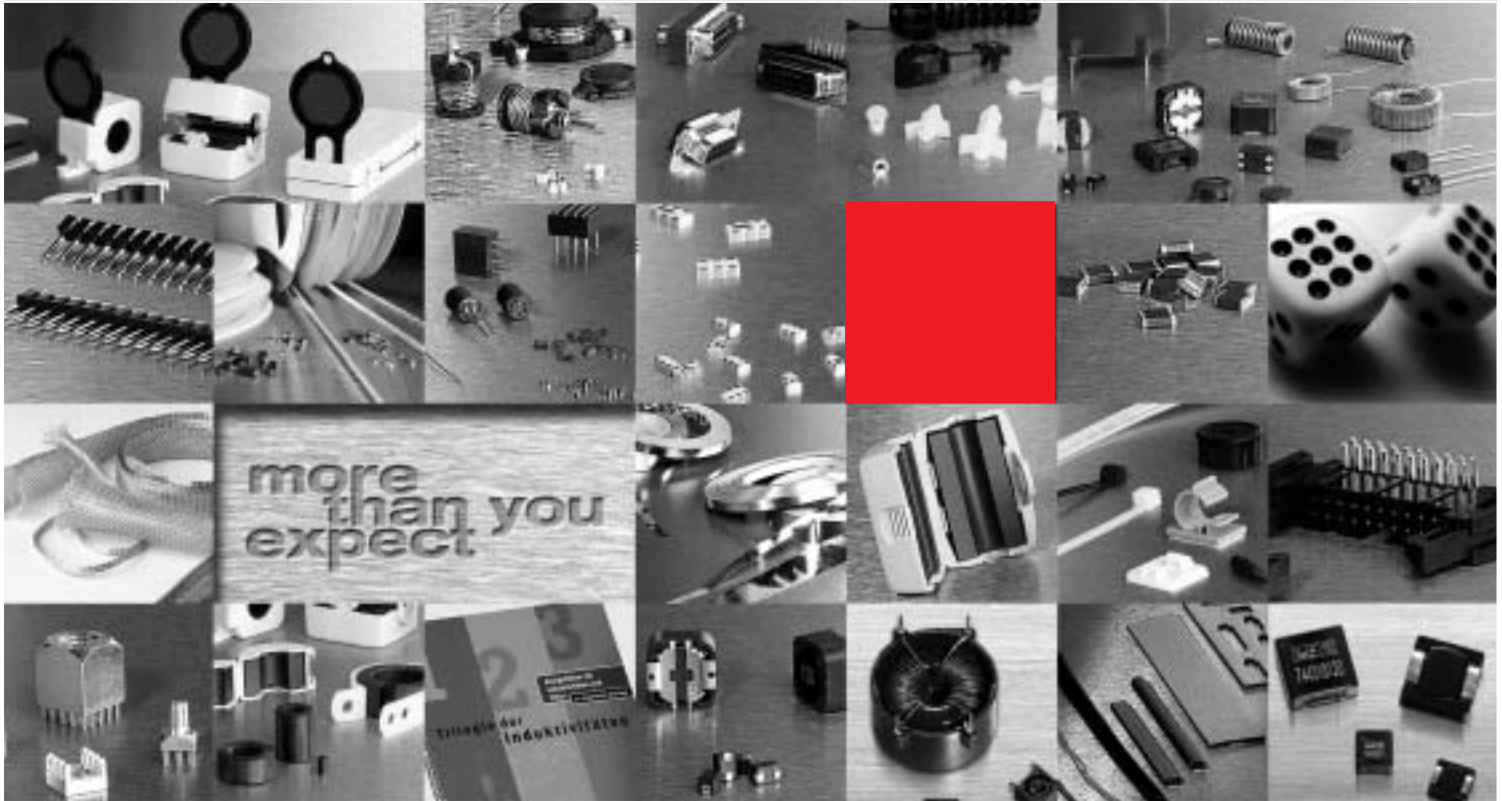


more than you expect



Würth Elektronik EMC & Inductive Solutions

Fachberichte zur EMV in der Praxis

Inhalt

Fachberichte zur EMV in der Praxis

Die Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG unterscheidet sich von anderen Bauelemente-Herstellern durch ein Merkmal:

Wir sind lieferfähig!

Wir entwickeln innovative Produkte und machen sie verfügbar.

Lassen Sie sich von unserem Service überzeugen!

Seite 3 Störungsfreier Betrieb

Wirksamer EMV-Schutz durch gezielten Einsatz von Ferriten

Seite 6 EMV im Design-In

Applikationen und Designregeln für ein störungsfreie Stromversorgung

Seite 10 ABC der Induktivitäten

Wichtige Parameter und Designregeln zum optimalen Einsatz von induktiven Bauelementen

Seite 13 Ersatzschaltbilder zur Simulation von EMV-Ferriten

Rechnergestützte Optimierung von HF-Filter – und Entkoppelschaltungen



Störungsfreier Betrieb

Wirksamer EMV-Schutz durch gezielten Einsatz von Ferriten

Die CE-Prüfung elektronischer Geräte im EMV-Labor zeigt deutlich, ob schon beim Design der Schaltung sowie der Gehäuseausführung unter HF-Gesichtspunkten geplant wurde. Selbst bei geringen Taktfrequenzen in z.B. microcomputergesteuerten Geräten treten plötzlich Störungen weit oberhalb der Nutzfrequenzen zu Tage, die im Rahmen der Grenzwerte gehalten werden müssen.

Zur Entkopplung von leitungsgebundenen Störungen im hochfrequenten Bereich empfehlen sich zur nachträglichen Entstörung EMV-Ferrite. Diese sind in verschiedenen Bauformen lieferbar und ermöglichen die schnelle und kostengünstige Problemlösung. Die Geräte bleiben lieferfähig und benötigen kein Redesign. Zur Schaltungsentstörung auf der Platine sind bedrahtete und zunehmend SMD-Ferrite interessant. Hier können direkt am Ort der Störungen wirksame Entkoppelmaßnahmen vorgenommen werden.



Welche Hilfestellung geben hier EMV-Ferrite von Würth Elektronik?

Ferrite zur Anwendung in EMV-Entstörmaßnahmen sind in der Regel Nickel-Zink-Ferrite. Durch den hohen Oberflächenwiderstand ($>10^6 \Omega\text{m}$) sind Kriechströme oder Kontakt-Kurzschlüsse ausgeschlossen.

Das besondere an diesen Ferriten ist, daß ab ca. 100 MHz an aufwärts der **reelle Anteil (R)** der Impedanz (Z) dominiert. Daraus resultieren eine ganze Reihe von Vorteilen:

1. Da der Ferrit als „Absorber“ für Frequenzen ab ca. 10 MHz aufwärts wirkt, beeinflusst er das Nutzsignal nur unwesentlich
2. Die Tiefpaßfilterwirkung wird bei bedrahteten Ferriten bzw. SMD-Ferriten allein durch die Durchführung erreicht, hier muß **kein Massepotential** als dritter Pol vorhanden sein!
3. Breitbandige Störunterdrückung mit nur einem Bauteil
4. Keine kapazitive Beeinflussung für Daten- oder Meßsignalleitungen

Bauformen von EMV-Ferriten

Klappferrite von Würth Elektronik eiSos

Die Klappferrite aus dem Hause Würth eignen sich hervorragend zur nachträglichen Montage an bestehenden Leitungen. Der spezielle Verschluss der Klappferrite von Würth Elektronik bietet Sicherheit gegen unbeabsichtigtes Öffnen, Stichwort CE-Zeichen. Das Kunststoffgehäuse schützt gleichzeitig den Ferrit gegen mechanische Beschädigung und bietet durch die Konstruktion erhöhten Anpressdruck auf die Ferrithälften. Daraus resultieren sehr hohe Impedanzen, sprich hohe Störunterdrückungen.

Typische Anwendungen sind Meßsignalaufnehmer, Monitorleitungen, Drucker- und Maus-kabel, Datenübertragungsleitungen u. a. m.

