

EMV Filter Design

T.Hofer, tobias.hofer@hsi-ag.ch

In fast allen elektronischen Geräten werden heutzutage Schaltnetzteile verwendet. Die Schaltnetzteile müssen immer höheren Anforderungen wie hoher Wirkungsgrad, niedrige Kosten oder geringe Emissionen Stand halten. Komplexe Projekte müssen in kürzester Zeit umgesetzt werden. Dies stellt die Entwicklung vor grosse Herausforderungen. Damit ein Produkt rechtzeitig, oder überhaupt, auf den Markt kommt, müssen alle geforderten normativen Richtlinien eingehalten werden. Für elektronische Baugruppen, im speziellen Schaltnetzteile, spielen die Grenzwerte der Emissionen und der Immunität eine zentrale Rolle. Der Entwickler muss mit diesen Normen und Grenzwerten vertraut sein. Der Entwickler muss in kurzer Zeit die EMV Probleme bei einem Prototyp analysieren können und lösen. Um diese anspruchsvolle Aufgabe erfüllen zu können ist viel Experten-Knowhow im Bereich Schaltungstechnik und EMV notwendig.

Der folgende Fachbeitrag gibt einen Einblick in das komplexe Gebiet der EMV mit dem Schwerpunkt EMV Filter Design und Analyse von Störungen in Schaltnetzteilen. Im Besonderen werden die Filterdrosseln betrachtet.

EMV und deren Phänomene und Auswirkungen stellen auch einen erfahrenen Entwickler immer wieder vor neue Herausforderungen. Das Verhalten und die Auswirkungen vom ersten Prototyp eines Schaltnetzteilchen lassen den Entwickler oftmals daran zweifeln, ob EMV überhaupt irgendwie analytisch analysiert werden kann, oder ob es sich eher um schwarze Magie handelt.

Die zugrunde liegenden Mechanismen und Ursachen sind bei näherer Betrachtung jedoch relativ einfach. Die Auswirkungen in der Praxis können jedoch sehr komplex sein. Schon um 1860 hat James Clerk Maxwell die Grundlagen für das Verständnis von Elektro-Magnetischen Störungen geschaffen. Ein sich schnell ändernder Strom induziert z.B. in einem benachbarten Leiter eine (Stör)Spannung.

$$e = M * \frac{di}{dt}$$

Sich schnell ändernde Spannungen, wie z.B. die Drain Spannung von einem FET verursachen Ströme, die durch die Parasitären-Kapazitäten in einem Schaltnetzteil fließen und entsprechende Störungen verursachen.

$$i = C * \frac{dU}{dt}$$

Durch die Anforderung an einen immer höheren Wirkungsgrad und ein geringes Volumen werden die Schaltfrequenzen immer höher und die Signalanstiegszeiten der Leistungshalbleiter immer schneller. Dies ist gut für den Wirkungsgrad. Es werden aber immer höhere Störungen verursacht. Betrachten wir z.B. für ein Klasse B Schaltnetzteil

den Grenzwert bei 1MHz, ist dieser bei einer Quasi Peak Messung $56dB\mu V$. Das bedeutet über einem 50Ω Widerstand darf eine maximale Leistung von ca. $8nW$ erzeugt werden. Somit sollte jede mögliche Störquelle, auch wenn sie noch so klein erscheint, als Verursacher der Störungen in Betracht gezogen werden.

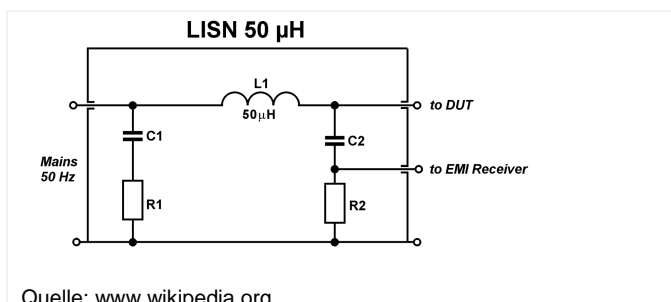
Störungsart Wir können unterscheiden zwischen den leitungsgebundenen Störungen und den Störungen, die abgestrahlt werden. Bei den leitungsgebundenen Störungen wird zwischen Common Mode (CMM) und Differential Mode (DM) unterschieden. Abstrahlung kann wiederum die Ursache von CMM Strömen sein, der auf Kabel und Leitern fließt. Diese beiden Störungen treten in unterschiedlichen Frequenzbereichen auf. So werden DM Störungen bis ca. 1MHz verursacht, CMM Störungen bis über hundert Megahertz. Daraus ist zu folgern, dass beide Störungsarten erkannt und unterschieden werden müssen. Die Störungsart hat einen grossen Einfluss auf die Auslegung der EMV Filter.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Bekämpfung der Störungen ist wie sich deren Quellen verhalten. So ist die Strategie bei der Filterauslegung nicht dieselbe, wenn die Störquelle eine Spannungsquelle oder eine Stromquelle ist. Was bedeutet dies nun für die Praxis?

