

# Designvorteile durch nanokristalline Kerne

## SKDs mit breitbandiger Dämpfung sind für alle Temperaturen geeignet

Bei der Entstörung eines Gerätes weisen die verwendeten stromkompensierten Drosseln (SKDs) oft kein ausreichend breitbandiges Dämpfungsverhalten auf. Ihre Dämpfung ist entweder bei niedrigen oder bei hohen Frequenzen oder aber bei sehr niedrigen oder sehr hohen Einsatztemperaturen unzureichend. Oft scheitert man auch an Platzproblemen. Zudem begrenzen die durch hohe Unsymmetrieströme hervorgerufenen Sättigungseffekte oft die Wirksamkeit einer SKD. In all diesen Fällen sind Kerne aus nanokristallinen Werkstoffen gängigen Ferritkernen überlegen. DR. JOHANNES BEICHLER

B.04

Induktive Bauelemente mit nanokristallinen Kernen bieten große Vorteile in stromkompensierten Drosseln (SKDs) für EMV-Filter in Schaltnetzteilen, Frequenzumrichtern, unterbrechungsfreien Stromversorgungen, Schweißgeräten und Wechselrichtern (z.B. Photovoltaik) [1,2]. Mit nanokristallinen Werkstoffen wie Vitroperm lassen sich Filtercharakteristiken erzielen, die schon bei niedrigsten Frequenzen hohe Dämpfungswerte zeigen und im HF-Bereich durch niedrige Wicklungskapazitäten gleichfalls eine hohe Dämpfungswirkung aufweisen. Diese Eigenschaften bleiben über einen weiten Temperaturbereich von z.B. -40 °C bis +160 °C unverändert, so dass auch der Einsatz in Automotive-Anwendungen möglich ist.

Für Anwendungen mit niedrigen Unsymmetrieströmen können Kerne mit sehr hohen Permeabilitäten von bis zu 100.000 eingesetzt werden, die schon bei 10 kHz eine hohe Dämpfung ermöglichen. Im Fall hoher Unsymmetrieströme stehen Drosseln mit besonders sättigungsfesten Kernen mit Permeabilitäten von etwa 5.000 und der für Vitroperm typischen Sättigungsinduktion von  $B_s=1,2$  T zur Verfügung.

**AUTOR** Dr. JOHANNES BEICHLER  
Entwicklung Induktive Bauelemente / EMV  
Vacuumschmelze GmbH & Co. KG  
Johannes.Beichler@  
Vacuumschmelze.com  
Grüner Weg 37  
62450 Hanau  
T +49/6181/38-2293  
F +49/6181/38-82293

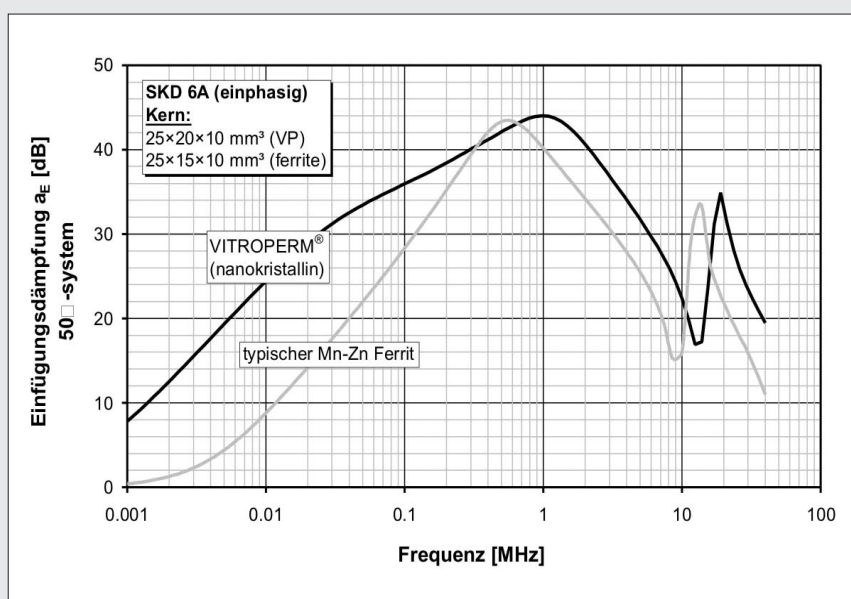


Abb.1: Typischer Dämpfungsverlauf einer SKD mit Ferritkern im Vergleich zu einer SKD mit Vitroperm-Kern bei gleichem Bauelementvolumen.