Blockkerne und Flachbandkabel-ferrite

HF hat ihre eigenen Gesetze. Und so sind schon u.U. 2 cm Flachbandleitung eine wirksame Antenne, um sich Störungen einzufangen oder Störungen auszusenden. In Anwendungen wo z.B. wegen des Servicefalles nicht auf „längere“ Flachbandkabel verzichtet werden kann (Zugänglichkeit etc.), aber dennoch Störungen unterdrückt werden müssen, tragen Flachbandkabel-ferrite oder Blockkerne wesentlich zur Einhaltung der Grenzwerte mit bei.

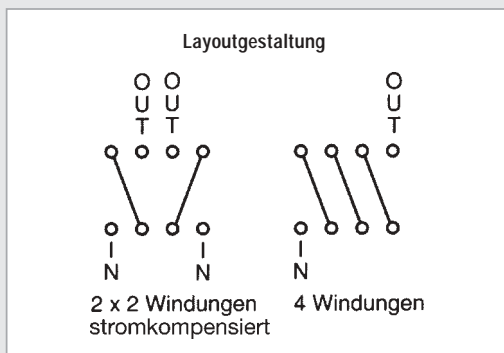
Störungsfreier Betrieb

Ferrithülsen und Ferritringe

Im Gegensatz zu Klappferriten oder Ferriten mit Nylonhalter können die Hülsen bzw. Ringe vor der endgültigen Konfektion auf das Kabel geschoben und mittels Schrumpfschlauch oder Verguß fixiert werden. Diese Lösung findet sich heute an jedem Computermonitor. Je besser der Innendurchmesser an den Kabeldurchmesser angepaßt ist, umso größer ist die Entstörwirkung. Durch Mehrfachdurchfädung kann wie bei Klappferriten, der induktive Anteil betont werden, bei gleichzeitig größerer Impedanz.

6-Loch-Ferritperlen

Die 6-Loch-Perlen – oder umgangssprachlich UKW-Drosseln – sind standardmäßig mit 2,5 Windungen Draht beaufschlagt und vertragen große Dauerströme, ohne in Sättigung zu gehen. Hier kann direkt auf die Platine wirksame HF-Störunterdrückung erreicht werden. Typische Anwendungen sind hier Masseentkopplung, Versorgungsspannungsentkopplung im Zusammenspiel mit Abblockkondensatoren (reeller HF-Tiefpaß) und Datenleitungsfilter.



Ferritbrücken

Die Ferritbrücke ist ein sehr universell einsetzbares Entstörelement: Einerseits als 4-fach Durchführungs-drossel stromkompensiert bei gleichzeitig hoher Strombelastbarkeit von typ 4A. Durch entsprechende Verschaltung kann die Impedanz oder der Strom erhöht werden. Weiterhin lässt sich durch entsprechende Verschaltung auch eine zweifache stromkompensierte Breitbanddrossel erzeugen (siehe Abbildung).

SMD-Ferrite von Würth-Elektronik

Der ständige Trend zur Miniaturisierung hat auch vor den EMV-Ferriten nicht Halt gemacht:

Auch bei SMD-Ferriten wird der Strom durch den Ferrit geführt; er wirkt für das Nutzsignal als niederohmige Durchführung ($R_{DC} \rightarrow 0\Omega$), für das Störspektrum allerdings als hoher Verlustwiderstand (Impedanzen bis weit über 2 k Ω).

Dies erreicht man durch den Aufbau als Multilayer, der je nach Ferritausführung Stromtragfähigkeiten bis zu 6 A erlaubt. Die Bauformen gehen von 0402, 0603, 0805, 1206, 1210 bis hin zu 1812.

Im Vordesign kann der Entwickler an kritischen Stellen schon kurzgeschlossene Löt pads mit vorsehen, an denen er dann bei EMV-Messungen durch Auftrennen entsprechende SMD-Ferrite bestücken kann.

Wie findet man den richtigen Ferrit?

Den endgültig richtigen Ferrit kann nur eine Messung im EMV-Labor bestätigen. Die Berechnung der dynamischen Impedanz von Störquelle und Last einer elektronischen Schaltung im Höchstfrequenzbereich ist in der Regel nicht möglich. Diese hängt von vielen Faktoren ab, die gerade im HF-Bereich nur schwer mathematisch zu beschreiben sind.

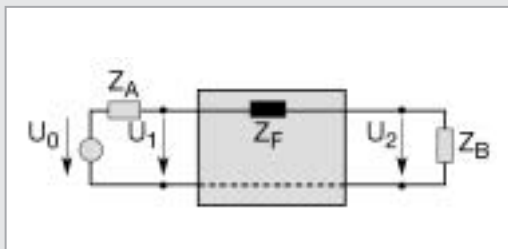
Dennoch kann man über Vergleichsmessungen und mit Erfahrungswerten zu einer ersten Aussage gelangen:

Versorgungsspannung- bzw. Masseleitungen sind in guten Designs sicher im Bereich von 1...10 Ω anzusetzen, Nutzsignalleitungen je nach Anwendungsfall zwischen 50-100 Ω und größer (z.B. Bussysteme wie CAN, SCSI etc.)

Ausgehend von dieser Annahme der Systemimpedanz (Z_A bzw. Z_B) und der gesuchten Störunterdrückung kann man anhand des u.g. Nomogrammes die gesuchte Ferritimpedanz (Z_F) ermitteln. Mit Kenntnis der Impedanz des Ferrites sucht man dann in bezug auf die Applikation den entsprechenden Ferrit aus, z.B. eine Ferrithülse oder einen SMD-Ferrit.

Einfügedämpfung (A):

$$A[\text{dB}] = 20 \log \frac{Z_A + Z_F + Z_B}{Z_A + Z_B}$$



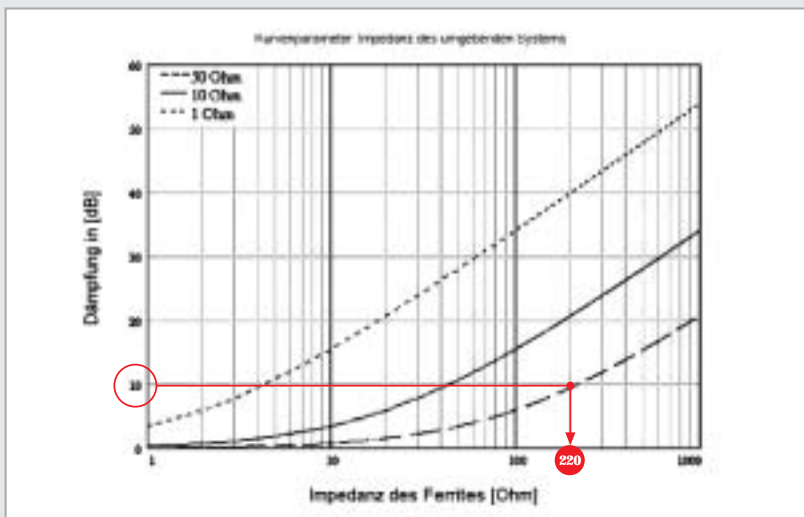
Beispiel:

40-polige Flachbandleitung mit Wellenwiderstand / Systemimpedanz ~ 50 Ohm.

Gesuchte Störunterdrückung bei $f = 150 \text{ MHz} \rightarrow 10 \text{ dB}$

Aus dem Nomogramm entnimmt man: Impedanz des Ferrites = 220 Ohm

→ gewählter Typ: Blockkern Würth Elektronik 742 792 51 mit
 $Z = 180 \text{ Ohm @ } 100 \text{ MHz}$
 $Z = 240 \text{ Ohm @ } 150 \text{ MHz}$



EMV im Design-In

Applikationen und Designregeln für ein störungsfreie Stromversorgung

Über die Stromversorgung sind alle elektronischen Bausteine miteinander gekoppelt. Spielte in früheren Designs die Digitaltechnik eine eher untergeordnete Rolle, so finden sich heute in nahezu jeder Schaltung auch Microcontrollereinheiten. Hier muß der Entwickler sorgfältig planen, um Verkopplungen über die Stromversorgung und Masseleitungen auf empfindliche Schaltungsteile wie z.B. Auswerte- oder Meßverstärker zu verhindern. Als Basis für eine EMV-gerechte Entwicklung ist ein HF-gerechtes Design im Bereich der Versorgungsspannung unabdingbar.