DM Störungen können als Spannungsquellen beschrieben werden. Schnell ändernde Ströme von z.B. einem Flyback Konverter verursachen

am ESR des Zwischenkreiskondensators einen Spannungsabfall. Somit kann die Störspannung durch ein geeignetes Filter mit hoher Impedanz gedämpft werden. Die Filterelemente sollten das Nutzsignal (z.B. Netzeingangsspannung) nicht dämpfen. Sie müssen möglichst geringe Verluste aufweisen. Wenn die Störquelle eher einer Stromquelle gleicht, führt diese Filterstruktur nicht zum gewünschten Erfolg. CM Störungen werden besser durch Stromquellen beschrieben. Ein Strom kann durch eine hohe Impedanz nicht dazu gebracht werden nicht weiter zu fließen. Eine hohe Impedanz kann dabei helfen, den Störstrom in eine andere Richtung niedriger Impedanz umzulenken. Was man aber braucht sind Bauteile, welche die Störenergie vernichten. Wir brauchen möglichst verlustbehaftete Bauteile. Das heißt wir brauchen Filterbauteile mit möglichst geringer Güte und hohen Verlusten.

EMV Messung Für die richtige und effektive Auslegung der Filter ist es unerlässlich, die Art der Störung zu kennen.



Quelle: www.wikipedia.org

Die Netznachbildung (LISN) misst die Summe der Störungen. Es wird nicht zwischen CM- und DM-Störungen unterschieden. Es wäre für die Auslegung von einem Filter ein entscheidender Vorteil, die Art der Störung zu kennen. Es gibt zwei Möglichkeiten. Wir kennen unsere Schaltung so gut, dass wir die Störungen simulieren können. Dies gelingt meist nur im tiefen Frequenzbereich bei den DM-Störungen. So kann z.B. die Welligkeit und Wellenform von einer PFC Stufe berechnet werden und mittels Fourier Transformation in den Frequenzbereich transformiert werden. CM-Störungen sind nicht einfach zu simulieren. Da diese vor allem über parasitäre Kapazitäten gekoppelt werden, die nicht im vornherein bekannt sind. Somit ist es der sinnvolle Weg, bei einem Prototyp die Störungen zu messen, und eine Messmethode anzuwenden, die beide Störungen voneinander trennt.

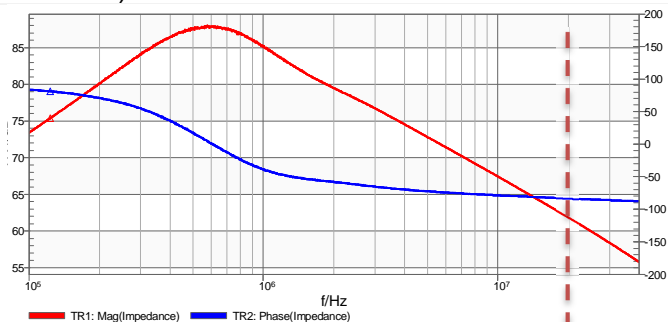
Sind beide Größen bekannt bildet dies die Basis für die weitere Optimierung und Auslegung.

EMV-Drossel Massgeblich zur Bekämpfung der Emissionen sind die induktiven Elemente der Filter. Da wir nun die Störungsarten kennen und wissen, dass für CM- und DM- Störungen unterschiedliche Anforderungen an die Induktivitäten gestellt werden, schauen wir die Parameter an durch welche die Performance einer Drossel bestimmt werden kann.

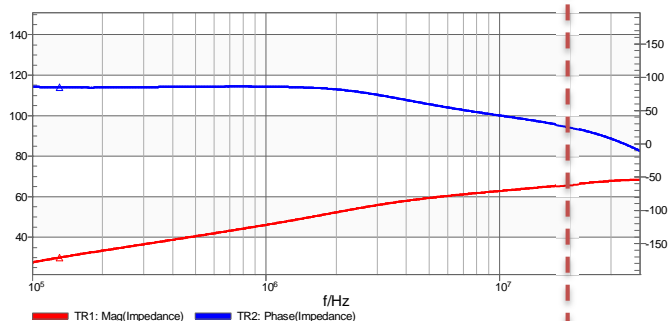
Die richtige Wahl der Induktivität spielt eine wichtige Rolle. Jedoch ist die Induktivität stark frequenzabhängig. Für eine CMM Drossel wird im nächsten Abschnitt dafür ein Ersatzschaltbild hergeleitet, das zur Auslegung und Simulation dienen soll. Vorab werden aber alle wichtigen Parameter einer Drossel für ein EMV Filter betrachtet.

