

Stromkompensierte Drosseln in der Leistungselektronik: fairer praxisorientierter Vergleich zwischen Ferrit und nanokristallinen Materialien

Dipl.-Ing. Christian Paulwitz, EPCOS AG, EMV-Labor Regensburg
Dr.-Ing. Jörn Schliewe, EPCOS AG, Heidenheim
Dr.-Ing. Stefan Weber, EPCOS AG, München

1 Anforderungen an stromkompensierte Drosseln in der Leistungselektronik

In der Leistungselektronik hält der Trend zu immer kompakterer Bauweise und dadurch immer höherer Leistungsdichte weiter an. Dies gilt natürlich auch für den Aufbau von EMV-Filtern für Frequenzumrichter, in denen für den Aufbau stromkompensierter Drosseln hohe magnetische Flussdichten bei geringer Baugröße gefragt sind, um hohe Induktivitäten zu realisieren. Dies hilft allerdings zunächst nur der Filterung von Gleichtaktstörungen, während für die Gegentaktstörungen die Streuinduktivität der Drossel wirksam ist. Bei hochpermeablen Materialien und kleineren Geometrien ist diese generell kleiner als bei weniger hoher Permeabilität der magnetischen Drosselmaterialien. Hier wird anhand eines praktischen Beispiels die Auswirkung auf die Entstörung der Anwendung untersucht und der Frage nachgegangen, ob die Erwartung an die hochpermeablen nanokristallinen Materialien erfüllt werden kann.

2 Ansatz der Untersuchungen

Für einen nichtentstörten Frequenzumrichter wird eine Filterschaltung aufgebaut, wobei Drosseln unterschiedlicher magnetischer Materialien (nanokristallin bzw. Ferrit) ausgewählt werden, mit gleicher Induktivität bei 100 kHz, etwa dem Beginn des typischen Meßbereichs bei leitungsgebundenen Störaussendungsmessungen am Netzanschluss. Das Volumen der Ferritdrossel ist unter diesen Bedingungen etwa 30 % größer. Parallel zur jeweiligen Störspannungsmessung wird auch der asymmetrische Strom betrachtet. Unterschiede in der Entstörwirkung können zum einen durch unterschiedliche Wirkung der Drosseln bei Gleichtakt- und Gegentaktstörungen bedingt sein, zum anderen aber auch durch unterschiedliche Permeabilitätsverläufe über die Frequenz. Ein weiterer Aspekt ist das Sättigungsverhalten. Die Sättigungsanfälligkeit der Drossel wird vom asymmetrischen Strom beeinflusst und ist bei Ferriten typischerweise stark abhängig von der Materialtemperatur. Ausführliche Untersuchungen und Erläuterungen der Materialeigenschaften und des Verhaltens auch der Drosseln in folgender Untersuchung bei asymmetrischer Strombelastung und unterschiedlichen Temperaturen wurden bereits vorgestellt [1]. Hier geht es dagegen um die konkrete Auswirkung in der Anwendung am Beispiel von Störspannungsmessungen an einem Frequenzumrichteraufbau.

2.1 Auswahl der untersuchten Drosseln für das EMV-Filter

Es werden zwei Drosselpaare zum Vergleich ausgewählt mit jeweils gleicher Induktivität der Vergleichsdrosseln bei etwa 100 kHz und gleichem DC-Widerstand. Dadurch ist die

Ferritdrossel etwa 30 % größer. Das erste Drosselpaar (Induktivität bei 100 kHz etwa 1 mH) besteht aus einer hochpermeablen nanokristallinen Drossel (Nanoperm μ_r ca. 90.000 nach Datenblatt, Magnetec-Ringkern M-046-02, 2 x 7 Windungen – **Drossel 1**) und einer Ferritdrossel (Material T65 von EPCOS, R40x24x16, 2 x 12 Windungen – **Drossel 2**). Die Streuinduktivität liegt für Drossel 1 bei knapp 3 μ H und Drossel 2 bei etwa 8 μ H. Sie beträgt somit bei der Ferritdrossel das etwa 2,5-fache.