### Designvorteile durch nanokristalline Kerne

Das Ausgangsmaterial für nanokristalline Kerne sind ca. 20 µm dicke Folien aus einer Legierung auf Eisenbasis. Die Folien werden durch Rascherstarrung hergestellt und liegen danach zunächst in amorpher Form in Enddicke vor. Danach werden sie zu Ringbandkernen gewickelt und in einer anschließenden Feld-Wärmebehandlung, bei der auch die genauen Kerneigenschaften eingestellt werden, in den nanokristallinen Zustand überführt. Die Materialeigenschaften dieser Kernmaterialien ermöglichen SKDs mit hoher Dämpfung bei im Vergleich zu

Ferritdrosseln niedrigeren Windungszahlen. Dies führt zu geringen Kupferverlusten, kleinen Wicklungskapazitäten und damit verbunden zu exzellenten HF-Eigenschaften. Damit verbessert das Kernmaterial indirekt die Dämpfung bei Frequenzen, bei denen es eigentlich nur noch eine untergeordnete Rolle spielt und die parasitären Eigenschaften der Drossel dominieren [2].

In Abbildung 1 wird bei gleichem Bauelementvolumen der Verlauf der Einfügungsdämpfung einer SKD mit Ferritkern mit dem einer SKD mit Vitroperm-Ringkern verglichen, wobei letzterer wegen des größeren Innendurchmessers nur 56 Prozent des Kernvolumens hat. Die bisher hauptsächlich genutzte höhere

**Tabelle 1: Typische Eigenschaften nanokristalliner Kernmaterialien im Vergleich zu typischen Ferriten**

Material	Nanokristallin (VITROPERM)	Typischer MnZn-Ferrit
Anfangspermeabilität $\mu_i$	4000....150 000	10....10 000 (20000)
Max. Arbeitstemperatur $T_{op}$	150°C (kurzzeitig: 180°C)	< 120°C
Sättigungsflußdichte $B_s$ [T]	> 1.2	< 0.48
Ummagnetisierungsverluste $P_{Fe,typ.}$ [W/kg] 100 kHz, 300mT, 100°C	80	140
Koerzitivfeldstärke $H_c$ (statisch) [A/m]	<3	5....60 (...2000)
Sättigungsmagnetostriktion $\lambda_s$	$\mu > 10000: 10^{-8} \dots 10^{-6}$ $\mu < 10000: < 8 \cdot 10^{-6}$	$10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-5}$
Curie-Temperatur $T_c$ [°C]	> 600	150...200

Dämpfung bei niedrigen Frequenzen ist eine Folge der höheren Permeabilität des Vitroperm-Kerns [3, 4]. Doch auch die Dämpfungseigenschaften oberhalb 1 MHz sind wegen der niedrigeren Windungszahl und der dadurch geringeren Wicklungskapazität  $C_w$  besser [2]. SKDs mit Vitroperm-Kernen haben gegenüber Ferritdrosseln vergleichbarer Dämpfung ein deutlich kleineres Volumen [3, 4]. Durch den breitbandigeren Dämpfungsverlauf lässt sich oft die Anzahl der Filterstufen gegenüber einem Ferritdesign reduzieren.

Die Vorteile nanokristalliner Kerne basieren auf der hohen Anfangspermeabilität  $\mu_i$  und dem günstigeren Frequenzgang der Permeabilität (s. Abb. 3). In Anwendungen mit niedrigeren Unsymmetrieströmen lassen sich diese Vorteile voll ausnutzen. Wird das mit der Anwendung verträgliche  $\mu$ -Niveau durch hohe Unsymmetrieströme begrenzt (diese treiben einen hochpermeablen Kern früher in Sättigung als einen solchen mit niedriger Permeabilität), so müssen anstelle von hochpermeablen Kernen mit  $\mu = 50.000$  bis  $100.000$  niederpermeablere Kerne mit  $\mu = 4.000$  bis  $20.000$  eingesetzt werden. Gegenüber den mit  $\mu = 4.000$  bis  $10.000$  auf ähnlichem Niveau liegenden EMV-Ferriten bieten nanokristalline Kerne die höhere Sättigungsinduktion (1,2 T statt ca. 0,4 T).

