

Stromkompensierte Drosseln mit hochpermeablen nanokristallinen Kernen für den 1000 A – Bereich

Dipl.-Ing. Stefan Becker, Sekels GmbH, Entwicklung
Dipl. Phys.-Ing. Dietrich Sekels, Sekels GmbH, Geschäftsführung

1 Die Vorteile nanokristalliner Ringbandkerne für stromkompensierte Drosseln

Nanokristalline Ringbandkerne sind das ideale Kernmaterial für stromkompensierte Entstördrosseln. Ihre hohen Permeabilität ermöglichen volumenoptimierte Designs mit wenigen Windungszahlen und einem sehr breitbandigen Dämpfungsverhalten in einem weiten Temperaturbereich. Sie werden als Alternative zu Lösungen mit Ferritkernen in vielen Industrieanwendungen eingesetzt, und sind bei Anwendungen mit höheren Temperaturanforderungen (z. B. Automotive) erste Wahl.

1.1 Eigenschaften nanokristalliner Ringbandkerne für stromkompensierte Drosseln

Nanokristalline Ringbandkerne (RBK) sind eine Alternative zu Ferriten, dem Standardwerkstoff für die meisten Anwendungen. Ferrite sind wegen ihres hohen spezifischen elektrischen Widerstandes für Anwendungen im kHz-Bereich und höher gut geeignet und haben, auch aus Kostengründen, dünnbandige metallische Bandkerne weitgehend verdrängt. Ende der 70ziger Jahre gab es durch die Entwicklung von rascherstarrten amorphen weichmagnetischen Legierungen eine technisch interessante Alternative mit deutlich besseren Dämpfungseigenschaften. Jedoch bestanden die für diese Anwendung geeigneten Legierungen zu ca. 80% aus Cobalt und die daraus gefertigten RBK waren relativ teuer. Zudem waren auch die oberen Anwendungstemperaturen dieser extrem hochpermeablen Co-Basis-Legierungen auf ca. 80 °C limitiert.

Eine technisch und in bestimmten Fällen wesentlich spannendere Alternative zu Ferriten sind nanokristalline RBK. Erfunden 1988 von HITACHI, mit wesentlichen Entwicklungsbeiträgen von Dr. Giselher Herzer von der Vacuumschmelze GmbH & Co. KG, Hanau (VAC). Nanokristalline Legierungen werden auch durch ein Rascherstarrungsverfahren zunächst als amorphe dünne Folie hergestellt. Durch eine anschließende Wärmebehandlung bildet sich eine Kristallstruktur mit Korngrößen im 10 – 15 nm-Bereich aus, eingebettet in einer amorphen Restphase. Der wesentliche Legierungsbestandteil ist kostengünstiges Eisen, Von amorphen Fe-Basis-Legierungen unterscheidet sie eine fast verschwindende Magnetostriktion und dadurch deutlich höhere Permeabilität, praktisch keine Geräuschentwicklung und niedrigere Verluste.

Die Sättigungsinduktion der kommerziell am meisten verbreiteten nanokristallinen Legierungen liegt bei ca. 1,2 T. niedriger im Vergleich zu der lauten amorphen Variante, aber immer noch deutlich höher im Vergleich zu den magnetisch antiparallel gekoppelten Ferriten. Zudem ist die Temperaturabhängigkeit der magnetischen Eigenschaften

wesentlich geringer (fast schon vernachlässigbar), und das Dämpfungsverhalten wesentlich breitbandiger.

Einen schönen Überblick gibt die Broschüre „EMV Produkte aus nanokristallinen Legierungen“ der VAC. Tabelle 1 ist eine Zusammenfassung aus dieser Broschüre.