Einleitung

Den meisten Entwicklern ist die Anwendung von Abblockkondensatoren von typisch $0,1 \mu\text{F}$ in unmittelbarer Nähe von z.B. Logik-IC's bekannt. Die schnellen Schaltflanken und hohen Schaltströme sollen aus diesem Kondensator gespeist werden. Das erzeugte breitbandige Störspektrum soll dabei durch den Kondensator gegen Masse abgeleitet werden. Die Stromspitzen erreichen Werte von 10 mA und mehr und erzeugen Störungen im Frequenzbereich bis 1 GHz. Bild 1 zeigt ein typisches Störspektrum des Versorgungsstromes eines digitalen IC's der AC-Logikreihe [1].

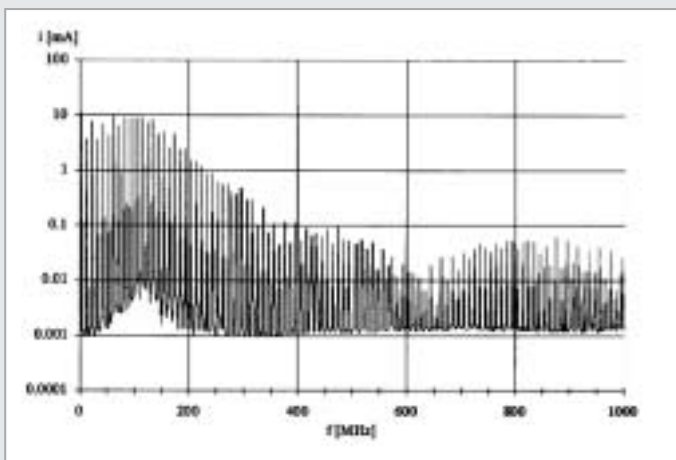


Bild 1: Störspektrum auf VCC (AC-Logik)

In der Praxis zeigt sich, daß die alleinige Verwendung eines $0,1 \mu\text{F}$ -Kondensators keine ausreichende Entkopplungen im HF-Bereich bietet. Wie kann die Entkopplung breitbandig sichergestellt werden?

Breitbandentkopplung mit SMD-Ferrit

Die breitbandige Entkopplung wird durch den SMD-Ferrit im Längsweig der Versorgungsspannungsleitung erreicht. Um abschätzen zu können, wie hoch die Dämpfung sein kann, wurde anhand des in Bild 2 gezeigten HF-Ersatzschaltbildes die Entkopplungsschaltung unter PSpice simuliert.

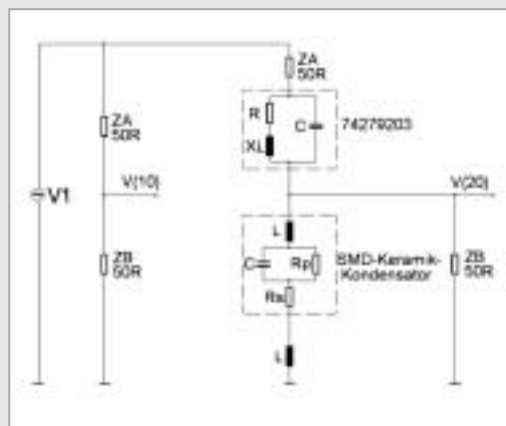


Bild 2: Simulationsmodell der VCC-Entkopplung

Die Schaltung selbst wird an einer Quell- und Senkenimpedanz von 50 Ohm betrieben (ZA und ZB). Zur Bestimmung der Einfügedämpfung wurden die Ausgangsspannungen von V(10) und V(20) entsprechend der Formel der Einfügedämpfung ins Verhältnis gesetzt.

Der SMD-Keramik-Kondensator wurde dabei zu

a) / b) = $100 \text{ nF} / X7R$

c) mit $10 \text{ nF} / X7R$ gewählt.

Die Simulationsergebnisse zeigt Bild 3.[2]

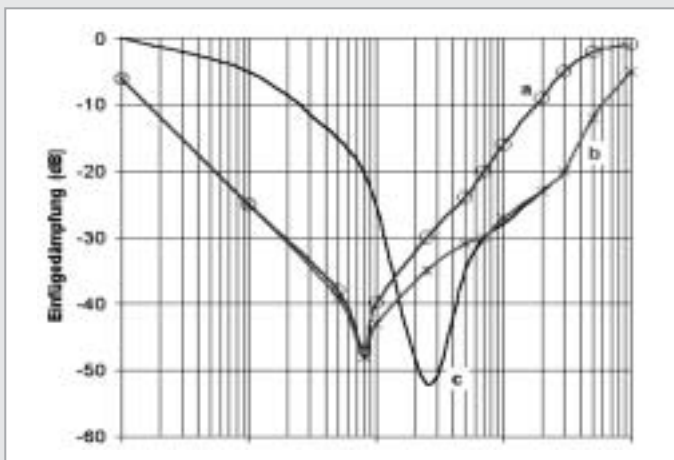


Bild 3: Einfügedämpfung verschiedener Entkopplungsvarianten

Die Kurve a) zeigt das Filterverhalten nur mit Kondensator 0,1 μF . Das Maximum an Dämpfung wird bei 8 MHz mit -48 dB erreicht. Gleichzeitig ist dies der Punkt der Eigenresonanzfrequenz des Kondensators im Zusammenspiel mit der Leiterbahninduktivität (hier 5 nH gewählt). Bei Frequenzen oberhalb der Eigenresonanzfrequenz wird aufgrund des immer stärker werdenden induktiven Verhaltens bei 200 MHz nur noch -10 dB Einfügedämpfung erzielt. In den Datenbüchern der Kondensatorhersteller sind entsprechende Angaben zur SRF (Self Resonant Frequency) zu finden. Ein Beispiel für SMD-Bauteile zeigt Bild 4.

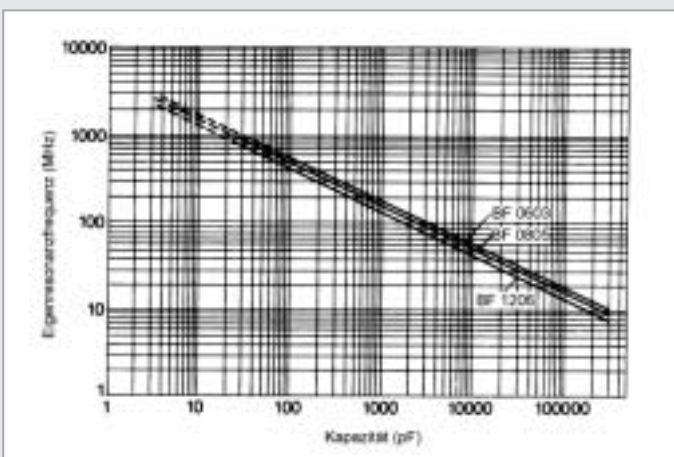


Bild 4: Eigenresonanzfrequenz von SMD-Kondensatoren

Als erste wichtige Designregel läßt sich daraus ableiten:

Designregel 1:

Abblockkondensatoren mit

- möglichst hoher Eigenresonanzfrequenz verwenden
- möglichst in SMD-Bauform einsetzen, die schädliche Induktivität bleibt dann im Bereich zwischen 1 nH...5 nH (bedrahtete Bauteile bis zu 10mal höher!)
- möglichst kleinem Serienverlustwiderstand (ESR) einsetzen
- nur so groß vom Kapazitätswert her wählen, wie der tatsächliche Pulsstrom dI und erlaubte Spannungseinbruch dU bei der vorhandenen Schaltzeit dt es erfordern (Beispiel: Erlaubter Spannungseinbruch $dU = 200 \text{ mV}$; Schaltgeschwindigkeit $dt = 5 \text{ ns}$; Pulsstrom $dI = 40 \text{ mA}$)

$$C = \frac{dI \cdot dt}{dU} = \frac{40 \text{ mA} \cdot 5 \text{ ns}}{200 \text{ mV}} = 1 \text{ nF}$$

- Platzierung des Abblockkondensators derart, daß die Länge der Strecke VCC-Pin-Kondensator-Massepin minimal wird und möglichst großflächig und niederohmige Leiterbahnen
- Parallelschaltung von Kondensatoren unterschiedlicher Kapazitätswerte vermeiden, da dadurch weitere Polstellen und Eigenresonanzfrequenzen auftreten. Wenn eine Parallelschaltung verwendet wird, muß ein schwingfähiges System unterbunden werden (Absenken der Güte Q des Resonanzkreises auf Werte unter 2, z.B. durch SMD-Ferrite)

EMV im Design-In

HF-Entkopplung mit EMV-Ferriten

Als Entkopplungs- und Dämpfungsglied der einzelnen Schaltungsteile untereinander eignen sich EMV-Ferrite von Würth Elektronik. Für optimale Wirksamkeit greift man auch hier in immer stärkerem Umfang auf SMD-Ferrite zurück. Die Impedanzkurve der SMD-Ferrite am Beispiel des Typs 74279203 zeigt Bild 5.[3]

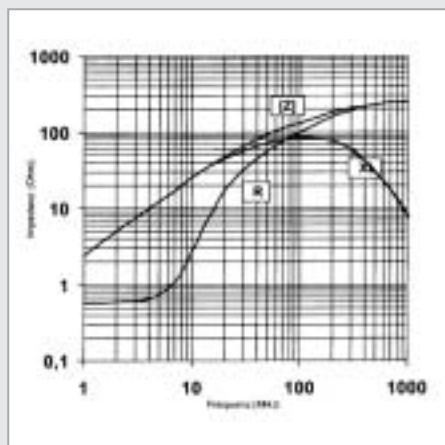


Bild 5: Impedanzkurve des SMD-Ferrites 74279203

Wie bei den bekannten Klappferriten, Hülsenferriten ist auch bei den SMD-Ferriten der entscheidende Vorteil, daß im Frequenzbereich ab ca. 30MHz bis hin zu 1GHz der ohmsche Verlustanteil R überwiegt und somit ein breitbandiger, reeler Widerstand zur HF-Absorption vorliegt. Dieser bedämpft und bekämpft unkontrollierte Schwingungen im eindeutig schwingfähigem System, wie es die Simulationsschaltung in Bild 2 zeigt. Die Filterwirkung wird dabei auch ohne Masseankopplung erreicht und durch Energieabsorption im Ferritmaterial bewirkt. Der Gleichstromwiderstand RDC der bedrahteten oder SMD-Ferrite ist davon getrennt zu sehen und liegt bei den SMD-Bauformen im Bereich zwischen 25 mOhm und 0,8 Ohm max (je nach Bauform). Somit bleibt der Spannungsabfall am Bauteil gering.

Verbesserte Filterschaltung

Das Simulationsergebnis unter Einfügung des SMD-Ferrites 74279203 bei einem Kondensator von 100nF/X7R (Kurve b) in Bild 2) im Vergleich zur alleinigen Abblockung mit 100nF (Kurve a) in Bild 2) zeigt deutlich die Überlegenheit im Frequenzbereich ab 30 MHz:

Durch Verwendung des SMD-Ferrites werden bei der Einfügedämpfung um bis zu 15dB bessere Werte erreicht! Selbst bei 1GHz ist diese Variante um rund 5 dB besser.

Wählt man stattdessen einen Kondensator von 10 nF (Kurve c), so verschiebt sich die SRF auf 25 MHz. Der SMD-Ferrit unterbindet auch hier weitere Resonanzpunkte durch seinen stetig wachsenden Verlustanteil R. Im Gegensatz zur Variante mit 0,1µF/SMD-Ferrit ist die Dämpfung bei 30 MHz um fast 15 dB besser. Der Gleichlauf im Frequenzbereich ab 100 MHz erklärt sich aus der immer vorhandenen Leiterbahninduktivität, die die schädliche Induktivität des Kondensators vergrößert. Von daher die Forderung nach niederimpedanten und kurzen Leiterbahnen.

Designregel 2:

- Einfügen von SMD-Ferriten in die Versorgungsspannungsleitungen, um breitbandig die einzelnen Schaltungsteile untereinander zu entkoppeln
- Hochstrom-SMD-Ferrite bieten besonders niedrige Gleichstromwiderstände (RDC)
- Hochohmige-SMD-Ferrite bieten besonders hohe Entstörwirkung im Frequenzbereich von 80 ... 300 MHz bei gleichzeitig geringem DC-Widerstand
- Induktivitäten als Entkoppelemente in Stromversorgungsleitungen erzeugen durch ihre Eigenresonanzfrequenz weitere Polstellen und sollten deshalb nicht für eine breitbandige Entkopplung eingesetzt werden! (hohe Schwingkreisgüten!)[4]
- Der Einsatz von SMD-Ferriten in Stromversorgungsleitungen unterbindet Schwingneigung durch die Eigenresonanz der Multilayerplatinen, die typisch im Bereich zwischen 100 ... 300 MHz liegt



Designregel 3

- Die ideale Masse gibt es nicht. Getrennte Massesysteme für Analog- und Digitalschaltungen sind empfehlenswert und sternförmig auf einen zentralen Massepunkt zu beziehen
1.
 - Gestörte Massesysteme können über Hochstromferrite (niederohmiger RDC) auf den Sternpunkt angekoppelt werden
 - Die breitbandige Entkopplung von Stromversorgungen die z.B. über Steckverbinder oder Leitungen aus zentralen Speisungen auf die Baugruppe bzw. Platine zugeführt wird, sollte über geeignete stromkompensierte Drosseln erfolgen. Geeignet sind zum Beispiel stromkompensierte Drosseln der Serie WE-VB oder WE-SL und auch Ferritbrücken von Würth Elektronik.
 - HF-Störströme auf Stromversorgungsleitungen durch entstandene Masseschleifen (z.B. durch Mehrfach-erdung bzw. Potentialunterschiede) können durch Ferrite/Klappferrite wirksam unterdrückt werden

Fazit

Einer hohen Störunterdrückung und wirksamen Entkopplung der Stromversorgung muß im Zusammenspiel von digitalen und analogen Schaltungsteilen besondere Beachtung zukommen. Nur so lassen sich Interferenzen über das „Bussystem“ Versorgungsspannung vermeiden. Durch den Einsatz von SMD-Ferriten in Verbindung mit geeigneten Abblockkondensatoren läßt sich ein Großteil von Störungen am Entstehungsort wirksam unterdrücken, selbst wenn das Layout der Schaltung nicht optimal gestaltet ist. Weitere wirksame Entkopplungsmaßnahmen sind die Zuführung der Spannungsversorgung über HF-taugliche stromkompensierte Drosseln bzw. bei leitungsgeführten Störungen über aufgefädelt Ferrite bzw. Klappferrite.

ABC der Induktivitäten

Wichtige Parameter und Designregeln zum optimalen Einsatz von induktiven Bauelementen

Induktivitäten bereiten vielen Entwicklern Kopfzerbrechen. Dies nicht zuletzt wegen der vielen Einzelparameter, die zum richtigen Einsatz von Induktivitäten zu beachten sind. Der allgemeine Trend zur Miniaturisierung, zu mikroprozessorgesteuerten Geräten und zu höheren Leistungen, bedingt gleichzeitig einen zunehmenden Einsatz von Induktivitäten. Induktivitäten werden zum Aufbau von Filtern, Schwingkreisen, Anpassungsnetzwerken und Funkenstörfiltern benötigt oder als Speicherdrosseln in Schaltreglern verwendet. Anhand dieses Fachbeitrages sollen die wichtigsten Parameter dieser Bauteile besprochen und anhand dreier Fallbeispiele der optimale Einsatz unter EMV-Gesichtspunkten besprochen werden.

