

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Beilage zum Kurs HFG – Grundlagen der Hochfrequenztechnik Herbstsemester 2011/2012

Dr. Werner Baumberger
20. September 2011

Inhaltsverzeichnis

1 Was lernen Sie in diesem Block?	2
2 Begriffsdefinition und Einführung ins Thema	3
2.1 Begriffe.....	3
2.2 Technische Einführung.....	3
2.3 Wirtschaftliche und regulatorische Aspekte.....	4
3 Koppelmechanismen und Gegenmassnahmen	4
3.1 Allgemeines	4
3.2 Galvanische Kopplung	5
3.3 Elektrische Kopplung (E-Feldkopplung, kapazitive Kopplung)	6
3.4 Magnetische Kopplung (H-Feldkopplung, induktive Kopplung)	7
3.5 Elektromagnetische Nah- und Fernfeldkopplung.....	8
3.6 Gleichtakt- und Gegentaktstörungen	9
3.7 Die Masseschleife, ein typischer EMV-Problemfall	10
3.7.1 Problembeschreibung	10
3.7.2 Gegenmassnahmen	11
4 Praktische Hinweise	12
4.1 Entstörkomponenten.....	12
4.1.1 Allgemeines	12
4.1.2 Drosseln und Filter	12
4.1.3 Gleichtaktdrosseln	14
4.1.4 Netzfilter.....	14
4.1.5 Schirm- und Dämpfungsmaterialien.....	15
4.2 Regeln für den Leiterplattenentwurf.....	15
4.2.1 Allgemeines	15
4.2.2 Anzahl der Lagen bei Leiterplatten und Massekonzept	15
4.2.3 Ausgestaltung der Ein- und Ausgänge	16
4.3 Weitere Regeln	16
5 Literatur	17

1 Was lernen Sie in diesem Block?

Dieser Block gibt Ihnen eine kurze Einführung in die elektromagnetische Verträglichkeit aus der Sicht des Hochfrequenztechniklers.

Konkret erhalten Sie einen Einblick in folgendes:

- Kopplungsmechanismen zwischen Stör- und Opferkreis
- Gleichtakt- und Gegentaktstörungen
- Gegenmassnahmen
- Entstörkomponenten
- EMV-gerechter Leiterplattenentwurf

Zahlreiche weitere Aspekte der EMV werden hier **nicht oder kaum tangiert**. Bei einer ausführlicheren Behandlung des Themas müssten noch folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Eine Behandlung der **häufigsten Störquellen** und ihrer Störspektren
- Eine präzisere Analyse der Kopplungsmechanismen, insbesondere die **Wirkung von Schirmen**
- Die umfangreiche **EMV-Messtechnik**, ohne die eine Überprüfung der getroffenen Massnahmen nicht zu erreichen ist
- Das grosse Gebiet der **EMV-Normen**, welches von keiner mit EMV-Problemen betroffenen Person ausgelassen werden kann

Da das Gebiet der EMV sehr viel Spezialwissen erfordert, ist es für den durchschnittlichen Ingenieur auch nicht einfach, sich darin auszukennen. Es braucht zudem recht viel Erfahrung, um relativ rasch Probleme eingrenzen und sinnvolle Massnahmen vorschlagen zu können.

2 Begriffsdefinition und Einführung ins Thema

2.1 Begriffe

Unter Elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) ordnet man alle Fragen ein, welche mit der Funktion von Geräten in einem elektromagnetischen Umfeld zu tun haben. Die genaue Definition von EMV nach DIN VDE 0870 lautet:

EMV ist Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung, in ihrer elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren, ohne diese Umgebung, zu der auch andere Einrichtungen gehören, unzulässig zu beeinflussen.

Dies ist eine sehr weit gefasste Definition, und entsprechend weit ist tatsächlich das Feld der EMV. Grundsätzlich geht es dabei immer um zwei Wirkungskreise:

- **Emission:** Die Wirkung eines Gerätes¹ auf seine Umwelt, d. h. sein Potential als Störquelle
- **Suszeptibilität (Immunität):** Die Wirkung, die die elektromagnetische Umgebung auf ein Gerät haben kann, d.h. sein Potential als Störsenke (Opfer)

Sowohl Emission wie auch Suszeptibilität sind in der Regel ungewollte Eigenschaften. Ein Gerät kann trotz mangelhafter EMV-Eigenschaften lange einwandfrei funktionieren, dabei aber andere Geräte stören. Oder es kann in einer seltenen, speziellen Umgebung ausfallen. Deshalb ist die EMV in zahlreichen **Normen** und Vorschriften vergleichsweise **dicht reguliert**.

Dabei reicht es nicht aus, bloss die Emission zu beschränken, wie man zunächst meinen könnte:

- Ein **Mobiltelefon** muss, um funktionieren zu können, modulierte elektromagnetische Wellen ausstrahlen. Es erzeugt dabei in seiner Nähe eine beträchtliche Feldstärke. Die **Emission** gehört hier also zu den Grundfunktionen und ist **erwünscht**. Für die heimische Stereoanlage ist das sendende Mobiltelefon jedoch klar ein **Störer**.
- **Blitzschläge** sind nicht-technische Störer, deren Auftreten naturgemäss nicht reguliert werden kann. Sie erzeugen Überspannungen (engl. *surge*) auf Speisungs- und Signalleitungen, gegen die die daran angeschlossenen Geräte eine ausreichende Immunität aufweisen müssen, um Fehlfunktionen oder gar Beschädigung zuverlässig zu verhindern.

Viele Teilgebiete der EMV beinhalten übrigens **keine hochfrequenztechnischen Themen**. Ein prominentes Beispiel für ein ausgesprochen nichthochfrequentes EMV-Problem ist **Flicker**. Hier geht es um Verbaucher am 230 V-Netz mit pulsartiger Stromaufnahme, welche Netzspannungsschwankungen im Hz-Bereich und dadurch ein Flackern der elektrischen Beleuchtung verursachen können, welche als lästig wahrgenommen wird und physiologisch sogar schädlich sein kann.

2.2 Technische Einführung

Für den Hochfrequenzingenieur geht es bei der EMV zunächst um die Verträglichkeit verschiedener **Geräte** oder **Systeme untereinander** (z. B. Mobiltelefon und Stereoanlage). Hier bilden die allgemeinen sowie die produkt- und systemspezifischen EMV-Normen **eine notwendige, wenn auch nicht hinreichende Basis** für die Entwicklungsarbeit.

Darüber hinaus geht es aber auch um die Verträglichkeit verschiedener Funktionseinheiten **innerhalb eines Gerätes**.

¹ Wir sprechen hier vereinfachend von Gerät; es kann sich dabei um irgendeine elektrische oder elektronische Einrichtung handeln, also um eine Leiterplatte, ein Modul oder auch um ein ganzes Verkehrsflugzeug.

Ein Beispiel hierfür ist die Kombination Sound-Karte und Schaltnetzteil in einem PC (Gerät), oder ein Mikro-Controller und ein AD-Wandler auf einer Leiterplatte (Modul). Beiden Beispielen gemeinsam ist das Vorhandensein grosser Pegelunterschiede auf kleinem Raum.

Dieser Teil der EMV ist zweifellos der schwierigere, da hierfür keine Normen existieren, und der Druck zur Miniaturisierung, zur vermehrten Integration verschiedener Funktionen sowie zur Verbilligung tendenziell zunimmt.

Für diesen Bereich gibt es jedoch eine Anzahl von Regeln, die in Kapitel 4 zu skizzieren sein werden.