Vorteil	Ursache, relevante Werkstoffeigenschaft
Kleine Baugröße	Hohe Permeabilität μ , hohe Sättigungsinduktion B_s
Gut für hohe Ströme und /oder hohe Spannungen	Hohes μ , hohes B_s , geeignete Kernabmessungen
Einstufige Filterkonzepte möglich	Einstufige Filterkonzepte möglich Extrem breitbandiges Dämpfungsverhalten, hohes μ , kapazitätsarme Designs, moderate μ -Abnahme mit steigender Frequenz, niedriger Q-Faktor im Frequenzbereich von 150 kHz
Hoher Wirkungsgrad, geringe Verlustleistung	Geringe Windungszahlen für hohes L erforderlich, Filterstufenreduzierung
„green“, umweltfreundlich	Niedrige Verlustleistung, wenig Materialeinsatz
Geeignet für hohe und für tiefe Umgebungs-temperaturen und hohe Arbeitstemperaturen	Hohe Curie-Temperatur, Materialeigenschaften (μ , B_s , λ_s) nur gering temperaturabhängig
„easy filter design“	Materialeigenschaften (μ , B_s , λ_s) nur gering temperaturabhängig, lineare Magnetisierungskurve ermöglicht stabile Impedanz über einen weiten Common Mode Strombereich. Design-Software für SKDs verfügbar.
Optimale angepasste Lösungen für verschiedene Applikationen verfügbar	Unterschiedliche μ -Niveaus, unterschiedliche VITROPERM Legierungen
Keine Betriebsgeräusche	Nahezu magnetostruktionsfreies Material
Geringer Bewicklungseinfluss bei Verwendung von Starkdraht	Nahezu magnetostruktionsfreies Material, robust gegen mechanische Verspannung

Tabelle 1 Vorteile von stromkompensierten Drosseln mit nanokristallinen Ringbandkernen

Die Broschüre beschreibt auch die Unterschiede im Dämpfungsverhalten der metallischen nanokristallinen Ringbandkerne zu keramischen Ferriten. Entscheidend sind das hohe Permeabilitätsniveau, das wegen der a priori geringen Banddicke der nanokristallinen Folien gute Frequenzverhalten, sowie der durch die Wirbelstromdämpfung grundsätzlich breitbandigere Dämpfungsmechanismus. Die hohen Permeabilität ermöglichen zudem hohe Induktivitäten im niederfrequenten Bereich, die wiederum in Verbindung mit optimierten Wicklungstopologien ein sehr hohes Dämpfungs niveau mit wenig Resonanzeinfluss im höheren Frequenzbereich ermöglichen.

2 Stromkompensierte Drosseln für hohe Ströme

2.1 Klassische Sektorbewicklung

Bei stromkompensierten Drosseln im Bereich bis einige 10 A kann der Dämpfungsverlauf über der Frequenz durch eine einlagige und exakte Bewicklung (geringe Koppel- und Wicklungskapazitäten) spürbar optimiert werden. Im Strombereich größer 100 A ist dies

wickeltechnisch i. d. R. nicht zu realisieren, da trotz der hohen Permeabilität und den dadurch möglichen kleinen Windungszahlen die hierfür benötigten Kerne zu groß (und zu teuer) wären. In der Praxis können von dem ideal realisierbaren Dämpfungsverlauf insbesondere im MHz-Bereich meist auch Abstriche gemacht werden, da die meisten Störer bei niedrigeren Frequenzen zu finden sind. Es kann also „wild“ gewickelt werden, mit dem Vorteil das dadurch die eigentlich kleinen Streuinduktivität von Ringkerndrossel erhöht und dadurch das „Differential Mode“ Dämpfungsverhalten verbessert wird.

Bild 1 zeigt eine Ausführung mit einer parallelen Starkdrahtbewicklung in klassischer Sektor-Ausführung. Als Besonderheit werden spezielle Kabelschuhe eingesetzt, die eine extrem zuverlässige und höhenoptimierte Verbindung sicherstellen (Abb. ohne Gehäuse und Verguss).

