

Störsicherer Entwurf von elektronischen Geräten und Komponenten (EMV)

1. Was versteht man unter Elektromagnetischer Verträglichkeit?

In elektrischen Einrichtungen fließen Ströme und es treten Spannungen auf, deren Auswirkungen sich nicht nur auf das Innere des Geräts beschränken. Über die Zuleitungen für die Primärenergie (Netz- oder Batterieanschluss) wie auch über Signalleitungen können über die gewünschten Signale hinaus unerwünschte Störsignale nach außen geführt werden. Ein elektrisches oder elektronisches Gerät kann damit unter Umständen ein anderes, in seinem Einflussbereich liegendes Gerät in seiner Funktion beeinträchtigen. Dies kann bis zur völligen Funktionsuntüchtigkeit gehen. Im schlimmsten Fall kann es sogar dauerhaft beschädigt werden. Was hier als Störung eines zweiten Geräts durch ein erstes beschrieben wurde, kann aber gerade so gut für zwei Funktionsmodule (z.B. Leiterplatten) innerhalb ein und desselben Geräts gelten. Wie stark ein Gerät durch ein störendes in seiner Funktion beeinträchtigt wird, hängt nicht nur von der Störgrösse ab, sondern auch von seiner Störempfindlichkeit. Jedes Gerät kann sowohl Störer als auch gestörtes Gerät sein.

Unter Elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) ordnet man alle Fragen ein, welche mit der Funktion von Geräten in einem elektromagnetisch „verseuchten“ Umfeld zu tun haben. Die genaue Definition nach VED 0780 lautet:

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

Alle elektrischen und elektronischen Geräte sind grundsätzlich einerseits Störer, können andererseits aber auch gestört werden. Die Frage ist einzig, wie stark ist die von einem Gerät ausgehende Störwirkung und wie empfindlich ist es gegen Störungen von aussen. Ein paar Beispiele mögen dies verdeutlichen. Eine elektrische Heizung verursacht in ihrer Umgebung ein elektrisches und magnetisches Wechselfeld mit 50 Hz. Das zugehörige elektrische Feld ist nicht abhängig davon, ob ein Strom fliesst oder nicht, es ist im ganzen Haus im Wesentlichen unabhängig von der Belastung. Anders das magnetische Feld. Bei einer grösseren Heizung fliesst ein beträchtlicher Strom, welcher ein entsprechend starkes magnetisches Feld erzeugt. Ob dieses stört, ist abhängig davon, ob ein gestörtes Gerät auf ein solches empfindlich reagiert, z.B. ein PC-Monitor.

Überall dort, wo grosse Ströme geschaltet werden oder wo Funken entstehen (z.B. Kollektoren von Elektromotoren) entstehen ausgeprägte Störfelder, welche z.T. nicht leicht einzudämmen sind. Nochmals anders liegen die Verhältnisse bei einem Radio- oder Fernsehempfänger. Jeder Empfänger besitzt intern einen sog. Lokaloszillator, welcher zum Umsetzen des Empfangssignals auf eine feste Zwischenfrequenz benötigt wird. Dieser Oszillator erzeugt also eine Wechselfrequenz, welche bei ungünstigem Entwurf des Geräts von diesem abgestrahlt werden kann. Aus dem Empfänger ist damit ein Störsender auf der Lokaloszillatorfrequenz geworden. Fast jedes Gerät enthält intern Oszillatoren, deren Signale über Kabel oder drahtlos nach aussen abgegeben werden können. Beispiele dazu sind Taktgeneratoren in PC's und anderen digitalen Geräten, Zeilenablenkfrequenz eines Monitors, usw.

Die wohl schwierigste Aufgabe bei der Behandlung von EMV-Problemen ist die Frage nach der Art der Störbeeinflussung. Fig 1 zeigt das grundsätzliche Modell, nach welchem die Störung erfolgt. Eine Störquelle, in der Regel eben ein elektrisches oder elektronisches Gerät, wirkt als Sender und beeinflusst über einen Koppelmechanismus ein zweites Gerät, welches als Empfänger für das Störsignal funktioniert. 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.