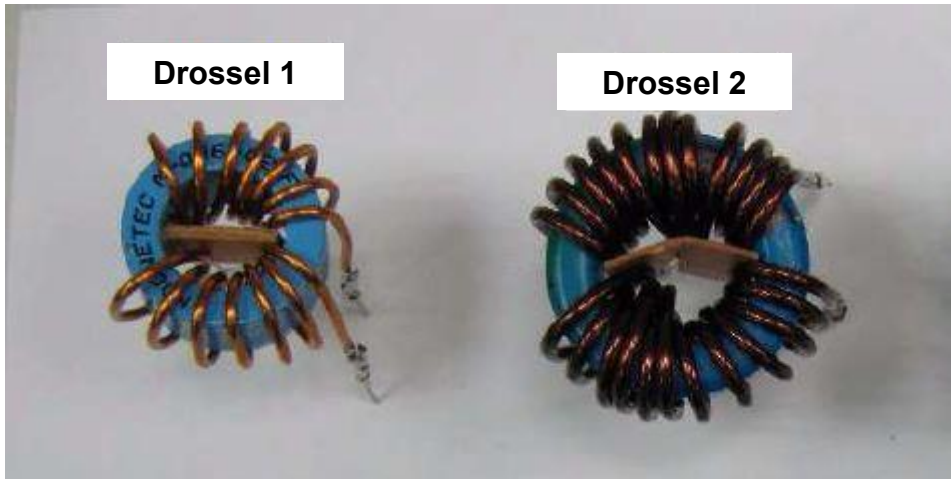


Bild 1: Drosselpaar mit 1 mH Induktivität bei 100 kHz: Drossel 1 und 2

Das zweite Drosselpaar liegt mit der Induktivität von 0,8 mH bei 100 kHz und besteht aus einer nicht ganz so hochpermeablen nanokristallinen Drossel (Nanoperm μ_r ca. 30.000 nach Datenblatt, Magnetec-Ringkern M-030-04, 2 x 7 Windungen -> **Drossel 3**) und einer Drossel mit gleichem Ferritkern wie Drossel 2 (jedoch 2 x 10 Windungen – **Drossel 4**). Die Streuinduktivität liegt für Drossel 3 bei knapp 3 μ H und Drossel 4 bei gut 6 μ H. Sie beträgt somit bei der Ferritdrossel immer noch mehr als Doppelte.

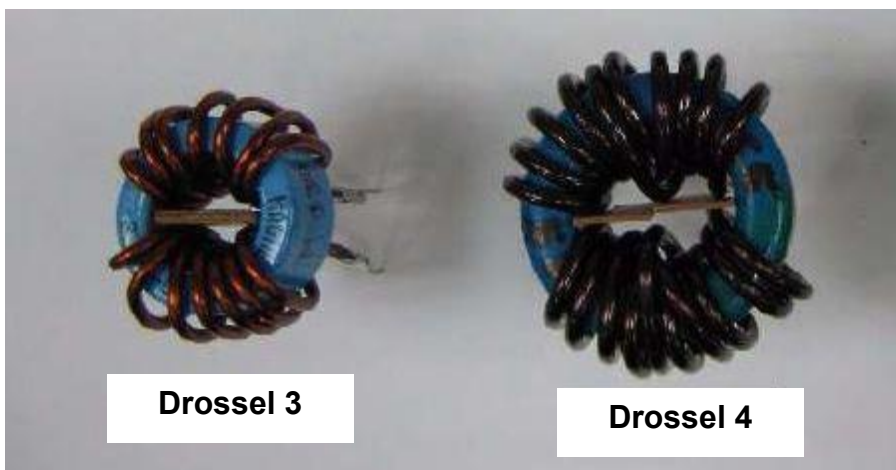


Bild 2: Drosselpaar mit 0,8 mH Induktivität bei 100 kHz: Drossel 3 und 4

2.2 Messaufbau

Es wurde ein Umrichter mit 750 W Leistung ausgewählt und die interne EMV-Filterbeschaltung entfernt. Diese wurde dann als bestückbare Platine vor den Umrichter gesetzt, die Kondensatorwerte für die Versuchsreihe konstant belassen (jeweils 470 nF zwischen den Leitern und jeweils 22 nF gegen Erde) und die stromkompensierte Drossel austauschbar bestückt. Der Aufbau erfolgte normgerecht [2] in einer geschirmten

Kabine mit 1 m Netzleitung an eine Netznachbildung angeschlossen sowie 15 m geschirmter Motorleitung an einem passenden Motor im Leerlauf. Die Platine mit der bestückbaren Versuchsfilteranordnung wurde mit einer provisorischen Styrodurkammer umgeben, um die Drossel im Messaufbau über Heißluft gezielt und unter reproduzierbaren Umständen erwärmen zu können. Dazu erhielten die jeweiligen Drosseln zwei Temperaturfühler zur besseren Beobachtung und Vermeidung ungleichmäßiger Erwärmung. Der Umrichter wird mit einer Ausgangsfrequenz von 10 Hz betrieben – modulationsbedingt kommt es hier zu höheren Gleichtaktströmen am Netzanschluss, was ja für die Untersuchungen von Bedeutung ist.