Eine zentrale Rolle zur Auslegung einer Drossel spielt das Kernmaterial und die Wicklungskapazität. Soll die Induktivität bei hohen Frequenzen wirksam sein muss darauf geachtet werden, die Wickelkapazität möglichst klein zu halten. Die Induktivität wird durch die komplexe Permeabilität μ' bestimmt. Wir brauchen aber nicht nur Induktivität sondern wir müssen die EMV Störungen auch vernichten, das heißt in Wärme umwandeln. Dies könnte man einfach mit Serie-Widerständen im EMV Filter realisieren, zu Lasten des Wirkungsgrades. Die Energie sollte somit verlustfrei für das Nutzsignal vernichtet werden können. Dies gelingt durch eine niedrige Güte der Drossel. Der „Resistive“-Anteil wird dabei durch die komplexe Permeabilität μ'' bestimmt, welcher Verlustbestimmend wirkt. Um eine Drossel mit hoher Induktivität herzustellen wird ein Kern mit hoher Permeabilität gebraucht. Dafür werden für CMM Drossel häufig Mangan-Zink (MnZn) Kerne eingesetzt. Bei MnZn Kernen bricht die komplexe Permeabilität schon bei einigen MHz zusammen. Ein weiterer Nachteil dieser Kerne ist die hohe innere Dielektrizitätskonstante, welche zusätzlich hohe Wicklungskapazitäten zur Folge hat. Dadurch kann diese Drossel nur im tiefen Frequenzbereich eingesetzt werden. Für Drosseln im höheren Frequenzbereich werden vielfach Nickel-Zink (NiZn) Kerne eingesetzt. Um mit einer Induktivität sowohl CMM- wie auch DM-Störungen bedämpfen zu können ist die Streuinduktivität ein weiterer wichtiger Faktor. Diese sollte möglichst hoch sein. Hat eine CMM Drossel eine hohe Streuinduktivität kann unter Umständen auf eine zusätzliche Lineardrossel zur Unterdrückung der DM-Störungen verzichtet werden.

Um das oben beschriebene zu verdeutlichen wurde die Einfügeimpedanz einer CMM Drossel mit MnZn Kern und einer Ringkerndrossel mit NiZn Kern ausgemessen. Zur Messung wurde ein Vektor Analyzer verwendet (Bode100 von Omicron).



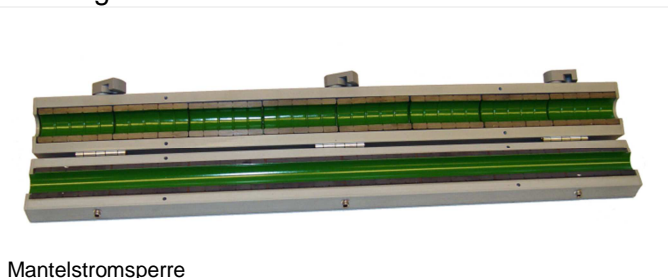
6.8mH Mehrkammerdrossel mit MnZn Kern



30µH Ringkern Drossel NiZn Kern

Ergebnis:

Bei einer Frequenz von 20MHz steigt die Einfügeimpedanz der Ringkerndrossel mit NiZn Kern über die der Drossel mit MnZn Kern. Obwohl die Induktivität der Drossel mit NiZn rund 200-mal kleiner ist! Man sollte also genau wissen, in welchem Frequenzbereich die Drossel wirken soll und mit welchen Störungen man zu tun hat. Weiter ist ersichtlich dass, die Phase sehr flach abfällt was auf eine niedrige Güte zurückzuführen ist. Dies ist ein enorm wichtiger Punkt bei Drosseln zur Bekämpfung von CMM Störungen im hohen Frequenzbereich. Die Verluste der Drossel sind ausschlaggebend wie wirksam die Drossel ist und nicht deren Induktivität. Ganz deutlich wird dies wenn wir, was viele sicherlich schon einmal in einem EMV Labor gesehen haben, eine Mantelstromsperre einsetzen zur Reduzierung von Störungen.