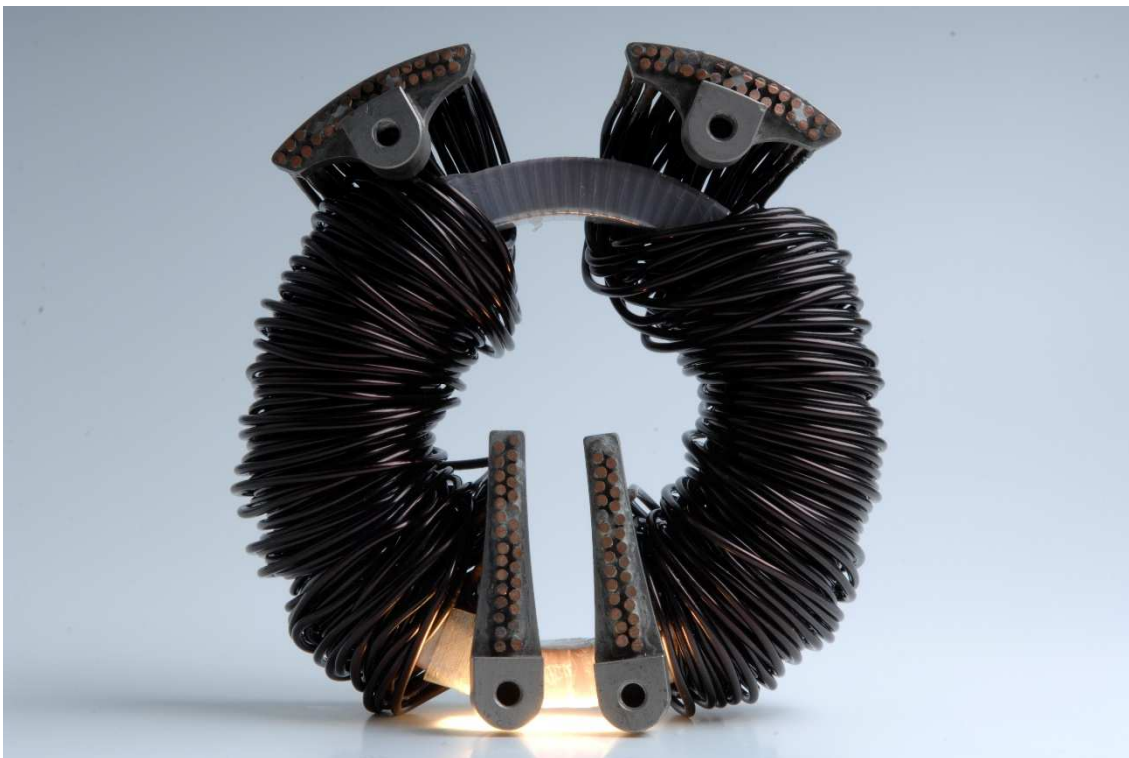


Bild 1 Hochstrom-SKD mit Starkdrahtbewicklung in klassischer Sektoranordnung

2.2 Klassische Sektorbewicklung mit Streusteg

Für eine weitere Verbesserung des Differential Mode Verhaltens kann ein Streusteg eingesetzt werden. Der wirkt im Prinzip wie eine zusätzliche (kleine) lineare Drossel und kann z. T. selbige einsparen. Bild 2 zeigt eine Starkdraht-Drossel mit Streusteg ohne Kabelschuhe und ohne Verguss.