2.3 Wirtschaftliche und regulatorische Aspekte

Die Analyse eines bereits bestehenden EMV-Problems kann, wie erwähnt, recht schwierig sein, dessen Behebung in einem **fertigen Produkt** (Gerät, Leiterplatte usw.) ist meist **sehr aufwändig**.

Dagegen ist es dank einem vertieften Verständnis der möglichen Koppelmechanismen recht einfach, **früh im Entwicklungsprozess** geeignete Gegenmassnahmen zu ergreifen.

Diesen Sachverhalt illustriert Fig. 1. EMV ist also ein Thema, welches vom Beginn einer Produktentwicklung Beachtung verdient, und nicht erst am Ende, wenn es an die Zulassung geht. So einleuchtend diese einfache Weisheit ist, so lückenhaft wird sie in der Praxis umgesetzt.

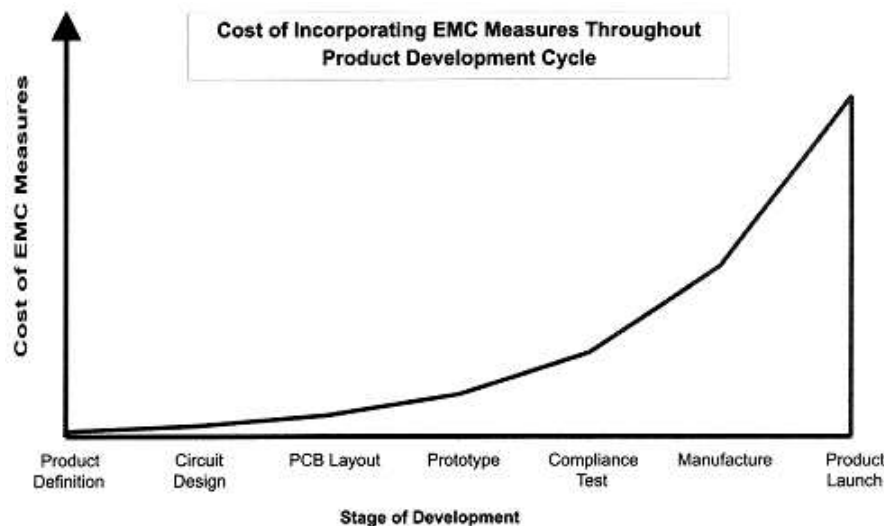


Fig. 1 Relative Kosten von EMV-Massnahmen im Produktentwicklungszyklus

Die Frage, welche Normen für ein spezifisches Produkt anwendbar sind, sowie die Verifizierung von deren Einhaltung (engl. *compliance*) ist in der Regel eine Aufgabe für **Spezialisten** resp. für ein **notified body**, also eine akkreditierte Prüfstelle¹.

3 Koppelmechanismen und Gegenmassnahmen

3.1 Allgemeines

Grundsätzlich kann jedes EMV-Problem nach dem Modell von Fig. 2 analysiert werden. Eine Störquelle (typischerweise ein elektrisches oder elektronisches Gerät) wirkt als Sender (Störer) und beeinflusst über einen **Koppelmechanismus** ein zweites Gerät, welches als Empfänger (Opfer) für das Störsignal funktioniert.

¹ In der Schweiz werden Prüfstellen vom Bundesamts für Metrologie (metas) akkreditiert.

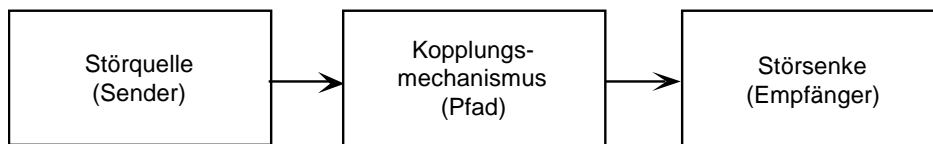


Fig. 2 Beeinflussungsmodell mit Störquelle, Koppelmechanismus und Störsenke

Stellt man in der Praxis eine Störbeeinflussung zwischen zwei Geräten fest, so muss zuerst der Koppelmechanismus gefunden werden. Kennt man diesen, so ist man einer Lösung bereits viel näher.

Nach Fig. 3 unterscheidet man vier verschiedene Koppelmechanismen, welche in Kapitel 2 näher erläutert werden. Für jeden dieser Koppelmechanismen gibt es geeignete Schutzmassnahmen, mit denen der Störeinfluss verringert werden kann.

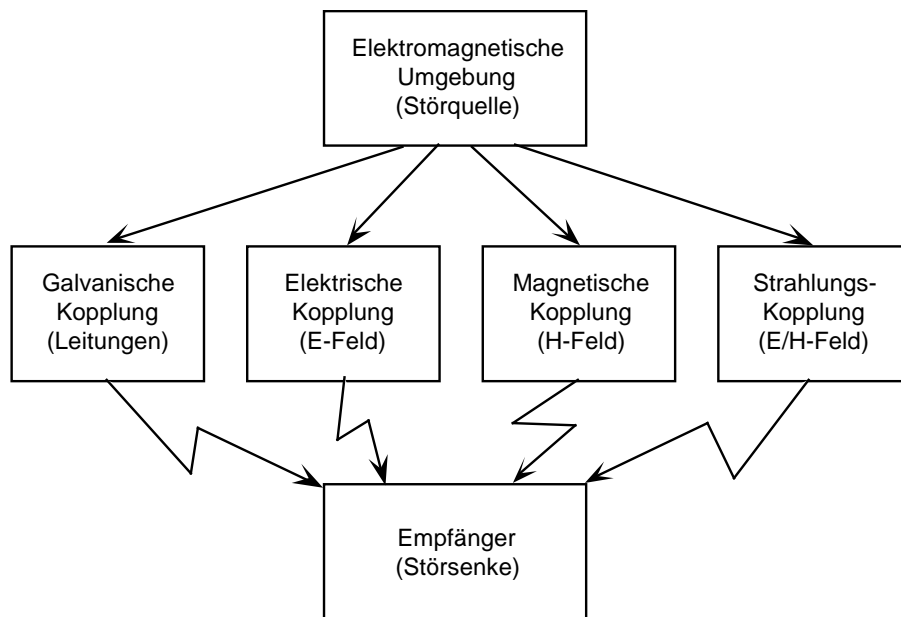


Fig. 3 Kopplungsmechanismen elektromagnetischer Beeinflussungen

So einfach dieses Modell aussieht, so schwierig kann es im konkreten Problemfall sein, den Koppelmechanismus eindeutig zu identifizieren. Oft ist auch eine Verkettung von zwei oder sogar **meh-reren Koppelmechanismen** an einem Problem beteiligt.

3.2 Galvanische Kopplung

Die galvanische Kopplung tritt dann auf, wenn zwei oder mehr Stromkreise einen gemeinsamen Leiter (allgemeiner eine gemeinsame Impedanz) besitzen. Fig. 4a zeigt schematisch diesen Fall.