Einleitung

Die induktiven Bauelemente lassen sich durch die folgenden Einzelparameter beschreiben:

Induktivität L

Die Induktivität einer Spule oder Drossel ist ein Maß für den Selbstinduktionskoeffizienten des Bauteils und wird durch folgende Formel ganz allgemein beschrieben:

$$L = \frac{\mu \cdot A \cdot N^2}{l} \quad \text{in Henry} \quad [1 \text{ H} = 1 \text{ Vs/1A}]$$

- * der absoluten Permeabilität (Parameter μ)
- * den geometrischen Abmessungen des Kernmaterials (A/l)
- * dem Quadrat der gewählten Windungszahl.

Die Induktivität ist aufgrund der aussteuerungsabhängigen (Strom I) und frequenzabhängigen Permeabilität ($\mu = f(f)$) sowie parasitärer Effekte ein stark nichtlineares Bauteil. Daher reicht die alleinige Angabe der Induktivität zur Auswahl der am besten geeigneten Bauform nicht aus.

Nennstrom I_N

Als Nennstrom der Induktivität wird der maximale Gleichstrom bei Umgebungstemperatur definiert, bei dem die Eigenwärmerung des Bauteils gewisse Grenzen überschreitet (z.B. 20 °C) oder aber die Induktivität die spezifizierten Toleranzgrenzen verläßt (z.B. 10 % Toleranz), je nachdem, was zuerst eintritt. Sollen dauerhaft größere Ströme durch das Bauteil fließen, so ist mit starker Erwärmung zu rechnen. Außerdem ist die Induktivität dann deutlich geringer als spezifiziert. Pulsierende Ströme führen aufgrund der kleinen Strom-Zeitflächen nicht zu nennenswerter Erwärmung, können aber die Bauteile in die Sättigung bringen,

so daß keine wirksame Induktivität mehr vorliegt. Im umgekehrten Fall, bei Betrieb mit dauernd erhöhter Umgebungstemperatur, muß ggf. ein Derating des Stromes durch die Induktivität stattfinden, um das Bauteil nicht zu überlasten. Bei Speicherdrosseln (z.B. WE-SI von Würth Elektronik) ist mit dem spezifizierten Nennstrom die zugehörige Nenninduktivität verknüpft.

Gleichstromwiderstand RDC

Für den Gleichstrom durch die Induktivität stellt die Wicklung bzw. die Multilayermäander beim SMD-Bauteil einen Verlustwiderstand dar. Dieser hat direkten Einfluß auf die Erwärmung der Spule. Definiert wird hier unter Umgebungstemperatur der maximal zu erwartende Gleichstromwiderstand (worst-case).

Güte Q

Die Güte ist ein Maß für die Qualität der Induktivität und läßt sich wie folgt definieren:

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{R}$$

Mit dem Formelzeichen R sind alle Verluste der Spule gekennzeichnet. Dies sind im wesentlichen:

- * Kernverluste
- * Skineffekt
- * Abstrahlungsverluste
- * Schirmungsverluste

Mit zunehmender Frequenz steigt die Güte bis zu einem Maximum an, um dann aufgrund immer stärker werdender Verluste im Kernmaterial etc. abzufallen. Entsprechende Güte-Frequenz-Diagramme helfen hier bei der Auswahl der geeigneten Induktivität für die Applikation.

Eigenresonanzfrequenz f_r

Jede Induktivität besitzt aufgrund der Wicklungen oder Multilayerlagen auch kapazitive Verkopplungen. Diese parasitären Kapazitäten sind im Ersatzschaltbild durch den Kondensator (C) symbolisiert. Dieser Kondensator in der Spule, bildet mit der Induktivität einen Parallelresonanzkreis. Bei der Eigenresonanzfrequenz pendelt die eingespeiste Energie dabei zwischen den Einzelementen Induktivität und Kapazität hin und her. Von außen wird keine Energie mehr aufgenommen. Betreibt man eine Spule oberhalb der Resonanz, so wirkt die Spule immer stärker kapazitiv. In der Praxis ist man daher bestrebt, die Induktivitäten weit unterhalb ihrer Eigenresonanzfrequenz zu betreiben.

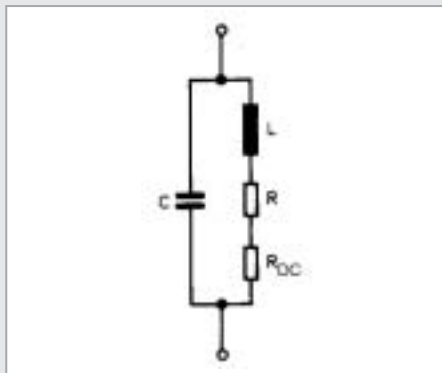


Bild 1: Ersatzschaltbild der realen Induktivität

Dimensionierung der Speicherdrossel
(Schaltfrequenz $f = 52 \text{ kHz}$)

$$L_N = \frac{(U_a - U_e) \cdot U_e^2}{U_a^2 \cdot 0,4 \cdot I_a \cdot f} = 73 \mu$$

$$I_N = \frac{U_a}{U_e} \cdot I_a = 1,92 \text{ A}$$

Aplikationen

Schaltregler

Durch die Verwendung integrierter Schaltungen hat sich das Design im Bereich der Schaltregler stark vereinfacht. Durch die hohen Taktfrequenzen (bis zu 1,5 MHz) bleibt die einzusetzende Speicherdrossel in ihren Abmessungen und Gewicht klein. Positiver Nebeneffekt von Schaltreglern: Deutlich höhere Wirkungsgrade als linear geregelte Netzteile und aufgrund der geringeren Kühlmaßnahmen auch deutlich geringere Kosten. Als Nachteil ist das relativ breitbandige Störspektrum durch die hohen Flankensteilheiten zu nennen. Das Design einer solchen Schaltung soll exemplarisch am Schaltregler-IC LM1577 (Aufwärtsregler) von z.B. National Semiconductor besprochen werden:

Geeignete induktive Bauteile für diese Schaltung:

Im Hinblick auf die Optimierung des EMV-Verhaltens kommt als Speicherdrossel ein Ringkern in Frage, z.B. WE-SI Typ 744 135 mit $L_N = 100 \mu\text{H}$ bei $I_N = 3\text{A}$. Zusätzlich zu den bekannten Designregeln, wie z.B. große Masseflächen sind weitere induktive Bauelemente mit eingefügt, um das Störspektrum auf den Zu- und Ableitungen klein zu halten:

L1 und L2 als Entstörferrite entkoppeln den Schaltregler HF-technisch von den anderen Stufen der Schaltung. Hier kommen Hülsendrosseln oder UKW-Enstördrosseln zum Einsatz (z.B. Würth Elektronik 7427605 bzw. 7427504), ggf. auch SMD-Ferrite.