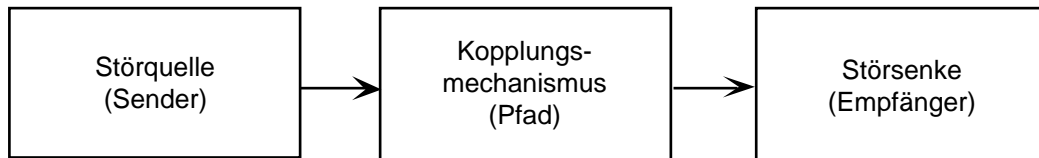


Fig.1 Beeinflussungsmodell mit Störquelle, Koppelmechanismus und Störsenke

Nach Fig. 2 unterscheidet man vier verschiedene Koppelmechanismen, welche nachfolgend näher erläutert werden. Für jeden dieser Koppelvorgänge gibt es geeignete Schutzmassnahmen, mit denen der Störeinfluss verringert werden kann. Stellt man bei einem Gerät eine zu grosse Störabstrahlung oder Störbeeinflussung fest, so gilt es, mit geeigneten Messungen die Art der Kopplung herauszufinden. Anschliessend müssen am Gerät Verbesserungen vorgenommen werden.

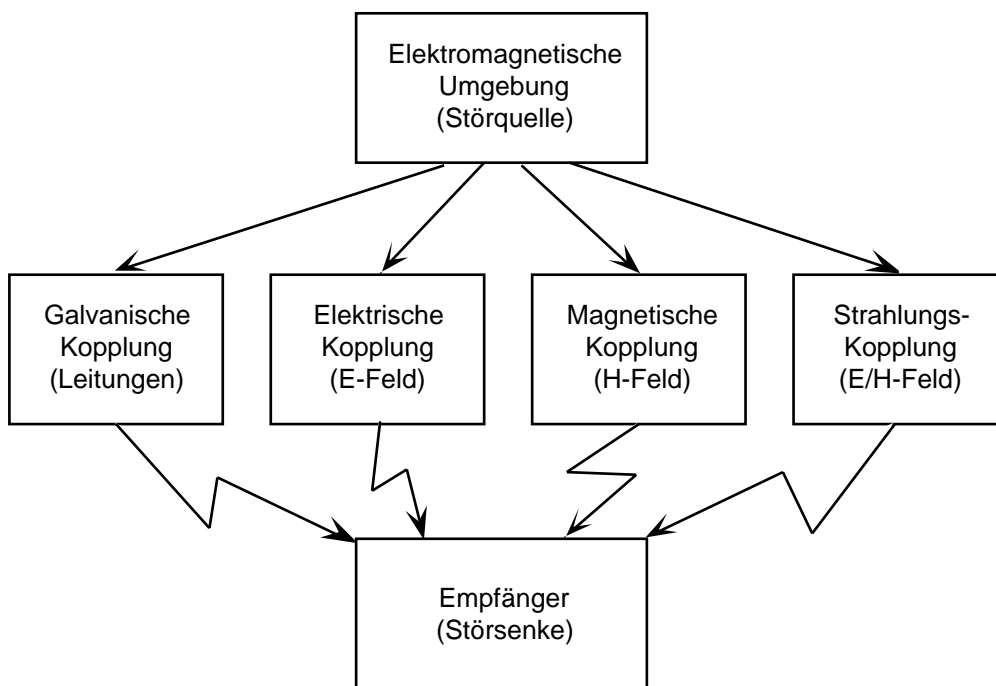


Fig. 2 Kopplungsmechanismen elektromagnetischer Beeinflussungen

Leider bedeuten die zu ergreifenden Massnahmen oft eine radikale Umgestaltung von Leiterplatten, Geräteverdrahtungen oder des gesamten Aufbaus eines Geräts, vor allem auch des Gehäuses. Dies hat bei einer laufenden oder bereits abgeschlossenen Entwicklung grosse zusätzliche Aufwendungen und Kosten zur Folge und darüber hinaus oft auch Lieferverzögerungen mit allen Konsequenzen von unzufriedenen Kunden bis und mit dem Verlust von Aufträgen. Es gibt heute kein wichtiges Anwendungsgebiet mehr für elektrische und elektronische Geräte, in welchem nicht strenge EMV-Normen eingehalten werden müssen.