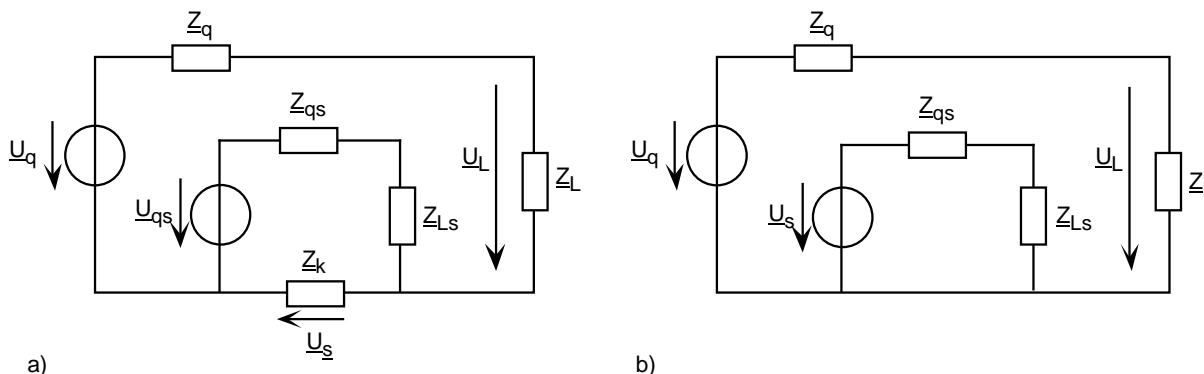


Fig. 4 Galvanische Kopplung: a) Entstehung von Störspannungen in Stromkreisen mit gemeinsamer Impedanz Z_k
 b) Abhilfe durch Eliminierung der Koppelimpedanz

Die Störquelle \underline{U}_{qs} erzeugt eine Störspannung \underline{U}_s über der gemeinsamen Impedanz \underline{Z}_k , (der Koppelimpedanz).

Galvanische Kopplung ist also ein reines *Verdrahtungsproblem* (Topologieproblem), welches theoretisch leicht zu verstehen, praktisch oft schwer lösbar ist.

Die theoretische Gegenmassnahme besteht darin, die Koppelimpedanz zu eliminieren.

In der Praxis treten galvanische Kopplungen z.B. dann auf, wenn mehrere Lasten (Geräte, Leiterplatten etc.) an ein gemeinsames Netzgerät mit endlichem Innenwiderstand oder langen gemeinsamen Leitern angeschlossen werden (Fig. 5a). Die Störungen wirken sich besonders dann aus, wenn in einer Last plötzliche Laständerungen auftreten, welche zu einem raschen Anstieg oder Abfall des Speisestromes führen. Über die Längsimpedanz (R - und L -Belag) der gemeinsamen Zuleitung erzeugen diese einen Spannungsabfall, welcher zu Störungen in den übrigen angeschlossenen Funktionseinheiten führen kann.

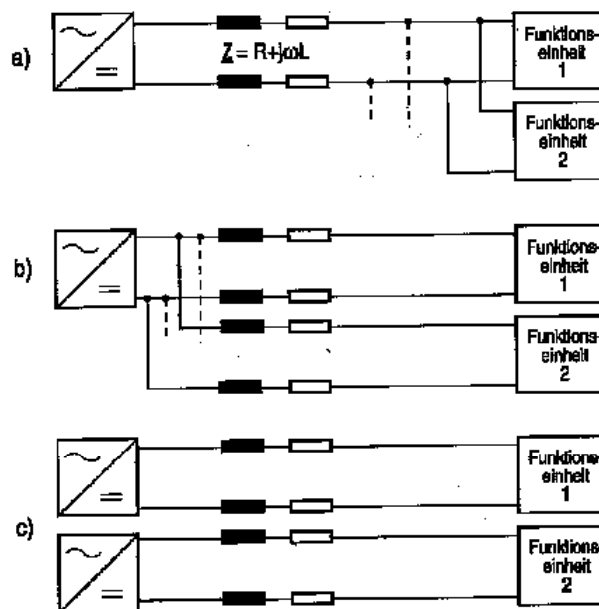


Fig. 5 a) Galvanische Kopplung bei gemeinsamer Speisung; Gegenmassnahmen:
b) Speiseleitungen getrennt ab Speisegerät oder c) getrennte Speisegeräte

Als praktische Gegenmassnahmen bieten sich die in Fig. 5b und c skizzierten Massnahmen an. Beide haben eine Verkleinerung der Koppelimpedanz zu Folge. Je nach Frequenzbereich der erwarteten Kopplung lässt sich Massnahme c) auch durch passive Filter oder aktive Spannungsregler an den Eingängen der einzelnen Funktionseinheiten realisieren.

Galvanische Kopplung ist oft ein NF-Problem, da bei HF der Skin-Effekt hilft, Stromkreise zu trennen.

3.3 Elektrische Kopplung (E-Feldkopplung, kapazitive Kopplung)

E-Feldkopplung erfolgt durch die Kapazität benachbarter Leiter.

Das Beispiel der Fig. 6 zeigt eine kapazitive Kopplung vom Netz (230 V) auf einen hochohmigen Opferkreis. Ein Charakteristikum der E-Feldkopplung ist, dass die verursachten Störungen **vom Strom im Störkreis unabhängig** ist und besonders auf **hochohmige Opferkreise** wirkt.

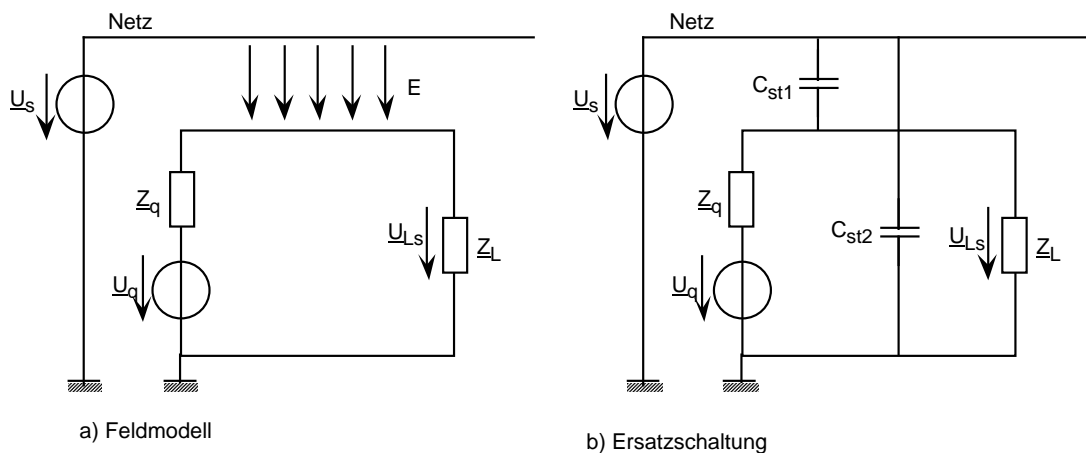


Fig. 6 Elektrische Kopplung zweier Stromkreise über das quasistatische elektrische Feld

Als Gegenmassnahme bietet sich neben einer räumlichen Trennung von Stör- und Opferkreis eine statische Abschirmung (Fig. 7), sowie, wenn möglich, eine **Reduktion der Bezugsimpedanz des Opferkreises** ($|Z_q|$, $|Z_L|$).