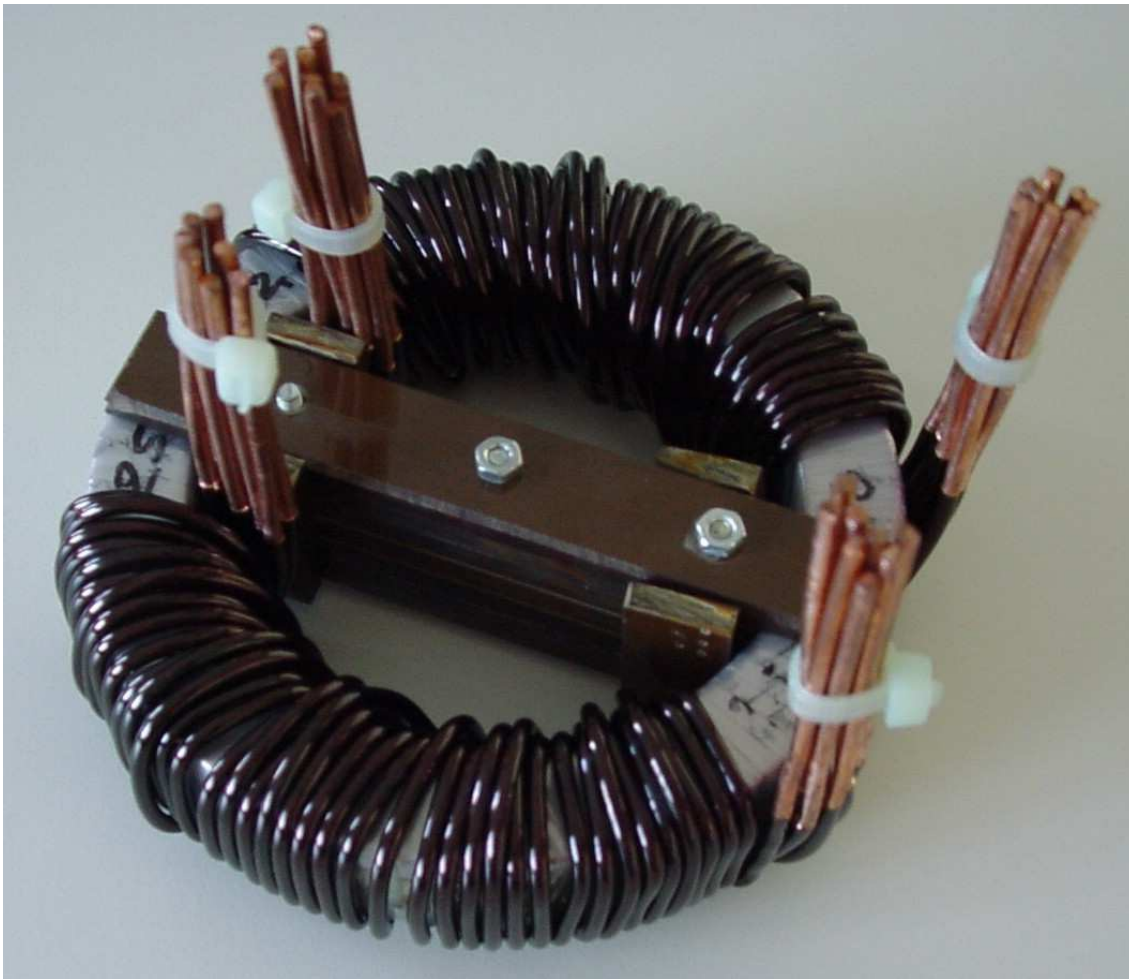


Bild 2 Starkdrahtdrossel mit Streusteg (ohne Kabelschuhe, vor Verguß)

3 Sättigungseffekte bei sehr hohen Strömen

Bekannt sind die Grenzen von hochpermeablen Kernen bei Anwendungen mit unsymmetrischen Lastströmen. Hochpermeable Kerne werden durch kleine Stromdifferenzen in den einzelnen Wicklungen schneller gesättigt (im Vergleich zu niederpermeablen Ferritkernen). Lösungsansätze sind nanokristalline Kernvarianten mit gezielt eingestellten niedrigeren Permeabilitätsniveaus. Sie bieten immer noch den Vorteil der höheren Sättigungsinduktion (wiederum im Vergleich mit Ferriten), sowie das unschlagbare Temperaturverhalten.

Bei Anwendungen von einigen 100 Ampere wurde ein weitere „Besonderheit“ von hochpermeablen Kernen festgestellt. Auch bei sehr geringen Unsymmetrieströmen bricht die Induktivität bei sehr hohen Nennströmen signifikant ein. Festgestellt wurde der Effekt zunächst bei Varianten mit Streusteg, der zur Verbesserung der Differential Mode Dämpfung (Gleichtakt-Dämpfung) verwendet wurde. Der Streusteg verstärkt den für die Differential Mode Dämpfung verantwortlichen Streufluss, der aber wiederum bei hochpermeablen Kernen zu lokalen Sättigungseffekten führt.

Streuflussbedingten Sättigungseffekte treten bei entsprechend hohen Strömen auch bei Drosseln mit hochpermeablen Kernen ohne Streusteg auf. Zum Verständnis des Effektes

hilft eine stark vereinfachte FEM-Darstellung der Flussdichten in Luft und Material, wie sie in Bild 3 schematisch gezeigt wird. In beiden Fällen ist eine übliche Sektor-Bewicklung mit 2 x 4 Windungen gezeigt. Durch den Streusteg wird der Fluss im Übergangsbereich stark konzentriert, und das Kernmaterial teilweise gesättigt (violett dargestellt). Hierdurch fällt die Nenn-Induktivität der Drossel ab Eintreten der partiellen Sättigung schnell ab. Ohne Streusteg (in der Rechnung wird ein „Steg“ aus Luft angenommen) treten erste Sättigungseffekte unterhalb der Bewicklung auf, jedoch erst bei ca. um den Faktor 2,5 höheren Strömen.

