

inductances SMT

bobines et ferrites - un choix simplifié

Dr. Heinz Zenkner (Würth Elektronik eiSos)

Comment choisir la bonne inductance pour votre application ? Cet article compare les différences entre trois composants SMT inductifs, à savoir les inductances céramiques, les ferrites SMT et les inductances en ferrite bobinées. Leurs propriétés électriques les rendent adaptées à différentes applications, et leurs propriétés physiques parasites peuvent être utilisées à votre avantage dans la conception des circuits électroniques.

Les composants inductifs sont disponibles sous de nombreuses formes. Les versions SMT sont très populaires, car elles sont faciles à monter sur les cartes de circuits imprimés. Cependant, toutes les inductances ne sont pas identiques, comme le montre cet article en utilisant trois variantes d'inductances SMT, avec l'inductance céramique, l'inductance ferrite SMT et l'inductance ferrite bobinée. La **figure 1** montre une comparaison des courbes d'impédance des trois types d'inductances :

- Ferrite SMT : WE-CBF [1]:
- Inductance SMT avec noyau céramique (« noyau à air ») : WE-KI [2]:
- Enroulements de fil sur un noyau de ferrite (« ferrite bobinée ») : WE-RFI [3]

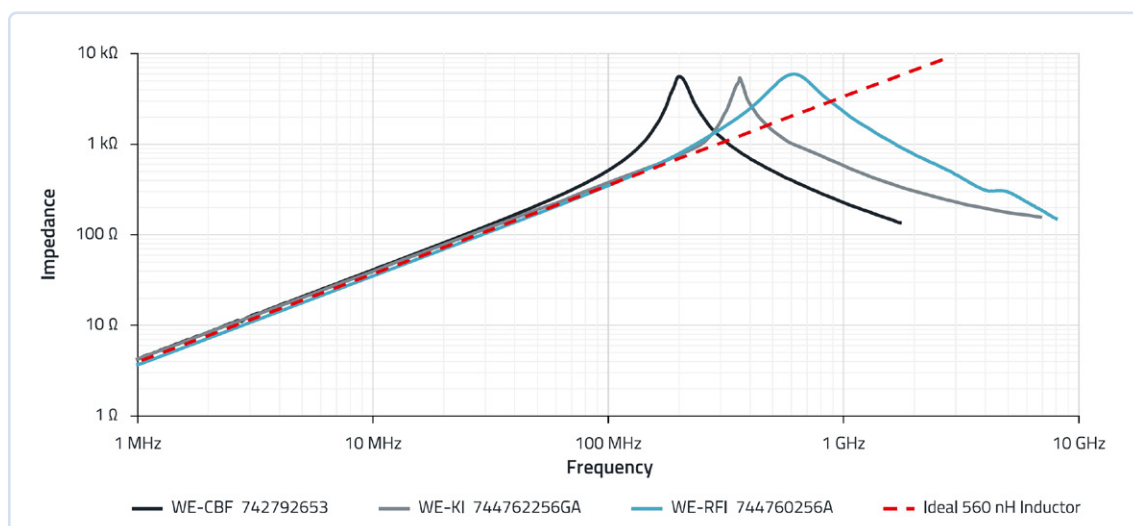
Les composants ont été sélectionnés de manière à présenter une courbe d'impédance similaire dans la plage située en dessous de leurs impédance maximale. Les différences d'impédance sont visibles dans la zone des pics, la ferrite SMT atteint son maximum à la fréquence la plus basse, tandis que la ferrite bobinée atteint son maximum à la fréquence la plus élevée. L'inductance en céramique présente la montée et la descente les plus raides dans la zone du maximum d'impédance, et par conséquent, le facteur de qualité Q le plus élevé.