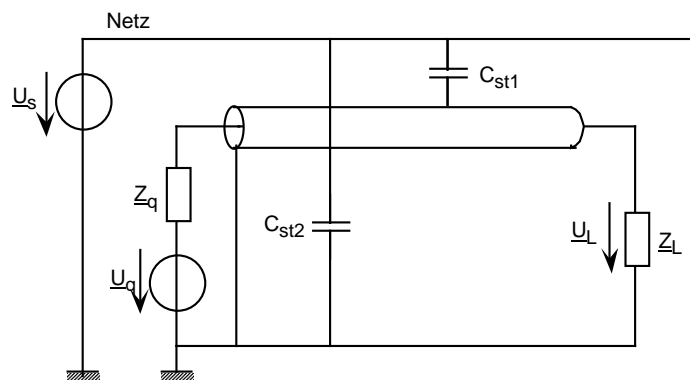


Fig. 7 Verringerung kapazitiver Kopplung durch einen geerdeten Schirm

Reine E-Feldkopplung kommt in der modernen Elektronik mit ihren eher tiefen (und tendenziell weiter sinkenden) Bezugsimpedanzen eher selten vor. Ausnahmen sind Sensoranwendungen mit sehr hochohmigen Sensoren.

3.4 Magnetische Kopplung (H-Feldkopplung, induktive Kopplung)

H-Feldkopplung erfolgt durch die Gegeninduktivität benachbarter Leiter. Fig. 8 zeigt die prinzipielle Anordnung sowohl als Feldmodell, wie auch als Ersatzschaltung, bei der die induktive Kopplung mittels gekoppelter Spulen dargestellt ist.

Im Gegensatz zur E-Feldkopplung hängt das Mass der verursachten Störungen direkt vom Strom im Störkreis ab; ohne Strom keine Störung.

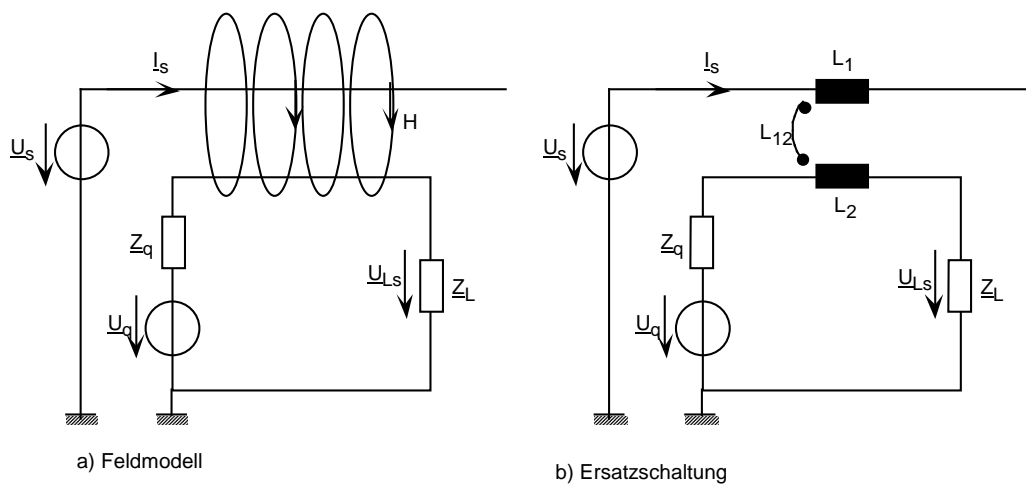


Fig. 8 Beispiel für die magnetische Kopplung zweier Stromkreise über das quasistatische magnetische Feld

Eine Gegeninduktivität L_{12} (s. Fig. 8b) kann nur entstehen, wenn sowohl Stör- wie Opferstromkreis eine gemeinsame Fläche umfassen. Eine wirksame und zugleich billige Gegenmassnahme beruht daher darauf, die vom **Stör-** wie auch vom **Opferstromkreis umschlossenen Flächen möglichst klein** und die gegenseitigen Abstände möglichst gross zu machen.

Eine weitere (vektorielle) Flächenreduktion kann durch **Verdrillen der Leiter** der einzelnen Stromkreise erreicht werden. Diese Technik erlaubt es z. B. bei der ETHERNET-Verkabelung mehrere Stromkreise (Leiterpaare) unabgeschirmt zu einem Kabel zusammenzufassen, ohne dass es zu störendem Übersprechen kommt (UTP - *unshielded twisted pair*).

Eine (niederfrequente) magnetische Abschirmung durch hochpermeables Material (Weicheisen) ist aufwändig und selten notwendig (Ausnahme: Bildröhren in der Nähe von elektrischen Bahnen).

Bei hohen Frequenzen wirkt eine geschlossene, leitende Abschirmung (z. B. Koaxialkabelaussenleiter) als Kurzschlusswindung (Kompensation des störenden H-Feldes), während der Skin-Effekt eine galvanische Kopplung verhindert (s. Abschnitt 3.2).

3.5 Elektromagnetische Nah- und Fernfeldkopplung

Diese Kopplungsmechanismen beginnen dann eine Rolle zu spielen, wenn die Abmessungen der Leiterstrukturen nicht mehr klein gegenüber der Wellenlänge sind (also rund $> \lambda/10$). In diesem Falle lässt sich die elektrische und die magnetische Komponente der Kopplung nicht mehr auseinanderhalten.

Eine gut bekannte HF-Komponente, bei der die **Nahfeldkopplung** erwünscht ist, ist der **Parallelleitungskoppler**. Ein vergleichbares Verhalten weisen alle Strukturen von parallelgeführten Leitern auf.

Fig. 9 zeigt als Beispiel die Kopplung zweier in einem Kabel über eine Länge von 5 m parallelgeführten Leiter. Bei tiefen Frequenzen nimmt die Kopplung proportional zur Frequenz zu, bei höheren Frequenzen (hier ab ca. 10 MHz) erkennt man das bekannte Verhalten des Parallelleitungskopplers, also maximale Kopplung bei $\lambda/4$ und ungeradzahligen Vielfachen, keine Kopplung bei $\lambda/2$ und Vielfachen.

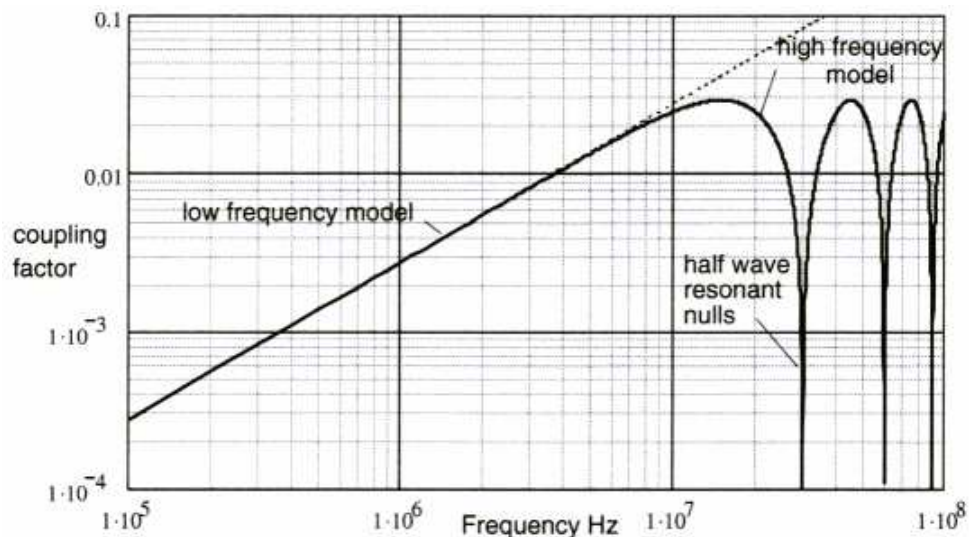


Fig. 9 Kopplung zweier über 5 m parallelgeführter Leiter (aus [2])

Die Nahfeldkopplung auf Leiterplatten lässt sich mit den bekannten Werkzeugen (z. B. MWO) auch quantitativ leicht analysieren. Sie stellt selten ein unüberwindbares Problem dar. So beträgt die maximale Kopplung (also bei $\lambda/4$) zwischen zwei 50 Ω -Leitungen im Abstand von einer Leiterbreite rund -20 dB.