Wichtigste Parameter für die Auswahl der gesuchten Speicherdrossel: L_N , I_N , R_{DC}

Symmetrischer Verstärker

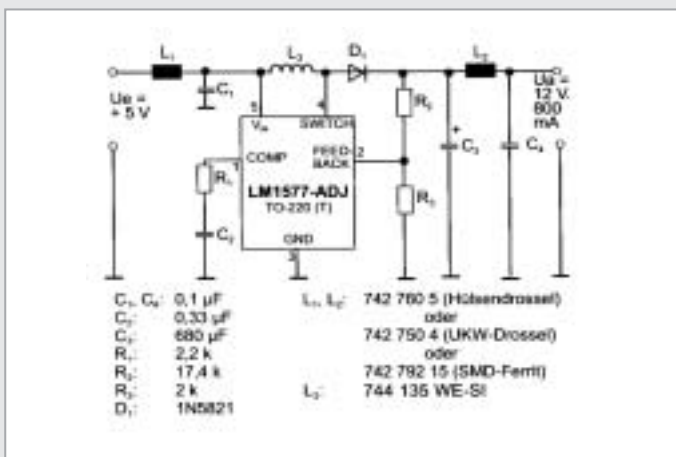


Bild 2: Aufwärts-Schaltregler (Boost-Converter)

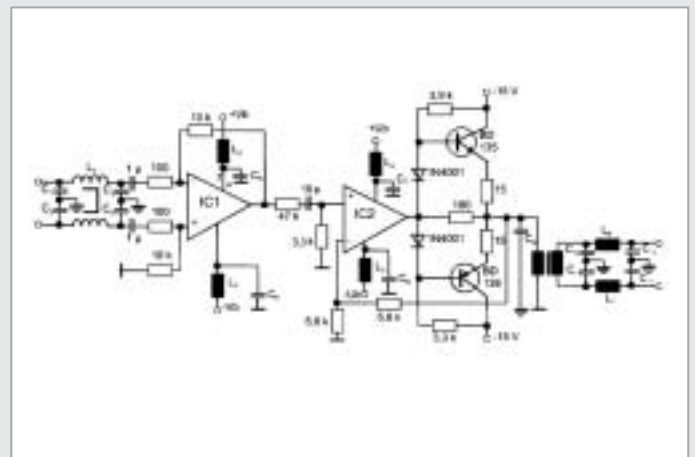


Bild 3: Symmetrischer Verstärker

ABC der Induktivitäten

Der symmetrische Audioverstärker hat prinzipiell auch einen konventionellen π -Tiefpaß am Ein- und Ausgang, jedoch kann hier am relativ hochimpedanten Eingang durch die Symetrie die Stromkompensation ausgenutzt werden (L_1). Am Ausgang wird der meist vorhandene Ausgangsübertrager für die Störunterdrückung im Frequenzbereich bis ca. 5 MHz genutzt (je nach Übertrager). Darüber hinaus werden die Ferritdrosseln L_6 und L_7 wirksam, die wegen der ab 30 MHz ansteigenden Impedanz nicht stromkompensiert sein müssen. Geeignete Entstörinduktivitäten sind stromkompensierte Ringkerninduktivitäten (z.B. Würth Elektronik WE-VB) und SMD-Ferrite bzw. Entstördrosseln (WE-ZB).

Wichtigste Parameter für die Auswahl der Bauteile:
 L_1 : Induktivität und Impedanzverlauf
 $L_2 \dots L_7$: Impedanzverlauf

Video-Filter im PC-Bereich

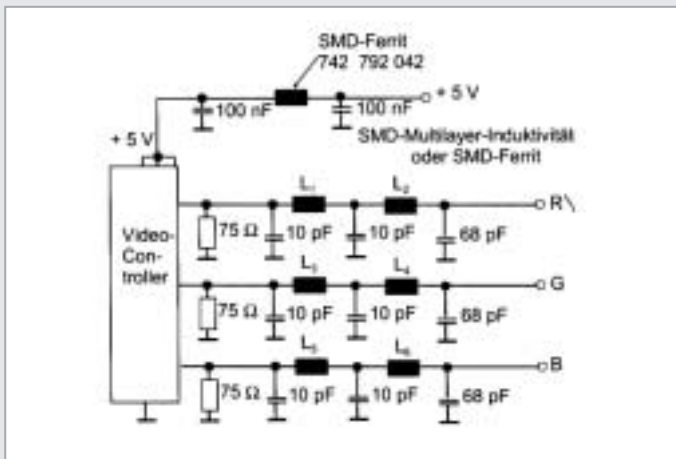


Bild 4: Videofilter für Grafikkarten

Für die HF-seitige Abblockung des hochgetakteten Videocontrollers zur Spannungsversorgung dient das diskret aufgebaute π -Filter, der als Längsinduktivität einen SMD-Ferrit nutzt. Vorteil: Breitbandige und extrem hohe Entkopplung durch den hohen Verlustanteil der Impedanz ($> 2000 \text{ Ohm}$) im Bereich oberhalb 100 MHz. Zur Anpassung auf die Kabelimpedanz und zur Filterung dienen die Filterbänke in den Signalzweigen R,G,B. Als Drosseln sind hier geschirmte Multilayer-Induktivitäten (WE-MI) im Einsatz. Diese können aufgrund der äußeren Schirmung eng platziert werden, ohne untereinander überzusprechen. Als weitere geeignete Filterelemente sind hier SMD-Ferrite zu nennen, die dank ihrer breitbandigen Entstörwirkung eine Reduktion der verwendeten

Kapazitätswerte ermöglichen.

Wichtigste Parameter für die Auswahl der Bauteile:
SMD-Ferrit: Impedanzverlauf; Strom
 $L_1 \dots L_6$: Impedanzverlauf, Eigenresonanzfrequenz, Güte

Fazit

Die Einhaltung der EMV-Grenzwerte beginnt mit einem HF-technisch ausgelegten Design. Anhand der wichtigsten Kennwerte von Induktivitäten und dreier Applikationen, ist der sinnvolle Einsatz von Induktivitäten unterschiedlichster Bauformen beschrieben. Unter Zuhilfenahme dieser Kennwerte und der im Literaturverzeichnis genannten Applikationsschrift, die dieses Thema weitaus ausführlicher behandelt, hat der Entwickler das Rüstzeug, um schon frühzeitig entsprechende Entstörmaßnahmen zu planen und notwendige Redesigns auf das Notwendigste zu beschränken.

Literaturverzeichnis

[1] Gerfer, A.; Rall, B.; Zenkner, H.:
Trilogie der Induktivitäten, 2. erweiterte Auflage,
 Würth Elektronik eiSos GmbH & Co KG 2002,
 Swirdoff Verlag, ISBN 3-934350-30-5

Ersatzschaltbilder zur Simulation von EMV-Ferriten

Rechnergestützte Optimierung von HF-Filter - und Entkoppelschaltungen

Beim Entwurf von elektronischen Schaltungen werden zunehmend schon im ersten Design EMV-Ferrite zur breitbandigen Entstörung mit vorgesehen. Um die Auswahl des geeigneten Bauteiles zu vereinfachen, bietet sich die Rechnersimulation zur Filterdimensionierung an. Auch wenn einige Faktoren hier nicht berücksichtigt werden (wie z.B. der Einfluss der Leiterplatte mit deren parasitären Effekten), bietet die Simulation den schnellen Weg zu ersten „Startwerten“. Ausgehend von diesen Bauteilwerten optimiert man im EMV-Meslabor die so erzeugte Filterschaltung.

Einleitung

Konstante Parameter für L, C und R sind die Vorbedingung für die Simulation von elektronischen Schaltungen. Ein falscher Ansatz bei der Festlegung eines Ersatzschaltbildes führt zu mangelhaften oder falschen Simulationsergebnissen. Elektronische Bauelemente, Widerstände, Kondensatoren, Induktivitäten, Leitungen, näherungsweise Ferritmaterialien und Isolierstoffe können durch Wechselstromgrößen hinreichend genau charakterisiert werden. Voraussetzung ist, daß sie ihre Eigenschaften bei verschiedenen hohen Spannungen und Strömen nicht nennenswert verändern oder im Kleinsignalbereich betrieben werden. Man spricht dann von linearen Bauelementen im Gegensatz zu nichtlinearen Bauelementen wie Varistoren, Dioden, Transistoren u. am..