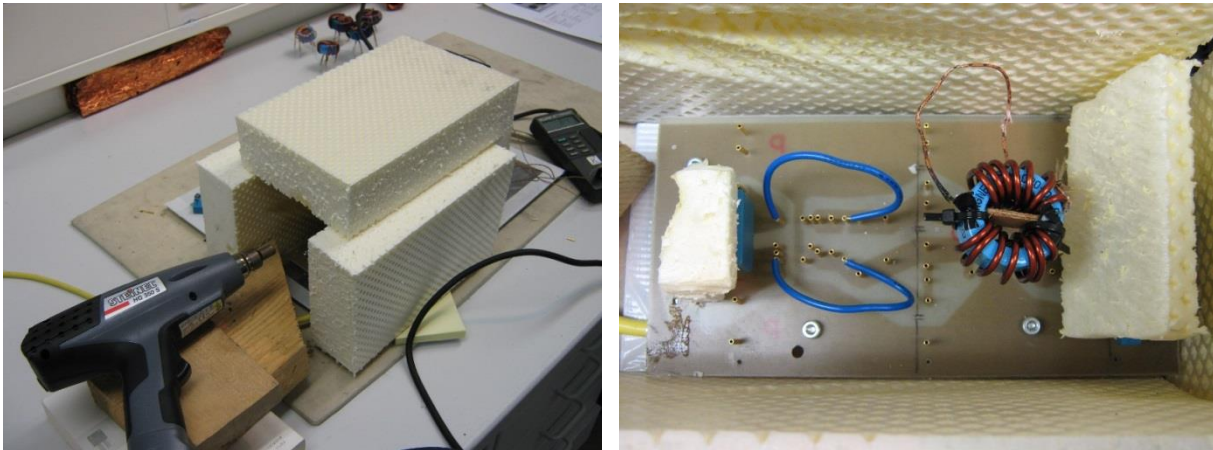


Bild 3: links: provisorische Kammer zur thermischen Entkopplung; rechts: Versuchsfilteraufbau mit Leiterbahnen (blau) zur optionalen Gleichtakt-Strommessung und stromkompensierter Drossel mit Thermofühlern, Kondensatoren gegen direkten Heißluftstrom durch Styrodurschirme geschützt (daher verdeckt)

Damit die Messergebnisse gut vergleichbar sind, wurden alle Messungen mit einem FFT-Empfänger durchgeführt, so dass jeweils Messdurchläufe mit QP- und CISPR-AV-Detektor auf beiden Leitern im stabilen Betriebszustand ermittelt werden konnten. Für einen umfassenden Eindruck der Drosselwirkung wurde der Frequenzbereich bereits bei 9 kHz begonnen. Oberhalb von 3 MHz sind die Ergebnisse nicht aussagekräftig, da die Pegel aufgrund guter Entkopplungsbedingungen und wirksamer Y-Kondensatoren gering waren – größere Differenzen bei Vergleich von Messungen ergaben sich dort zum Teil aufgrund von unterschiedlichen Rauschböden durch andere Vordämpfungseinstellungen.

3 Ergebnisse beim Vergleich der Drosseln 1 (nanokristallin) und 2 (Ferrit)

3.1 Schaltfrequenzeinstellung 4 kHz, Labortemperatur 27 °C

Da die Stabilität der Drossel in Frequenzumrichteranwendungen mit der asymmetrischen Strombelastung zusammenhängt, wird diese mit aufgenommen, um unterschiedliche Störspannungsergebnisse besser einordnen zu können. Bei einer Schaltfrequenzeinstellung von 4 kHz sind beide Drosseln bei Labortemperatur (etwa 27 °C) etwa gleich asymmetrisch belastet, und zwar relativ gering (Bild 4). Die Drosseln sind beide stabil.

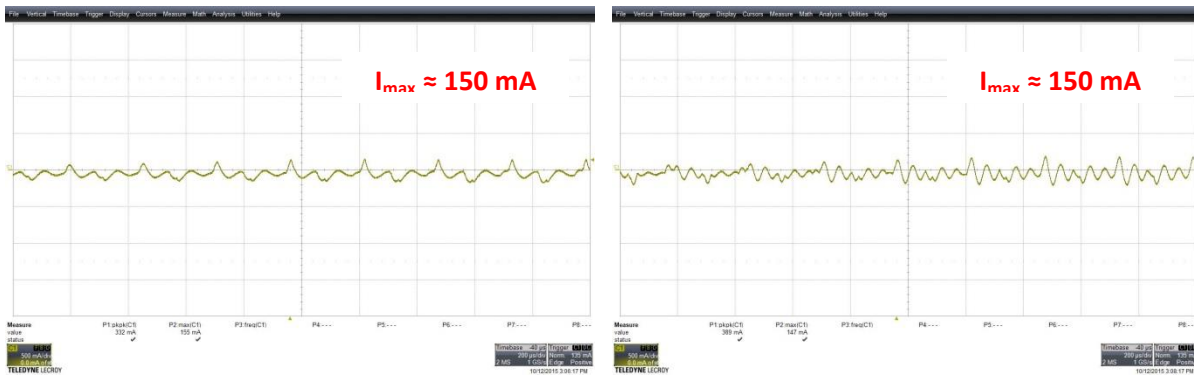


Bild 4: Gleichtaktströme mit Drossel 1 (links) bzw. Drossel 2 (rechts) bei 4 kHz Schaltfrequenz

Die Diagramme der Störspannungskurven enthalten jeweils eine rote und eine orangene Kurve (QP auf Leiter L bzw. Neutralleiter N) sowie eine blaue und eine hellblaue Kurve (CISPR-AV auf Leiter L bzw. Neutralleiter N). Offensichtlich ist die Performance der Ferritkurve insbesondere ab ca. 200 kHz deutlich besser – der höheren Streuinduktivität geschuldet.