Unterschätzt wird die Nahfeldkopplung zuweilen bei **Logikschaltungen**. Auch wenn im Frequenzbereich der Clock-Rate die Kopplung aufgrund der kurzen Leitungslängen gering ist, steigt sie wegen den bei hohen Flankensteilheiten zahlreich vorhandenen Harmonischen rasch an und kann zu Fehlschaltungen führen. Gegenmassnahmen sind, neben ausreichenden Abständen, eine **Beschränkung der Flankensteilheit** von Logiksignalen auf das notwendige Minimum.

Fernfeldkopplung kann vor allem wegen den an Geräten und Leiterplatten angeschlossenen **Kabeln** in Verbindung mit anderen Koppelmechanismen ein Problem werden. In diesem Falle wirken die Kabel als effiziente Antennen. Gegenmassnahmen werden im Kapitel 4 über Entstörkomponenten und EMV-gerechten Leiterplatten- und Geräteentwurf besprochen.

3.6 Gleichtakt- und Gegentaktstörungen

Eine wichtige Technik zur Vermeidung von EMV-Problemen im Bereich von tiefen bis zu mässig hohen Frequenzen beruht auf der Verwendung von **symmetrischen Stromkreisen**. Bei solchen Stromkreisen wird die Erde (Masse) nicht als Rückleiter verwendet. Die auf den beiden symmetrischen Signalleitern liegenden Nutzspannungen sind gegenüber Masse **gegenphasig**.

Um die Wirkung dieser Technik in Verbindung mit den verschiedenen Koppelmechanismen verstehen zu können, ist es nötig, das Begriffspaar **Gegentakt- und Gleichtaktstörung** einzuführen.

Gegentaktstörungen wirken **gegenphasig** auf beide Signalleiter. Sie sind daher nicht von den Nutzsignalen zu unterscheiden.

Gleichtaktstörungen wirken **gleichphasig** auf beide Signalleiter. Solange der Empfänger (der potentielle Opferschaltkreis) eine hohe Gleichtaktunterdrückung aufweist, wirkt sich eine Gleichtaktstörung nicht aus.

Den Sachverhalt verdeutlicht Fig. 10. In keinem der beiden gezeigten Fälle fliesst aufgrund der Gleichtaktstörquelle ein Störstrom durch die Last Z_L . Erst wenn die Symmetrie gestört wird, wie im Falle von Fig. 11 mit $Z_1 \neq Z_2$ oder $C_{str1} \neq C_{str2}$, kommt es zu einer Gleichtakt/Gegentakt-Konversion und somit zu einer Störung.

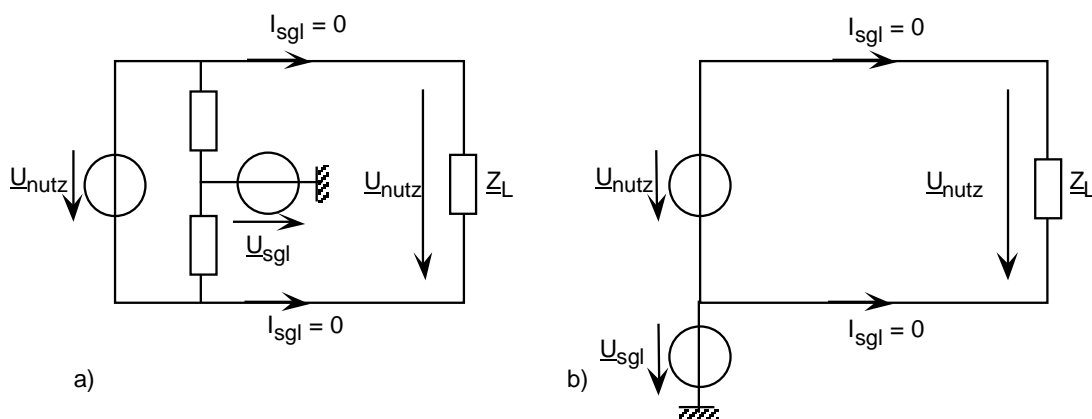


Fig. 10 Zum Prinzip von Gegentaktnutzsignal und Gleichtaktstörung (U_{sgl} , I_{sgl} = Gleichtaktstörspannung und -strom)

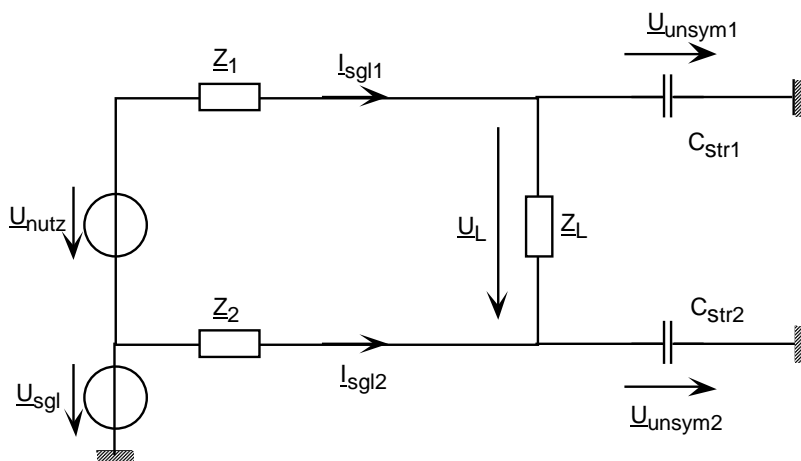


Fig. 11 Gleichtakt/Gegentakt-Konversion aufgrund von Unsymmetrien

3.7 Die Masseschleife, ein typischer EMV-Problemfall

3.7.1 Problembeschreibung

Die Masseschleife ist ein typisches niederfrequentes EMV-Problem, bei dem **zwei Kopplungsmechanismen** beteiligt sind (induktive und galvanische Kopplung). Der Fall eignet sich auch hervorragend zur Demonstration der Gegenmassnahmen.

Die Versuchsanordnung zeigt Fig. 12: Eine Signalquelle und eine Last sind durch ein Koaxialkabel sowie die obligatorische Schutzerdung miteinander verbunden.