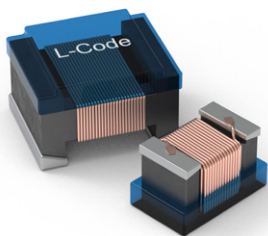
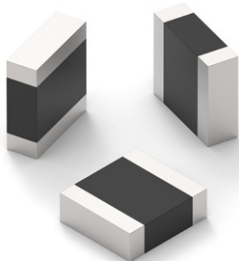
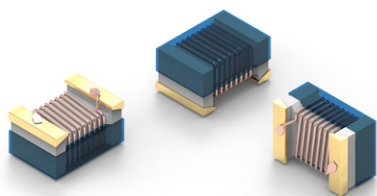
Comparaison des paramètres électriques

La **figure 2** compare les paramètres électriques des inducteurs. Pour les inductances sans noyau de ferrite (WE-KI), l'inductance est indiquée comme une valeur dans les fiches techniques, dans ce cas 560 nH. Bien que la valeur de l'inductance soit donnée pour une certaine fréquence mesurée, la valeur en dessous de la fréquence de résonance est quasiment constante (voir la fiche technique). En y regardant de plus près, la réactance de l'inductance n'augmente pas linéairement avec la fréquence. L'impédance de la bobine à noyau d'air est augmentée par deux effets, à savoir l'augmentation de la réactance par la loi de Lenz et l'augmentation de la résistance à cause de l'effet de peau.

Dans le circuit purement inductif, la bobine est connectée directement à la tension d'alimentation en courant alternatif. Lorsque la tension augmente et diminue avec la fréquence, la force contre-électromotrice (FCEM) auto-induite dans la bobine augmente et diminue également en fonction de ces variations. Cette force contre-électromotrice auto-induite est directement proportionnelle au taux de variation du courant dans la bobine

Figure 1. Comparaison des impédances de ferrites SMT, de l'inductance céramique/air et de la ferrite bobinée.





Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
Inductance	L	25 MHz	560	nH	±2%
Q-Factor	Q	100 MHz	45		min.
DC Resistance	R_{DC}	@ 20 °C	1.5	Ω	max.
Rated Current	I_R	$\Delta T = 15$ K	310	mA	max.
Self Resonant Frequency	f_{res}		430	MHz	min.

Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
Impedance @ 100 MHz	Z	100 MHz	600	Ω	±25%
Maximum Impedance	Z_{max}	200 MHz	4500	Ω	typ.
Rated Current 1	I_{R1}	$\Delta T = 20$ K	300	mA	max.
Rated Current 2	I_{R2}	$\Delta T = 40$ K	500	mA	max.
DC Resistance	R_{DC}	@ 20 °C	0.65	Ω	max.
Type	High Speed				

Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
Inductance	L	25.2 MHz	0.56	μH	±5%
Q-Factor	Q	100 MHz	45		min.
Impedance @ 100 MHz	Z	100 MHz	350	Ω	±25%
Maximum Impedance	Z_{max}	600 MHz	5570	Ω	typ.
Rated Current 1	I_{R1}	$\Delta T = 15$ K	450	mA	max.
Rated Current 2	I_{R2}	$\Delta T = 40$ K	620	mA	max.
DC Resistance	R_{DC}	@ 20 °C	0.55	Ω	max.
Self Resonant Frequency	f_{res}		340	MHz	min.

Figure 2. Comparaison des paramètres de la ferrite SMT, de l'inductance céramique/air et de la ferrite bobinée.

(loi de Lenz) et augmente donc avec la fréquence. Par conséquent, la réactance de l'inductance augmente également avec la fréquence, et cette fonction est proportionnelle.

Une augmentation supplémentaire de l'impédance est provoquée par l'effet de peau. À basse fréquence, un conducteur utilise toute sa surface transversale comme moyen de transport pour les porteurs de charge. Si la fréquence augmente, une augmentation du champ magnétique dans la direction du centre du conducteur représente une impédance pour les porteurs de charge, ce qui entraîne une diminution de la densité de courant au centre du conducteur et une augmentation de la densité de courant au bord du conducteur. Cette augmentation de la densité de courant à la périphérie du conducteur est connue sous le nom d'effet de peau. L'effet augmente avec la fréquence et se produit également avec tous les autres inducteurs (avec un noyau de ferrite).

La fréquence de résonance de l'inductance sans noyau de ferrite est principalement due à la capacité parasite entre les différentes spires. Dès que deux conducteurs sont disposés à proximité immédiate mais séparés par un diélectrique, et qu'il y a une différence de tension entre eux, un condensateur est créé.