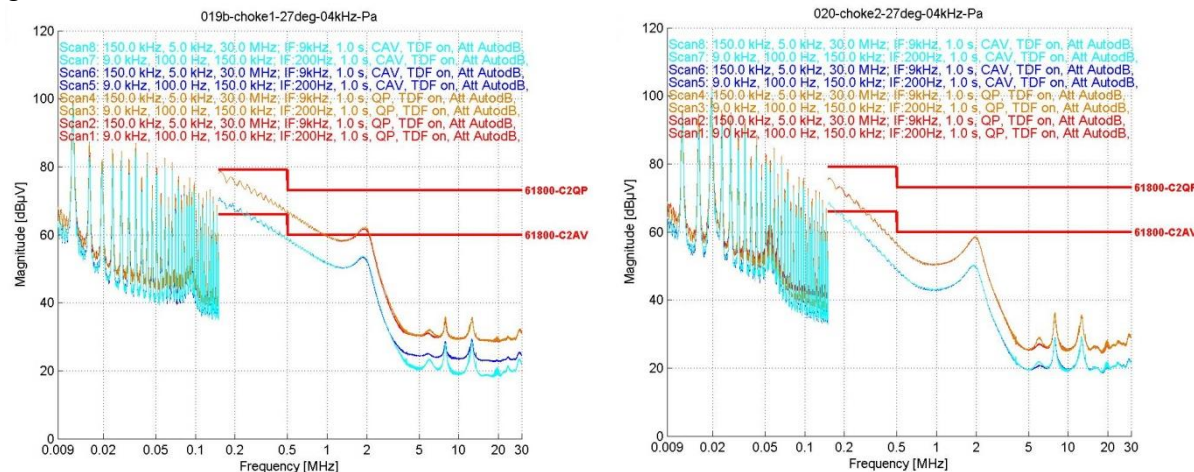


Bild 5: Störspannung mit Drossel 1 bzw. 2 bei 4 kHz Schaltfrequenz, Labortemperatur

Nun wurde für jede Messung eine QP-Kurve aus dem Maximum der beiden Leitern und in gleicher Weise eine Maximal-AV-Kurve gebildet. Durch Differenzbildung der jeweiligen Detektorkurven zwischen den beiden Drosseln kann anschaulich ein quantitativer Vergleich gezogen werden. Allerdings ist darauf zu achten, dass nicht aufgrund unterschiedlicher automatisch eingestellter Vordämpfungen Rauschböden miteinander verglichen werden. Oberhalb 3 MHz ist daher ein Vergleich nicht möglich.

Bei der Differenzbildung (Bild 6) sieht es auf den ersten Blick so aus, als ob die nanokristalline Drossel im unteren Frequenzbereich besser abschneiden würde, was angesichts einer höheren Induktivität aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften plausibel wäre. Auf den zweiten Blick sieht man jedoch, dass dies nur zum Teil zutrifft. Es gibt auch Unterschiede, die in der Messdynamik liegen. Dies wird besonders bei etwa 50 und 100 kHz deutlich. Für den unteren Frequenzbereich – unter 100 kHz – ist dies bei der Bewertung zu beachten. Vergleicht man die Spitzen der Schaltfrequenz-Harmonischen in den Störspannungskurven, sind die Pegel ähnlich. Bei 20 kHz scheint dagegen die höhere Induktivität der nanokristallinen Drossel zu wirken. Eindeutig sind jedoch die Unterschiede im Frequenzbereich zwischen 150 kHz bis 2 MHz – hier schneidet die Ferritdrossel in dieser Beispielanwendung um bis zu 10 dB besser ab – bei gleicher nomineller Induktivität bei 100 kHz, aufgrund der höheren Streuinduktivität.