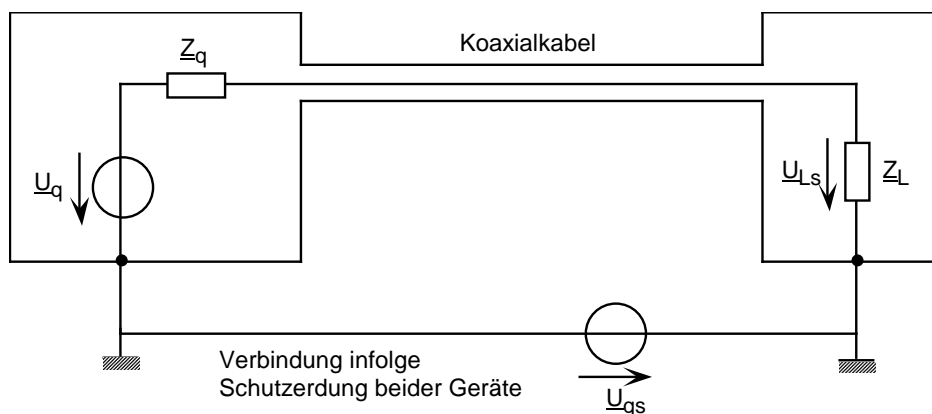


Fig. 12 Signalquelle und Last, durch Koaxialkabel und Schutzerdung miteinander verbunden

Die beteiligten Koppelmechanismen wirken wie folgt:

- **Magnetische Kopplung:** Das durch die Schleife, bestehend aus Aussenleiter des Koaxialkabels, Gerätegehäuse und Schutzerdleiter, strömende magnetische Wechselfeld induziert eine Störspannung \underline{U}_{qs} , welche zu einem Störstrom in der Schleife führt.
- **Galvanische Kopplung:** Dieser Störstrom führt u.a. zu einem Spannungsabfall über dem Serienwiderstand des Aussenleiters des Koaxialkabels (Koppelimpedanz). Da der Aussenleiter zugleich Rückleiter des Signalstromkreises ist, kommt es zu einer Störung.

Das Problem tritt nur bei **tiefen Frequenzen** auf: mit abnehmender Eindringtiefe des Stroms trennen sich die beiden Stromkreise, der Störstrom fliesst auf der Aussenhaut des Aussenleiters des Koaxialkabels, der Nutzstrom auf der Innenhaut; die Koppelimpedanz geht gegen null.

3.7.2 Gegenmassnahmen

Neben unpraktikablen oder gefährlichen Lösungen (wie z. B. das Auftrennen der Schutzerdung) bieten sich folgende Lösungen für das Problem an:

- Einführen einer **Gleichtaktdrossel** (*common mode choke*, manchmal auch Neutralisierungstrafo genannt) in den Nutzstromkreis

Diese Technik ist in der Fig. 13 illustriert. Hier ist der Nutzstromkreis eine Zweidrahtleitung, es könnte sich ebenso gut um ein Koaxialkabel handeln.

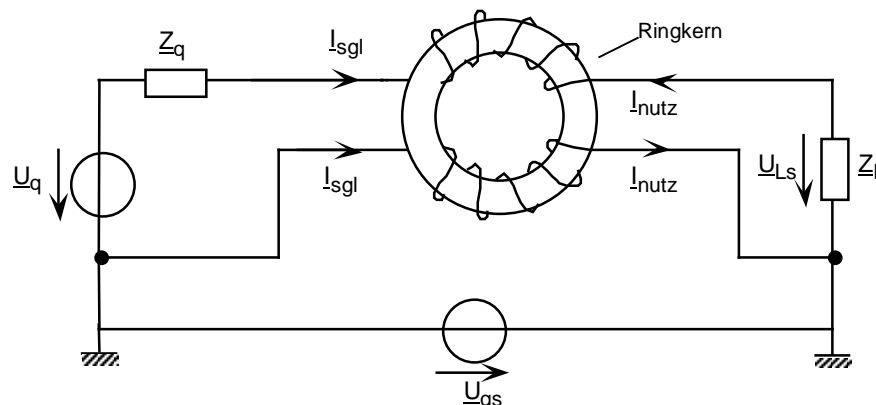


Fig. 13 Unterdrückung des Störstromes durch Einfügen einer Gleichtaktdrossel (*common mode choke*)

Wichtig ist bei dieser Technik der Wickelsinn der beiden Signalleiter auf dem Kern. Der Störstrom I_{sgl} , der als **Gleichtaktstörung** auf beiden Signalleitern fliesst, führt zu einem magnetischen Fluss im Ringkern. Für I_{sgl} weist die Drossel eine **hohe Induktivität** auf. Bei gegebener Störspannung U_{qs} senkt die Gleichtaktdrossel daher den Störstrom.

Demgegenüber fliesst der Signalstrom I_{nutz} im Gegentakt; die magnetischen Flüsse im Ringkern sind daher **entgegengesetzt** und **heben sich somit auf**, die Drossel hat für den Signalstrom keine Induktivität; sie ist ohne Wirkung!

Die Wirkung der Gleichtaktdrossel nimmt mit kleiner werdender Frequenz ab, da sie auf deren Induktivität beruht.

- **Symmetrische Signalübertragung** und Empfänger mit Differenzeingang (Differenzverstärker)

Diese Gegenmassnahme illustriert Fig. 14. Sie ist v.a. bei tiefen Frequenzen sehr wirksam, da die Gleichtaktunterdrückung von Differenzverstärkern dort hoch ist und Streukapazitäten zwischen den einzelnen Signalleitern und Masse die Symmetrie noch wenig stören.

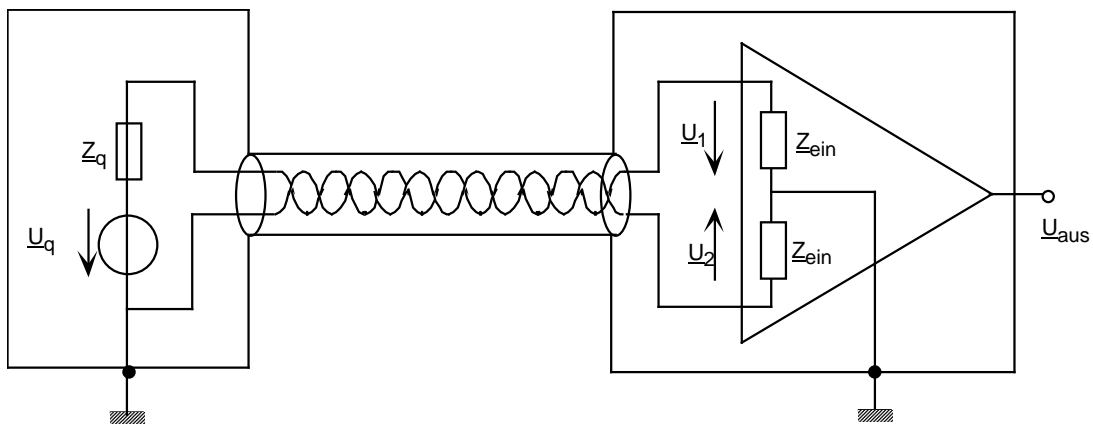


Fig. 14 Symmetrische Signalübertragung

In der Fig. 14 erkennt man auch, dass die symmetrischen Signalleiter **verdrillt** sind, was deren aufgespannte Fläche minimiert. So wird verhindert, dass das magnetische Störfeld **direkt** in den Signalleitern eine Störspannung induziert. Zusätzlich verhindert eine fakultative statische Abschirmung eine E-Feldkopplung.

Die beiden Massnahmen (Gleichtaktdrossel und symmetrische Signalübertragung) können ohne weiteres **kombiniert** werden. Die Massnahmen ergänzen sich in nahezu idealer Weise und ermöglichen eine **breitbandige Immunität**.

4 Praktische Hinweise

4.1 Entstörkomponenten

4.1.1 Allgemeines

Unter der Bezeichnung **Entstörkomponenten** verstehen wir Filter, Überspannungsableiter und andere Komponenten, welche sowohl auf der Seite der potentiellen Störer die Emission reduzieren, wie auch auf der Seite der Opfer die Immunität erhöhen.

Diese Komponenten werden überall dort eingesetzt, wo **Leitungen verschiedenster Art** (Speise-, Steuer- und Signalleitungen) in Geräte, Module oder auf Leiterplatten geführt werden müssen.