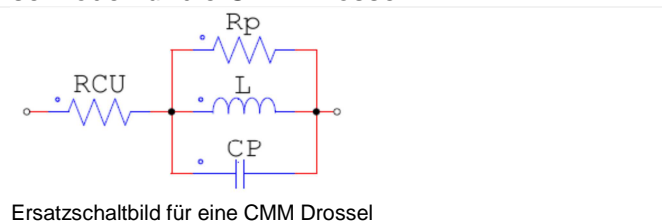
Mantelstromsperre

Diese „Drossel“ hat mit einer Wicklung praktisch keine Induktivität aber eine sehr hohe Dämpfung.

Auslegung in der Praxis Bevor mit der Auslegung von einem neuen Eingangsfiler oder mit der Optimierung eines bestehenden gestartet wird, sollte die Störquelle bekannt sein. Diese ist z.B. bei einem Flyback Konverter in der Regel der primäre Leistungsschalter. Dieser sollte nun so gut es geht „entstört“ werden. Möglichkeiten wie Ansteuerung, Transformator Aufbau oder der Einsatz von Snubber-Beschaltungen sollten ausgeschöpft werden.

Wir werden uns im Folgenden mit der Auslegung von EMV Eingangsfilern für Schaltnetzteile im Frequenzbereich bis 30MHz beschäftigen. Das heisst, wir versuchen die leitungsgebundenen Störungen zu reduzieren.

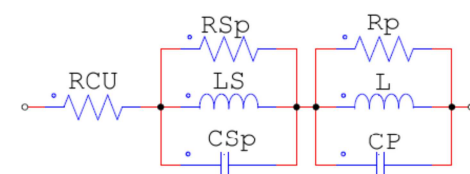
In einem ersten Schritt ist es von grosser Bedeutung für die Filterauslegung die Art der Störung zu kennen. Das heisst wir verwenden eine Messmethode, die leitungsgebundenen Störungen in DM- und CMM Störungen zu trennen. Anschliessend kann die benötigte Dämpfung berechnet werden. Dies geschieht am einfachsten mit einem Simulationsprogramm wie z.B. Pspice. Da wir bei der Entstörung bis 30MHz sicherlich mit CMM-Störungen zu kämpfen haben, müssen parasitäre Effekte beachtet werden. Schlüsselement für eine erfolgreiche Simulation ist dabei das Drosselmodell für die CMM Drossel.



Ersatzschaltbild für eine CMM Drossel

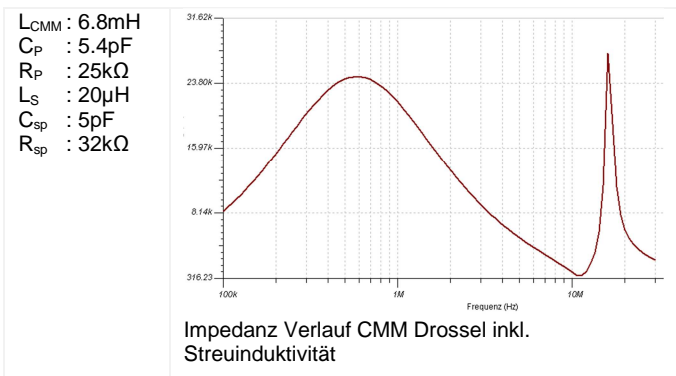
RCU ist der Kupferwiderstand, Rp steht für die Kernverluste, CP für die Wicklungskapazität und L für die Common-Mode Induktivität. Die Parameter für das Drosselmodell können berechnet werden, wenn der Hersteller im Datenblatt einen Impedanz Verlauf darstellt oder die Messung kann wie weiter oben gezeigt mit einem Netzwerkanalyzer selbstständig durchgeführt werden.

Das Ersatzschaltbild wird nun um die Streuinduktivität erweitert.



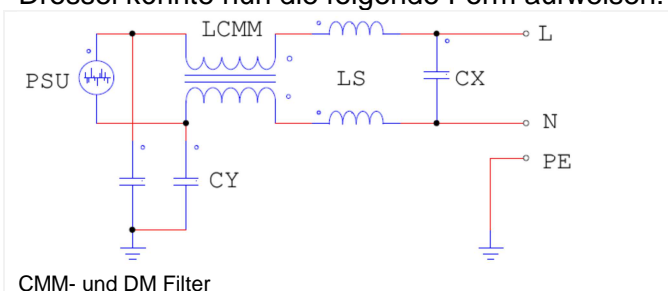
Ersatzschaltbild CMM Drossel inkl. Streuinduktivität