Dies gilt in der Regel sowohl für das Gerät als Störer wie auch bezüglich seiner Störimpfindlichkeit. Kein Elektroingenieur, der noch irgend etwas mit Hardware zu tun hat, wird deshalb um minimale Kenntnisse von EMV und geeignete Massnahmen dazu herumkommen.

2. Kopplungsmechanismen und Gegenmassnahmen

2.1 Gegentakt- und Gleichtaktstörungen

Ein grundlegendes Thema in der EMV-Technik sind Störungen in symmetrischen Stromkreisen. Darunter versteht man Stromkreise, bei welchen Hin- und Rückleiter von Masse getrennt sind. Masse oder Erde bildet einen dritten Leiter, so dass ein symmetrischer Stromkreis ein **Dreileitersystem** bildet. Manchmal ist die Masse in symmetrischer Weise mit dem Stromkreis verbunden, wie dies Fig. 3a zeigt. Typische symmetrische Stromkreise sind die Telefonverbindung zwischen Teilnehmer und Anschlusszentrale, viele Verbindungen in Messsystemen zwischen Sensoren und Elektronik oder auch die Verbindungen bei symmetrischen Datenverbindungen (RS422 bzw. V.11). Zu den asymmetrischen Verbindungen gehören dagegen alle Verbindungen auf der Basis von Koaxialleitungen.

In symmetrischen Verbindungen treten Störungen auf zwei Arten auf, welche sich unterschiedlich auf das Nutzsignal auswirken. Viele Störfälle können mit einer symmetrischen Verbindung reduziert werden, was auch der häufige Grund für deren Anwendung ist.

Gegentaktstörungen (differential mode, odd mode): Diese treten zwischen den beiden Leitern einer symmetrischen Schaltung auf, Fig. 3. Die Störspannungsquelle $\underline{U}_{s\text{gg}}$ und der resultierende Störstrom $\underline{I}_{s\text{gg}}$ sind in Serie mit der Nutzspannungsquelle $\underline{U}_{\text{nutz}}$ und dem Nutzstrom. Nutz- und Störsignal können in diesem Fall sowohl bei symmetrischem Betrieb als auch bei asymmetrischem nicht voneinander getrennt werden.

