

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichtaktdrosseln der WE-CMDC-Serie



Dr.-Ing. Heinz Zenkner

1. EINLEITUNG

Gleichtaktdrosseln (CMCs, von engl. *Common Mode Choke*) werden oft zum Filtern von Störkomponenten in elektronischen Schaltungen verwendet. Diese Bauteile dämpfen gezielt Störsignal, die auf Leitungspaaren mit gleicher Amplitude und Phase bezogen zur Referenzmasse auftreten. Das präzise Modellieren des Verhaltens von CMCs ist entscheidend für ein detailliertes Verständnis dieses Bauteils. Darüber hinaus muss die Übertragung des Modells und seiner Funktionssimulation in die Praxis verstanden werden, um eine wirkungsvolle Integration in komplexe Systeme zu gewährleisten und die Filterleistung gezielt optimieren zu können.

Die vorliegende Abhandlung stellt die Simulation einer Gleichtaktdrossel vor und vergleicht die Ergebnisse mit realen Messungen. Außerdem werden unkonventionelle Anwendungen von CMCs untersucht, um das Anwendungsspektrum dieser Bauelemente zu erweitern. Insbesondere werden die parasitären Eigenschaften von CMCs auch als funktionale Elemente in bestimmten Schaltungsdesigns genutzt, was ihre Vielseitigkeit über traditionelle Anwendungen hinaus unter Beweis stellt.

2. LTSPICE-SIMULATION VON CMCs

CMCs sind passive Bauteile, die in einem bestimmten Frequenzbereich eine hohe Impedanz erzeugen, um die Ausbreitung unerwünschter Signale (typischerweise elektromagnetische Störungen) zu reduzieren. Die Struktur der CMC entspricht der einer gewickelten Spule: Es gibt einen Kern aus ferromagnetischem Material, um den mehrere Drähte gewickelt sind. Abbildung 1 zeigt den grundlegenden Aufbau einer CMC.

Im Detail unterscheiden sich CMCs nicht nur in der Anzahl der Windungen und der Bauweise, sondern auch in der Art des für die jeweilige Anwendung verwendeten Kerns. Das Kernmaterial weist oberhalb einiger zehn MHz einen niedrigen Qualitätsfaktor auf, d. h., das Kernmaterial wird so gewählt, dass es oberhalb eines bestimmten Frequenzbereichs möglichst hohe Verluste verursacht. Eisenpulverkerne sind bei niedrigen Frequenzen ($f_c < 3$ MHz, typischerweise unter 500 kHz) aktiv, Mangan-Zink-Kerne arbeiten bei höheren Frequenzen (zwischen 200 kHz und 30 MHz), und Nickel-Zink-Kerne eignen sich für noch höhere Frequenzen ($f_c > 10$ MHz bis zu mehreren hundert MHz).

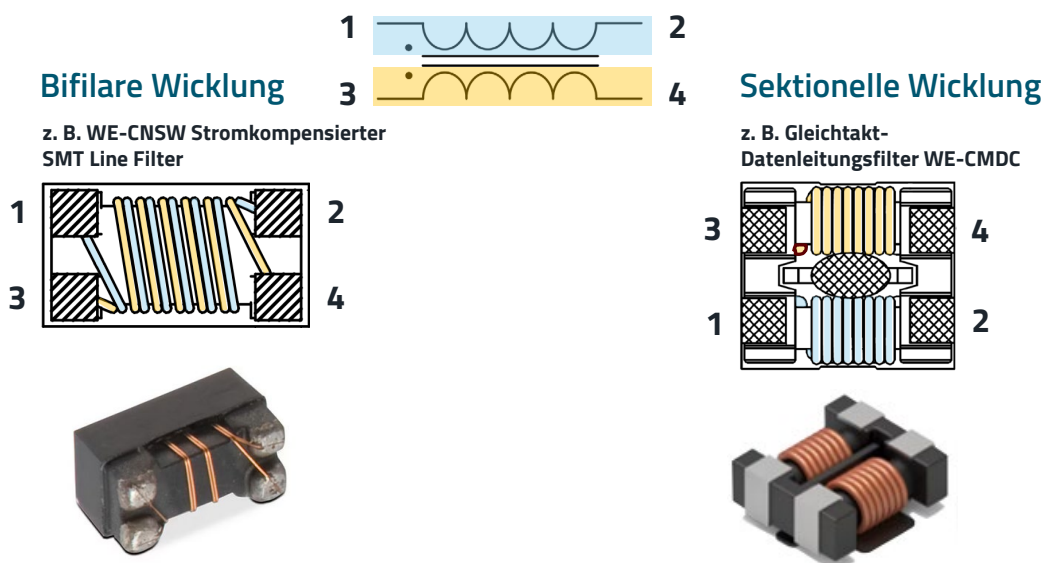


Abbildung 1: Grundstruktur einer CMC. Linke Seite: Bifilarer Wicklungstyp, rechte Seite: Sektionale Wicklungsart.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichtaktrosseln der WE-CMDC-Serie

Bifilare und sektionelle Wicklungsarten beeinflussen die Leistung und das Verhalten der Drossel, insbesondere in Bezug auf die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und auf Filteranwendungen.

Bei der bifilaren Wicklung werden zwei (oder mehr) Drähte eng parallel auf den Kern gewickelt (links in Abbildung 1). Die bifilare Wicklung sorgt für eine hervorragende magnetische Kopplung zwischen den Wicklungen, wodurch die Induktivität für Gleichtaktströme erhöht wird. Da die Drähte gemeinsam gewickelt werden, ist die Konstruktion kompakt und einfach herzustellen. Die Drosseln blockieren aufgrund ihrer hohen Kopplung und der daraus resultierenden Induktivität hochfrequente Gleichtaktstörungen sehr wirksam. Die enge Kopplung hebt die Induktivität für Ströme im Gegentaktmodus auf, wodurch die Unterdrückung von Gegentaktstörungen gering ist. Durch den geringen Abstand der Drähte zueinander erhöht sich die parasitäre Wicklungskapazität, was bei sehr hohen Frequenzen zu Leistungseinbußen führen kann.

Bei der sektionellen Wicklung (gezeigt anhand der Drossel auf der rechten Seite von Abbildung 1) sind die Wicklungen auf dem Kern in verschiedene Abschnitte oder Sektionen unterteilt. Die Drähte sind in physisch getrennten Lagen oder Bereichen gewickelt und weisen Abstände zueinander auf. Die Trennung der Wicklungen senkt die Wicklungskapazität und verbessert so die Hochfrequenzleistung. Aufgrund der

geringeren Kopplung bietet die Drossel eine gewisse Induktivität im Gegentaktmodus, was zur Unterdrückung von Gegentaktstörungen beiträgt. Die Trennung kann die Wärmeableitung verbessern. Die Induktivität für Gleichtaktströme ist im Vergleich zu bifilarer Wicklung geringer. Die sektionelle Wicklung führt häufig zu einer größeren Drossel, da die Wicklungen voneinander getrennt sind.

CMCs werden mit Kondensatoren zu komplexen Filterkreisen kombiniert, um eine möglichst hohe Einfügungsdämpfung und damit eine optimale Filterwirkung zu erzielen. Wie diese Kreise funktionieren, wo ihre Schwächen und Stärken liegen und wie die Impedanzverhältnisse des Systems berücksichtigt werden müssen, lässt sich am besten anhand einer LTspice-Simulation erklären, wie sie im Folgenden durchgeführt wurde.

2.1 Simulation der Gleichtaktrossel WE-CMDC als Bestandteil eines Filters

In der folgenden Analyse unter Verwendung von LTspice werden Gleichtakt- und Gegentaktdämpfung separat betrachtet. Der Schaltplan der Simulation ohne Drossel ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Gleichtakt-Störsignalquelle erzeugt ein Signal mit einer Amplitude von 1 V bei einer Frequenz von 5 MHz und wird über zwei 200 pF-Kondensatoren in den Stromkreis eingeschleift.

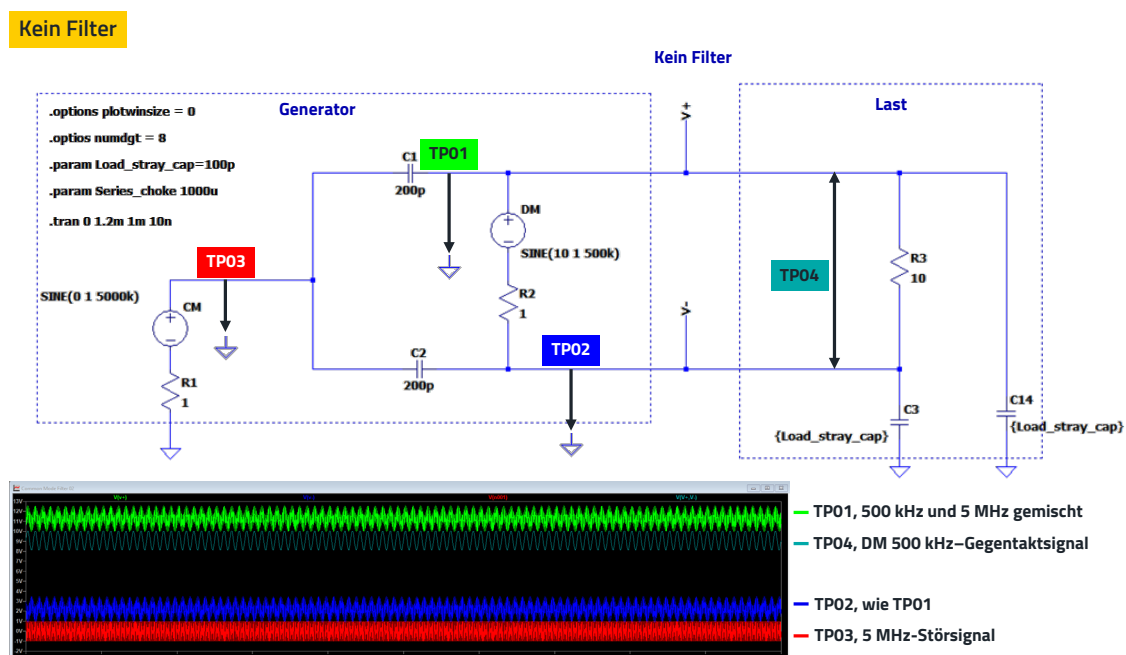


Abbildung 2: Schaltplan ohne CM-Drossel. TP₀₁ bis TP₀₄ zeigen die jeweiligen Spannungen.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichtaktrosseln der WE-CMDC-Serie

Das Nutzsignal (Gegentaktsignal) hat eine Wechselspannungsamplitude von 1 V bei einer Frequenz von 500 kHz und eine zusätzliche Gleichspannungsamplitude von 10 V, um die Darstellung im Diagramm zu verbessern. Beide Signale können an der Last R_3 betrachtet werden.

Um zu veranschaulichen, wie die Gleichtaktrossel als Bestandteil eines Filters funktioniert, wird die Komponente in verschiedenen Funktionszuständen im Zeit- und Frequenzbereich betrachtet.

Die Messungen in Abbildung 3 zeigen eindeutig, dass bei Verwendung einer einzelnen Drossel (L_3) mit Kondensator (C_{10}) in einem der beiden Pfade keine Dämpfung des Gleichtaktsignals auftritt.

Dargestellt werden sowohl der Zeit- als auch der Frequenzbereich. Dabei ist im Zeitbereich die durch die Gleichspannung verursachte Phasenverschiebung der Signale im Drosselpfad gut zu erkennen. Der Zeitbereich zeigt die Spektrallinien bei 500 kHz und 5 MHz an den verschiedenen Messpunkten. Die Pegel an den Messpunkten unterscheiden sich nicht in ihrer Amplitude.

Abbildung 4 zeigt, dass nur das differentielle Signal in seiner Wechselspannungsamplitude stark gedämpft wird (TP₀₁, blau).

Da das Gleichtakt-Störsignal in beiden Pfaden (V+ und V-), auftritt, müssen auch beide Pfade mit Filterkomponenten versehen werden, um die Störung gegen Masse zu dämpfen. Aus diesem Grund kann hier kein asymmetrisch wirksamer Filter (z. B. ein LC-Tiefpassfilter) verwendet werden. In der in Abbildung 5 gezeigten Konfiguration wurden zwei Drosseln verwendet.

Wir erkennen hier eine deutliche Dämpfung des Störsignals um ca. 30 dB; gleichzeitig wird jedoch auch das Nutzsignal stark gedämpft, wie das Diagramm im Zeitbereich deutlich zeigt. Daher muss ein Konzept zur Stromkompensation eingeführt werden, damit das Gegenteilssignal nicht gedämpft wird.

Bei einer Gleichtaktrossel bewirken die Wicklungen, dass sich die Magnetfelder der Ströme im Gegenteilmodus gegenseitig aufheben, während sie sich im Gleichtaktmodus

addieren. Der Strom im Gegenteilmodus fließt in entgegengesetzten Richtungen durch die Wicklungen, wodurch sich die erzeugten Magnetfelder im Idealfall vollständig aufheben. Dadurch nähert sich die Induktivität für differentielle Ströme gegen Null, wodurch der normale Signalfloss nicht gedämpft wird. Bei Gleichtaktströmen fließen die Ströme in beiden Wicklungen in derselben Richtung, wodurch sich die Magnetfelder addieren, und eine hohe Induktivität entsteht.

Diese hohe Induktivität sorgt für eine hohe Impedanz gegenüber hochfrequenten Gleichtaktstörungen und dämpft diese wirkungsvoll.

Entscheidend für eine gute Gleichtaktdämpfung ist eine hohe induktive Kopplung der beiden Spulen, die wechselseitige Induktivität, d.h. die sogenannte Gegenkopplungsinduktivität. Bei diesem Phänomen induziert eine Stromänderung in einem Stromkreis aufgrund des vom Strom erzeugten Magnetfelds eine Spannung in einem benachbarten Stromkreis, ähnlich wie bei einem Transformator. Der Kopplungsgrad zwischen den beiden Stromkreisen wird durch die Gegenkopplungsinduktivität M quantifiziert, die von Faktoren wie der Anzahl der Windungen in den Spulen, ihrer relativen Ausrichtung/Position, dem Abstand zwischen ihnen und den magnetischen Eigenschaften des Mediums abhängt.

Der Gegenkopplungsfaktor K quantifiziert die Kopplung zwischen den beiden Wicklungen der Drossel. Er ist definiert als:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad (1)$$

Hierbei gilt:

M ist die Gegenkopplungsinduktivität, d.h. die wechselseitige Induktivität zwischen den Wicklungen.

L_1 und L_2 sind die Eigeninduktivitäten der Wicklungen.