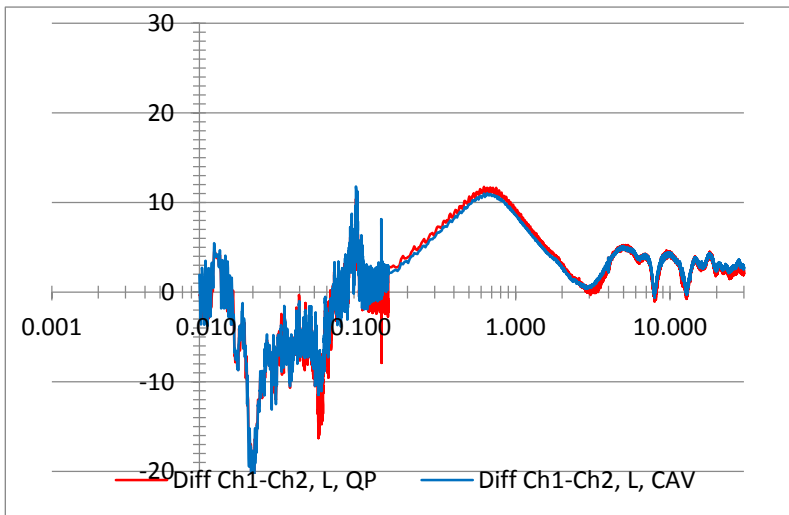


Bild 6: Differenzbildung der beiden QP- und AV-Maximalkurven der beiden Drosseln

3.2 Schaltfrequenzeinstellung 8 kHz

Auch hier zunächst die Gleichtaktströme mit den Drosseln etwa auf Labortemperatur (ca. 26 °C), zum besseren Verständnis der Interpretation der Störspannungskurven (Bild 7). Bei beiden Drosseln ist der asymmetrische Strom höher als bei der vorhergehenden Betriebsart, und bei der nanokristallinen etwas höher in der Spitze (Maxima spitz zulaufend) als bei der Ferritdrossel, was ein Hinweis auf Erreichen der Sättigungsgrenze ist. Die Induktivität ist dabei jedoch noch nicht vollständig zusammengebrochen.

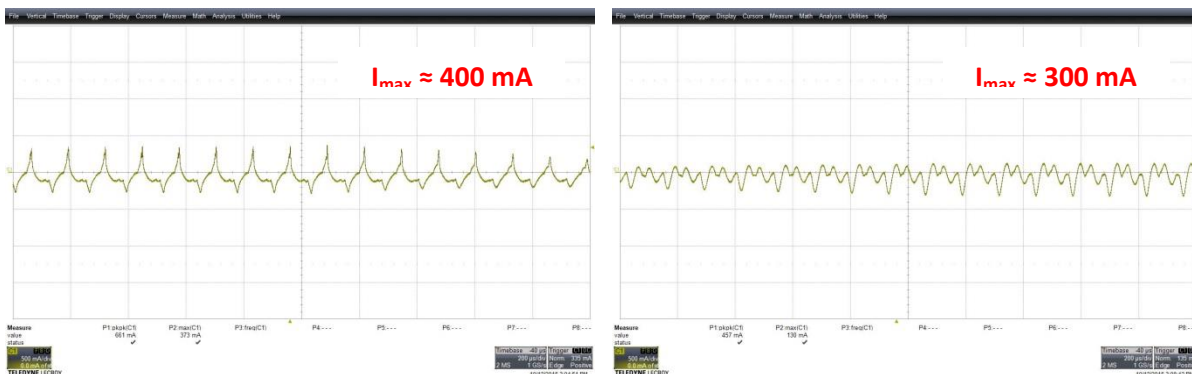


Bild 7: Gleichtaktströme mit Drossel 1 (links) bzw. Drossel 2 (rechts) bei 8 kHz Schaltfrequenz

Die Teil-Sättigung der nanokristallinen Drossel zeigt sich in der Störspannungsmessung. Auch hier ist der Vergleich oberhalb 3 MHz aus den geschilderten Gründen nicht möglich und die Vergleichskurve (Bild 9) unterhalb 150 kHz ebenfalls nur teilweise aussagekräftig, aber es ist deutlich, dass oberhalb von etwa 70-80 kHz die Dämpfung der nanokristallinen Drossel deutlich schlechter ist, und zwar aufgrund der Teilsättigung durch die asymmetrische Strombelastung, mit der die Ferritdrossel zunächst besser umgehen kann.

Wird Drossel 1 nun auf eine höhere Temperatur (bis 100 °C) gebracht, bleiben die Eigenschaften dieses nanokristallinen Materials weitgehend gleich, jedenfalls im Hinblick auf die Impedanz der Drossel. Bei Ferrit ist dies etwas anders, wie hier zwei Messungen zeigen (Bild 10) und der Vergleich mit der Drossel bei Labortemperatur deutlich macht

(Bild 11). Auch hier Vorsicht bei den Ergebnissen unter 150 kHz und diejenigen oberhalb 3 MHz ignorieren. Bei 150 kHz ist jedoch deutlich, dass insbesondere bei 100 °C in dieser Anwendung eine deutliche Verschlechterung von etwa 6 dB eintritt, und um ca. 700 kHz auch schon vorher eine Verschlechterung um ca. 3-4 dB zu beobachten ist.