Kondensatoren => Serienresonanzkreis

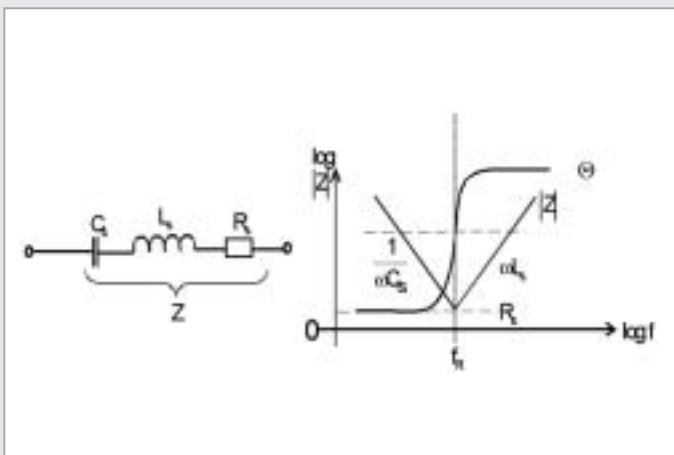


Bild 1: Serienresonanzkreis (Kondensator)

Die ideale Kapazität C_s wird durch die Zuleitungsinduktivität L_s (im Bereich einiger nH) und den Bahnwiderstand R_s (im Bereich von typ. 20 mΩ ... 100 mΩ, bei kalten Elektrolytkondensatoren bis zu 1 Ω) beeinflusst. Bei tiefen Frequenzen überwiegt der kapazitive Anteil, bei der Eigenresonanzfrequenz

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

ist der Bahnwiderstand messbar. Oberhalb der Serienresonanz überwiegt der induktive Anteil, der durch kürzeste Anschlusslängen in gewissen Grenzen beeinflussbar ist. Die Phasenkurve geht im Resonanzbereich von $\approx -90^\circ$ auf $\approx +90^\circ$. Der Phasenpunkt 0° bestimmt dabei sehr genau den Punkt der Resonanzfrequenz, oft viel genauer als dies über die Amplitudenmessung möglich ist.

Induktivitäten => Paralleleresonanzkreis

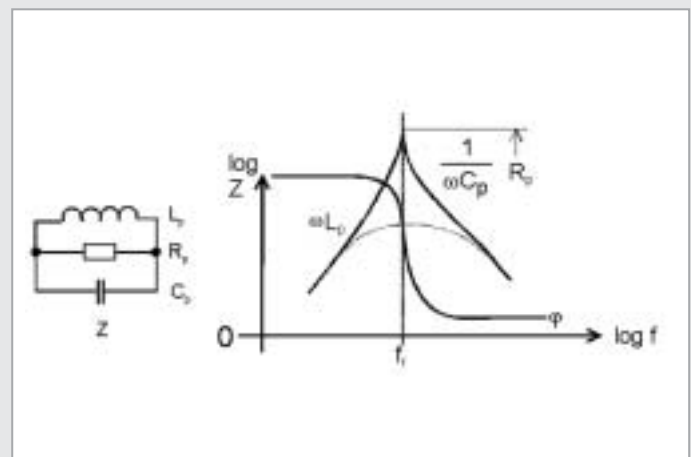


Bild 2: PSK und Impedanz über der Frequenz.

Die ideale Induktivität L_p wird dabei durch die unvermeidlichen Wicklungs-kapazitäten C_p und durch die in R_p zusammengefassten Verluste (Kernmaterial, Wicklungsverluste) beeinflusst. Bei Induktivitäten strebt man nach unendlich grossem Parallelwiderstand R_p .

Ersatzschaltbilder zur Simulation von EMV-Ferriten

EMV-Ferrite: Reihen-oder Serienresonanzkreis ?

Es ist marktüblich, die EMV-Ferrite durch ihre Serieninduktivität L_s und dem dazu in Reihe liegenden Widerstand R_s zu spezifizieren. Diese Werte lassen sich mit einem Impedanzanalyzer über den interessierenden Frequenzbereich sehr genau messen und als Impedanzkurve darstellen.

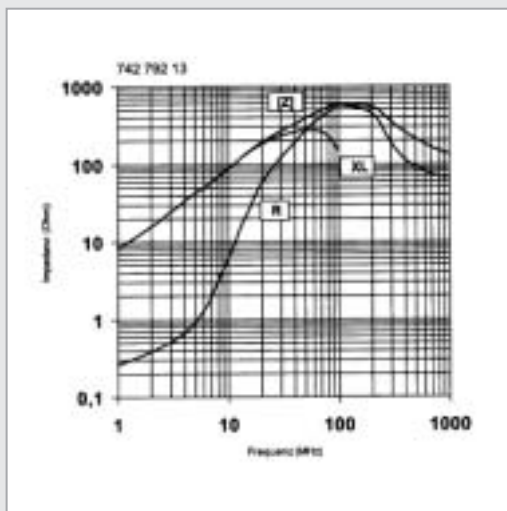


Bild 3: Impedanzkurve SMD-Ferrit 74279213

In [1] wurde beschrieben, wie man von der Impedanzkurve zu einem Simulationsmodell speziell für PSICE umrechnen kann. Dieses Verfahren ist recht umständlich und erfasst nicht die parasitäre Kapazität und deren Parallelschaltung zum Widerstand oder Induktivitätsanteil.

Nur durch alle drei Parameter L , C und R ist ein Bauelement aber genau beschrieben. Moderne Impedanzanalyzer ermitteln rechnergestützt für unsere Anwendung das besser geeignete Parallelersatzschaltbild – denn hier liegen drei ideale und vom Wert konstante Bauelemente vor. Damit ist dieses Modell universell einsetzbar.

Bei EMV-Ferriten ist im Gegensatz zu Induktivitäten ein hoher und breitbandig wirkender Widerstand R_p ein gewünschter Parameter. Die Induktivität L_p spielt dabei eine nur untergeordnete Rolle und ist der Schlüssel um den Verlustwiderstand in die Leitung einzutransformieren. Um breitbandig zu arbeiten, muss gleichzeitig die Parallelkapazität gegen Null streben.

Für den oben gezeigten SMD-Ferrit gelten folgende Werte des Parallelersatzschaltbildes:

74279213:

$L_p = 1,4675 \mu\text{H}$

$C_p = 1,2584 \text{ pF}$

$R_p = 685 \Omega$

Für eine Entkopplungsschaltung simulieren wir ein T-Filter für 500 MHz und verwenden einmal den SMD-Ferrit 74279213 und den SMD-Ferrit 74279211 mit folgenden Simulationsdaten:

74279211:

$L_p = 0,2000 \mu\text{H}$

$C_p = 0,1834 \text{ pF}$

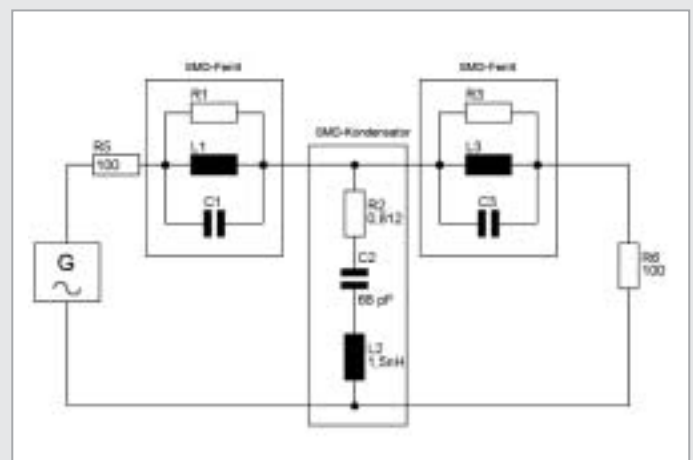
$R_p = 125 \Omega$

Das Filter arbeitet an einer Quell- und Senkenimpedanz von je 100Ω . Der verwendete SMD-Kondensator in Bauform 1206 hat laut Herstellerangaben bei 500 MHz seine Eigenresonanzfrequenz. Daraus resultieren einerseits eine Serieninduktivität von $1,5 \text{ nH}$ und als Datenblattangabe ein Serienwiderstand von $0,812 \Omega$. Eine Kurve der typischen Eigenresonanzfrequenz von SMD-Kondensatoren finden Sie auf Seite 7, Bild 4.