K reicht von 0 (keine Kopplung) bis 1 (vollständige Kopplung); bei einem Kopplungsfaktor K von 1 beträgt die Gegenkopplung der beiden Drosseln 100 %. Typische Kopplungsfaktoren für Gleichtaktrosseln liegen zwischen 0,80 und 0,95.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichakttdrosseln der WE-CMDC-Serie

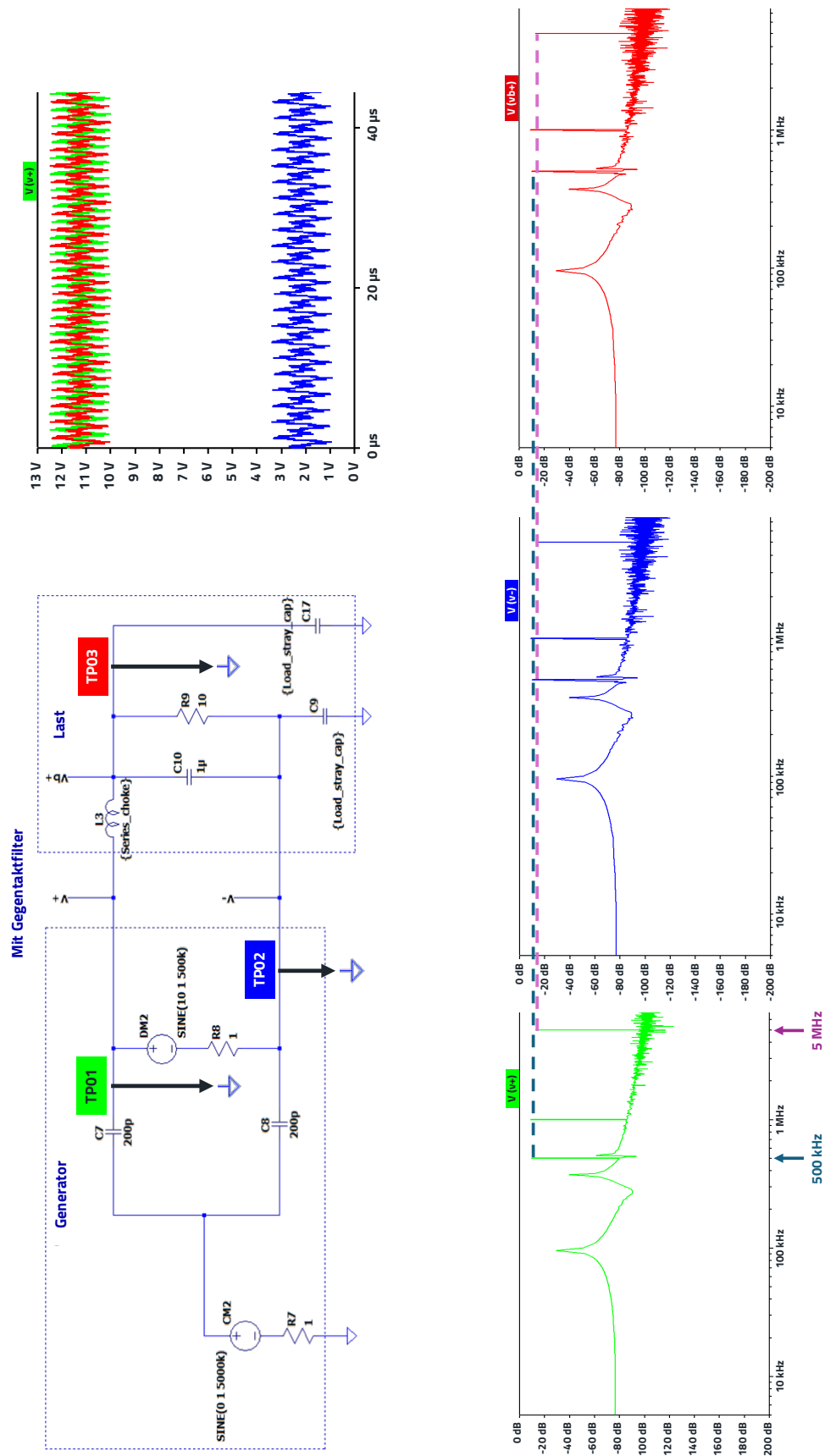


Abbildung 3: Visualisierung der Amplituden der Messpunkte im Zeit- und Frequenzbereich ($L_3 = 1000 \mu\text{H}$, $C_9/C_{17} = 100 \text{ pF}$).

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichakttdrosseln der WE-CMDC-Serie

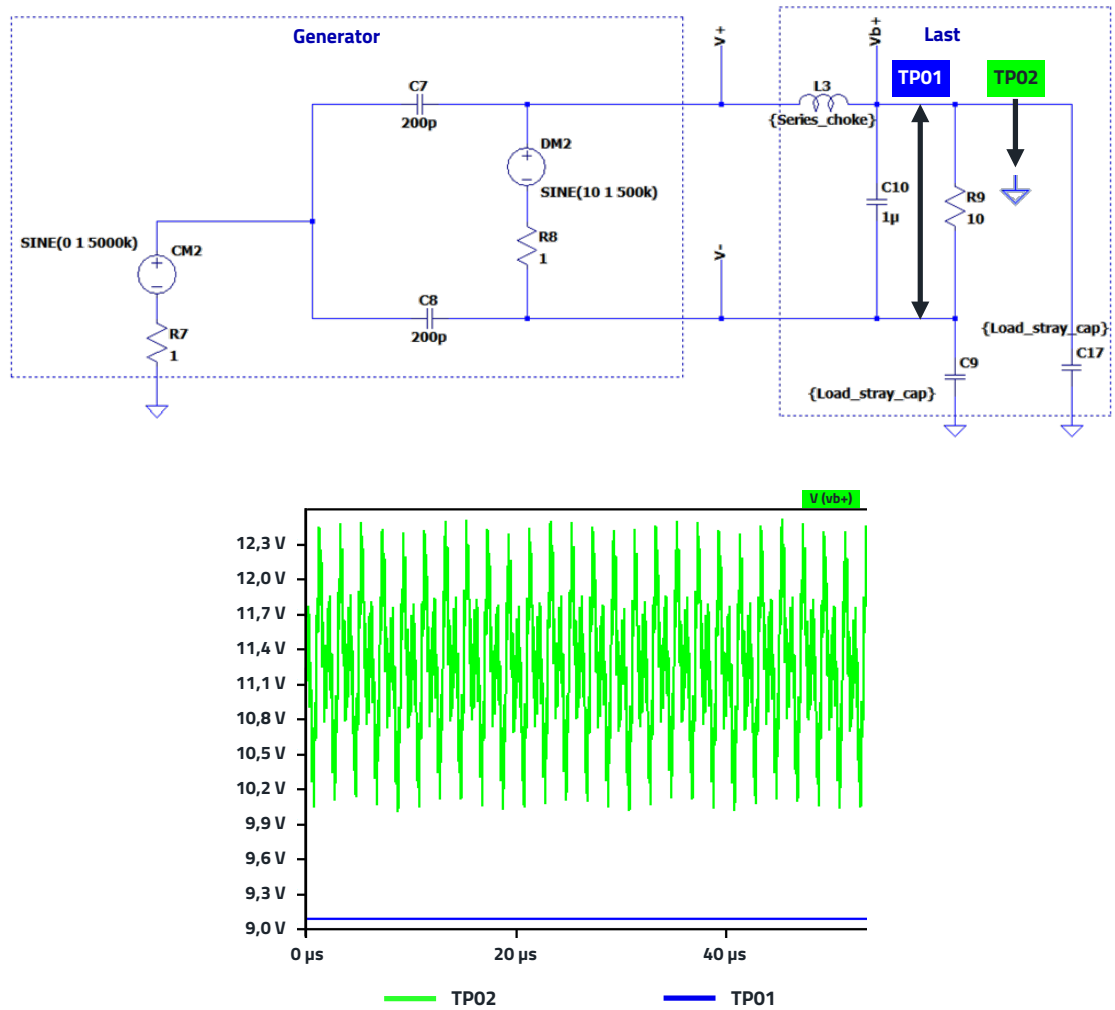


Abbildung 4: Visualisierung der Amplituden der Messpunkte hinter dem Filter im Zeitbereich ($L_3 = 1000\ \mu H$, $C_9/C_{17} = 100\ pF$).

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichaktrosseln der WE-CMDC-Serie

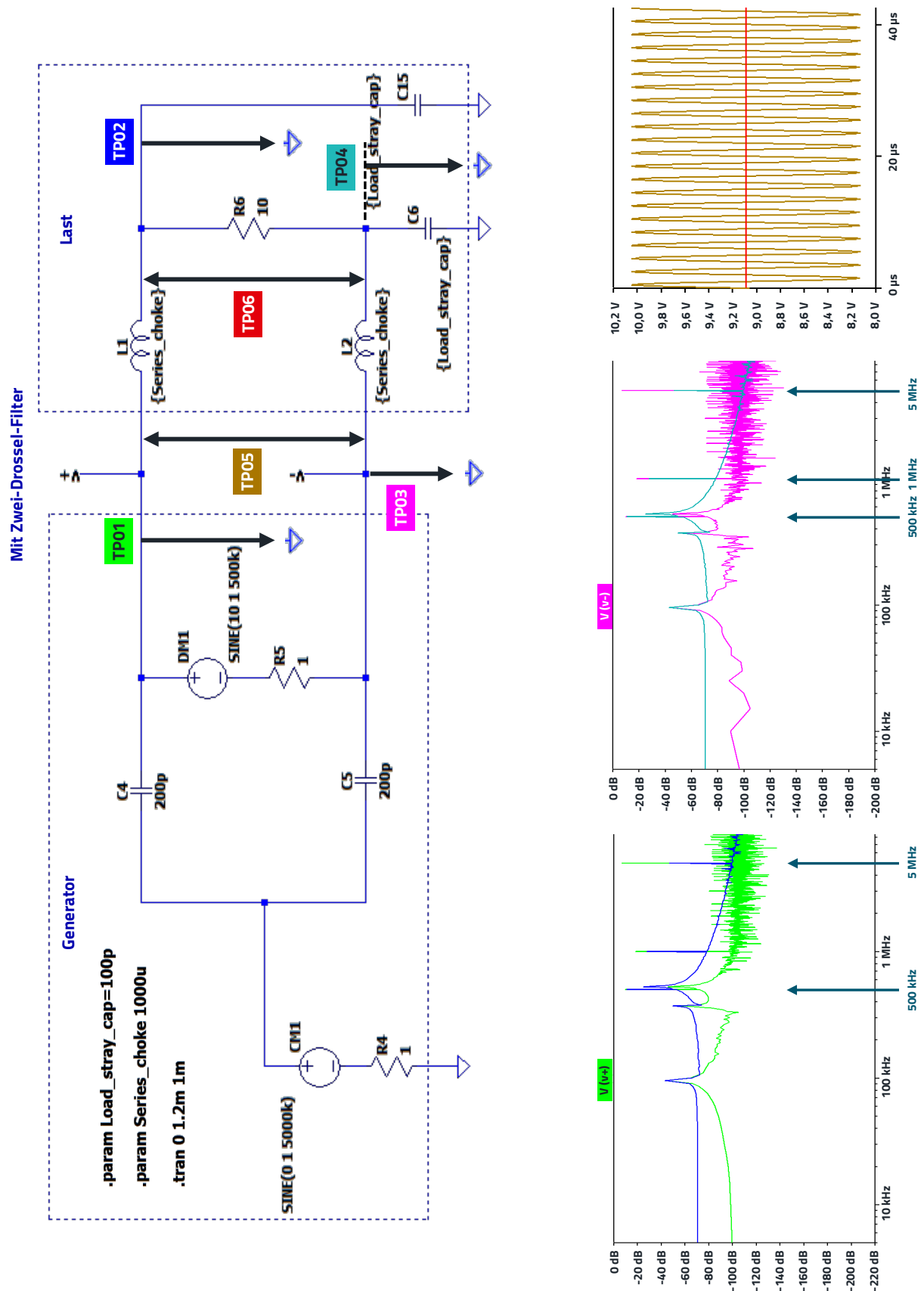


Abbildung 5: Filter mit zwei Drosseln (L_1 , L_2), sowohl DM- als auch CM-Signale werden gedämpft. TP_{05}/TP_{06} zeigen die Gegentaktdämpfung (Signal bei 500 kHz), TP_{01}/TP_{02} und TP_{03}/TP_{04} zeigen die Gleichaktndämpfung ("Rauschen" bei 5 MHz).

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichaktrosseln der WE-CMDC-Serie

Der Effekt der Gegenkopplungsinduktivität ist in Abbildung 6 dargestellt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass das Nutzsignal bei 500 kHz nicht mehr gedämpft wird, das Gleichtakt-Störsignal bei 5 MHz jedoch um ca. 40 dB abgeschwächt wird.

Dagegen hängt die Dämpfung im aktuellen System in hohem Maße von der Lastimpedanz ab. Um auch bei hochimpedanten Gleichaktlasten, wie z. B. Peripheriekabeln (→ hochimpedante Monopolantenne bei Impedanzfehlanpassung), eine ausreichende Dämpfung zu erzielen, muss der Ausgang des Filters HF-technisch niederimpedant sein. Aus diesem Grund werden zusätzliche Kondensatoren, sogenannte Y-Kondensatoren, am Ausgang der Gleichaktrossel eingesetzt. Dadurch entsteht ein frequenzabhängiger Spannungsteiler, wie in Abbildung 7 dargestellt.

Da der Filter nun ein frequenzabhängiger Spannungsteiler ist, macht ihn das Teilerprinzip weniger abhängig von der Lastimpedanz.

Die Anordnung in Abbildung 7 zeigt, dass das Gegentaktsignal kaum gedämpft wird, während das Gleichtaktsignal durch die zusätzlichen Y-Kondensatoren um über 70 dB reduziert wird. Wie ersichtlich ist, hat der Einsatz der Y-Kondensatoren nur einen geringen Einfluss auf die Dämpfung des Nutzsignals, da der Kondensatorwert (hier 100 nF) das Nutzsignal nur mit halber Kapazität belastet. An dieser Stelle ist auch zu erwähnen, dass erstens die Nutz- und Störsignale frequenzmäßig weit voneinander entfernt sind und dass hier keine Induktivität im Gegentakmodus implementiert ist, was im Folgenden näher erläutert wird.

Wie bereits erwähnt, quantifiziert der Gegenkopplungsfaktor K die Kopplung zwischen den beiden Wicklungen der Drossel. Andererseits gibt der Gegenkopplungsfaktor K einer

Gleichaktrossel nicht nur Aufschluss über die Stärke der Kopplung zwischen den Wicklungen, sondern auch über den Grad der Streuinduktivität. Ein spezieller „Trick“ kann für eine zusätzliche Gegentaktdämpfung verwendet werden. Bei abnehmendem Gegenkopplungsfaktor entsteht eine Streuinduktivität, die als Teil der Gegentakinduktivität und damit als Gegentakfilter genutzt werden kann, wiederum in Kombination mit einem zusätzlichen, parallel zur Last geschalteten Kondensator (X-Kondensator). In vielen Fällen sind die Y-Kondensatoren, die zusammen die Hälfte ihres Wertes als X-Kondensator ausmachen, bereits ausreichend. Ein hoher K -Wert bedeutet eine starke Kopplung bei minimaler Streuinduktivität, wodurch die Impedanz der Drossel gegenüber Gegentakströmen reduziert und somit die Gegentaktdämpfung verringert wird. Je niedriger der K -Wert, desto höher wird die Streuinduktivität, wodurch sich die Gegentakimpedanz erhöht und die Störunterdrückung im Gegentakmodus verbessert. Allerdings ist ein hoher K -Wert entscheidend für eine maximale Gleichtaktdämpfung, da er die Impedanz der Drossel gegenüber Gleichtaktströmen erhöht. Das Design muss daher einen K -Wert aufweisen, mit dem ein Kompromiss zwischen der Gleichtakt- und der Gegentaktdämpfung erzielt wird, oder es müssen zur Unterdrückung von Gegentakstörungen zusätzliche Bauelemente wie z. B. SMD-Ferritperlen eingesetzt werden, um die Dämpfung im hohen Frequenzbereich zu verstärken, aber gleichzeitig ihren Einfluss auf die Nutzsignale im niedrigen Frequenzbereich zu minimieren. Die Aussage gilt uneingeschränkt für sektionelle Wicklungen, bei denen K angepasst werden kann, um Gleichtakt- und Gegentaktdämpfung in einem ausgewogenen Verhältnis zu halten. Bei der bifilaren Wicklung ist K grundsätzlich hoch, sodass der Kompromiss nicht in gleicher Weise gilt. Stattdessen sind hier zusätzliche Maßnahmen wie Ferritperlen zur Gegentaktdämpfung erforderlich.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichtaktrosseln der WE-CMDC-Serie