La combinaison de ces capacités des spires est connectée en parallèle à l'inductance de l'enroulement, et forme ainsi un circuit résonant parallèle. En plus, il y a une capacité parasite entre les connexions (points de soudure), qui est parallèle à la capacité de l'enroulement. Il en résulte un circuit équivalent formé d'une capacité parasite totale en parallèle avec l'enroulement. Le circuit équivalent est illustré à gauche dans la **figure 3**.

Pour les inductances avec noyau en ferrite (WE-RFI) et les ferrites SMT (WE-CBF), la fiche technique n'indique pas une valeur d'inductance, mais une impédance à une fréquence de mesure donnée. On constate également que la ferrite SMT présente la tolérance la plus élevée, tandis que l'inductance sans ferrite présente la tolérance la plus faible.

Comme l'inductance WE-KI n'a pas de noyau en ferrite, elle nécessite plus de spires de fil pour la même impédance que les composants avec ferrite, ce qui explique pourquoi l'inductance WE-KI a également la résistance ohmique la plus élevée (R_{DC} , Résistance DC). Un facteur Q, c'est-à-dire un facteur de qualité, est spécifié pour la WE-KI et la WE-RFI, mais pas pour la WE-CBF. Le facteur Q est une mesure de la propriété dissipative d'une inductance. Les inductances ayant un facteur Q élevé ont de faibles pertes et une courbe d'impédance plus étroite. Les inductances avec un facteur Q faible,

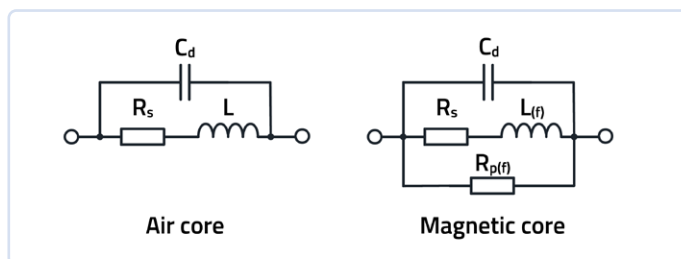
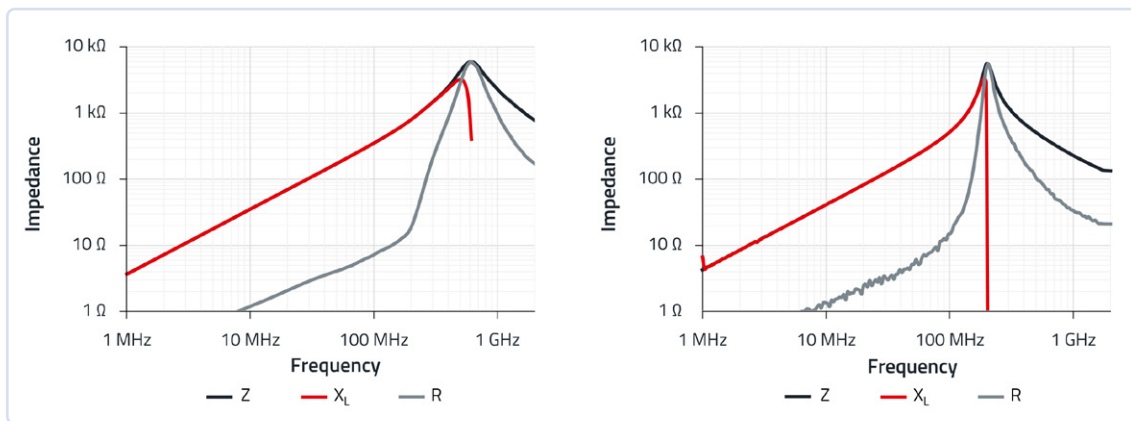


Figure 3. Circuit équivalent d'une inductance sans noyau magnétique (à gauche) et avec noyau magnétique (à droite).