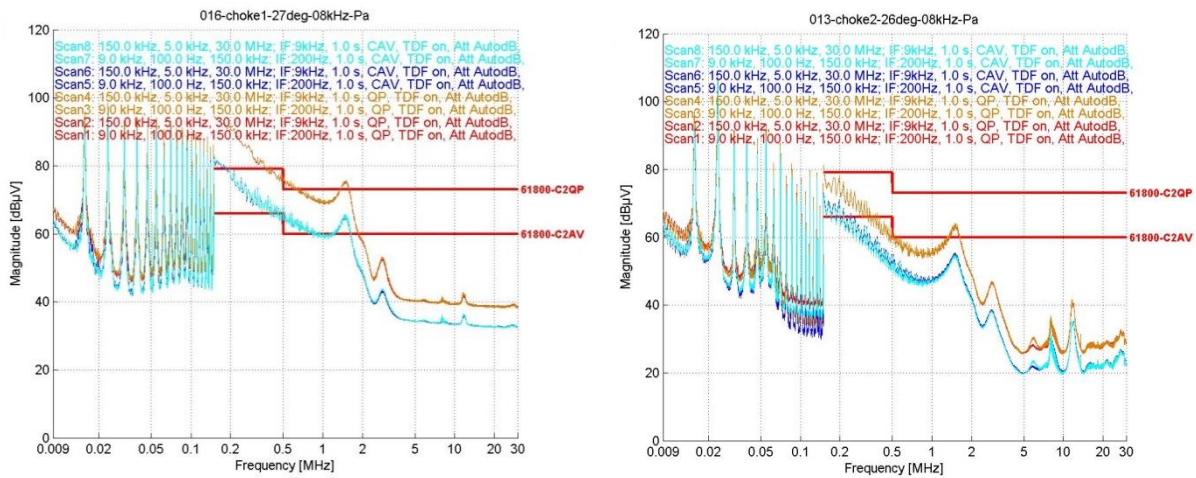


Bild 8: Störspannung mit Drossel 1 bzw. 2 bei 8 kHz Schaltfrequenz, Labortemperatur

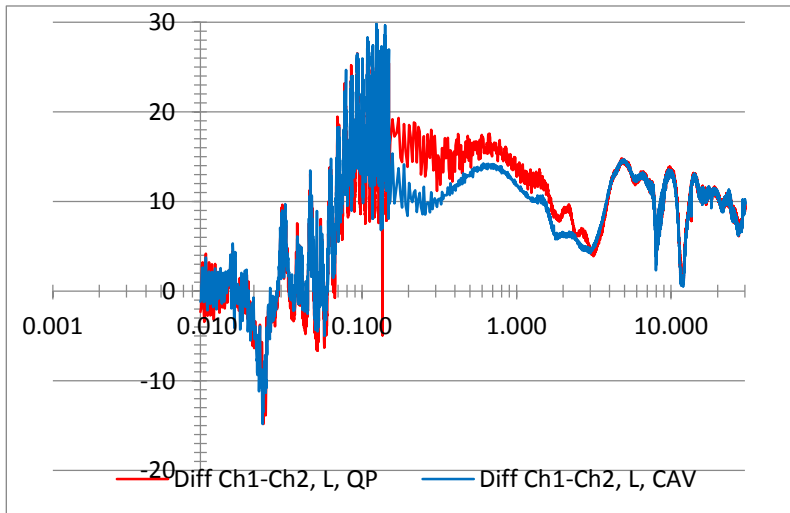


Bild 9: Differenzbildung der beiden QP- und AV-Maximalkurven der beiden Drosseln

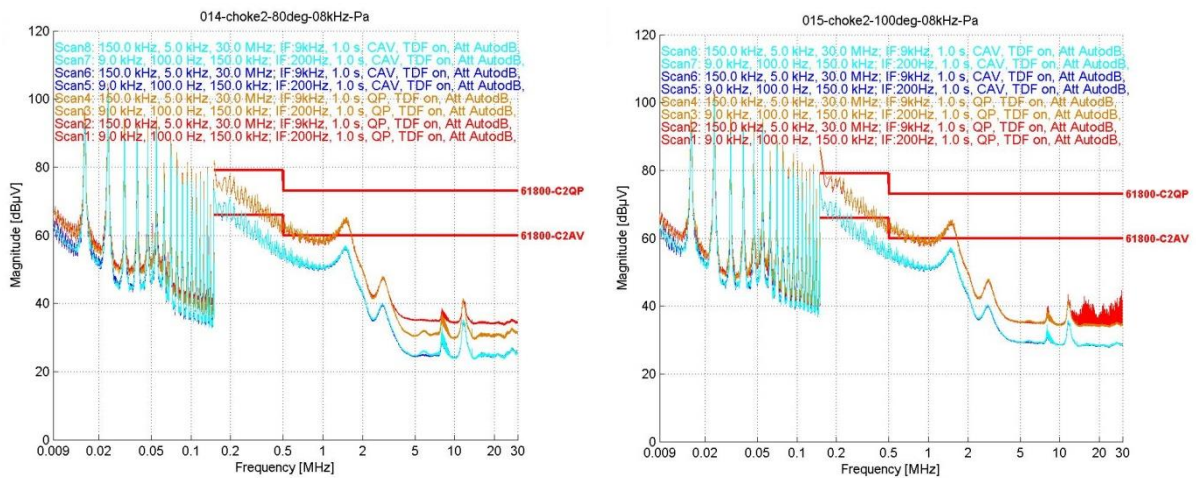


Bild 10: Störspannung mit Drossel 2 bei 8 kHz Schaltfrequenz, links bei 80 °C, rechts bei 100 °C

