilité effective. La formule suivante a été interpolée à partir de mesures sur différents types AMCC et peut servir à déterminer une valeur initiale, qui devra toutefois être vérifiée empiriquement :

$$l_k \approx l_{\text{fe}} \cdot c \cdot \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{a} - 1 \right)^{\frac{1}{b}}$$

avec :

$a \approx 1,9$ (plage env. 1,5... 3)

$b \approx -0,7$ (plage env. -0,6... -0,8)

$c = \frac{l_{\text{fe}}}{A_{\text{fe}}} \text{ (cm)/(cm}^2\text{)}$

Si l'inductivité souhaitée L est bien atteinte, la densité de courant S_{eff} peut être réduite ou un noyau plus petit peut être utilisé. Inversement, si la densité de courant doit être augmentée, un noyau plus grand devra être utilisé.

Un inconvénient des entrefers plus importants est l'augmentation des pertes cuivre et fer dues aux champs de fuite. Si la self est commandée trop près de la saturation, le courant et la tension sont déformés par la diminution de l'inductivité.

Il faut d'abord estimer la charge thermique correspondant à la densité de courant choisie. Les mécanismes de perte sont relativement complexes et dépendent fortement de la structure concrète de l'enroulement, de l'entrefer et des possibilités de refroidissement. Les formules d'approximation décrites dans le chapitre suivant peuvent donc servir de référence ou de guide.

Pertes et surchauffe

Les pertes de cuivre dépendent de la fréquence et de la structure d'enroulement spécifique, les pertes de cuivre et de noyau dépendent également de l'entrefer en raison de l'influence du champ parasite. Les formules suivantes permettent de déterminer approximativement la surchauffe due aux pertes de cuivre et de noyau.

Les pertes cuivre se composent des parts ohmiques ainsi que des pertes dépendantes de la fréquence causées par les effets de peau (skin effect) et de proximité :

$$P_{cu} \approx \left(\rho_{\omega} \cdot \frac{l_{\omega} \cdot N^2}{A_{\omega}} \cdot I_{eff}^2 \right) \cdot K_{w \approx v}$$

Le facteur correctif $K_{w \approx v}$ dépend de la fréquence, du type de fil utilisé (litz ou fil massif), et de la structure concrète de l'enroulement (simple ou multicouche).

Dans la plage de fréquences moyennes autour de 20 kHz, des valeurs typiques de 2 à 3 sont courantes.

Pour les pertes du noyau dans les cœurs amorphes découpés en bandes, on trouve dans la littérature la formule d'approximation suivante, valable pour la plage d'env. 10–30 kHz, pour de faibles excursions (ripple de 10–30 %) et sans entrefer :

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

La fréquence **f** doit être saisie en **kHz**, la masse **mFe** en **kg** et \hat{B} en **tesla**. Il en résulte une valeur en **watts**.

Dans la littérature, on trouve pour les selfs utilisant des noyaux amorphes découpés en bandes la formule d'approximation suivante pour la surtempérature :

$$\Delta T \text{ [K]} \sim \left(\frac{c_1 \cdot P_{\text{Gesamt}}}{O} \right)^{0,85} \cdot c_2$$

Ici, **O** est, dans cette approximation, la surface d'enveloppe de la self sans le fond, en m².

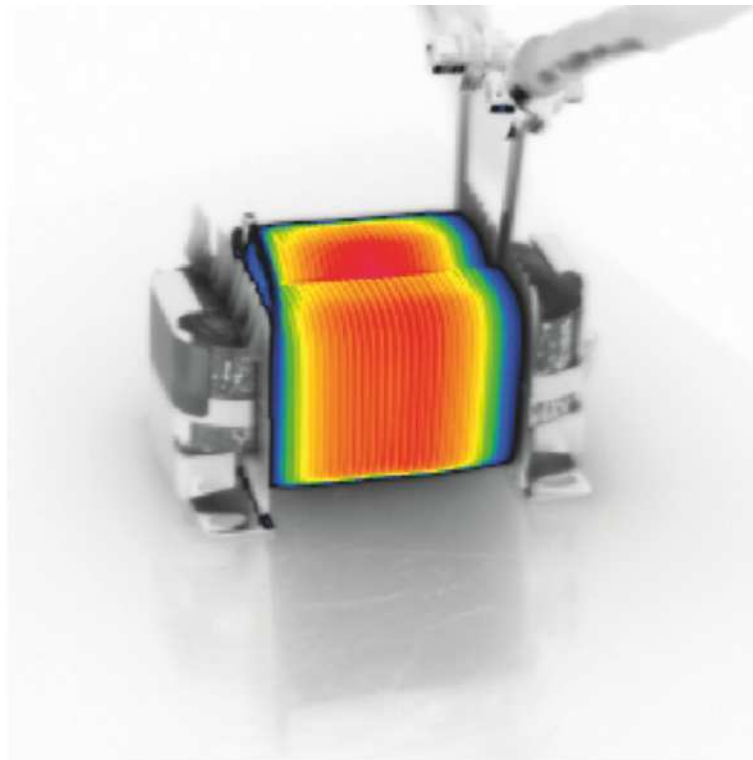
Les valeurs approximatives correspondantes se trouvent dans le tableau.