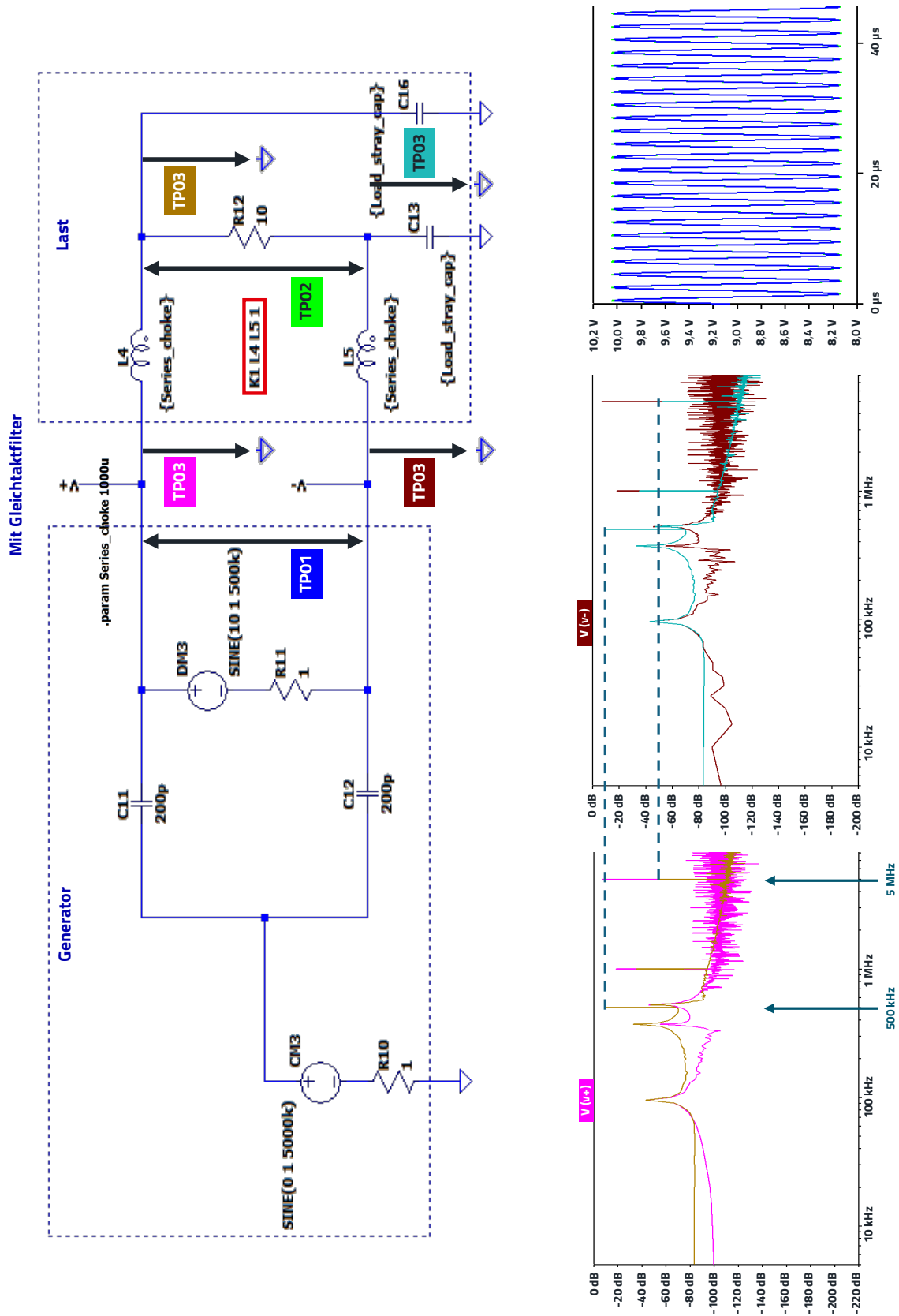


Abbildung 6: Filter mit zwei Induktivitäten in gegenseitiger induktiver Kopplung. Die Signale von TP_{01} und TP_{02} überschneiden sich im Zeitbereich, das Signal von TP_{02} liegt im Diagramm hinter dem Signal von TP_{01} .

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichaktrosseln der WE-CMDC-Serie

Mit Gleichaktfilter und Gleichaktkondensatoren 5-MHz-Störung

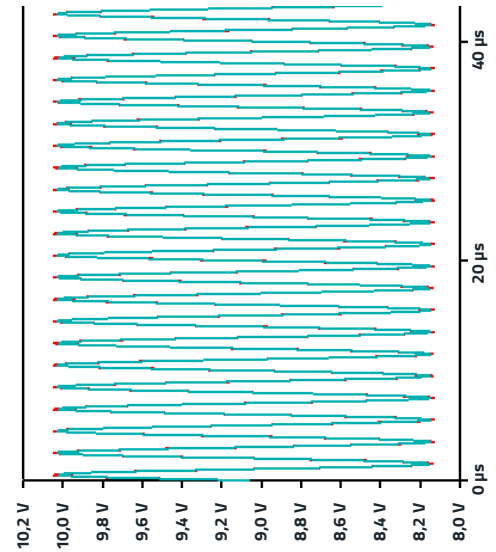
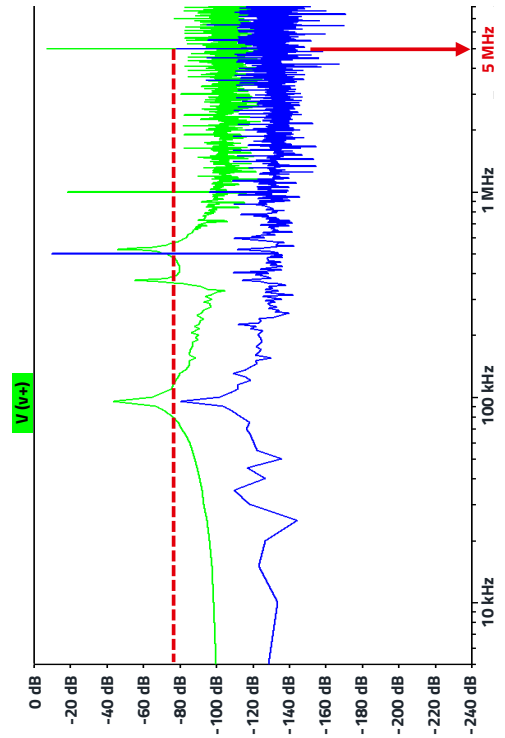
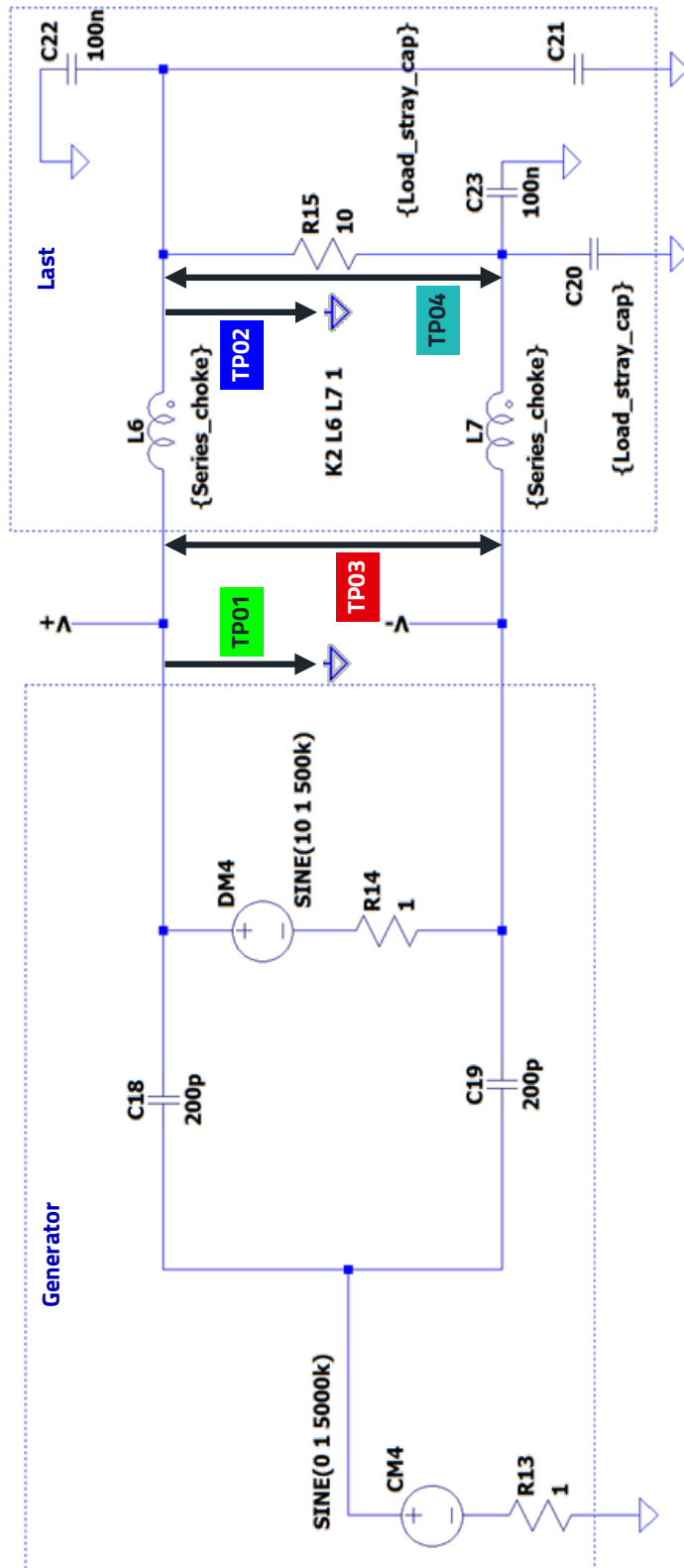


Abbildung 7: Gleichaktrosselfilter mit zusätzlichen Y-Kondensatoren (C_{22} , C_{23}). Die Signale von TP_{03} und TP_{04} überschneiden sich im Zeitbereich, das Signal von TP_{03} liegt im Diagramm hinter dem Signal von TP_{04} .

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichaktrosseln der WE-CMDC-Serie

Abbildung 8 zeigt den Einfluss des Kopplungsfaktors K auf die Dämpfung im Gegentaktmodus. Zur besseren Veranschaulichung wurde der Gleichaktquellpegel auf 0 V gesetzt.

Wie Abbildung 8 zeigt, kann bereits eine geringfügige Reduzierung des K -Faktors einen erheblichen Einfluss auf die Dämpfung des differentiellen Signals haben.

In der vorliegenden Simulation wird eine Drossel ohne das nichtlineare Verhalten des Ferritmaterials auf die Impedanz

über die Frequenz betrachtet. In der Praxis dagegen muss der Verlauf der komplexen Permeabilität über die Frequenz und damit die Nichtlinearität der Induktivität über den Frequenzbereich berücksichtigt werden. Darüber hinaus sind auch die parasitären Parameter, wie beispielsweise die parasitären Kapazitäten der Wicklungen, in Betracht zu ziehen. Der erste Schritt zur Ermittlung dieser Parameter besteht darin, das Ersatzschaltbild der Gleichaktrossel zu bestimmen.

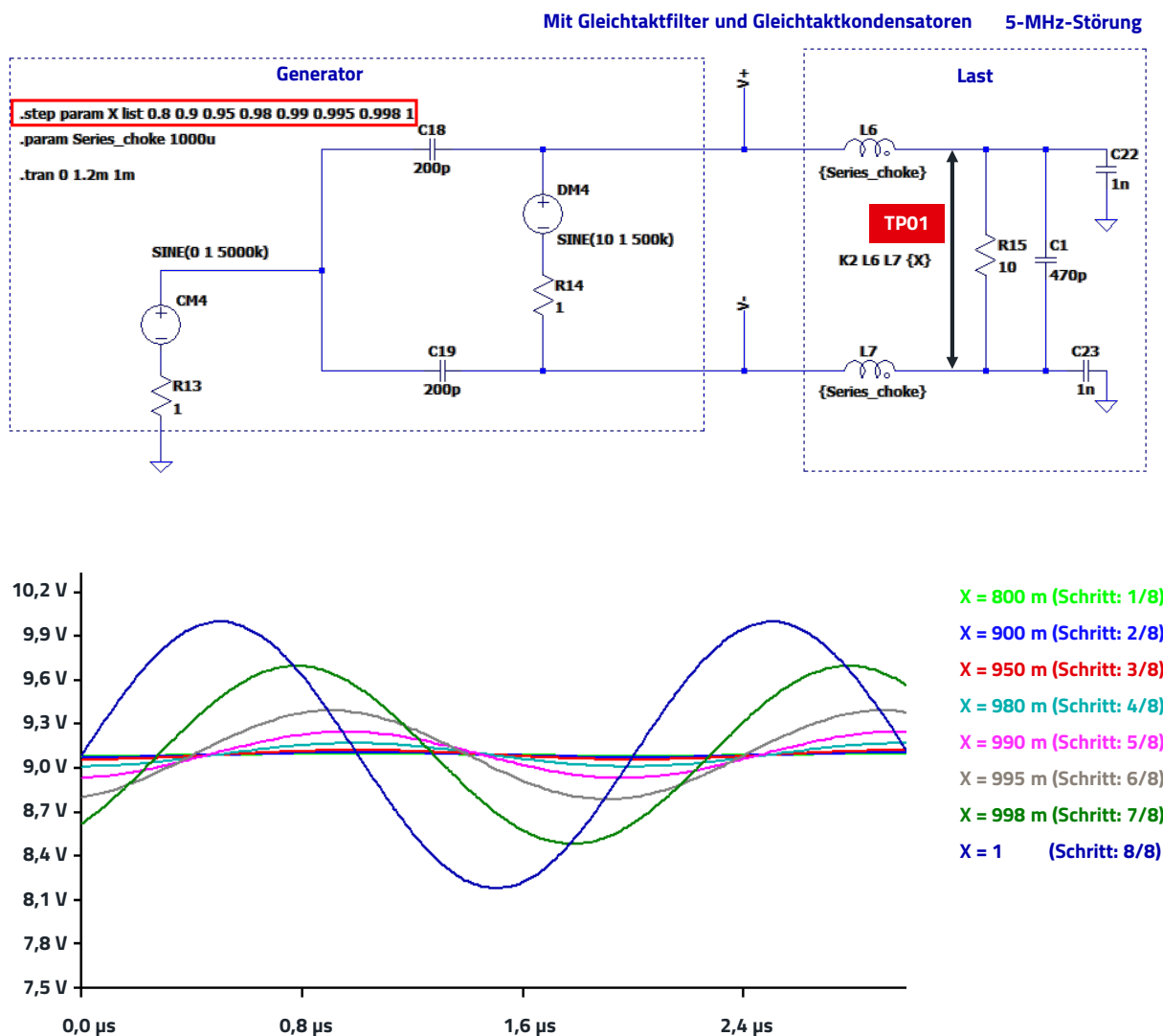


Abbildung 8: Einfluss des K -Faktors auf die DM-Dämpfung.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichaktinduktoren der WE-CMDC-Serie

2.2 Messung und Berechnung der Parameter für das CMC-Ersatzschaltbild

Das Ersatzschaltbild der Drossel ist nicht nur für die Simulation der CMC erforderlich, sondern auch für das Verständnis des Bauteils, sofern die Filtereinfügedämpfung unter Berücksichtigung der realen Eigenschaften einbezogen werden soll. Die Daten können dem Datenblatt entnommen werden, jedoch müssen einige Parameter zusätzlich gemessen und berechnet werden. Im Folgenden wird eine

Zusammenfassung gegeben. Beim Erstellen des Ersatzschaltbildes einer CMC werden die Parameter für das Ersatzschaltbild überwiegend durch Messungen ermittelt, die in drei Schritten durchgeführt werden. Abbildung 9 zeigt das hier verwendete Ersatzschaltbild.