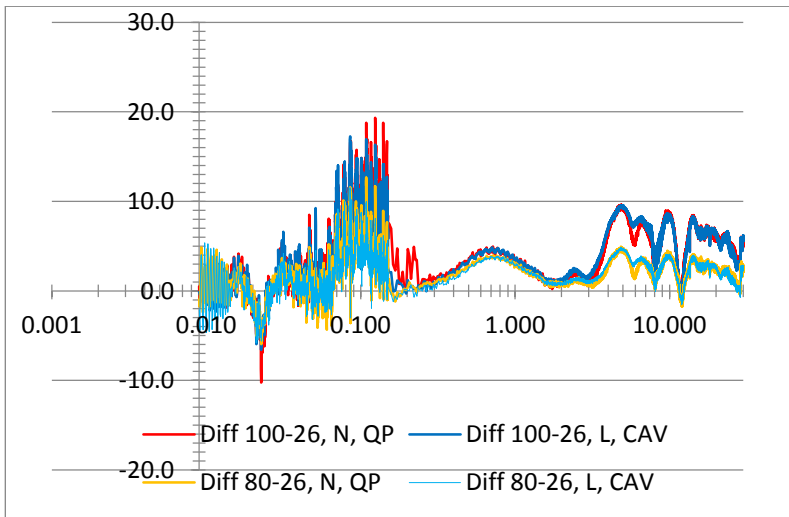


Bild 11: Differenzbildung jeweils der beiden QP- und AV-Maximalkurven von Drossel 2 bei 80 °C (orange/hellblau) bzw. 100 °C (rot/dunkelblau) und der Ausgangsmessung bei Labortemperatur (ca. 26 °C)

4 Ergebnisse beim Vergleich der Drosseln 3 (nanokristallin) und 4 (Ferrit)

Bei diesen Drosseln zeigt nun die Ferritdrossel höhere Gleichtaktströme bei Labortemperatur (ca. 26 °C, Bild 12) als die nanokristalline. Im Stromverlauf sind jedoch keine Ansätze bezüglich Sättigung zu erkennen.

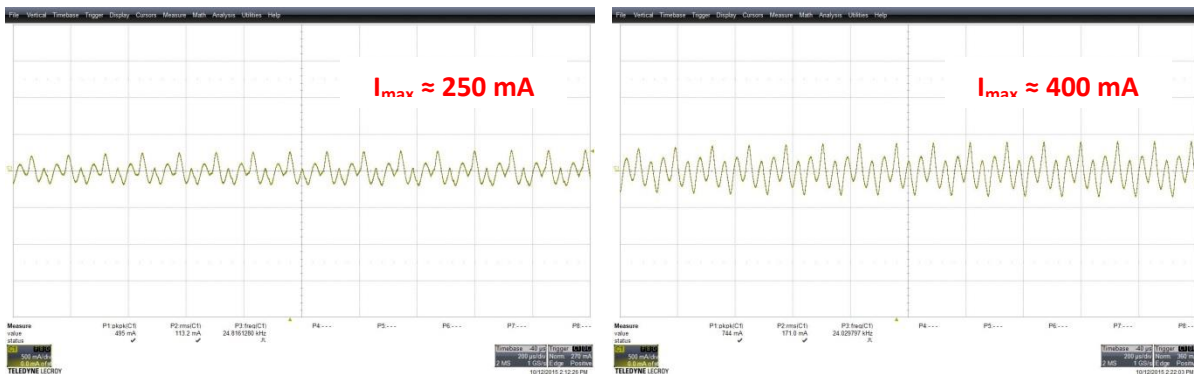


Bild 12: Gleichtaktströme mit Drossel 3 (links) bzw. Drossel 4 (rechts) bei 8 kHz Schaltfrequenz

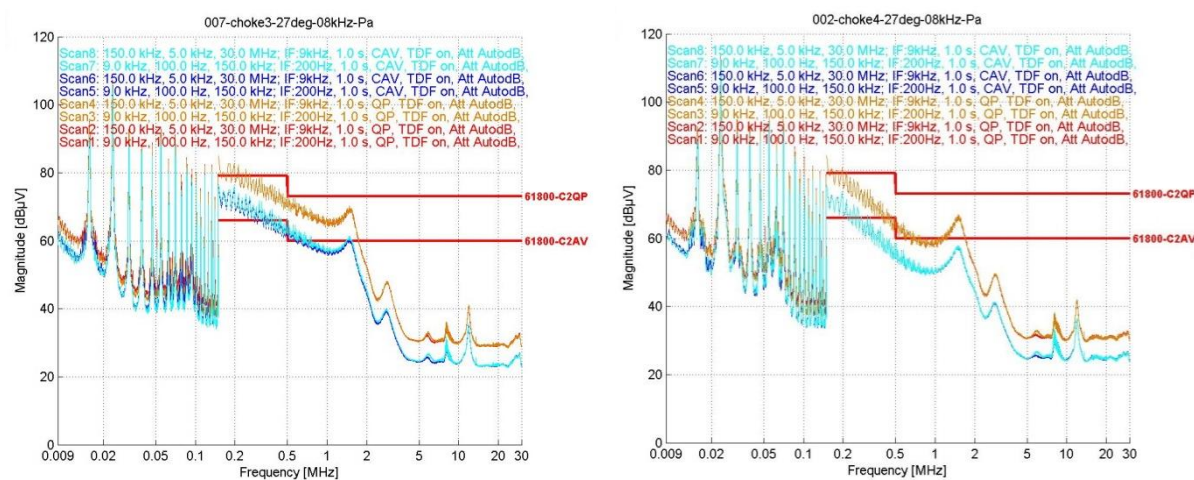


Bild 13: Störspannung mit Drossel 3 bzw. 4 bei 8 kHz Schaltfrequenz, Labortemperatur