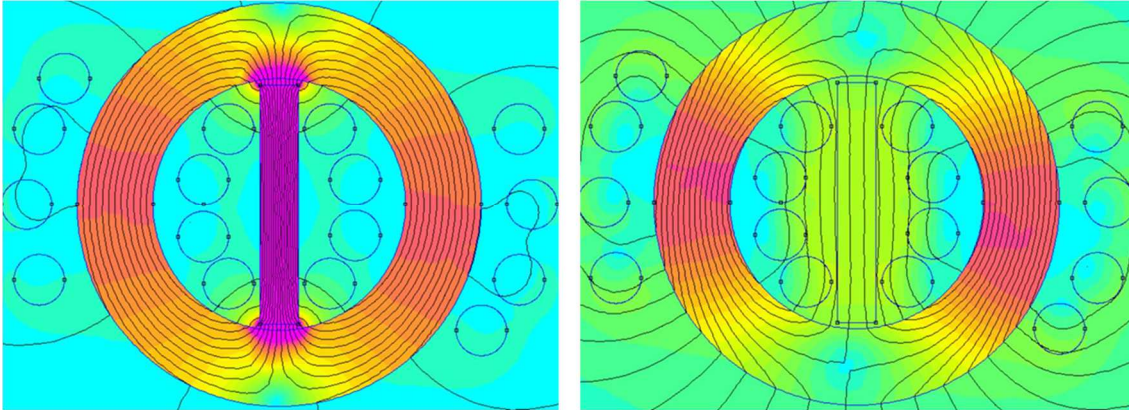


Bild 3 Sättigungseffekte bei stromkompensierten Drosseln unterschiedlicher Ausführung bei hohen Strömen (violette Bereiche)

4 Lösungsansätze für stromkompensierte Drosseln für sehr hohe Ströme

Ziel unserer Untersuchungen war ein Lösungsansatz für noch höhere Ströme, jedoch in einer kleinen Bauform. Also eine hochstromfeste Drossel mit allen Vorteilen von hochpermeablen nanokristallinen Ringbandkernen. Dies gelingt mit Hilfe einer streuarmlen Wickeltechnologie, die zwar grundsätzlich aus der Signaltechnik bekannt, jedoch nicht für höhere Ströme und zur Vermeidung von partieller Sättigung im Kernmaterial.

Nachteilig bei einem streufeldarmen Wicklungsaufbau ist das geringe Differential Mode Dämpfungsverhalten. Da dies i. d. R. im Gesamtkonzept des Filters oder des Dämpfungsverhaltens unverzichtbar ist, müssen zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden. Dies kann wiederum ein Streustegansatz sein, der in Verbindung mit einer Streuarmlen Wicklung höhere Ströme ermöglicht. Oder lineare Drosseln, wie z. B. zusätzliche Pulverkerne.

Bild 4 zeigt das Sättigungsverhalten schematisch von Drosseln mit streufeldarmen Wicklungsaufbau. Wo die Stromgrenzen liegen ist noch nicht ausgelotet. Rechnerisch kann mit einem solchen Lösungsansatz der Strombereich ohne Induktivitätseinbruch im Vergleich zur klassischen Sektor-Bewicklung um ca. den Faktor 4 erweitern. Selbst die Streusteglösung in Bild 4 ist mit dem doppelten Nennstrom gerechnet im Vergleich zur klassischen Sektor-Bewicklung ohne Streusteg, ohne dass Sättigungseffekte sichtbar werden (gleiches Farbschema). Zumindest im Ringbandkern.

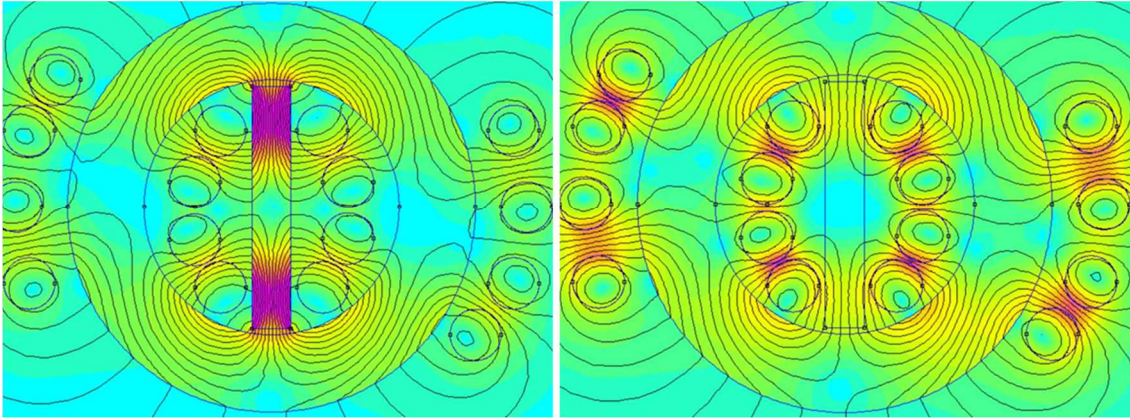


Bild 4 Sättigungseffekte (violett) bei stromkompensierten Drosseln mit streuarmer Bewicklung mit und ohne Streusteg

In Bild 5 sind die Ergebnisse aus Messungen und theoretischen Überlegungen schematisch zusammengefasst.