Figure 4. Courbes d'impédance typiques de l'inductance WE-RFI 744760256A (à gauche) et de la ferrite SMT WE-CBF 742792653 (à droite).



en revanche, ont des pertes plus élevées et une courbe d'impédance plus large. L'amplitude de l'impédance maximale de l'inducteur est liée au facteur de qualité Q. Les inductances à faibles pertes avec un facteur Q élevé ont une impédance maximale très élevée, tandis qu'une inductance à fortes pertes a une impédance maximale plus faible. L'impédance maximale et la plage de fréquences du pic d'impédance peuvent être ajustées, en modifiant la façon dont une inductance est bobinée ou les matériaux utilisés pour le noyau. Mais qu'est-ce que l'impédance maximale ?

Les matériaux du noyau magnétique

La **figure 4** montre les courbes d'impédance en fonction de la fréquence de l'inductance WE-RFI et de la ferrite SMT WE-CBF. Les deux composants utilisent des matériaux ferrites comme matériau de base. Les diagrammes montrent chacun trois courbes différentes, avec R pour la résistance (ohmique), X_L pour la réactance (inductive) et Z comme valeur de l'impédance du composant. Il est important de comprendre ces diagrammes afin d'utiliser avec succès les inductances en ferrite dans les circuits.

Dans de nombreuses applications en radiofréquence, où de grandes valeurs d'inductance sont nécessaires dans un espace réduit, les inductances à « noyau d'air » ne peuvent pas être utilisées en raison de leur taille. La conception de l'inductance peut être réduite si le noyau d'air est remplacé par un noyau avec un matériau ayant une perméabilité magnétique plus élevée ($\mu_r > 1$).

Si la taille reste la même, la valeur de l'inductance est maintenue malgré la réduction du nombre de spires.

Cela permet d'obtenir plusieurs avantages :

- Une taille réduite, en raison du nombre de spires plus petit nécessaire pour une inductance donnée.
- Un facteur Q plus élevé, car moins de spires signifient moins de résistance du fil.
- Réglage de l'impédance de l'inductance en fonction de la fréquence, par sélection/mélange ciblé du matériau du noyau.

Pourtant, l'utilisation de noyaux magnétiques pose quelques problèmes importants, et il convient de veiller à ce que le matériau choisi pour le noyau soit le bon pour l'application concernée. Voici quelques-uns de ces problèmes :

- Chaque matériau de noyau présente de fortes pertes au-delà d'une plage de fréquences spécifique. Par exemple, l'ajout d'un noyau magnétique à une bobine à air peut réduire la qualité de l'inductance, en fonction du matériau utilisé et de la fréquence de fonctionnement.
- La perméabilité de tous les noyaux magnétiques varie avec la fréquence, et tombe généralement à une valeur très faible à l'extrémité supérieure de leur plage de fonctionnement. Elle

finit par se rapprocher de la perméabilité de l'air ($\mu_r = 1$) et devient « invisible » pour le circuit.

- Plus la perméabilité du noyau est élevée, plus il est sensible aux variations de température. L'inductance de la bobine peut donc fluctuer considérablement sur de larges plages de température.
- La perméabilité du noyau magnétique varie en fonction du niveau du signal appliqué. Si le courant traversant l'inductance est trop élevé et que la densité du flux magnétique à travers le noyau devient trop importante, le noyau va saturer.

Ces problèmes peuvent être résolus, en prenant garde au cours de la phase de développement, à ce que les inductances soient sélectionnées correctement pour l'usage auquel elles sont destinées. Pour cela, les diagrammes d'impédance avec les trois courbes d'impédance différentes R, X_L et Z sont nécessaires. Le comportement des courbes en fonction de la fréquence dépend en grande partie des propriétés magnétiques du matériau du noyau.

Le circuit équivalent d'une inductance sans noyau magnétique est illustré à la **figure 3** à gauche.

Le facteur de qualité d'un inducteur à « noyau d'air » est donné par l'**équation 1** :

$$Q = \frac{X_L}{R_S}$$

Où (**équation 2**) s'applique à X_L :

$$X_L = \omega \cdot L$$

où R_S est la résistance des bobinages.