Die Streuinduktivität spielt bei der Auslegung eine sehr wichtige Rolle. So ist es möglich mit Hilfe der Streuinduktivität, die bei verschiedenen Drosseltypen unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann, den differentiellen Anteil der Störungen zu unterdrücken. So kann mit der geschickten Auswahl der CMM Drossel unter Umständen auf ein 2-Stufiges Filter in der Praxis verzichtet werden. Weiter kann mit Hilfe der Streuinduktivität (diese wirkt symmetrisch) auch im höheren Frequenzbereich für CMM Störungen eine zusätzliche Dämpfung erzielt werden. Man sollte beachten, dass die Streuinduktivität das Resonanzmaximum typischerweise im höheren Frequenzbereich grösser 10MHz hat. Die folgende Simulation zeigt den Impedanz Verlauf einer Mehrkammerdrossel. Die Drossel wurde ausgemessen und die folgenden Parameter wurden aus dem Impedanz Verlauf ermittelt:



Ergebnis:

Die Resonanzfrequenz der CMM-Drossel ist bei 600kHz. Ab dieser Frequenz wirkt die Drossel kapazitiv. Die zweite Resonanzfrequenz bei 16MHz stammt von der Streuinduktivität. Es wurde eine Streuinduktivität von 20μH ermittelt. Dies ist ein recht hoher Wert, den man geschenkt bekommt. Ein Vorteil der Streuinduktivität ist das diese nicht sättigen kann und somit bei hohen Strömen wirkt. Möchte man nun die Streuinduktivität zusätzlich zur Dämpfung der differentiellen Störungen verwenden muss ein zusätzlicher Kondensator dazu geschaltet werden, um ein Filter zweiter Ordnung zu bekommen. Ein mögliches CMM- und DM-Filter mit nur einer CMM Drossel könnte nun die folgende Form aufweisen:



Brauchen wir Induktivität? Um diese Frage beantworten zu können müssen wir unterscheiden zwischen Störungen im tiefen Frequenzbereich und Störungen im hohen Frequenzbereich sowie zwischen CMM- und DM-Störungen. Im tiefen Frequenzbereich <1MHz können beide Störungsarten in der Regel als Spannungsquelle beschrieben werden. Somit kann durch das Einfügen einer hohen Impedanz die Störung, die gemessen wird an der Last, verkleinert werden (komplexer Spannungsteiler). Dies erreichen wir z.B. durch ein einfaches LC-Filter. Bei Störungen im Frequenzbereich >1MHz haben wir es meistens mit CMM Störungen zu tun. Diese Störquelle kann nun am besten durch eine Stromquelle beschrieben werden. Ist die Störung eine Stromquelle, führt das Einfügen einer Impedanz nicht zur gewünschten Wirkung. Der Strom hört dadurch nicht auf zu fließen und kann an der Last unvermindert gemessen werden. Wenn wir nun die Möglichkeit haben, Y-Kondensatoren zu verwenden, können wir dadurch dem Störstrom einen niederstromigen Rückpfad zur Verfügung stellen, und der Störstrom kann somit zur Quelle zurückfließen. Ist der Einsatz von Y-Kondensatoren nicht möglich, muss ein anderer Ansatz gewählt werden. Somit kommen nun die Güte respektive die Verluste der Drossel zum Tragen. Der Störstrom muss „vernichtet“ werden, das heisst in Wärme umgewandelt werden. Dafür werden möglichst verlustbehaftete Drosseln notwendig, die im entsprechenden Frequenzbereich wirken. Typischerweise werden dafür Ferrite eingesetzt.

Zusammenfassung Erfolgreiche Bekämpfung von EMV Störungen erfordert ein Verständnis der Störgrößen. Es werden Messmethoden benötigt, die eine Analyse der Störströme ermöglichen. Sind uns die DM- und CM-Störgrößen bekannt können in einem weiteren Schritt mit Hilfe von Simulationsmodellen die benötigten Filter ausgelegt werden. Mit den Ersatzmodellen von Spulen und Kondensatoren sowie dem Wissen, welche Parameter beachtet werden müssen, können die Filter effektiver ausgelegt werden. Beim richtigen Vorgehen wird dabei die Entwicklungszeit reduziert und die Kosten für die Filter können optimiert werden.



El. Ing. Eureka, Tobias Hofer
tobias.hofer@hsi-ag.ch

Referenzen:

- [1] Modeling Non-Ideal Inductors in Spice
;Martin O'Hara*
- [2] Performance Optimization Aspects of Common Mode Chokes; University of Twente*
- [3] Trilogie der Induktivitäten
;Würth Elektronik*