Die ausgewählte Gleichaktinduktoren ist die **WE-CMDC** (Art.-Nr. **744238132**). Das Datenblatt enthält die folgenden Parameter, mit denen die fehlenden Werte ermittelt werden können (Abbildung 10).

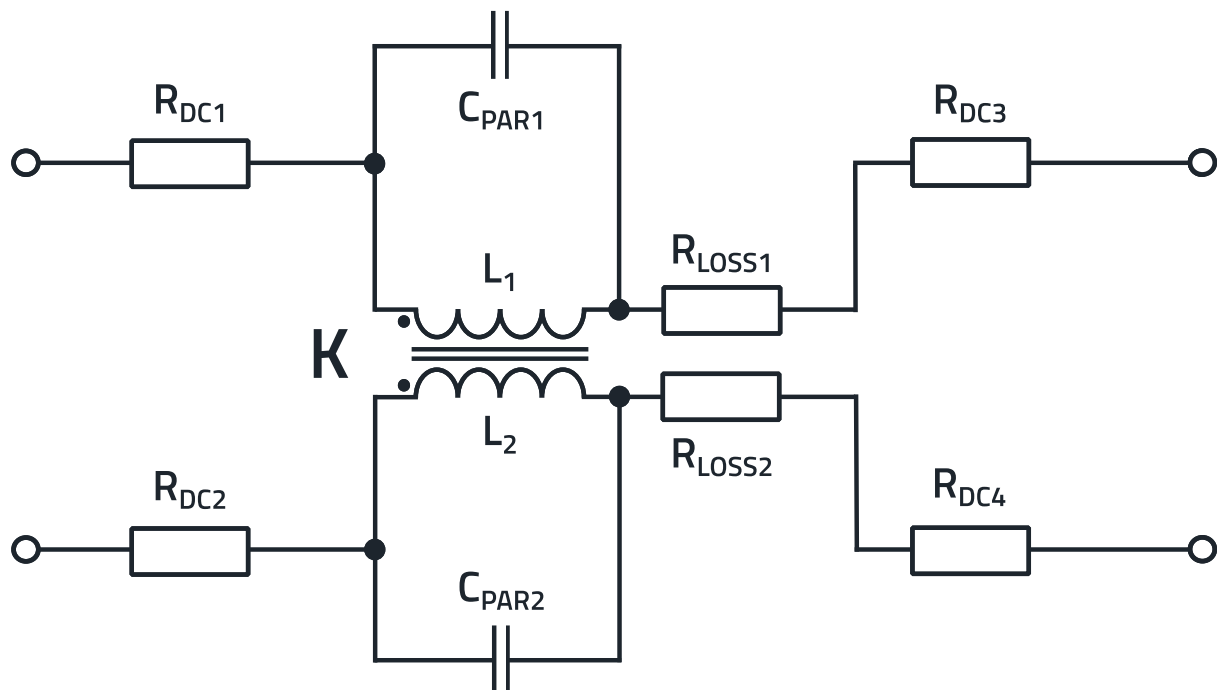


Abbildung 9: Das Ersatzschaltbild der hier verwendeten CM-Drossel. Der Ersatzverlustwiderstand ($R_{LOSS,x}$), wurde hier von einer Parallelschaltung in eine Reihenschaltung umgewandelt.

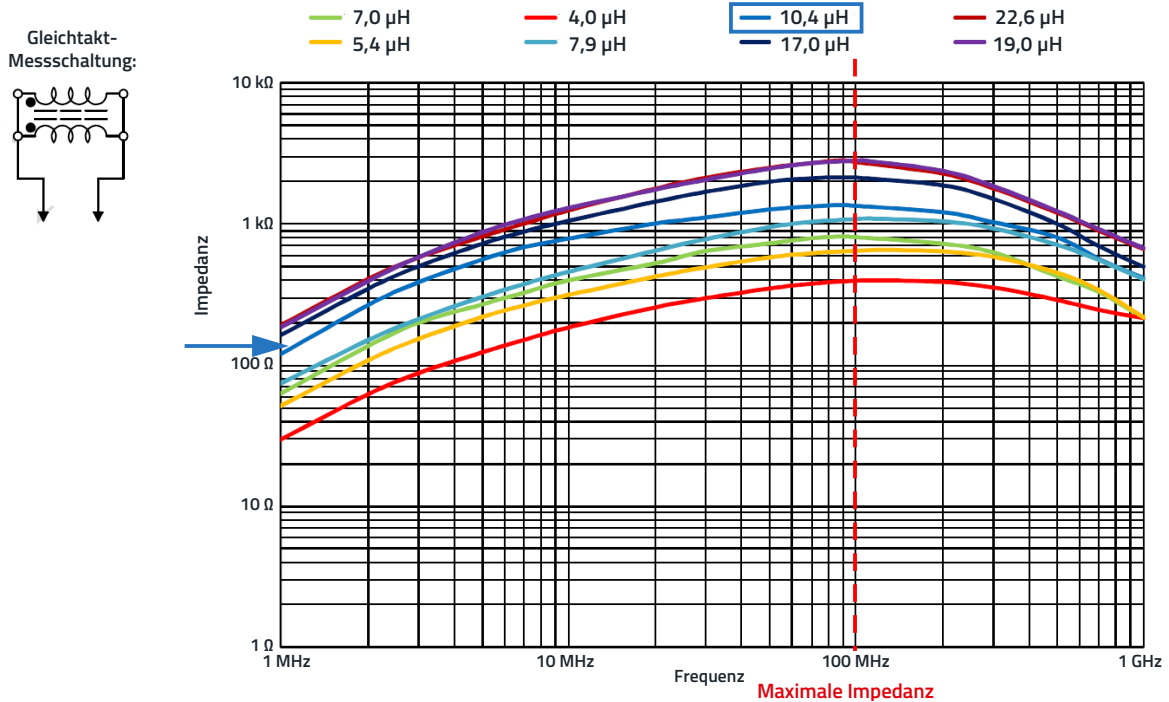
APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichakttdrosseln der WE-CMDC-Serie

Elektrische Eigenschaften, WE-CMDC, 10,4 μH , 744238132

Art.-Nr.	Impedanz (Ω)		Prüffrequenz (MHz)	L_1, L_2 (μH) ref.	R_{DC1}, R_{DC2} (m Ω) max.	I_{DC} (A) max.
	min.	typ.				
744238132	910	1300	100	10,40	25,0	2,50

Gleichaktimpedanz in 50 Ω System



Gegentaktimpedanz in 50 Ω System

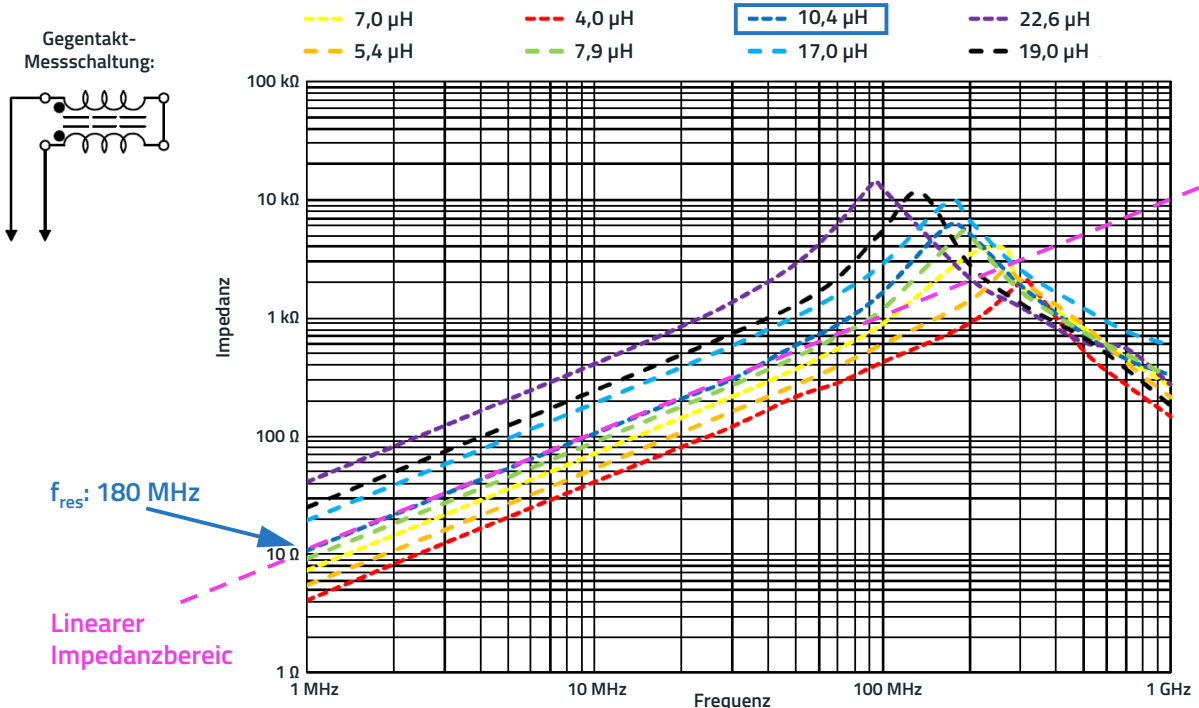


Abbildung 10: Elektrische Parameter aus dem Datenblatt, CM-Drossel WE-CMDC, 744238132.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichtaktrosseln der WE-CMDC-Serie

Die Drossel hat eine Induktivität von $10,40 \mu\text{H}$ pro Wicklung. Dieser Wert wurde bei einer Frequenz von 100 MHz gemessen. Für diese Frequenz ist eine skalare Impedanz im Bereich zwischen 910 und 1300Ω spezifiziert. Der Gleichstromwiderstand, d. h. der Kupferwiderstand einer Wicklung, beträgt maximal $25 \text{ m}\Omega$.

Die blaue Kurve im oberen Diagramm in Abbildung 10 zeigt die Gleichtaktimpedanz, die der Impedanz einer Wicklung (L_1 oder L_2) mit dem Ferritkern entspricht, da die Wicklungen parallel in derselben Wicklungsrichtung geschaltet sind. Der Höchstwert der Kurve (dunkelblau) liegt bei ca. 100 MHz , wobei die Resonanz nicht besonders ausgeprägt ist. Ein linearer Impedanzanstieg ab 1 MHz ist nicht erkennbar, d. h., das Ferritmaterial weist über den gesamten Frequenzbereich einen verlustbehafteten Permeabilitätsanteil auf, was zu der flach verlaufenden Kurve führt. Das untere Diagramm in Abbildung 10 zeigt die Gegentaktimpedanz. Bis etwa 50 MHz verläuft der Impedanzanstieg linear. Das Diagramm zeigt außerdem eine Resonanzfrequenz bei ca. 180 MHz . Die Resonanzfrequenz ist ausgeprägt und wird durch die parasitären Kopplungskapazitäten der Wicklungen verursacht.

Im nächsten Schritt werden die Impedanz der Primärspule gemessen und der Ferritverlustwiderstand sowie die parasitäre Wicklungskapazität bestimmt.

Der grundlegende Messaufbau und das entsprechende Ersatzschaltbild sind in Abbildung 11 gezeigt.

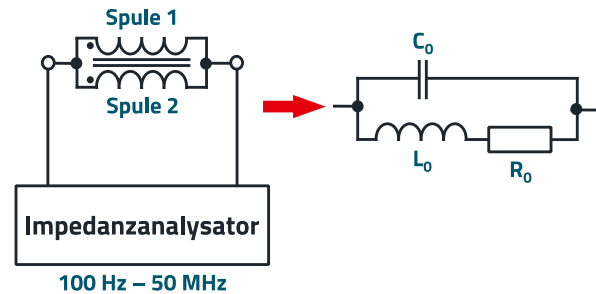


Abbildung 11: Schematischer Messaufbau zur Ermittlung der Parameter für das Ersatzschaltbild der CM-Drossel.

Gemessen werden die Induktivität L_0 , einschließlich der Streuinduktivität L_s , des Widerstands R_0 , der dem Ferritverlust entspricht, und der Streukapazität C_0 der Wicklung. R_0 und C_0 sind die Gesamtwerte der Primär- und Sekundärspulen. L_0 ist die Summe der von der Primär- und der Sekundärspule erzeugten Magnetflüsse. Die Induktivität verdoppelt sich scheinbar, aber die Primär- und Sekundärspulen sind parallel geschaltet, sodass das Ergebnis L_0 bleibt.

Das Ergebnis der Impedanzmessung ist in Abbildung 12 dargestellt. Zur Bestimmung der Induktivität wird ein möglichst linearer Bereich der Impedanzkurve ausgewählt.

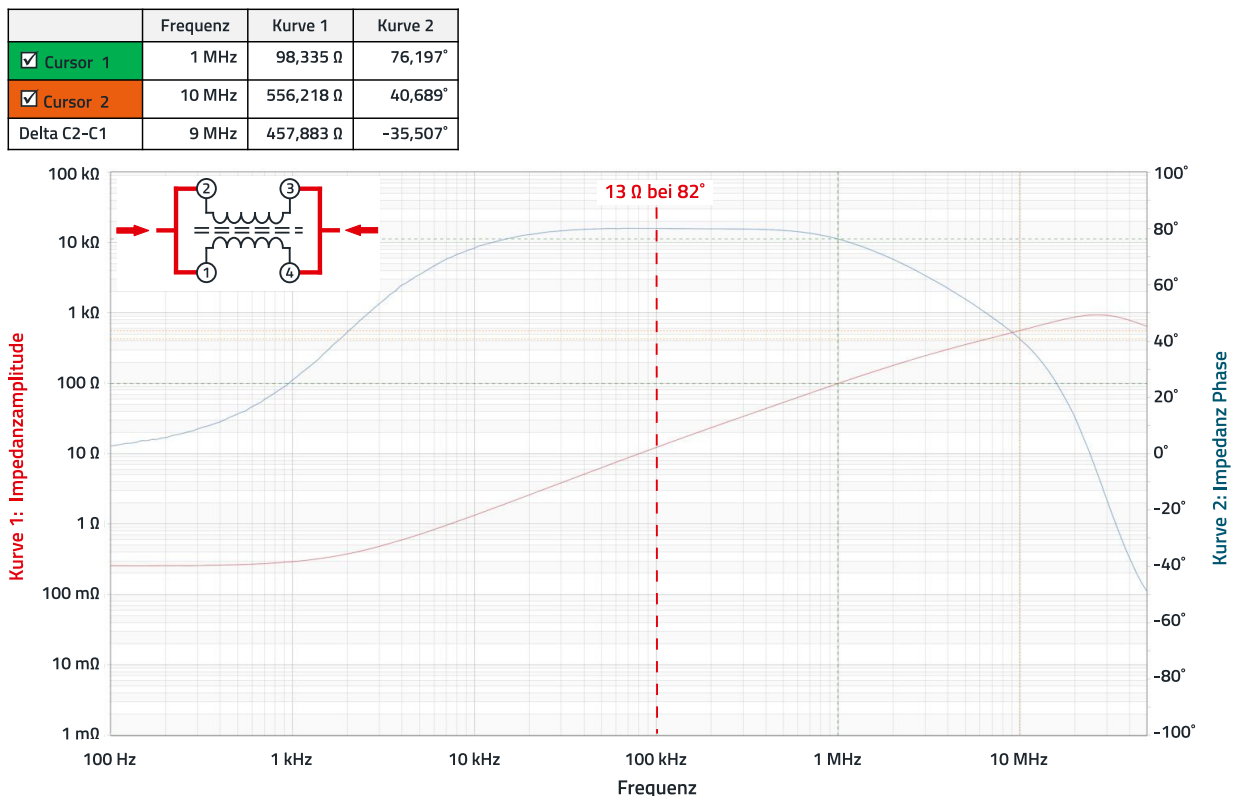


Abbildung 12: CM-Impedanz der Spule im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 50 MHz , rot: Impedanz, blau: Phase.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichtaktrosseln der WE-CMDC-Serie

In diesem Bereich sollte die Phasenverschiebung der Impedanz über 80° liegen, da dies auf eine dominante Induktivität hinweist und kapazitive und resistive („ohmsche“) Verluste vernachlässigbar sind. Dadurch ist sichergestellt, dass die Induktivität auf der Grundlage eines realistischen Modells berechnet wird. Würde die Induktivität in einem Bereich mit signifikanten Verlustanteilen (Phasenanteile unter 80°) berechnet, könnten größere Abweichungen auftreten, da der Verlustwiderstand die Messung verfälscht.