Si un noyau magnétique est ajouté à l'inductance, le circuit équivalent ressemble à la **figure 3** (à droite). La résistance $R_p(f)$ a été ajoutée pour représenter les pertes qui se produisent dans le noyau lui-même. Ces pertes, qui dépendent de la fréquence, se présentent sous la forme d'un hystérésis magnétique. L'hystérésis est la perte de puissance dans le noyau, qui se produit en raison des courants de Foucault et du réalignement des particules magnétiques dans le matériau lorsque la magnétisation change. Des courants de Foucault circulent dans le noyau à cause des courants qui y sont induits. En plus de cela, l'inductance L dépend également de la fréquence $L(f)$, car comme mentionné auparavant, la perméabilité magnétique du matériau varie de manière non linéaire avec la fréquence f. La qualité d'une inductance à noyau de ferrite est donc un paramètre variable qui dépend du courant circulant dans l'inductance et doit donc être déterminée au cas par cas.

La ferrite est un matériau qui contient principalement du fer. Elle est fabriquée à partir d'un mélange d'oxyde de fer et d'autres micro-métaux. Comme le matériau a une faible conductivité électrique, il réduit les courants de Foucault, et par conséquent, les pertes dues aux courants de Foucault restent faibles. Une propriété particulière de ces matériaux est leur forte dépendance à la fréquence, à la densité du flux magnétique et à la température.

Perméabilité complexe

Les propriétés magnétiques des matériaux peuvent être décrites par la « perméabilité magnétique » μ . C'est une propriété qui quantifie la réponse magnétique de la densité de flux B , lorsque le matériau est exposé à un champ magnétique H . Elle est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique et au rapport entre les variations de B et de H (équation 3) :

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

La valeur de la perméabilité absolue μ exprime le rapport direct entre B (T) et H (A/m), l'unité SI résultante étant (H/m). La perméabilité relative est sans unité, elle se réfère à la perméabilité du vide (μ_0) et est généralement spécifiée dans les fiches techniques des inductances. Les valeurs relatives fournissent un indicateur facilement compréhensible, de la capacité du matériau en question à concentrer le champ magnétique « mieux » que le vide.

On obtient ainsi la relation suivante à l'équation 4 :

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

Avec μ_0 : Perméabilité magnétique du vide : $1,26 \times 10^{-6}$ (H/m). La plupart des matériaux ferritiques utilisés sont des mélanges de poudres de fer additionnées de manganèse-zinc (MnZn) et de nickel-zinc (NiZn), et μ_r est généralement compris entre 600 et 15 000 pour le MnZn et entre 10 et 1 500 pour le NiZn. Il est important de noter que la perméabilité relative dépend énormément de la fréquence du champ magnétique. En plus, les courbes de la figure 4 indiquent déjà que la perméabilité magnétique relative a deux composantes, une composante réelle μ' et une composante imaginaire μ'' . Cette perméabilité complexe devient pertinente avec les effets de champ magnétique à haute fréquence, dans lesquels un déphasage entre H et B se produit. Cette relation se traduit par l'équation 5 :

$$\mu = \frac{B_0 \cdot e^{j(\omega t - \delta)}}{H_0 \cdot e^{j\omega t}} = \frac{B_0}{H_0} \cdot e^{-\delta} = \frac{B_0}{H_0} \cdot \cos(\delta) - j \cdot \frac{B_0}{H_0} \cdot \sin(\delta)$$

appliquée à une inductance avec un noyau de ferrite se traduit par l'équations 6 et 7 :

$$L_S = \mu' \cdot L_0 \quad \text{and} \quad R_S = \omega \cdot L_0 \cdot \mu''$$

Où L_0 est l'inductance du bobinage sans ferrite.

La relation à l'équation 8 s'applique par conséquent :

$$\underline{Z} = j \cdot \omega \cdot L_0 \cdot (\mu' - j \cdot \mu'') = R + j \cdot X_L$$

Avec L_0 : Inductance sans ferrite.