4.1.2 Drosseln und Filter

Grundsätzlich eignen sich alle Formen von LC-Filtern auch als Entstörfilter. Allerdings sind v.a. bei Speisungs- und Steuerleitungen die *Impedanzverhältnisse oft sehr schlecht definiert*, weshalb man dort bevorzugt stark **verlustbehaftete Komponenten** (im Gegensatz zu reinen L und C) verwendet.

Ein Beispiel einer in diesem Sinne für EMV-Zwecke optimierten Drossel zeigt Fig. 15. Am gezeigten Impedanzverlauf erkennt man, dass die Drossel lediglich bis zu wenigen MHz hauptsächlich als Induktivität wirkt. Ab ca. 30 MHz dominieren die Verluste, die Drossel wirkt oberhalb v.a. als Widerstand.

Solche Drosseln eignen sich besonders für Speisungszuführungen, da ihr Gleichstromwiderstand sehr klein (für SMD-Bauteile der Art von Fig. 15 im Bereich 0.1Ω), die absorbierende Wirkung bei hohen Frequenzen jedoch gross ist (einige 10 bis 100Ω).

Oft werden solche Drosseln auch aus gestrecktem Draht realisiert (also nicht als Wicklung), über den ein kleiner Ring aus geeignetem Ferrit geschoben wird („**Dämpfungspferle**“).

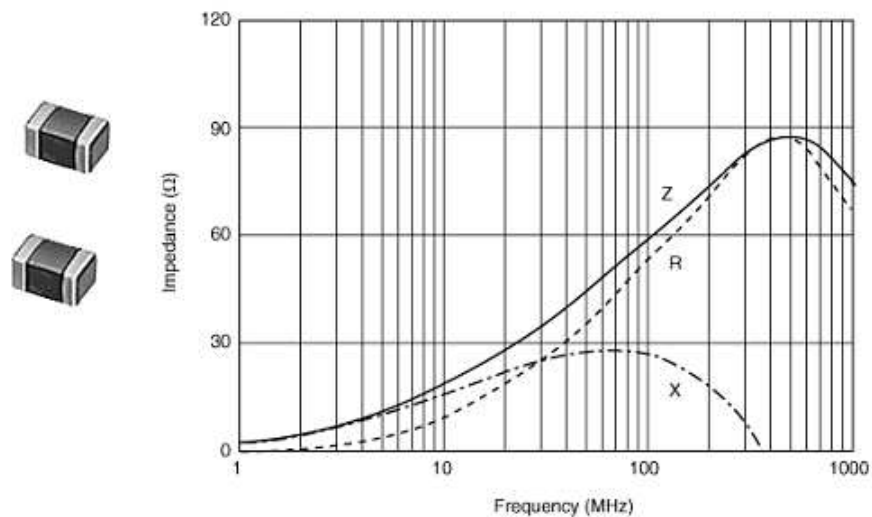


Fig. 15 Für EMV-Anwendungen optimierte verlustbehaftete Drossel in SMD-Ausführung (Murata BLM21PG600)

Auch **komplette Filter** auf der Basis verlustbehafteter Drosseln sind erhältlich, ein Beispiel zeigt Fig. 16 (LC-Tiefpass 3. Ordnung). Der in der Figur gezeigte Dämpfungsverlauf wurde zwar in einem $50\ \Omega$ -System gemessen; wegen den Spulenverlusten werden aber auch bei stark abweichenden Quellen- und Lastwiderständen gute Sperrdämpfungswerte erreicht.

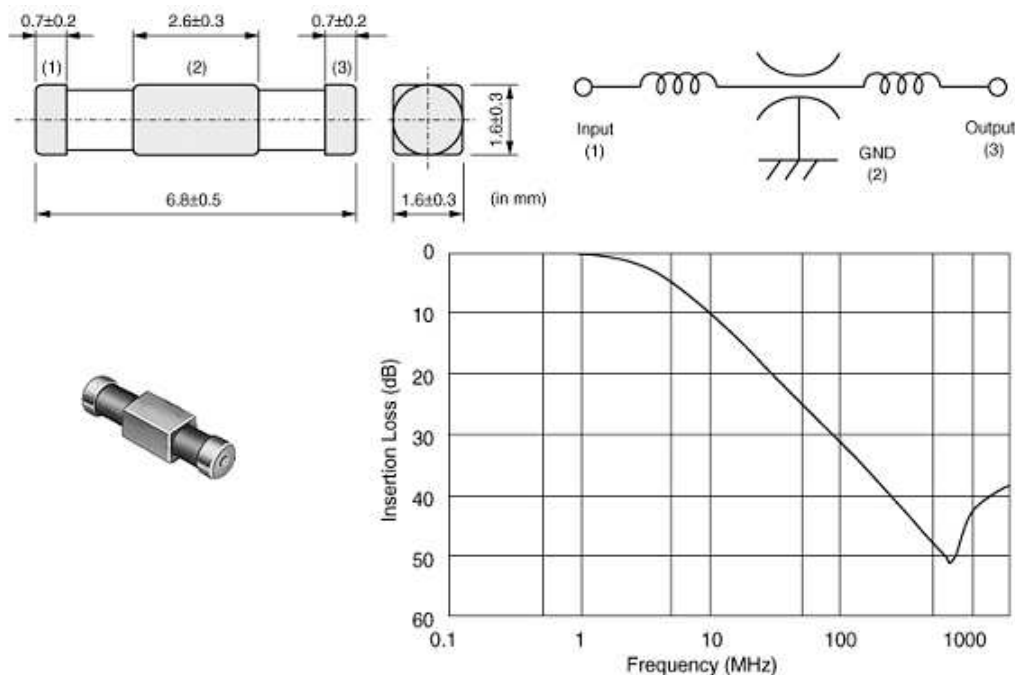


Fig. 16 Tiefpassfilter aus verlustbehafteten Drosseln für EMV-Anwendungen in SMD-Ausführung (Murata NFE61PT102E1H9K)

Solche Filter sind auch als bedrahtete Bauteile in vielen Variationen erhältlich, ebenso zum Einbau in die Wände von Metallgehäusen und in Löcher in Abschirmblechen. Man nennt letztere Durchführungsfilter (oder Durchführungskondensatoren, wenn keine Drosseln integriert sind; Fig. 17).



Fig. 17 Durchführungsfilter zum Schrauben oder Lötten (Oxley, Tusonix)

Als Kondensatoren eignen sich in Speisungsfiltern **keramische Typen mit X7R-Dielektrikum**. Dieses ist leicht verlustbehaftet und vermeidet Resonanzen, wenn mehrere Kondensatoren unterschiedlichen Wertes parallel geschaltet werden.

4.1.3 Gleichtaktdrosseln

Die bereits in Abschnitt 3.7.2 eingeführten Gleichtaktdrosseln sind in mannigfaltigen Ausführungen als EMV-Bauteile erhältlich, und zwar sowohl als SMD-Komponenten wie auch bedrahtet. Neben der in Fig. 13 schematisch gezeigten Ausführung auf einem Ringkern kommen je nach geforderter Gleichtaktinduktivität und spezifischer Anwendung auch zylindrische Doppelwicklungen oder gerade Leiterpaare mit darübergestülpter Ferrithülse zum Einsatz. Eine Auswahl zeigt Fig. 18.