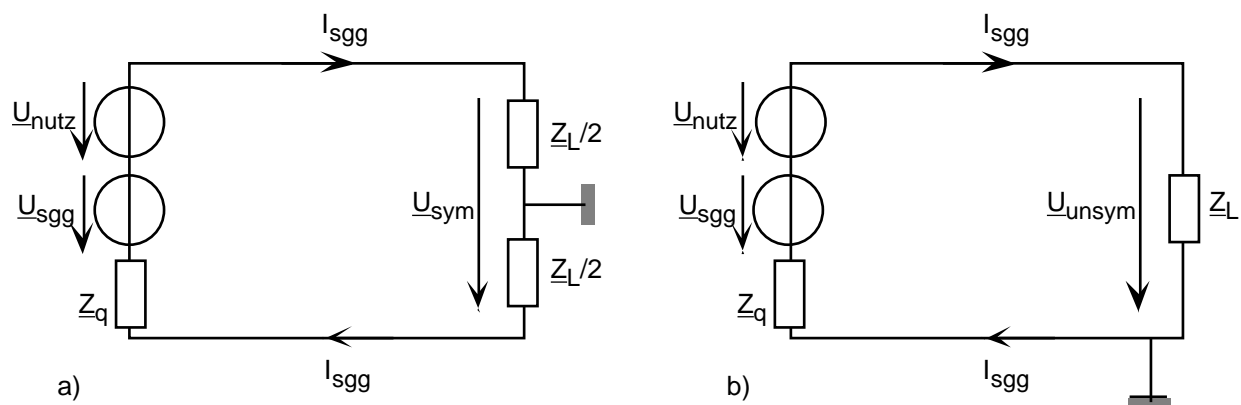


Fig. 3 Gegentaktstörungen. Sie treten in Serie zum Nutzsignal auf und können von letzterem nicht getrennt werden. a) Symmetrischer Stromkreis (erdfrei) und b) unsymmetrischer Stromkreis, bei dem eine Seite von Generator und Last an Erde liegt. In a) sind die Störungen wie das Nutzsignal selber ein symmetrisches Signal, in b) je ein unsymmetrisches Signal

Gleichtaktstörungen (common mode, even mode): Die Störspannung $\underline{U}_{s\text{gl}}$ tritt zwischen den beiden Leitern, welche über die Nutzquelle miteinander verbunden sind, und Masse oder Erde auf. Der Einfluss der Störquelle auf den Nutzlastwiderstand kann nach dem Überlagerungsprinzip bestimmt werden. Solange die Nutzlast bezüglich der Störquelle im Brückenweig einer Brückenschaltung liegt, ist die Störspannung in der Nutzlast null (Fig. 4a und b). Sobald aber eine Asymmetrie auftritt, wie sie z.B. in Fig. 5 durch ungleiche

Streukapazitäten an den beiden Klemmen der Nutzlast verursacht wird, findet eine Kopplung von Störquelle zu Nutzlast auf. Man spricht auch von der **Gleichtakt-/Gegentaktkonversion**.

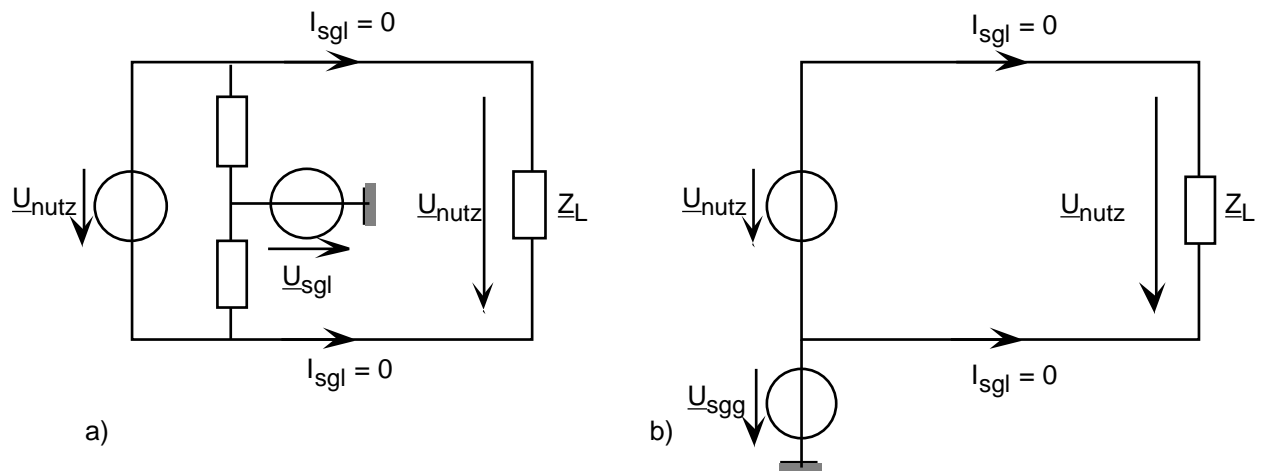


Fig. 4 Gleichtaktstörungen treten zwischen einzelnen Signaladern und der Bezugsmasse auf, z.B. als transiente Erdpotentialanhebung. a) Symmetrisch betriebener Stromkreis und b) asymmetrisch betriebener Stromkreis. In beiden ist die Störspannung in der Nutzlast 0, da der Störkreis nicht geschlossen ist.