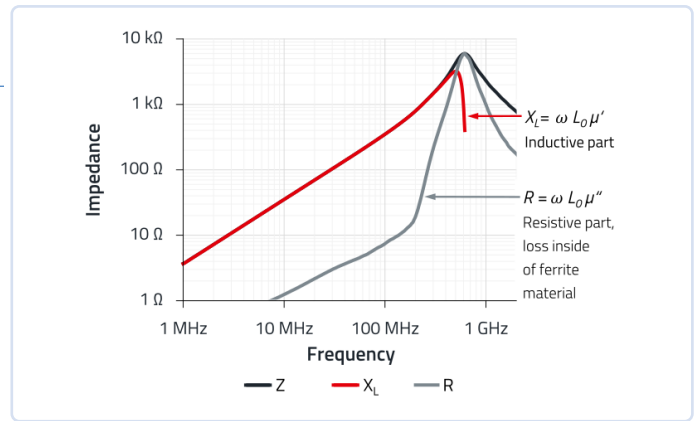


Figure 5. Courbes d'impédance de l'inductance WE-RFI 744760256A.

Il est facile de voir dans les formules qu'une perméabilité élevée conduit à une inductance élevée, mais elle est aussi habituellement associée à des pertes plus importantes dans le noyau.

Les différentes composantes de l'impédance, à savoir $Z(f)$, $X_L(f)$ et $R(f)$, sont indiquées dans les fiches techniques des inductances en ferrite. La figure 5 montre à nouveau les courbes d'impédance de l'inducteur WE-RFI 744760256A.

Cela montre également pourquoi les courbes d'impédance sont d'une grande importance pour le fonctionnement d'un circuit lors de l'utilisation d'inductances à noyau de ferrite. L'impédance (Z) est une combinaison vectorielle de la résistance et de la phase. La résistance ohmique R a une propriété dissipative, car l'énergie est convertie et non récupérée. La réactance X_L est la partie de l'impédance qui est générée par l'inductance. La phase est le retard entre une tension appliquée au composant et le courant qui le traverse. La résistance ohmique et la réactance varient avec la fréquence, et donc la phase également.

Mais ce n'est pas tout. Les matériaux magnétiques présentent des effets de saturation qui, au-delà de certaines fréquences, dépendent principalement de la densité du flux magnétique, c'est-à-dire du courant qui traverse l'inductance en ferrite. C'est ce que l'on appelle la saturation du noyau, un effet que l'« inductance à air » ne connaît pas. La figure 6 montre l'impédance des deux inductances WE-RFI 744760256A et WE-CBF 742792653 avec différentes polarisations en tensions continues selon la fréquence. La différence est clairement visible.

Les inductances bobinées sont moins sensibles à la polarisation en courant continu que les ferrites SMT, pour la même intensité nominale.

L'influence de polarisations magnétiques de différentes intensités sur les courbes d'impédance, peut être simulée pour toutes les références, à l'aide de la plate-forme de simulation en ligne RedExpert de Würth Elektronik [4].

Domaines d'application privilégiés des inductances

Le tableau 1 fournit une vue d'ensemble des paramètres les plus importants des trois types d'inductances et de leurs domaines d'application préférés.

Les aspects de la mesure du comportement de l'impédance, comme les conseils détaillés sur l'utilisation de la bonne inductance dans diverses applications, dépassent le cadre de cet article.

L'AppNote ANP129 de Würth Elektronik [5], sur laquelle cet article est basé, propose une configuration plus détaillée pour mesurer le comportement de l'impédance, et présente une méthode simple pour mesurer l'impédance.