Das Diagramm in Abbildung 12 zeigt, dass bei 100 kHz die Impedanz bei einem Phasenwinkel von 82° ca. 12 Ω beträgt. Hieraus ergibt sich folgende Berechnung:

Z bei 100 kHz: 13 , $\theta = 82^\circ$

Gegeben sind

$$Z = \sqrt{R^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L)^2} \quad (2)$$

und

$$\tan \theta = \frac{X_L}{R} \text{ with } X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (3)$$

und

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (4)$$

ergibt:

Widerstand R: 1,67 Ω $R_0 = 3,34 \Omega$

Gegeninduktion X_L : 11,88 Ω

Induktivität L_0 : 18,91 μH

Zur Berechnung der Streuinduktivität kann die Impedanz der Primärspule bei kurzgeschlossener Sekundärspule gemessen werden. Aufgrund der magnetischen Kopplung ist L_s die Summe der Streuinduktivitäten von Primär- und Sekundärspule. Wird die Sekundärspule kurzgeschlossen, so ist die magnetisch gekoppelte L_0 aus Sicht der Primärspule kurzgeschlossen und die Reststreuinduktivität L_s kann gemessen werden. Der schematische Messaufbau ist in Abbildung 13 dargestellt.

L_0 ist die Gesamtinduktivität, bestehend aus der Streuinduktivität und der Induktivität L_0 , die auf die Gleichtaktstörung wirkt.

Es ergibt sich folgende Formel:

$$L_0 = L_{s1} + L_0' \quad (5)$$

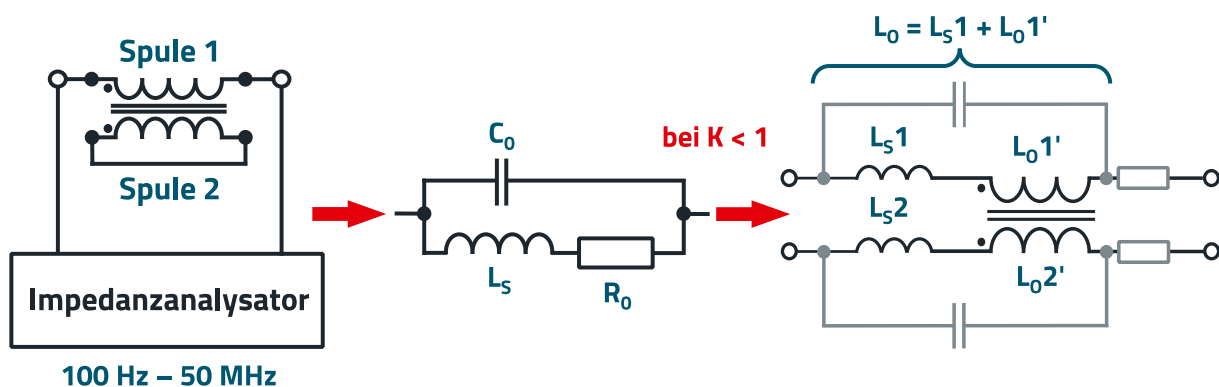


Abbildung 13: Schematischer Messaufbau zur Bestimmung der Streuinduktivität.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichtaktrosseln der WE-CMDC-Serie

Abbildung 14 zeigt das Messprotokoll zur Berechnung der Streuinduktivität.

Die folgenden Berechnungen ergeben sich aus $Z = 1,3 \, \Omega$ und $\theta = 76^\circ$ bei 100 kHz:

Der Widerstand R wird anhand der folgenden Formel berechnet: $R = Z \cdot \cos(\theta)$

Die Gegeninduktion X_L wird wie folgt berechnet: $X_L = Z \cdot \sin(\theta)$

Die Induktivität (L) steht in folgender Beziehung zu X_L :

$$L = X_L / (2 \cdot \pi \cdot f)$$

$$\theta = 76^\circ \rightarrow \theta_{\text{rad}} = \frac{76 \cdot \pi}{180} = 1,326 \text{ radians} \quad (6)$$

$$R = Z \cdot \cos(\theta) = 1,3 \cdot \cos(1,326) \quad (7)$$

$$R = 1,3 \cdot 0,241 = 0,31 \, \Omega$$

$$X_L = Z \cdot \sin(\theta) = 1,3 \cdot \sin(1,326) \quad (8)$$

$$X_L = 1,3 \cdot 0,968 = 1,26 \, \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{1,26}{2 \cdot 3,1416 \cdot 100000} \quad (9)$$

$$L = \frac{1,26}{628318} = 2,01 \, \mu\text{H}$$

Ergebnisse:

Widerstand (R): 0,31 Ω

Gegeninduktion (X_L): 1,26 Ω

Induktivität (L_S): 2,01 μH , wobei es sich um die Streu- oder Leckinduktivität handelt, gemessen bei 100 kHz.

	Frequenz	Kurve 1	Kurve 2
☒ Cursor 1	1 MHz	11,337 Ω	86,206°
☒ Cursor 2	10 MHz	110,477 Ω	85,468°
Delta C2-C1	9 MHz	99,14 Ω	-737,746 m°

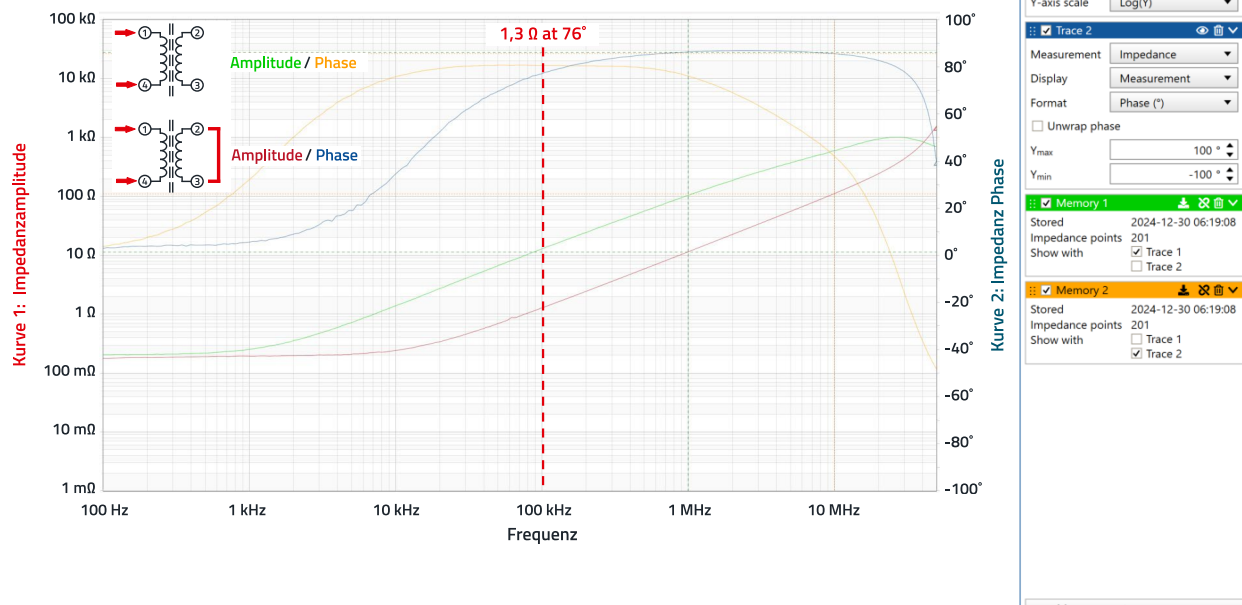


Abbildung 14: Messprotokoll zur Berechnung der Streuinduktivität. Rot: Impedanz, blau: Phase.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichakttdrosseln der WE-CMDC-Serie

Die parasitäre Kapazität wird am Resonanzpunkt der Drossel bestimmt, der oberhalb der Frequenz von 50 MHz liegt. Zu diesem Zweck wird die Einfügedämpfung wie in Abbildung 15 dargestellt mit einem HF-Netzwerkanalysator gemessen.

Es wurden drei verschiedene Signalpegel gemessen, um etwaige Verschiebungen durch den Einfluss des Ferritmaterials berücksichtigen zu können.

Alle Kurven in Abbildung 15 zeigen eine Resonanz bei 241,77 MHz. Die Streukapazität kann nun wie folgt berechnet werden.

Gegeben sind

$$f_0 = \frac{1}{\pi \sqrt{L_0 \cdot C_0}} \quad (10)$$

und

$$C = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot L} \quad (11)$$

und

$$C_0 = 2 \cdot C_S; L_S = 2 \mu\text{H}$$

Es ergibt sich:

$$C_0 = 1,26 \text{ pF (einschließlich aller Messabweichungen).}$$

Der nächste, sehr wichtige Parameter einer Gleichakttdrossel ist der Gegenkopplungskoeffizient K oder die Gegenkopplungsinduktivität M. Wie bereits erwähnt, ist der Kopplungskoeffizient K einer Gleichakttdrossel ein Maß dafür, wie wirksam die Magnetfelder ihrer beiden Wicklungen gekoppelt sind. Im Idealfall sollte K für eine Gleichakttdrossel nahe 1 liegen, was bedeutet, dass der von einer Wicklung erzeugte magnetische Fluss fast vollständig mit der anderen Wicklung gekoppelt ist. Diese hohe Kopplung gewährleistet eine effektive Unterdrückung von Gleichaktstörungen, während differentielle Signale mit minimalen Störungen durchgelassen werden. Da in diesem Fall jedoch keine Streuinduktivität zum Filtern von Harmonischen oder Störsignalen im Gegentaktmodus vorhanden ist, muss eine zusätzliche Induktivität hinzugefügt werden.

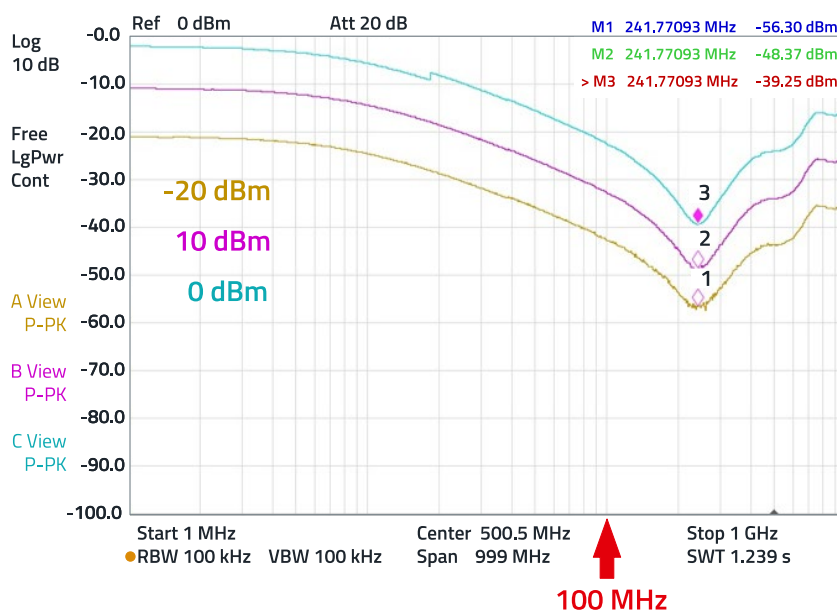
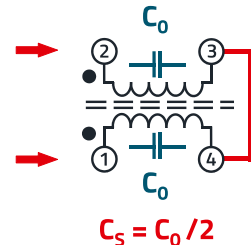


Abbildung 15: Einfügedämpfung der DM-Impedanz bei drei verschiedenen Signal-/Messpegeln.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichtaktrosseln der WE-CMDC-Serie

Wenn also der Kopplungskoeffizient K reduziert wird, kann die Streuinduktivität nützlich sein, um die Gegentaktstörungen zu reduzieren, die dann natürlich im Frequenzbereich oberhalb des Nutzsignals liegen müssen.

Für die Parameter K und M gilt folgende Beziehung:

$$\text{Kopplungskoeffizient } K = (L_0 - L_S)/L_0$$

$$\text{Gegenkopplungsinduktivität } M = K \cdot L_0$$

$$L_0 = 18,91 \mu\text{H}$$

$$L_S = 2,01 \mu\text{H}$$

Daraus ergeben sich folgende Werte:

$$\text{Kopplungskoeffizient } K = 0,89$$

$$\text{Gegenkopplungsinduktivität } M = 16,9 \mu\text{H}$$

Die Messung des Kupferwiderstands R_{DC} bei Gleichstrom fehlt noch. Sie gestaltet sich überraschend kompliziert, da diese Messung eines sehr kleinen Widerstandswerts von der Umgebungstemperatur und dem Kontakt zum Prüfobjekt abhängt (trotz Kelvin-Anschlüssen). Letztendlich wurde der Wert unter kontrollierten Bedingungen gemessen; Aufbau und Messergebnisse sind in Abbildung 16 dargestellt.

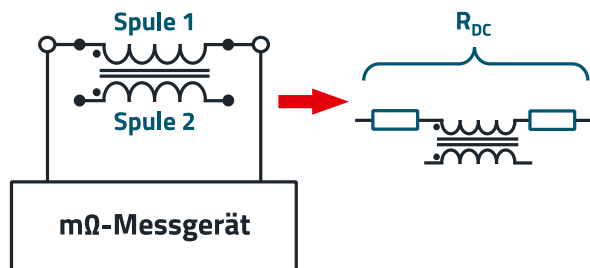


Abbildung 16: Schematischer Messaufbau zur Bestimmung des Kupferwiderstands der Wicklungen.

Da die Primär- und die Sekundärspule die gleiche Windungszahl aufweisen, gilt der gemessene Wert auch für die Sekundärspule. Der für den Kupferwiderstand R_{DC} einer Wicklung einschließlich der Anschlussverbindungen ermittelte Wert beträgt 23 mΩ.

Insgesamt ergibt sich daraus das folgende Ersatzschaltbild für die Gleichtaktinduktivität (Abbildung 17).

Der Einfluss der Parameter C_0 und K auf die Filtereigenschaften ist nachfolgend dargestellt. Das in Abbildung 18 gezeigte Schaltbild veranschaulicht den Einfluss der parasitären Kapazität C_0 der CMC.

Die parasitäre Kapazität in den Wicklungen dieser Drossel entsteht durch die räumliche Nähe benachbarter Wicklungswindungen, was zu einer ungewollten kapazitiven Kopplung führt. Diese Kopplung bildet eine Parallelresonanz mit der Induktivität der Wicklungen, wodurch eine Eigenresonanzfrequenz entsteht, die in Abbildung 18 deutlich erkennbar ist. Unterhalb der Eigenresonanzfrequenz verhält sich die Drossel vorwiegend induktiv und sorgt so für eine effektive Unterdrückung von Gleichtaktstörungen. Wenn sich die Frequenz jedoch der Eigenresonanzfrequenz annähert, bewirkt die parasitäre Kapazität bei der Drossel einen deutlichen Impedanzabfall. Bei Frequenzen oberhalb der Eigenresonanzfrequenz wird die Impedanz der Drossel zunehmend kapazitiv, wodurch ihre Wirksamkeit bei der Dämpfung von Gleichtaktstörungen verringert wird. Diese Verschiebung wirkt sich negativ auf die Einfügedämpfung aus. Dies gilt in besonderem Maße in höheren Frequenzbereichen, in denen die Drossel keine nennenswerte Dämpfung mehr bewirkt. Wie in Abbildung 18 zu sehen ist, führen bereits geringe Werte der parasitären Kapazität, beispielsweise 0,3 pF, zu starken Resonanzeffekten bei einer Frequenz im Bereich von etwa 115 MHz. Diese ausgeprägte Parallelresonanz weist einen hohen Q-Faktor auf. Aus diesem Grund können parasitäre Kapazitäten unerwünschte Resonanzen in den Stromkreis einbringen, wodurch bestimmte Störfrequenzen nicht unterdrückt, sondern sogar verstärkt und leicht in benachbarte Kreise gekoppelt werden können.