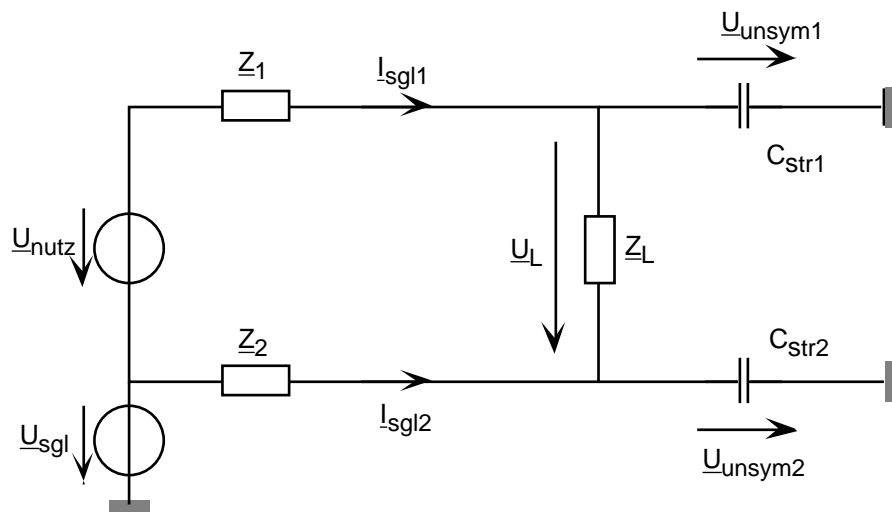


Fig. 5 Gleichtaktstörungen wirken sich sofort aus, falls der Störkreis geschlossen wird und die Nutzlast von der Störquelle aus gesehen nicht mehr im Brückenweig einer abgeglichenen Brücke liegt (im Beispiel sind es die ungleichen Streukapazitäten, welcher zu einer Verstimmung der Brücke führen, trotz $Z_1 = Z_2$).

Erde und Masse: Noch einige Bemerkungen zum Unterschied zwischen Erde und Masse. In fast allen Geräten und Systemen wird zwischen diesen beiden Anschlüssen unterschieden. Unter Erde versteht man den Schutzleiter, welcher dem Schutz von Mensch, Tier und

Sachwerten dient, und der Masse, dem gemeinsamen Bezugsleiter elektrischer Stromkreise. Erde und Masse sind in der Regel an einer Stelle miteinander verbunden. Es gibt aber einen grossen Unterschied [1, Seite 38]:

Erdleiter führen nur im Fehlerfall Strom, Masseleiter führen betriebsmässig Strom und stellen häufig den gemeinsamen Rückleiter mehrerer Signalkreise dar.

Es gibt zahlreiche synonyme Begriffe für Erde wie Masse:

- Erde = Schutzleiter, Erdung, Schutzerdung, Gehäuseerde, Stationserde
earth ground, protective earth, fault protection, equipment ground, safety ground
- Masse = Neutralleiter, Schaltungsmasse, Signalreferenz, Signalmasse, Messerde, 0 V
signal ground, signal reference, control common, circuit common, neutral

Wo die beiden Erden miteinander verbunden werden sollen, ob nur an einer Stelle oder an mehreren, kann nicht generell beantwortet werden. Beim zentralen Massepunkt, werden die einzelnen Schaltungen sternförmig an diesen Massepunkt geführt, welcher dann meist auch mit der Schutzerde verbunden ist. Bei der verteilten oder Flächenmasse verwendet man eine möglichst grossflächige Masse, welche dann an einer Stelle mit Erde verbunden wird. Je höher die Frequenz, umso eher wird man zur Flächenmasse übergehen müssen. Dies schon aus dem praktischen Grund, da dann häufig koaxiale Verbindungen nach außen verwendet werden, welche normalerweise keine Unterscheidung zwischen Erde und Masse zulassen, da der Schirm der Koaxialkabel fast immer ans Gehäuse angeschlossen werden muss.