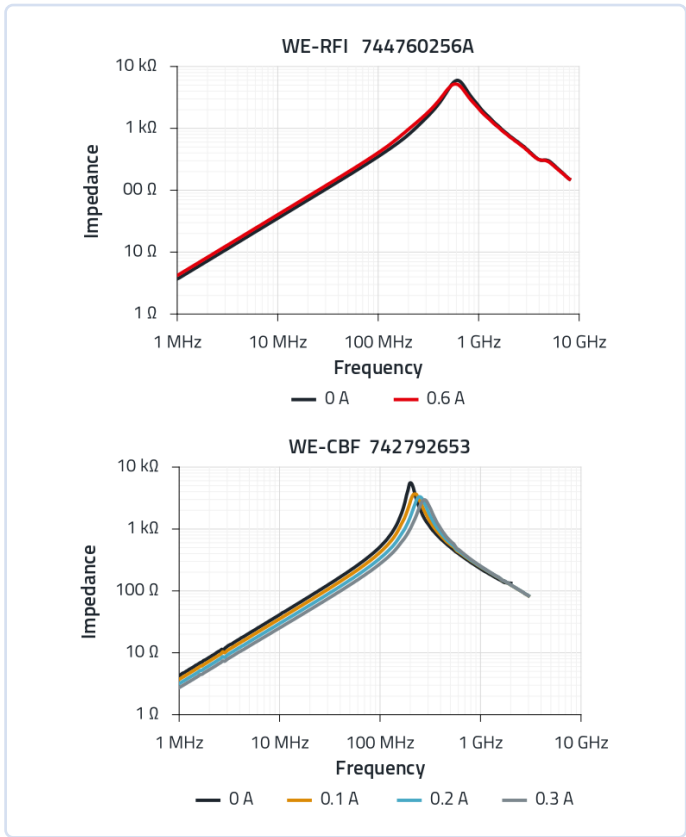


Figure 6. Impédance des deux inductances WE-RFI 744760256A et WE-CBF 742792653, avec différents courants de polarisation DC selon la fréquence.



À propos de l'auteur

L'ingénieur diplômé Heinz Zenkner a étudié l'électrotechnique, avec une spécialisation dans les technologies des communications et des radiofréquences, et il est titulaire d'un doctorat. Il est depuis de nombreuses années un expert officiellement mandaté et assermenté en matière de CEM. Outre ses nombreuses publications scientifiques, il est l'auteur de nombreux ouvrages sur la CEM. Heinz a également été chargé de cours dans diverses universités, à la Chambre de commerce et d'industrie et dans de nombreux séminaires. Il travaille depuis de nombreuses années dans le domaine de l'électronique industrielle, depuis l'idée initiale d'un produit jusqu'à la production en série. Il s'intéresse particulièrement à la transmission d'énergie sans fil, pour laquelle il a développé ses propres concepts théoriques et pratiques.

De plus, les différents champs d'application des différents types d'inductances sont illustrés avec l'exemple de l'utilisation d'un générateur de signaux de 20 MHz. ◀

VF : Laurent Rauber — 240520-04

Tableau 1. Aperçu et comparaison des paramètres les plus importants des ferrites SMT, des inductances en céramique, et des inductances ferrite bobinées.

Parameter	SMT ferrite	Ceramic inductor	Wire-wound ferrite inductor
Inductance range	---	low	high
Impedance range	high	low	high
Tolerance of the inductor	high	very low	low
Rated current range	high	very high	low
Loss resistance R_{DC}	low	very low	medium/high
Self-resonance frequency	high	very high	low/medium
Shape of the resonant frequency (bandwidth)	wide	narrow	narrow, multiple
Quality Q in the range below the resonant frequency	low	very high	medium
Preferred application	Attenuation/reduction of HF currents	HF filters and resonant circuits	High-frequency decoupling, steep filters, attenuation/reduction of HF currents

LIENS

- [1] Ferrite SMT WE-CBF de Würth Elektronik : <https://www.we-online.com/en/components/products/WE-CBF>
- [2] Inductance SMT avec noyau céramique de Würth Elektronik : <https://www.we-online.com/en/components/products/WE-KI>
- [3] Perles de ferrite bobinées SMT de Würth Elektronik : https://www.we-online.com/en/components/products/WE-RFI_FERRITE_BEAD
- [4] Exemple de simulation dans RedExpert : <https://we-online.com/re/5oGcZLA5>
- [5] Zenkner, H.: Inductances, ferrites SMT et ferrites SMT bobinées - Le fil fait la différence. AppNote ANP129 de Würth Elektronik : <https://www.we-online.com/ANP129>

ECiNews

La plateforme d'information de l'électronique



Composants actifs,
composants passifs, interconnexions,
hyperfréquences, instrumentation et
mesure, logiciels, IdO...

Pour tous les secteurs : automobile,
aéronautique et spatial, santé,
industrie, télécoms...

ECI News est la plateforme d'information française de l'électronique aux côtés des portails européens eeNews Europe, eeNews Embedded Europe et Microwave Engineering Europe édités par European Business Press.