P_{Gesamt} représente les pertes totales en watts (W).

De plus, on a :

$c_1 = 0,1 \cdot \text{m}^2/\text{W}$ et $c_2 = 1 \cdot \text{K}$ (K = Kelvin).

Une vérification expérimentale est indispensable, car selon la construction et les conditions environnementales, des températures nettement plus élevées peuvent être atteintes.



L'imagerie thermique d'une bobine d'arrêt avec bobine de cuivre verticale de 7,1 x 2 mm² montre une surcharge thermique à un courant effectif de 52 A. Dans cet exemple, la valeur du courant thermique calculée à l'aide des formules était d'environ 10 à 20 % trop élevée.

Canettes et bandes de tension

Pour correspondre aux types de noyaux énumérés, nous proposons des formateurs de bobines et des sangles de serrage. Les formateurs de bobines sont fabriqués en polyamide 66 (nylon) chargé de fibre de verre. Les dimensions sont répertoriées dans le tableau.

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

Tableau : Dimensions nominales des bobines standard (en mm)

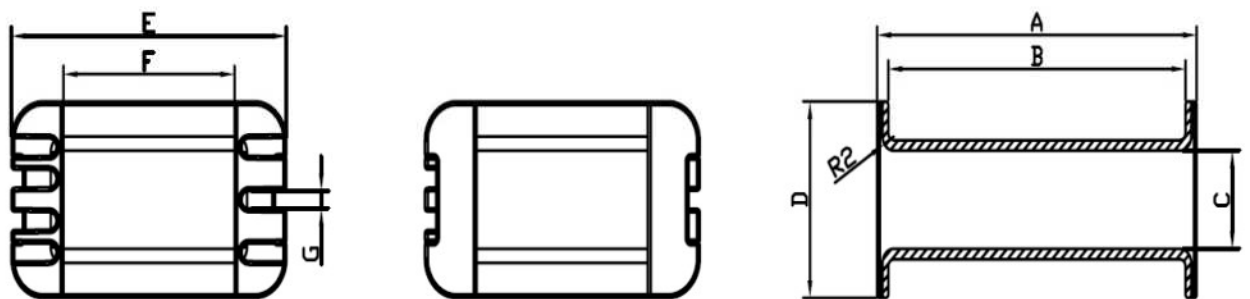
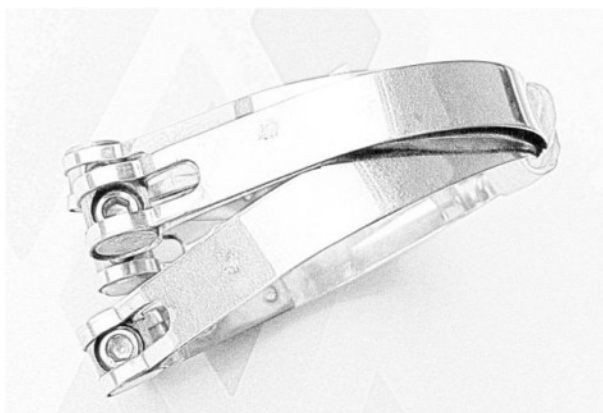


Figure : Dimensionnement des formateurs de bobines



Nous proposons des sangles de tension en acier amagnétique dans une bande passante de 6,2 mm et une fermeture avec des vis Allen.

Figure : Sangles de tension

Termes et définitions

Vous trouverez ci-dessous un résumé des symboles de formule utilisés avec une brève description.

Tableau des symboles, unités et descriptions

Symbole	Unité	Description
B	T (Vs/m ²)	Densité de flux magnétique (induction)
H	A/m	Intensité du champ magnétique
μ_{reff}	—	Perméabilité magnétique relative effective
μ_0	Vs/Am	Constante magnétique ($4\pi \cdot 10^{-7}$)
B_s	T	Induction de saturation
T_C	°C	Température de Curie
λ_s	ppm	Magnétostriction de saturation
ρ_o	$\Omega \cdot m$	Résistivité électrique spécifique
ρ	kg/m ³	Densité spécifique du matériau
A_e	m ²	Section magnétique effective
l_e	m	Longueur moyenne du chemin magnétique
FF	%	Rapport section magnétique / section géométrique
A_{Cu}	m ²	Section efficace du cuivre
l_j	m	Longueur moyenne d'une spire
O	m ²	Surface d'enveloppe de la self
E_{drossel}	VAs	Énergie stockée dans la self
L	H	Inductivité de la self
\hat{I}	A	Courant maximal de crête
I_{eff}	A	Courant efficace
N	—	Nombre de spires
S	A/m ²	Densité de courant
l_p	m	Entrefer total
P_{Cu}	W	Pertes cuivre
P_{Fe}	W	Pertes fer
$K_{w,l}$	—	Facteurs correctifs cuivre / total
V_{eff}	m ³	Volume effectif du noyau