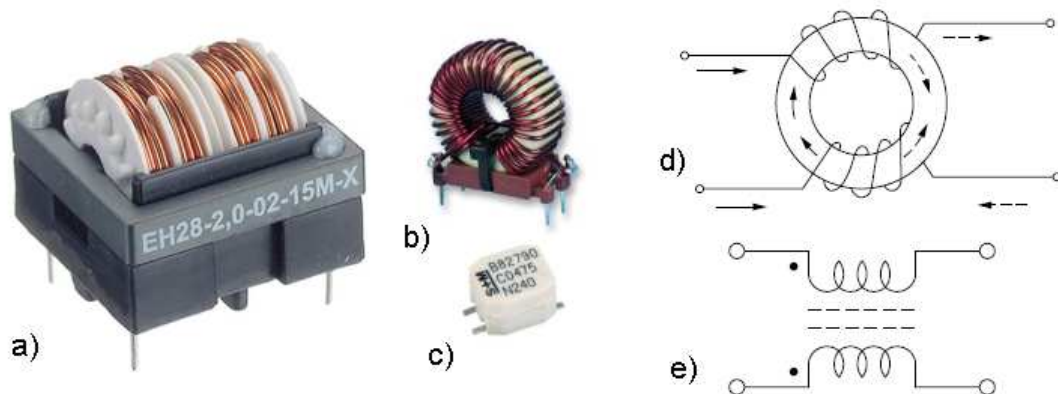


Fig. 18 Verschiedene Bauformen von Gleichtaktdrosseln (a-c), Wirkungsweise (d) und Schaltschema (e)

4.1.4 Netzfilter

Handelsübliche Netzfilter vereinigen die oben genannten Funktionen (**Gleichtaktdrossel, Tiefpassfilter**) in einem einzigen Gehäuse, oft auch in Verbindung mit einem **Einspeisestecker**. Sie verhindern so das Empfangen und Aussenden von Gleichtaktstörungen, wie auch die Übertragung von unerwünschten höherfrequenten Gegentaktstörungen (Oberwellen, Takt von Schaltnetzteilen, Rundsteuersignale usw.).

Zwei Beispiele zeigt Fig. 19. Die Gleichtaktdrosseln sind so ausgeführt, dass sie die beiden Wicklungen nicht völlig gekoppelt sind. Die resultierende **Streuinduktivität** bildet zusammen mit den Kondensatoren C_X ein Tiefpassfilter für höherfrequente Gegentaktstörungen. Die Kondensatoren C_Y leiten hochfrequente Störungen aufs Gehäuse ab. Die Netzfilter haben also auch die Funktion eines Durchführungskondensators. Der Widerstand R entlädt die Kondensatoren bei abgetrenntem Netz (Sicherheit).



Fig. 19 Verschiedene Netzfilter und Innenschema

4.1.5 Schirm- und Dämpfungsmaterialien

Daneben existiert eine grosse Auswahl an Abschirmungs- und Dämpfungsmaterialien wie selbstklebende Kupferfolien oder mit absorbierendem Eisenpulver oder Ferrit versetzte Gummimatten, deren Behandlung den Rahmen dieses Skript sprengen würde.

Es darf an dieser Stelle aber nicht verschwiegen werden, dass solche Materialien, wenn sie als Notlösung gegen EMV-Probleme in (fast) fertigen Produkten eingesetzt werden, sehr teuer sind und oft nur eine sehr beschränkte Wirkung entfalten (vgl. hierzu Abschnitt 2.3).

4.2 Regeln für den Leiterplattenentwurf

4.2.1 Allgemeines

Ein EMV-gerechter Leiterplatten- und Geräteentwurf muss von Anfang **die Vermeidung der typischen Koppelmechanismen** zum Ziel haben. Obwohl die Anforderungen und möglichen Fehler sehr vielfältig sein können, lassen sich einige Regeln angeben, deren Einhaltung zwar noch nicht EMV-Problemfreiheit garantiert, aber dennoch sehr empfehlenswert ist. Sie sind in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

4.2.2 Anzahl der Lagen bei Leiterplatten und Massekonzept

Sobald EMV-Probleme zu erwarten sind (d.h. praktisch immer!), sollte man mindestens eine **zwei-lagige Leiterplatte** als Minimallösung ansehen. Die eine Leiterschicht sollte man **grossflächig mit Masse** belegen.

Ist die Komplexität eher hoch, so dass eine Lage zur Verdrahtung nicht ausreicht, ist es von Vorteil, eine **vierlagige Leiterplatte** zu verwenden, anstatt die Massefläche zu unterbrechen.

Falls die Massefläche trotzdem unterbrochen werden muss, ist es wichtig dafür zu sorgen, dass Hin- und Rückweg von empfindlichen (Immunität) oder störenden (Emission) Signal- oder Speiseleitungen **keine Fläche aufspannen**, da ansonsten eine magnetische Kopplung begünstigt wird. Fig. 20 zeigt ein gutes und ein schlechtes Beispiel.

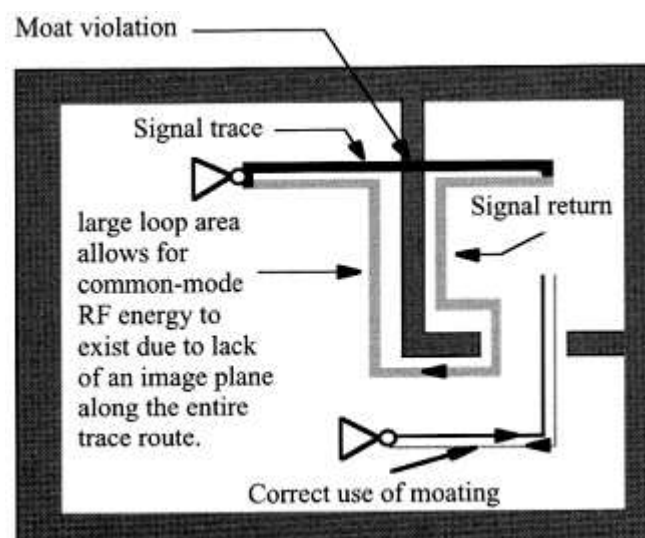


Fig. 20 Gutes und schlechtes Beispiel der Signalführung bei Leiterplatten mit unterbrochener Massefläche (moat = Graben; aus [3])

Bei hohen Frequenzen ist ferner zu beachten, dass Schlitze in Masseflächen wie auch nicht angeschlossene Leiterinseln als **Resonatoren** wirken können.

- Der Einsatz von **Durchführungskondensatoren und -filter** hilft gegen hochfrequente Störungen (ab MHz).
- Die Verwendung **geschlossener leitender Schirme** verhindert HF-Strahlungskopplung bei grossen Dynamikbereichen auf kleinem Raum.
- Die Verwendung von **Logikfamilien mit kontrollierten Flankensteilheiten** (nicht schneller als nötig!) reduziert Störungen aufgrund hochfrequenter Signalkomponenten.
- Bei etwas kniffligeren Problemen empfiehlt es sich fast immer, frühzeitig einen **Experten** (Berater) beizuziehen, der auch mit einem **Messlabor** zusammenarbeitet.

5 Literatur

- [1] Adolf J. Schwab, *Elektromagnetische Verträglichkeit*, Springer Verlag, Berlin, 4. Auflage, 1996 (ETH-Bibliothek Nr. 311 270)
- [2] Tim Williams, *EMC for Product Designers – Meeting the European Directive*, Newnes 2001 (ETH-Bibliothek Nr. 313 574)
- [3] Mark I. Montrose, *Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance: a Handbook for Designers*, IEEE Press, New York, 2000 (ETH-Bibliothek Nr. 313 212)