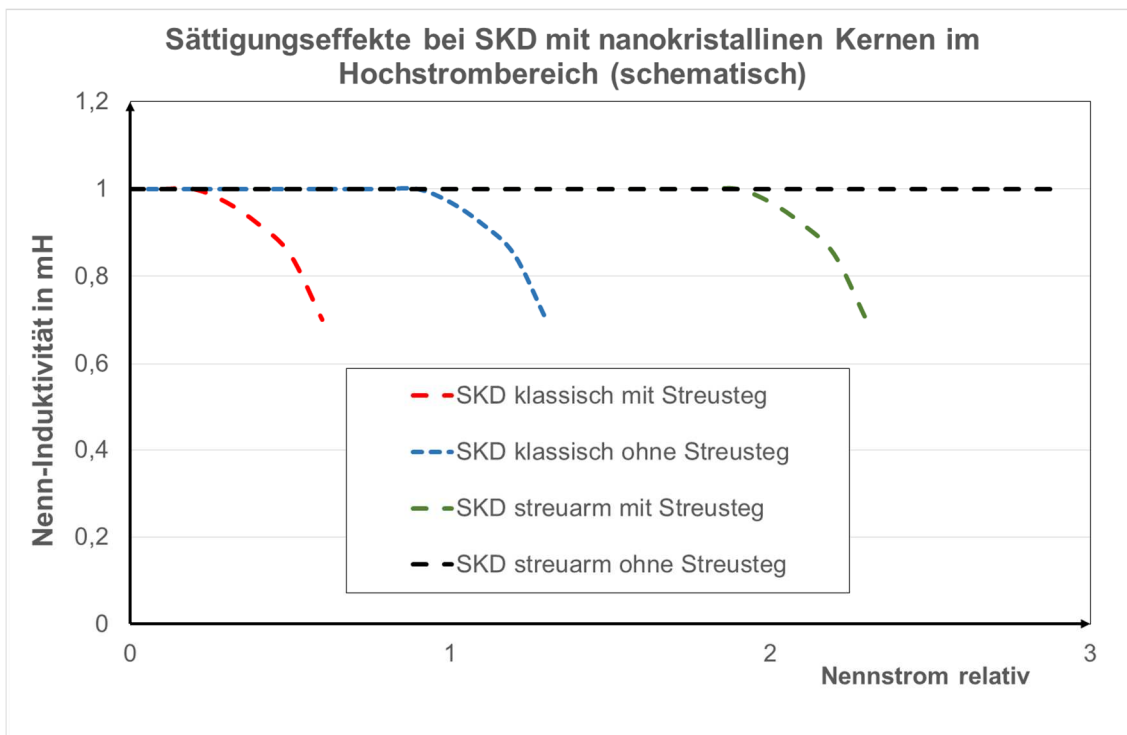


Bild 5 Sättigungseffekte bei stromkompensierten Drosseln mit/ohne Streusteg und unterschiedlicher Bewicklung (schematisch)

5 Zusammenfassung

Der Vortrag stellt volumenoptimierte stromkompensierte Drosseln mit hochpermeablen nanokristallinen Kernen vor, deren spezieller Wicklungsaufbau Induktivitätseinbrüche durch partielle Sättigungseffekte bei sehr hohen Strömen vermeidet. Die Nachteile der geringen Streuinduktivität können durch zusätzliche lineare Einleiterdrosseln oder eine Streusteg kompensiert werden.

Literaturangaben

- [1] Klinger, R., „Nanokristallines VITROPERM / EMV-Produkte“; Beichler, J., Vacuumschmelze GmbH & Co KG, Produktschrift 2010
- [2] Europäische Patentanmeldung 12 000 413.0 – 1556, Hochstromfeste, stromkompensierte Funkentstördrossel
- [3] Klinger, R., „Nanocrystalline Materials for the Next Generation of Noise Suppression Solutions“; Beichler, J., Magnetics Business & Technology, Fall 2013