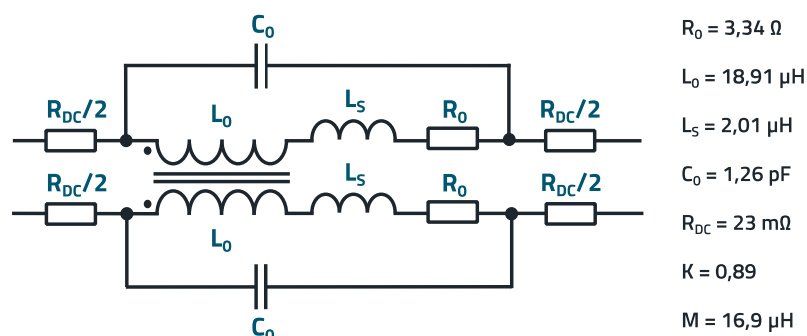


Abbildung 17: Ersatzschaltbild der CM-Drossel **WE-CMDC**, Bestellnummer: **744238132**.

APPLICATION NOTE

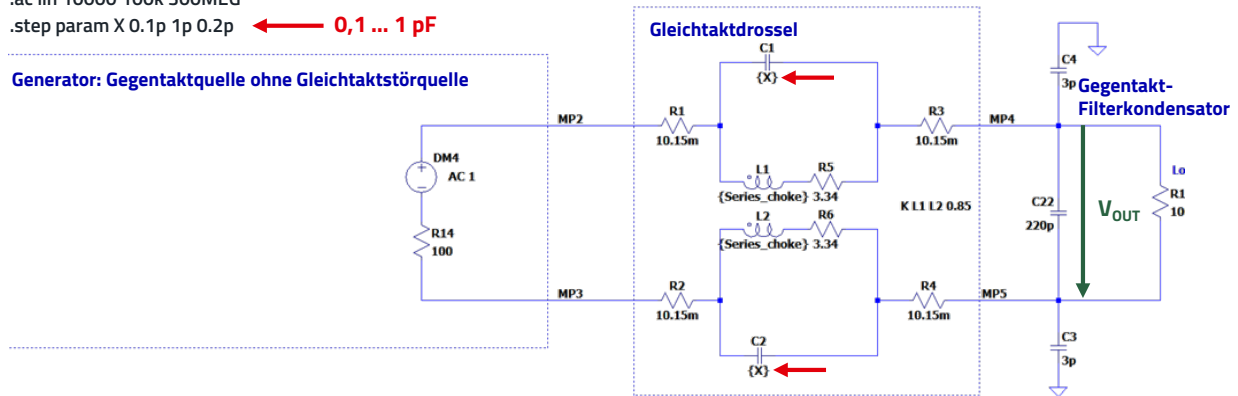
ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichakttdrosseln der WE-CMDC-Serie

Mit Ersatzschaltung für Gleichaktfilter und „Gegentaktkondensator“

```
.options plotwinsize = 0
.optios numdgt = 8
.param Series_choke 18.91u
.ac lin 10000 100k 300MEG
.step param X 0.1p 1p 0.2p
```

Generator: Gegentaktquelle ohne Gleichaktstörquelle

Parasitäre Kapazitäten C_1 , C_2 variabel



V_{OUT} im Verhältnis zur Frequenz, C_0 (C_1 , C_2) variabel

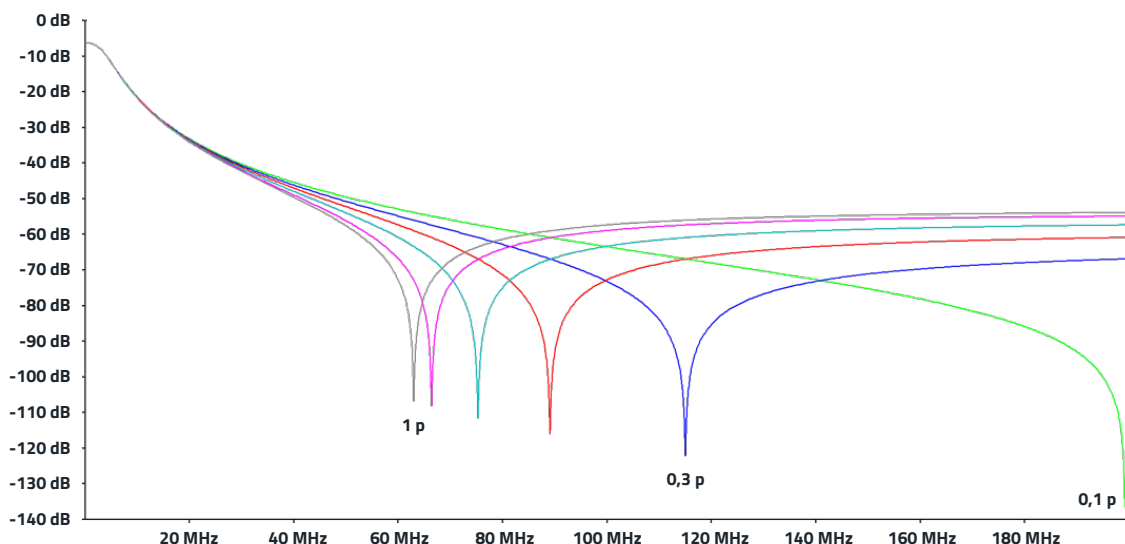


Abbildung 18: Schaltplan und Ausgangsspannung (V_{OUT}) des Filters, um den Einfluss von C_0 zu zeigen. Da es sich um eine Simulation handelt, sind keine kapazitiven Streueffekte aufgrund des Messaufbaus enthalten.

Um diese Effekte abzumildern, werden sorgfältige Designpraktiken angewendet, wie z. B. die Auswahl einer passenden Drossel, die Minimierung der Kopplung auf der Leiterplatte, die Dämpfung von Resonanzen durch zusätzliche Verluste wie Widerstände und das Hinzufügen von

SMD-Ferriten im Gegentaktmodus, die in diesem Frequenzbereich verlustbehaftet sind. Diese Maßnahmen tragen dazu bei, parasitäre Kapazitäten zu minimieren und den effektiven Betriebsfrequenzbereich der Drossel zu erweitern.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichaktrosseln der WE-CMDC-Serie

Das in Abbildung 19 dargestellte Schaltbild veranschaulicht den Einfluss des Kopplungsfaktors K bzw. der wechselseitigen Induktivität M der CMC auf die Gegentaktspannung V_{OUT} . Ein hoher Kopplungsfaktor nahe 1 weist auf eine starke magnetische Kopplung hin, was bedeutet, dass der größte Teil des von einer Wicklung erzeugten Flusses mit der anderen Wicklung zusammenwirkt.

Dies erhöht die Induktivität für Gleichaktströme und verbessert die Fähigkeit der Drossel, Gleichaktstörungen zu dämpfen. Folglich wird die Resonanzfrequenz für Gleichaktstörungen aufgrund der erhöhten Effektivinduktivität abgesenkt.

Die Resonanzfrequenz wird in erster Linie durch die Streuinduktivität und die parasitäre Kapazität beeinflusst.

Daher senkt, wie in Abbildung 19 dargestellt, ein höherer Kopplungsfaktor die Streuinduktivität, womit wiederum eine Erhöhung der Resonanzfrequenz einhergeht. Mit einem höheren K -Wert bietet die Drossel eine bessere Unterdrückung von Gleichaktstörungen über einen breiteren Frequenzbereich, bevor sie in Resonanz tritt.

Darüber hinaus verbessert sich die Einfügedämpfung für Gleichaktstörungen, da die Drossel auch bei höheren Frequenzen ihre Wirkung behält. Umgekehrt steigt bei einem niedrigen K -Wert die Streuinduktivität, wodurch die Resonanzfrequenz sinkt und der Frequenzbereich, in dem die Störunterdrückung wirksam ist, möglicherweise verringert wird. Dies kann auch zu einer geringeren Einfügedämpfung bei höheren Frequenzen führen.

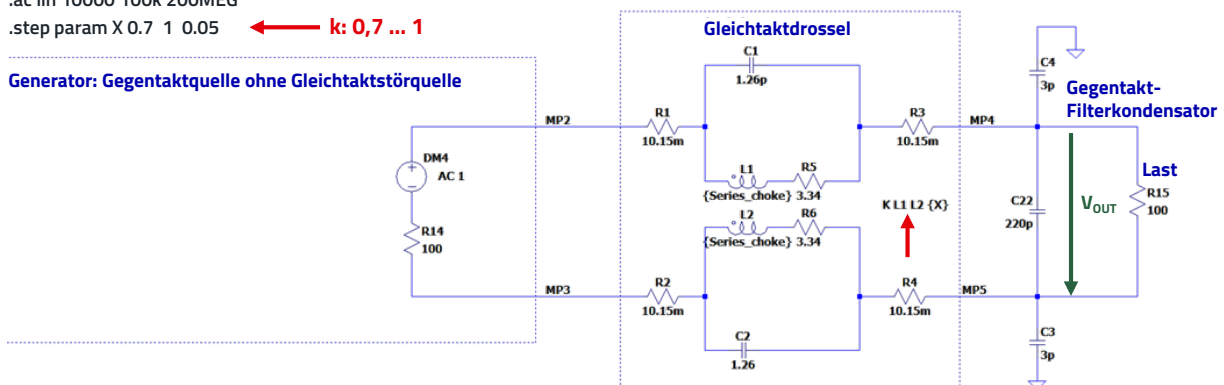
Mit Ersatzschaltung für Gleichaktfilter und „Gegentaktkondensator“

```
.options plotwinsize = 0
.optios numdgt = 8
.param Series_choke 18.91u
.ac lin 10000 100k 200MEG
.step param X 0.7 1 0.05
```

← $k: 0,7 \dots 1$

Generator: Gegentaktquelle ohne Gleichaktstörquelle

Wechselseitiger Kopplungsfaktor k variabel



V_{OUT} im Verhältnis zur Frequenz, k variabel

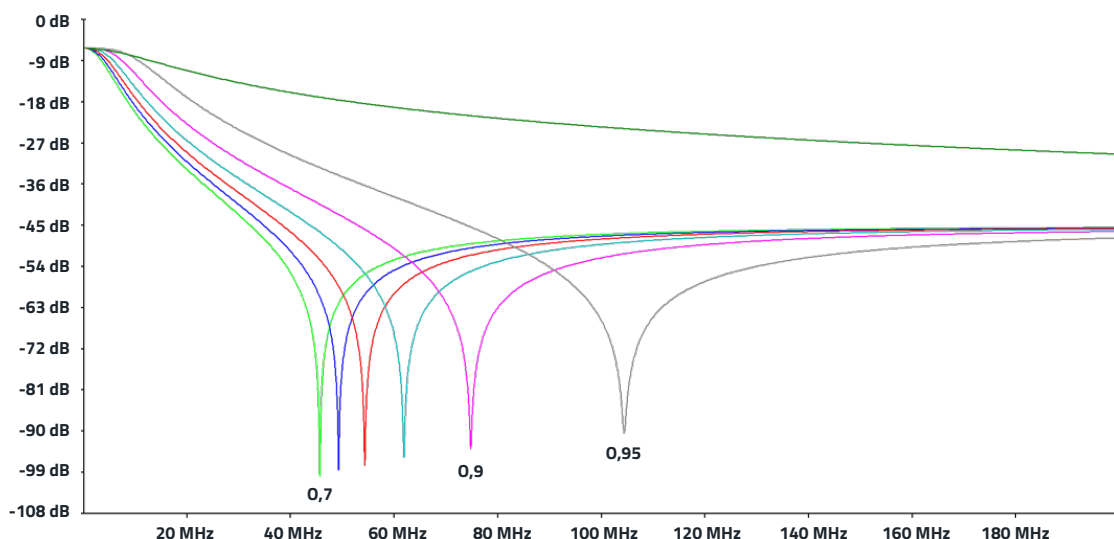


Abbildung 19: Schaltplan und Ausgangsspannung (V_{OUT}) des Filters zur Darstellung des Einflusses von M (K).

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichakttdrosseln der WE-CMDC-Serie

In der praktischen Anwendung muss eine CMC ausgewählt werden, die eine hohe Kopplung für eine wirksame Störunterdrückung mit einer geeigneten Streuinduktivität in Einklang bringt, um unbeabsichtigte Auswirkungen auf Gegentaktsignale zu vermeiden.

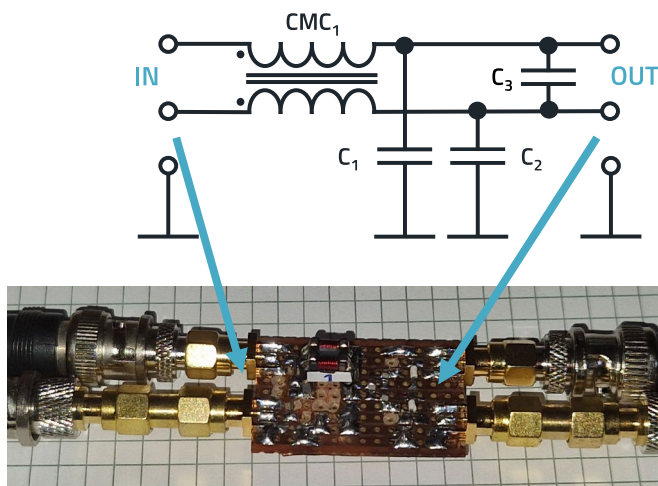
3. FILTERANWENDUNGEN

Der folgende Abschnitt enthält praktische Beispiele, die die Verwendung von Gleichakttdrosseln veranschaulichen. Diese Anwendungen sind leicht verständlich und verdeutlichen die Vorteile von Gleichakttdrosseln, wenn deren Aufbau und Parameterauswahl sorgfältig optimiert sind.

3.1 Gleichaktfilter

Abbildung 20 zeigt die schematische Darstellung eines einfachen Gleichaktfilters. Um die Auswirkungen der Auswahl unterschiedlicher Werte der **WE-CMDC**-Serie zu veranschaulichen, wurde die Einfügedämpfung gemessen.

Der Filter ist auf einer Lochplatte mit einer Massefläche aufgebaut; diese wurde im Bereich der Gleichakttdrossel weggelassen, um die kapazitive Kopplung gering zu halten. Das Eingangssignal ist ein Differenzsignal mit einer Impedanz von $50\ \Omega$ gegen Masse, d. h. einer Differenzimpedanz von $100\ \Omega$. Das Ausgangssignal wurde über eine Differenzsonde mit einer Differenz-Eingangsimpedanz von $1\ \text{M}\Omega$ an das Oszilloskop angelegt. Abbildung 21 zeigt die Gegentaktdämpfung.