Wohl aufgrund der geringeren Induktivität dieser Drosseln liegen die Störspannungskurven bei beiden Drosseln etwas höher. Wiederum schneidet die Ferritdrossel (Drossel 4) mit steigender Frequenz etwas besser ab. Dies ändert sich jedoch bei Erwärmung der Drossel. Während die nanokristalline Drossel ziemlich konstant bleibt (hier nicht gezeigt), steigt der Störpegel bei zunehmender Temperatur (@150 kHz ca. 5 dB bei 80 °C und ca. 10 dB bei 100 °C) an, ohne dass die Drossel jedoch ganz in Sättigung geht.

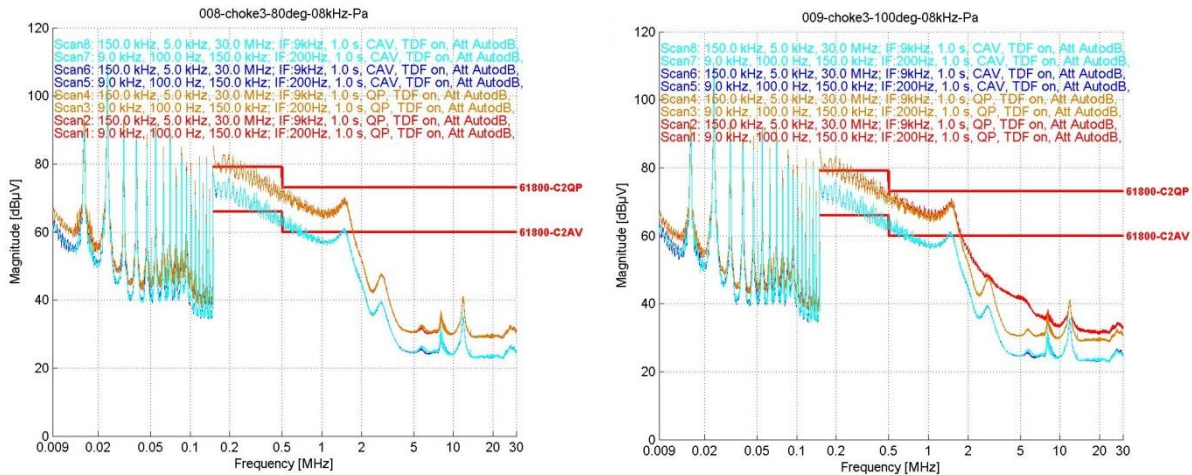


Bild 14: Störspannung mit Drossel 4 bei 8 kHz Schaltfrequenz, links bei 80 °C, rechts bei 100 °C

5 Zusammenfassung

Vergleicht man zwei Drosseln mit gleicher Induktivität aber unterschiedlicher Materialien miteinander, so liegen in der Anwendung die Vorteile des nanokristallinen Materials gegenüber Ferrit darin, dass bei kleinerer Bauform eine höhere Entstörwirkung vor allem im Frequenzbereich von einigen kHz bis einigen 10 kHz erreicht werden kann, sofern es um die Unterdrückung von Gleichtaktstörungen geht. Ein typischer Fall wäre z. B. die Reduzierung von Ableitströmen im Bereich der Schaltfrequenz. Ferner ist das Material sehr temperaturstabil.

Demgegenüber steht der Nachteil der geringeren Sättigungsfestigkeit bei nanokristallinen Drosseln kleineren Volumens aufgrund des höheren magnetischen Flusses, und bei Näherung an die Sättigungsgrenze bricht die Induktivität schneller zusammen als bei Ferrit, wo der Übergang weicher ist. Die höhere Streuinduktivität der etwas größeren Ferritdrossel bewirkt in der Regel eine deutlich bessere Gegentaktämpfung, und dies ist häufig ein entscheidender Aspekt in der Anwendung, zumal in der Regel außer der Streuinduktivität kaum Gegentaktinduktivität verfügbar ist.

Literaturangaben

- [1] Dr. Jörn Schlieve, Christian Paulwitz, Dr. Stefan Weber: A just Comparison of Ferrite and Nanocrystalline Common Mode Chokes, PCIM Europe 2016 – 10-12 May 2016, Nuremberg, Germany, pp. 156 – 163
- [2] EN 61800-3 (2004) + A1 (2012): Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe – Teil 3: EMV-Anforderungen einschließlich spezieller Prüfverfahren; Störspannung am Stromversorgungsanschluss, Kategorie C2