Der Dämpfungsverlauf einer SKD mit nanokristallinem Kern ändert sich mit der Temperatur nur unwesentlich. Abbildung 2 zeigt dies für eine Vitroperm-Drossel im Vergleich mit einer Ferritdrossel, bei der ein hochwertiger MnZn-Kern mit einer Curietemperatur von  $T_c > 150$  °C verwendet wurde. Man erkennt eine drastische Änderung des Dämpfungsverlaufs der Ferritdrossel, die bei niedrigen Temperaturen ihre Ursache in einer deutlichen Abnahme der Permeabilität hat, während sie bei hohen Temperaturen in einer deutlich niedrigeren Güte  $Q (= \text{Im}(Z) / \text{Re}(Z))$  liegt. Bei Raumtemperatur und darunter erhält man bei  $f = 100$  kHz Q-Werte von 10–15, bei hohen Temperaturen Q-Werte von 1–2. Das hat zur Folge, dass das ursprünglich hohe Resonanzmaximum der Ferritdrossel (Resonanz von Hauptinduktivität mit Wicklungskapazität) niedriger wird und der Dämpfungsverlauf eine breitere Form annimmt. Das Verhalten des Vitroperm-Kerns ist hier grundsätzlich anders: Weder Permeabilität noch Güte sind nennenswert von der Temperatur abhängig. Daher ändert sich der Dämpfungsverlauf über der Temperatur praktisch nicht. Des Weiteren liegt Q (100 kHz) für die Vitroperm-Drossel stets im Bereich von 1 oder sogar darunter. Niedrige Q-Werte sind für eine EMV-Drossel wünschenswert, da dadurch die Störenergie in Form von Wärme im Kern absor-

B.04

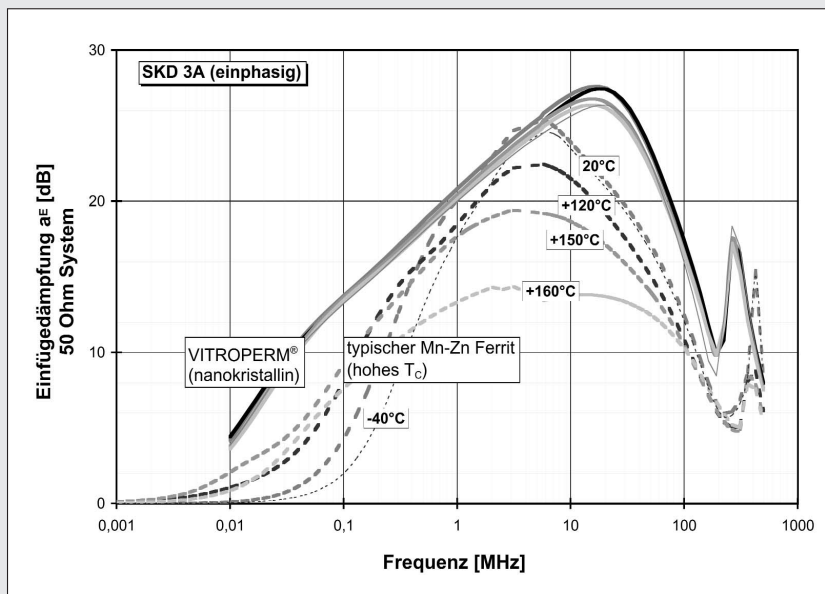


Abb.2: Änderung des Dämpfungsverlauf einer SKD mit Ferritkern (Curietemperatur > 150 °C, gestrichelte Linien) im Vergleich zu einer SKD mit Vitroperm-Kern (durchgezogene Linien).

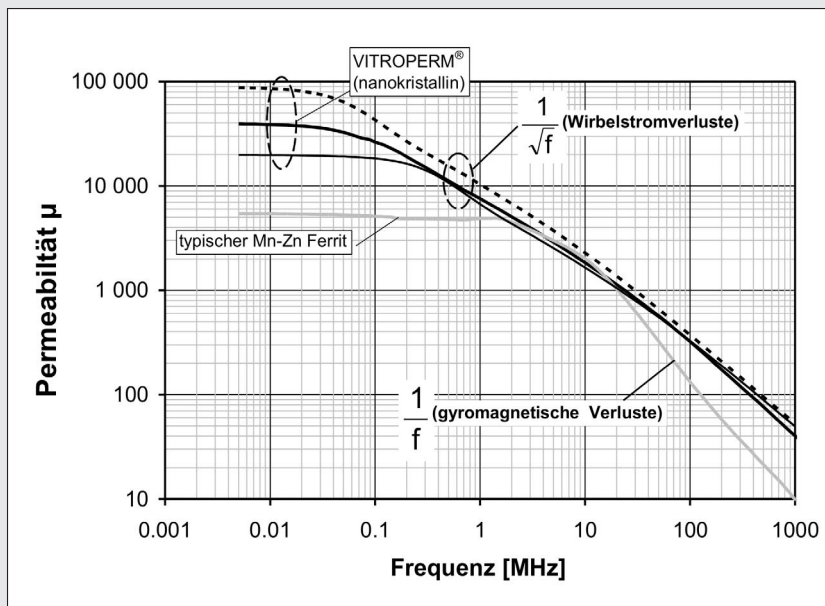


Abb.3: Frequenzgang der Permeabilität von Vitroperm (μ<sub>i</sub>=20.000, 40.000 und 90.000) im Vergleich zu einem typischen MnZn-Ferrit (μ<sub>i</sub>=5.000).