Vorteil dieses diskreten gegenüber integriertem T-Filter:

Deutlich kleinere Kapazitätswerte und damit geringe Belastung für schnelle Signale sowie einfache Abstimmung über drei Standardbauteile. Abb. 4 zeigt die entsprechende Schaltung, die unter PSPICE simuliert wurde.

Bild 4: T-Filter schaltung mit realen Bauelementen



Die Simulation erfolgte in drei Schritten:

- 1) nur mit SMD-Kondensator $C = 68 \text{ pF}$ gegen Masse
- 2) mit 2 SMD-Ferriten Typ 74279211 als T-Filter mit $C = 68 \text{ pF}$
- 3) mit 2 SMD-Ferriten Typ 74279213 und SMD-Kondensator $C = 68 \text{ pF}$

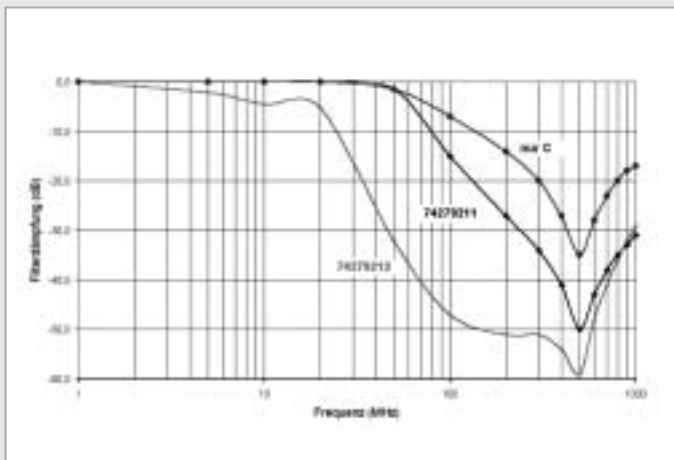


Bild 5 : Simulationsergebnisse des diskreten T-Filters

Der Filterkondensator zeigt - wie erwartet - seine maximale Dämpfung bei 500 MHz. Damit wird der Störstrom durch die SMD-Ferrite genau dort am größten, wo die höchste Dämpfung benötigt wird. Achtung ! Im praktischen Aufbau sind die Anschlussinduktivitäten der Leiterbahnen ggf. mit zu berücksichtigen- denn diese verschieben den Eigenresonanzfrequenzpunkt des Kondensators zu tieferen Frequenzen hin. Theoretisch werden bei 500 MHz mit dem Kondensator allein schon 35 dB Einfügedämpfung erreicht. Allerdings recht schmalbandig. **Die breitbandige Filterwirkung ohne Resonanzüberhöhungen erfüllt das gezeigte Filter mit SMD-Ferriten.**

Der SMD-Ferrit 74279211 verbessert die Einfügedämpfung um weitere 15 dB bei 500 MHz und setzt schon bei ca. 80 MHz mit deutlicher Dämpfung ein. Noch besser das Ergebnis mit dem SMD-Ferrit 74279213: Hier setzt die Filterwirkung schon bei ca. 25 MHz ein und erreicht Einfügedämpfungswerte von besser als 30 dB im Bereich von 45 MHz ... 1 GHz.

Erkennbar ist deutlich ein Gewinn an Filterdämpfung und breitbandiger Entstörung, die mit dem SMD-Ferrit 74279213 maximal wird. Ist eine eher schmalbandige Dämpfung gewünscht, so ist die Lösung mit SMD-Ferrit 74279211 zu bevorzugen (siehe Abb. 5). Eine vollständige Tabelle mit Simulationsparametern findet sich im Fachbuch „Trilogie der Induktivitäten“

Zusammenfassung und Ergebnis

Die Entstörung mittels EMV-SMD-Ferriten gewinnt zunehmend an Bedeutung. Um für eine Problemstellung die Filterschaltung zu bestimmen und deren Wirkung abschätzen zu können, empfiehlt sich die Rechnersimulation. Dank eines einfachen Parallelersatzschaltbildes als Simulationsmodell, kann diese Simulation mit jeder marktüblichen Software durchgeführt werden. Die gewonnenen Filterkurven geben einen ersten Eindruck über die zu erwartende Dämpfung und werden durch eine entsprechende Messung im EMV-Labor ggf. noch optimiert.

Literaturverzeichnis

- [1] Gerfer, A. *Simulationsmodell SMD-Ferrite*:
Homepage Würth Elektronik, www.we-online.de
- [2] Würth Elektronik GmbH & Co KG:
Datenbuch EMV-Bauteile & Induktivitäten 1999
- [3] Gerfer, A.; Rall, B.; Zenkner, H.:
Trilogie der Induktivitäten - Designführer für Induktivitäten und Filter, 2. erweiterte Auflage 2001,
Swiridoff Verlag; ISBN 3-934350-30-5



EMC & Inductive Solutions



EUROPA

**Würth Elektronik eiSos
GmbH & Co. KG**
EMC & Inductive Solutions
Max-Eyth-Str. 1
D-74638 Waldenburg
Tel. +49 (0) 79 42 945 - 0
Fax +49 (0) 79 42 945 - 400
eiSos@we-online.de

Würth Elektronik France
109, Rue du 1er mars 1943
F-69612 Villeurbanne Cedex
Tel. +33 (0) 4 72 35 31 88
Fax +33 (0) 4 72 35 31 89
info@wurth-elektronik.fr
www.wurth-elektronik.fr

Würth Elektronik Ireland
36, Westbury Drive
Lucan
IRL - Co. Dublin
Tel. +353 (0) 1 621 20 61
Fax +353 (0) 1 624 92 93

Würth Elektronik Austria
Gerberweg 6
A-2320 Schwechat
Tel. +43 (0) 1 707 40 44
Fax +43 (0) 1 706 37 36

Würth Elektronik UK
4 th Avenue, The village, Trafford Park
GB - M17 1DB Manchester
Tel. +44 (0) 161 872 0431
Fax +44 (0) 161 872 0433
sales-uk@we-online.com
www.we-online.com

Würth Elektronik Nederland
Iseoplantsoen 1
NL-1060 PW Amsterdam
Tel. +31 (0) 20 48 92 631
Fax +31 (0) 20 48 92 632

Würth Elektronik Finland
Karhutie 4
FIN-01900 Nurmijärvi
Tel. +358 (0) 9 87 89 10 - 0
Fax +358 (0) 9 87 89 10 - 38

USA

Würth Electronics INC.
91 Grant Street
Ramsey, NJ 07446
Phone (201) 785 8800
toll free (866) EMC MORE
Fax (201) 785 8810
eiSos-usa@we-online.com

ASIEN

Würth Elektronik China
No. 8 Xinghua 8 Zhi Lu
Xiging Economic D
300381 Tianjin, PR China
Phone +86 (0) 22 83963220
Fax +86 (0) 22 83963800
eiSos-china@we-online.com

Würth Elektronik Hong Kong
Unit B 6/F., Prince Ind Bldg.
No. 106 King Fuk Street
Kowloon, San Po Kong
Phone +852 (0) 27 50 81 18
Fax +852 (0) 27 53 00 84
eiSos-hongkong@we-online.com

Würth Elektronik Malaysia
Bandar Baru Permas Jaya
7 Jalan Permas 9/13
81750 Johor Bahru, Malaysia
Phone +607 (0) 3 87 62 80
Fax +607 (0) 3 88 43 91
eiSos-malaysia@we-online.com

Würth Elektronik Taiwan
4th Fl., No. 28, Lane 80
Sec. 3, Nan-Kang Road,
Taipei, Taiwan, R.O.C.
Phone +886 (0) 2 26 51 01 15
Fax +886 (0) 2 26 51 01 02
eiSos-taiwan@we-online.com

Würth Elektronik Singapore
Yishun Industrial Park A
Block 1024, #04-25
768763 Singapore
Phone +65 (0) 64 87 42 38
Fax +65 (0) 64 87 42 39
eiSos-singapore@we-online.com