C_1, C_2 : 470 pF, NPO, Art.-Nr.: 885012007086
 C_3 : 150 pF, NPO, Art.-Nr.: 885012077083

Verwendete Werte für CMC_1 :

4,0 μH – Art.-Nr.: 744238301
7,0 μH – Art.-Nr.: 744238701
10,4 μH – Art.-Nr.: 744238132
22,6 μH – Art.-Nr.: 744238302

Abbildung 20: Schema und Aufbau eines CM-Filters unter Verwendung verschiedener Gleichakttdrosseln der **WE-CMDC**-Serie. "IN" ist die Seite, an der das Messsignal (in der Praxis das Störsignal) angelegt wurde.

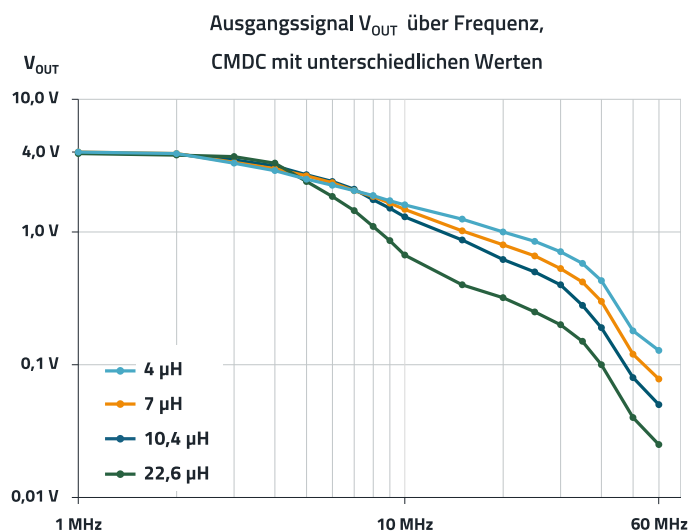
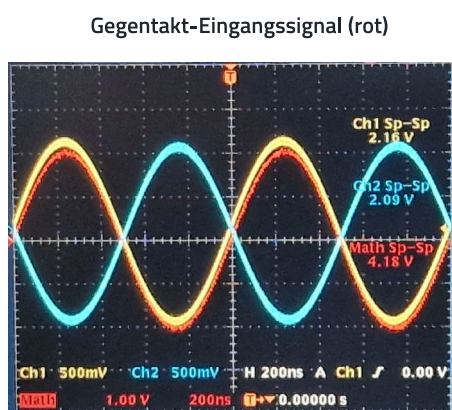


Abbildung 21: DM-Dämpfung des Filters, dargestellt in Abbildung 20.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichtaktdrosseln der WE-CMDC-Serie

Das doppelt logarithmische Diagramm in Abbildung 21 zeigt, dass die differentielle Dämpfung für alle ausgewählten Werte bis ca. 5 MHz gering ist. Jenseits dieses Frequenzbereichs hängt die Dämpfung dagegen nicht nur vom gewählten Induktivitätswert ab, sondern auch vom Verhalten des Imaginärteils μ'' der Permeabilität des Ferritmaterials. Selbstverständlich weist der Filter mit der höheren Induktivität auch eine stärkere Dämpfung auf, jedoch ist die Nichtlinearität, insbesondere die Knickstelle bei ca. 35 MHz, auf das Ferritmaterial zurückzuführen. Oberhalb von 35 MHz nimmt die Dämpfung bei allen vier Filtern deutlich zu, da das Ferritmaterial sich seiner Resonanzfrequenz und damit seinem höheren Impedanzbereich annähert, in dem nicht nur μ' , sondern auch μ'' deutlich ansteigen.

Die Gegenkopplungsinduktivität (M) nimmt mit der Frequenz ab, da die reale Permeabilität (μ') des Ferrits sinkt, wodurch L_{STRAY} und die Gegentaktdämpfung zunehmen. Die imaginäre Permeabilität (μ'') des Ferrits steigt bei höheren Frequenzen an, wodurch Widerstandsverluste entstehen, die die Gegentaktdämpfung weiter verstärken. Obwohl sich L_{STRAY} wie eine Luftdrossel verhält, wird der Wert durch die frequenzabhängige Kopplung (M) mit dem Kernmaterial beeinflusst. Infolgedessen hängt die Gegentaktdämpfung vom Ferritmaterial ab, da dessen Permeabilitätsschwankungen sowohl L_{STRAY} als auch die Widerstandsverluste über den Frequenzbereich beeinflussen. Die Gleichtaktdämpfung ist in Abbildung 22 dargestellt. Eine

höhere Induktivität führt dabei zu einer höheren Impedanz; die Markierungen zeigen jeweils die 3-dB-Grenzfrequenz an. Alle Drosseln weisen keine ausgeprägten Resonanzen auf, lediglich im Bereich um 80 MHz besteht konstruktionsbedingt eine schwache Parallelresonanz. Im Bereich zwischen 200 MHz und 300 MHz verschiebt die Impedanz die Drosseln in den kapazitiven Bereich, wodurch die Impedanz zunimmt. Dieser Bereich wird ebenfalls durch die Messanordnung bestimmt und kann je nach Layout und Aufbau variieren.

Dennoch ermöglicht die Anordnung im 50- Ω -System des Netzwerkanalysators bei allen Induktivitätswerten eine Einfügedämpfung von 40 dB bei 100 MHz, während die 22,6- μ H-Drossel mehr als 50 dB erzielt.

3.2 Gekoppelter Filter zur Störunterdrückung in DC-DC-Wandlern

Störungen an den Ausgängen von DC/DC-Wandlern können verschiedene Ursachen haben, unter anderem hochfrequente Schalttransienten, leitungsgebundene oder abgestrahlte EMV-Störungen sowie Rippelspannungen infolge unzureichender Filterung. Der Schaltvorgang in Wandlern mit Pulsweiten- oder Pulsfrequenzmodulation erzeugt hochfrequente Störgrößen, die in empfindliche Schaltungen gekoppelt werden können. Eine unzureichende Filterung oder ein ungeeignetes Platinenlayout können diese Störgeräusche verstärken und zu Problemen mit der Signalintegrität führen.

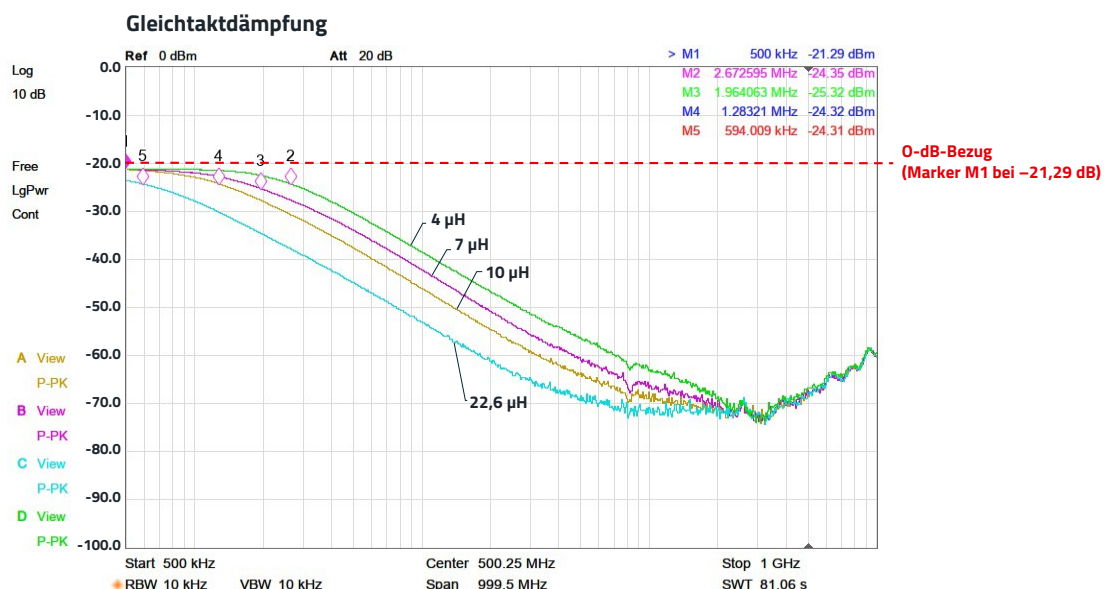


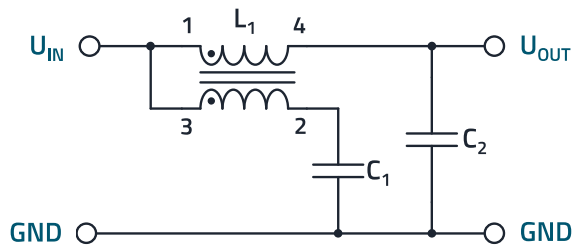
Abbildung 22: CM-Dämpfung verschiedener Drosseln im Bereich von 500 kHz bis 1 GHz, gemessen im 50 Ω -System mit einem Netzwerkanalysator.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichaktrosseln der WE-CMDC-Serie

Breiten sich diese Störungen in Schaltkreisen aus, kann es zu Fehlfunktionen analoger und digitaler Bauelemente und damit zu Instabilität, fehlerhafter Datenverarbeitung oder Leistungseinbußen kommen. Eine hohe Rippelspannung kann präzise Analogschaltungen stören, Offsets verursachen und die Messgenauigkeit von Sensoren oder ADC-Wandlern beeinträchtigen. In HF-Systemen können Störungen bei einem DC/DC-Wandler das Phasenrauschen verstärken und somit die Empfindlichkeit des Gesamtsystems beeinträchtigen. Bei digitalen Hochgeschwindigkeitssystemen kann übermäßiges Rauschen zu Timingfehlern und Verbindungsausfällen führen.

Ein zusätzlicher Filter, der aus einer Gleichaktrossel in einem speziellen Schaltmodus besteht, kann Reststörungen wirksam reduzieren. Abbildung 23 zeigt das Schaltbild.



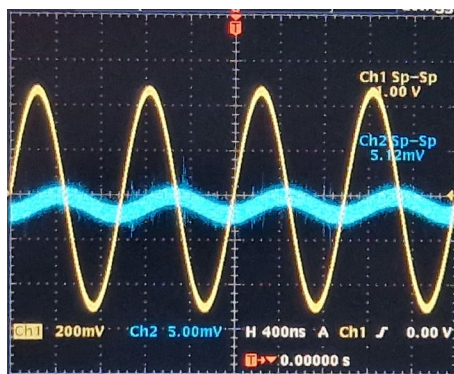
L_1 : 22,6 μH , WE CMDC 744 238 302

C_1 : 220 μF WE WCAP-PT5H
Polymerkondensator 870 235 374 004

C_2 : 100 μF WE WCAP-PT5H
Polymerkondensator 870 235 373 001

Abbildung 23: DC-Line-Filter zur zusätzlichen Rauschdämpfung mit **WE-CMDC** als gekoppelte Induktivität. "U_{IN}" ist die Seite, an der das Messsignal (in der Praxis das Störsignal) angelegt wurde.

— V_{IN} 1 MHz, 1,0 V_{SS} aus 50 Ω -Quelle
— V_{OUT} 5,12 mV_{SS} bei 1:1-Sonde



Durch die Kopplung der zweiten Wicklung gegen Masse kann eine zusätzliche Störreduzierung erzielt werden. Ein Parameter für eine hohe Dämpfung ist die Induktivität von L_1 , ein weiterer der Gegenkopplungsfaktor K , der im Bereich unter 0,9 liegen sollte, da die Streuinduktivität die Dämpfung bestimmt. Je höher die Kapazität von C_1 ist, desto niedriger ist der dämpfbare Frequenzbereich. Ein typischer Wert ist 220 μF , der zum Filtern bis in den kHz-Bereich verwendet werden kann. Der ESR des Kondensators sollte niedrig sein, weshalb ein Polymerkondensator verwendet wurde. Einige Messsignale zur Veranschaulichung der Wirksamkeit sind in Abbildung 24 dargestellt.

Die Signaldämpfung bei 1 MHz beträgt ca. 73 dB; wird der Kondensator C_1 entfernt, reduziert sich die Dämpfung um ca. 6 dB. Diese Dämpfungsreduzierung ist von 200 kHz bis 30 MHz nahezu konstant.

Einfügedämpfung mit/ohne Kondensator C_1 in 50- Ω -Netzwerkanalysatorsystem

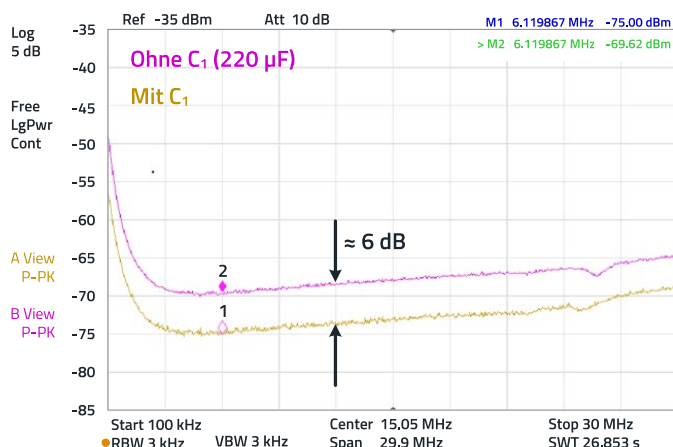


Abbildung 24: Signaldämpfung und Einfügedämpfung des Filters mit gekoppelter Spule.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichakttdrosseln der WE-CMDC-Serie

3.3 Oszillator mit sehr geringer Verzerrung

Wenn man die Gleichakttdrossel im Schaltkreis um 90 Grad dreht, erhält man einen Signaltransformator. Auch wenn die Gleichakttdrossel natürlich nicht für diese Anwendung hergestellt wurde, lässt sich der „Nutzen“ des Bauteils hierfür leicht überprüfen. Abbildung 25 zeigt die Übertragungscharakteristik der 22,6- μ H-Drossel über der Frequenz.

Selbstverständlich kann der Signaltransformator nur in einem Frequenzbereich eingesetzt werden, in dem die Übertragungseigenschaften gut sind, d. h. die Linearität hoch und die Verluste nicht zu hoch sind. Nach Abbildung 25 ist dies der Bereich zwischen ca. 80 kHz und 2 MHz.

Die folgende Anwendung zeigt den Einsatz der CMC-Drossel als Signaltransformator in einem Meißner-Oszillator. Der

Meißner-Oszillator erzeugt sinusförmige Schwingungen. Er besteht aus einem Verstärker (z. B. einem Transistor) und einem Signaltransformator (zwei gekoppelte Spulen), der als frequenzbestimmendes Element dient. Die positive Rückkopplung zur Erzeugung der Schwingung wird durch die induktive Kopplung zwischen den Spulen des Transformators realisiert. Die Schwingungsfrequenz wird dabei von der Induktivität des Transformators und den Kapazitäten im Stromkreis bestimmt. Der Oszillator ist einfach aufzubauen und bietet eine stabile Schwingungserzeugung mit hoher Ausgangsamplitude. Die Frequenz lässt sich durch Ändern der Induktivität oder Kapazität leicht anpassen. Da der Ausgang an C_2 nicht entkoppelt ist, ändert jede kapazitive Last an C_2 die Resonanzfrequenz. R_3 entkoppelt den Resonanzkreis und mindert somit die Auswirkungen kapazitiver Lasten auf die Resonanzfrequenz.