biert wird und nicht im Filter zirkulieren kann.

In diesem Fall hat die hohe Dämpfung der Ferritdrossel im Bereich des Dämpfungsmaximums ihre Ursache in der bei großem Q scharfen Resonanzkurve. Eine bei abnehmendem Q drastisch niedrigere Dämpfung im Bereich des Maximums ist daher vor diesem Hintergrund unvermeidlich. Beim Vitroperm-Kern erfolgt die Dämpfung bei allen Temperaturen besonders breitbandig und die oben geschilderte Absorption der Stör-energie im Kern findet daher besonders effektiv statt.

Da ihr Dämpfungsverlauf auch bei höheren Temperaturen nahezu unverändert bleibt, lassen sich Vitroperm-SKDs in Anwendungen mit besonders weit reichenden Temperaturanforderungen (z.B. im Automotive-Bereich) einsetzen – auch mit der Perspektive einer weiteren Volumenreduzierung.

### Materialeigenschaften

Das Potenzial für diese Designvorteile schöpfen nanokristalline Kerne aus den spezifischen physikalischen Eigenschaften der Kernmaterialien, die im Folgenden mit denen von Ferritkernen verglichen werden (siehe auch Tabelle 1).

Im gesamten Frequenzspektrum sind amorphe und nanokristalline Magnetkerne den Ferritkernen überlegen. In Abbildung 3 ist die Permeabilität μ dreier Vitroperm-Kerne mit verschiedenen μ-Niveaus im Vergleich zu der eines Ferritkerns über der Frequenz aufgetragen. Die Abbildung zeigt, dass die Permeabilität der nanokristallinen Kerne etwa ab der Wirbelstromgrenzfrequenz f<sub>g</sub> zu fallen beginnt (z.B. f<sub>g</sub>≈60 kHz für μ<sub>i</sub> = 40.000):

$$f_g = \frac{4 \cdot \rho_{el}}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_i \cdot d^2} \quad (1)$$

publish industry®  
TECHNISCHE KOMMUNIKATIONEN

Wo können Sie per E-Mail sofort Kontakt zu den Autoren des E&E-Kompodiums aufnehmen?

[www.EuE24.net!](http://www.EuE24.net!)

### LESETIPP



Das Medienkonzept für Elektronik & Entwicklung

E&E  
E&E-Kompodium  
[www.EuE24.net](http://www.EuE24.net)

**Tabelle 2: Vorteile durch nanokristalline SKDs**

Hohe Permeabilität $\mu$	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ kleine Baugröße</li> <li>→ hohe Dämpfung bei niedrigen Frequenzen</li> <li>→ kleine Windungszahl</li> <li>→ niedrige Wicklungskapazität</li> <li>→ niedrige Kupferverluste</li> <li>→ Reduktion der Anzahl der Filterstufen (wegen Breitbandigkeit)</li> </ul>
Verschiedene Permeabilitätsniveaus	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Anpassung an verschiedene Unsymmetrieströme z.B. für SNT (hohes <math>\mu</math>) oder Umrichter (niedrigeres <math>\mu</math>)</li> </ul>
Langsame Abnahme der Permeabilität zu hohen Frequenzen hin	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ hohe Dämpfung bei hohen Frequenzen. Oberhalb der Grenzfrequenz:</li> </ul> $\mu \leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} \quad \left( \text{Ferrit: } \mu \leftrightarrow \frac{1}{f} \right)$
	Obwohl die Permeabilität pro Frequenzdekade um einen Faktor von 3...4 abfällt, steigt die Dämpfung mit ca. 10 dB pro Dekade
Hohe maximale Arbeitstemperatur	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ hohe Umgebungstemperaturen möglich</li> <li>→ kleine Baugröße</li> <li>→ Einbauort unkritisch</li> </ul>
Geringe Temperaturabhängigkeit von $\mu, B_{S, -S}$	→ temperaturunabhängige Dämpfungseigenschaften
Sehr hohe Sättigungsinduktion $B_s$	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ hohe Unsymmetrieströme oder Common Mode Ströme</li> <li>→ kleine Baugröße</li> </ul>
Niedriger Q-Faktor im Bereich 150 kHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ breitbandige Dämpfung</li> <li>→ Störenergie wird im Kern absorbiert anstatt im Filter „herumzuvagabundieren“</li> </ul>
Hohe Linearität der Magnetisierungskurve	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ konstante Impedanz über einen weiten Common Mode Strombereich</li> </ul>
Sehr niedrige Magnetostriktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ unempfindlich gegen mechanische Belastung</li> <li>→ keine Geräusche im NF Bereich</li> </ul>