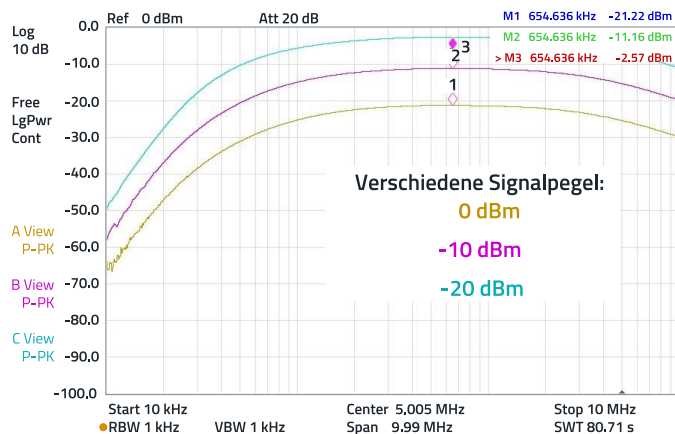
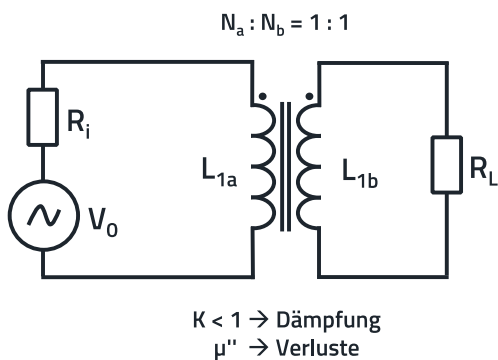


Abbildung 25: Übertragungskennlinie der CM-Drossel bei Verwendung als Signalübertrager mit dem Windungsverhältnis 1:1 ($N_a:N_b$).

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichaktrosseln der WE-CMDC-Serie

Abbildung 26 zeigt das Schaltbild, den Aufbau und das Ausgangssignal der Schaltung.

Bei einer Versorgungsspannung von 15 V beträgt die Ausgangsspannung 10 V_{pp} an einem 1-M Ω -Oszilloskoptastkopf. Das Ausgangssignal hat eine Frequenz von 1 MHz, und das Spektrum zeigt, dass die Harmonischen des Signals im Rauschen liegen und somit einen Abstand von mehr als 60 dB zum Grundsignal haben. Dadurch eignet sich die Schaltung besonders für Anwendungen, bei denen eine hohe Signalreinheit gefragt ist.

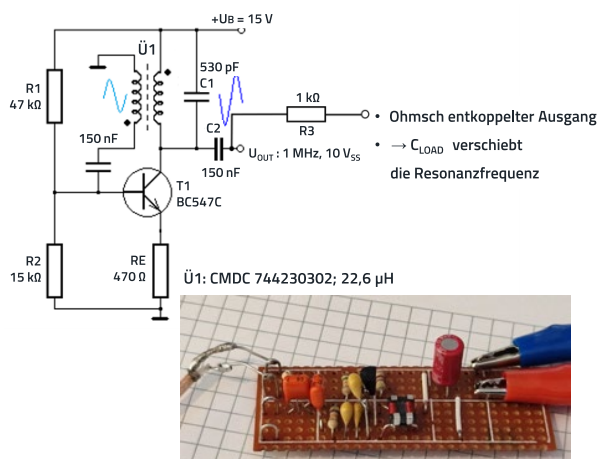


Abbildung 26: Schema und Ausgangssignal des Meissener Oszillators.

3.4 Primärer DC-Filter im Gleich- und Gegentaktmodus

Die letzte in diesem Artikel vorgestellte Anwendung ist der Einsatz der **WE-CMDC** in einem Gleichstrom-Eingangsfiler: die klassische Gleichaktrossel. Zusätzlich wurden in dem Eingangsfilter auch Schutzvorrichtungen gegen transiente Störungen und umgekehrte Polarität der Eingangsspannung implementiert (Abbildung 27).

Wichtig ist wie bei allen Filtern eine niederimpedante Verbindung mit geringem Störspannungs-Offset zur Primärmasse (SGND), damit die „Y-Kondensatoren“ die Gleichaktstörungen effektiv dämpfen können. Ferner ist zu beachten, dass der Übergang von SGND zu GND auf der Sekundärseite der Gleichaktrossel an einer kontrollierten Verbindung am Metallgehäuse, d.h. störpotenzialarm und niederimpedant, erfolgen muss. Eine detaillierte Beschreibung finden Sie im Referenzdesign **RD041**.

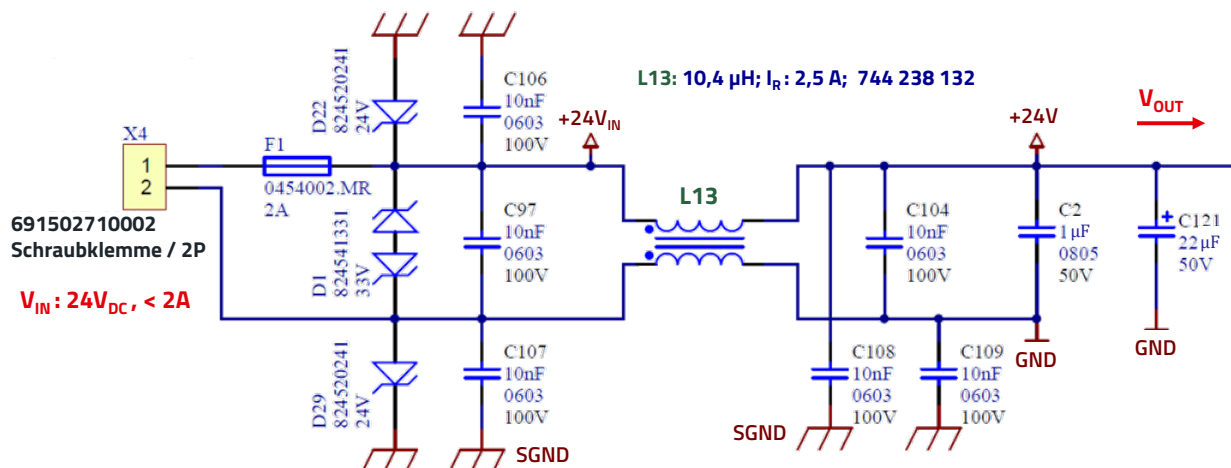
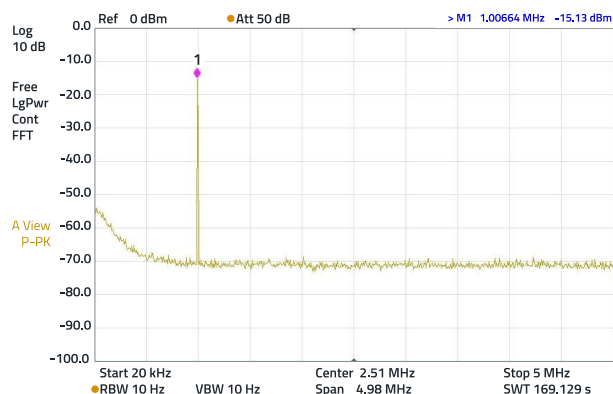


Abbildung 27: Schematische Darstellung eines DC-Filters mit CM- und DM-Dämpfung.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichtaktrosseln der WE-CMDC-Serie

4. FAZIT

Wir haben gesehen, dass eine CMC-Drossel mit Ferritkern eine wirksame Maßnahme zur Unterdrückung von Gleichtaktstörungen in elektrischen und elektronischen Schaltungen darstellt. Es ist jedoch wichtig zu verstehen, dass die Induktivität nicht der einzige Parameter ist, der im Hinblick auf die Signaleigenschaften berücksichtigt werden muss. Die frequenzabhängige Permeabilität des Ferritmaterials und die parasitäre Kapazität der Drossel verändern die Eigenschaften. Eine sorgfältige Auswahl der Drossel unter Berücksichtigung der Betriebsfrequenz und der konkreten Anwendung ist daher von entscheidender Bedeutung. Die Anwendungsbereiche einer CMC können durchaus über die typischen Bereiche wie EMV-Filter in Netzteilen hinausgehen. Trotzdem erfordert eine optimale Konstruktion die Einbeziehung aller elektrischen und mechanischen Eigenschaften, um eine einwandfreie Funktion zu gewährleisten.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichakttdrosseln der WE-CMDC-Serie

A ANHANG

Zum Abschluss bietet die als Anhang angefügte Abbildung 28 einen umfassenden Überblick über typische Drosseln, die in Signalanwendungen eingesetzt werden. Der Schwerpunkt liegt vor allem auf Gleichakttdrosseln, ergänzt durch SMD-Ferrite und Klappferritbaureihen. Dieser Vergleich soll dem Benutzer helfen, die wichtigsten Unterschiede, Vorteile und spezifischen Anwendungen der einzelnen Komponenten besser zu verstehen, um eine fundiertere und effektivere Auswahl zu ermöglichen.

Bezeichnung	CMDC	CNSW	SCC	SL2	CBF, RFI, PBF	STAR, AFB, SAFB
Funktion	Gleichakttdrossel	Gleichakttdrossel	Gleichakttdrossel	Gleichakttdrossel	Ferritperle	Ferrithülse
Beispielabbildung						
Bevorzugte Anwendung	Filterung von Gleichstromversorgungswegen im Niederspannungsbereich	Signaldatenleitungen, auch für hohe Übertragungsraten (HDMI, USB 3.X)	Filterung von Gleichstromversorgungswegen im Niederspannungsbereich	Drossel für Signal- und Datenleitungen	Zur Dämpfung von Gegentakt-Störsignalen im Hochfrequenzbereich	Zur Dämpfung von Gleichaktstörungen im Hochfrequenzbereich in Kabeln
Vorteile	Geringe parasitäre Kapazität, Ferritverlust $R < 5 \text{ MHz}$ (typ.)	Hohe Symmetrie, geringe Verluste	Hohe Induktivitätswerte, hohe Streuinduktivität	Sehr großer Wertebereich zwischen 10 pH und 20 mH verfügbar	Aufgrund des sehr breiten Wertebereichs gezielte frequenzselektive Maßnahmen möglich	Kann auch nachträglich noch an Kabeln montiert werden
Hauptmerkmal	Resonanzfrequenz $> 100 \text{ MHz}$ (typ.), hoher Nennstrom	Geringe Verluste unterhalb der Resonanzfrequenz	Sehr hohe Einfügedämpfung möglich	Hohe Symmetrie, geringe Verluste, geringes Streufeld durch Ringkern	Unterscheidung zwischen reaktivem und resistivem Wirkungsbereich auch bei hohen Strömen möglich	Einfach zu montieren, Wirksamkeit lässt sich schnell überprüfen
Anmerkung	Hohe Streuinduktivität im Verhältnis zur Wicklungsinduktivität	Niedriger Nennstrom, geringe Streuinduktivität, weniger geeignet für Stromversorgungsanwendungen	Resonanzfrequenz beginnt typischerweise im Bereich von 30 MHz, höhere parasitäre Kapazität	Erfordert sorgfältige Auswahl einer geeigneten Drossel	Sättigung des Vorspannungsstroms und Einfluss des Nutzsignals beachten	Wirkung abhängig vom Kabeltyp, mechanische Befestigung am Kabel erforderlich

Abbildung 28: Übersicht über typische Induktivitäten für Signalanwendungen: Gleichakttdrosseln, SMD-Ferrite und Scharnierferrit-Serien.

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu Gleichtaktrosseln der WE-CMDC-Serie

WICHTIGER HINWEIS

Der Anwendungshinweis basiert auf unserem aktuellen Wissens- und Erfahrungsstand, dient als allgemeine Information und ist keine Zusicherung der Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG zur Eignung des Produktes für Kundenanwendungen. Der Anwendungshinweis kann ohne Bekanntgabe verändert werden. Dieses Dokument und Teile hiervon dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung vervielfältigt oder kopiert werden. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG und seine Partner- und Tochtergesellschaften (nachfolgend gemeinsam als „WE“ genannt) sind für eine anwendungsbezogene Unterstützung jeglicher Art nicht haftbar. Kunden sind berechtigt, die Unterstützung und Produktempfehlungen von WE für eigene Anwendungen und Entwürfe zu nutzen. Die Verantwortung für die Anwendbarkeit und die Verwendung von WE-Produkten in einem bestimmten Entwurf trägt in jedem Fall ausschließlich der Kunde. Aufgrund dieser Tatsache ist es Aufgabe des Kunden, erforderlichenfalls Untersuchungen anzustellen und zu entscheiden, ob das Gerät mit den in der Produktspezifikation beschriebenen spezifischen Produktmerkmalen für die jeweilige Kundenanwendung zulässig und geeignet ist oder nicht.

Die technischen Daten sind im aktuellen Datenblatt zum Produkt angegeben. Aus diesem Grund muss der Kunde die Datenblätter verwenden und wird ausdrücklich auf die Tatsache hingewiesen, dass er dafür Sorge zu tragen hat, die Datenblätter auf Aktualität zu prüfen. Die aktuellen Datenblätter können von www.we-online.com heruntergeladen werden. Der Kunde muss produktspezifische Anmerkungen und Warnhinweise strikt beachten. WE behält sich das Recht vor, an seinen Produkten und Dienstleistungen Korrekturen, Modifikationen, Erweiterungen, Verbesserungen und sonstige Änderungen vorzunehmen. Lizenzen oder sonstige Rechte, gleich welcher Art, insbesondere an Patenten, Gebrauchsmustern, Marken, Urheber- oder sonstigen gewerblichen Schutzrechten werden

hierdurch weder eingeräumt noch ergibt sich hieraus eine entsprechende Pflicht, derartige Rechte einzuräumen. Durch Veröffentlichung von Informationen zu Produkten oder Dienstleistungen Dritter gewährt WE weder eine Lizenz zur Verwendung solcher Produkte oder Dienstleistungen noch eine Garantie oder Billigung derselben.

Die Verwendung von WE-Produkten in sicherheitskritischen oder solchen Anwendungen, bei denen aufgrund eines Produktausfalls sich schwere Personenschäden oder Todesfälle ergeben können, sind unzulässig. Des Weiteren sind WE-Produkte für den Einsatz in Bereichen wie Militärtechnik, Luft- und Raumfahrt, Nuklearsteuerung, Marine, Verkehrswesen (Steuerung von Kfz, Zügen oder Schiffen), Verkehrssignalanlagen, Katastrophenschutz, Medizintechnik, öffentlichen Informationsnetzwerken usw. weder ausgelegt noch vorgesehen. Der Kunde muss WE über die Absicht eines solchen Einsatzes vor Beginn der Planungsphase (Design-In-Phase) informieren. Bei Kundenanwendungen, die ein Höchstmaß an Sicherheit erfordern und die bei Fehlfunktionen oder Ausfall eines elektronischen Bauteils Leib und Leben gefährden können, muss der Kunde sicherstellen, dass er über das erforderliche Fachwissen zu sicherheitstechnischen und rechtlichen Auswirkungen seiner Anwendungen verfügt. Der Kunde bestätigt und erklärt sich damit einverstanden, dass er ungeachtet aller anwendungsbezogenen Informationen und Unterstützung, die ihm durch WE gewährt wird, die Gesamtverantwortung für alle rechtlichen, gesetzlichen und sicherheitsbezogenen Anforderungen im Zusammenhang mit seinen Produkten und der Verwendung von WE-Produkten in solchen sicherheitskritischen Anwendungen trägt.

Der Kunde hält WE schad- und klaglos bei allen Schadensansprüchen, die durch derartige sicherheitskritische Kundenanwendungen entstanden sind.

NÜTZLICHE LINKS



Application Notes
www.we-online.com/appnotes



REDEXPERT Design Platform
www.we-online.com/redexpert



Toolbox
www.we-online.com/toolbox



Produkt Katalog
www.we-online.com/products

KONTAKT INFORMATION



appnotes@we-online.com
Tel. +49 7942 945 - 0



Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG
Max-Eyth-Str. 1 74638 Waldenburg Germany
www.we-online.com

APPLICATION NOTE

ANP146 | Theoretische Hintergründe und praktische Anwendungen zu
Gleichtaktdrosseln der WE-CMDC-Serie

REVISIONSHISTORIE

Dokument Version	Veröffentlichungsdatum	Änderungen
ANP146a	2025/08/05	Ursprüngliche Version der Application Note

Hinweis: Die aktuelle Version des Dokuments und das Veröffentlichungsdatum sind in der Fußzeile jeder Seite dieses Dokuments angegeben.