Dies geschieht näherungsweise mit  $1/\sqrt{f}$ , wie es für Wirbelstromverluste typisch ist. Der Verlauf für den Ferritkern ist bis in den unteren MHz-Bereich flach und geht erst dann in einen stetig fallenden Verlauf über. Da die Ummagnetisierungsverluste des Ferritkerns gyromagnetisch dominiert sind, verläuft der Abfall hier steiler, nämlich näherungsweise mit  $1/f$ . Im Bereich von 3–10 MHz liegen die Permeabilitäten beider Materialien relativ nahe beieinander, jedoch erweist sich der nanokristalline Kern bei höheren Frequenzen wegen des flacheren Frequenzverlaufs wieder überlegen. Ab etwa 10 MHz setzt bei den

nanokristallinen Kernen ein geringfügig steilerer Verlauf ein, ein Hinweis auf dann auftretende gyromagnetische Zusatzverluste. Die Abweichung von der  $1/\sqrt{f}$ -Abhängigkeit ist aber gering. Auch das Frequenzverhalten amorpher Kerne reagiert auf diese Weise. Näherungsweise laufen alle amphen und nanokristallinen Kerne bei hohen Frequenzen in die gleiche  $1/\sqrt{f}$ -Asymptote, deren genaue Lage nur von der Banddicke und schwach von der Sättigungsinduktion abhängt.

Die Permeabilität von Vitroperm ändert sich mit der Temperatur nur schwach (bezogen

auf Raumtemperatur  $\pm 5$  Prozent / -40 bis +120 °C), während Ferrite im gleichen Temperaturbereich Schwankungen von -30 bis +70 Prozent unterworfen sein können.

Vitroperm ermöglicht durch die hohe Sättigungsinduktion kleinere Baugrößen und höhere Unsymmetrieströme (bei vergleichbarem  $\mu$ -Niveau) als ein MnZn-Ferrit. Außerdem ist die Temperaturabhängigkeit der Sättigungsinduktion geringer: für 20 °C → 100 °C typisch -8 Prozent gegenüber bis zu -40 Prozent für Ferritkerne. Durch die hohe Curietemperatur von mehr als 600 °C darf die Arbeitstemperatur von Vitroperm 150 °C, für eine begrenzte Zeit sogar 180 °C erreichen verglichen mit 100–120 °C für typische Ferrite.

### Zusammenfassung

Nanokristalline Kerne haben sich in den letzten Jahren zunehmend in EMV-Filtern bewährt, bei denen es auf geringes Volumen, breiten Arbeitstemperaturbereich, hohe Anwendungstemperaturen und besonders hohe oder breitbandige Dämpfung ankommt. Bei unkritischeren Anwendungen, die mit Ferritkernen problemlos funktionieren, lassen sich durch die Möglichkeit, die Anzahl der Filterstufen zu reduzieren, zudem Kosten sparen. Die Designvorteile sind in Tabelle 2 nochmals zusammengefasst.

### Literatur

- [1] Petzold, J.: „Applications of nanocrystalline softmagnetic cores in modern electronics“; Soft Magnetic Materials 16 (09.-12.09.2003), Vol. 1, S. 97
- [2] Beichler, J. u. Ganz, S.: „Nanokristallines Vitroperm / EMV-Produkte“; Vacuumschmelze GmbH & Co KG, Produktschrift 2004
- [3] Petzold, J. u. Klinger, R.: „Nanocrystalline materials in common-mode chokes“; PCIM Europe 6/2000
- [4] Petzold, J.: „Nanokristalline Kernwerkstoffe in stromkompensierten Funkentstördrosseln“; EMC Kompendium 2001, S. 148

Beitrag als PDF auf [www.EuE24.net](http://www.EuE24.net)

more @ click **EESB0401** >