2.2 Galvanische Kopplung¹

Die galvanische Kopplung tritt dann auf, wenn zwei oder mehr Stromkreise einen gemeinsamen Leiter (allgemeiner eine gemeinsame Impedanz) besitzen. Fig. 6a zeigt schematisch diesen Fall. Die Störquelle \underline{U}_{qs} erzeugt eine Störspannung \underline{U}_s über der gemeinsamen Impedanz \underline{Z}_k , welche für kleine Koppelimpedanzen mit nahezu gleichem Wert auch über $\underline{Z}_q + \underline{Z}_L$ auftritt. In diesem Fall ist $\underline{U}_L = (\underline{U}_q - \underline{U}_s) \cdot \underline{Z}_L / (\underline{Z}_q + \underline{Z}_L)$. Eliminiert man die Koppelimpedanz, so verschwindet die Störspannung.

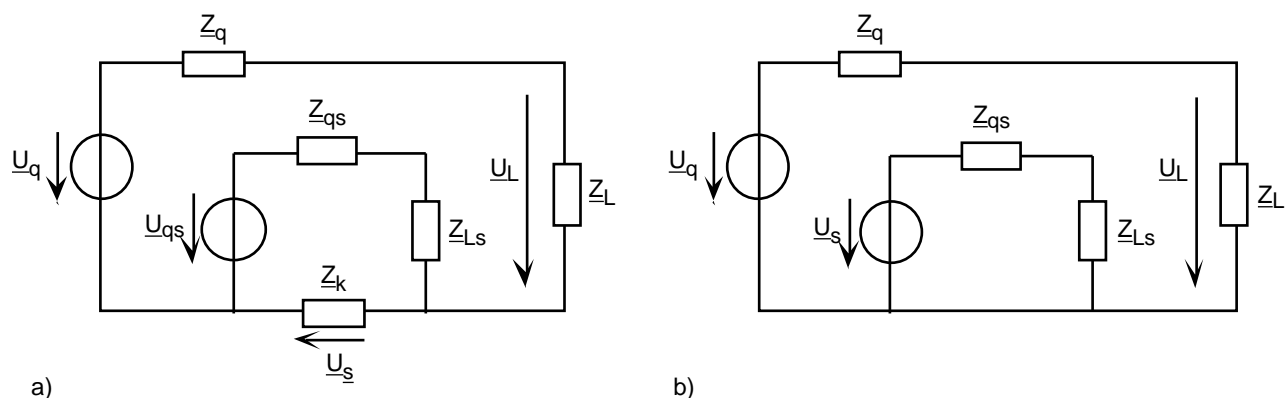


Fig. 6 Galvanische Kopplung: a) Entstehung von Störspannungen in Stromkreisen mit gemeinsamer Impedanz \underline{Z}_k . b) Abhilfe durch Eliminierung der Koppelimpedanz.

¹ Die kapazitive, induktive und galvanische Kopplung wurden in den Versuchen „Kapazitive und induktive Störungen“ sowie „Galvanische Störungen und Erdschleifen“ im Rahmen des Praktikums zur Elektrizitätslehre ausführlich behandelt. Sie sind hier der Vollständigkeit halber nochmals aufgeführt.

Galvanische Kopplungen treten z.B. dann auf, wenn mehrere Lasten (Geräte, Leiterplatten etc.) an ein gemeinsames Netzgerät mit endlichem Innenwiderstand und/oder langen gemeinsamen Leitern angeschlossen werden (Fig. 7a). 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 Induktivität der gemeinsamen Zuleitung erzeugen diese eine induktive Spannung, welche ohne weiteres zu Störungen in einer der angeschlossenen Schaltungen führen kann.

Gegenmassnahmen:

- Z_k verkleinern, z.B. mit dickeren und kürzeren Leitern
- Falls es sich bei den gemeinsamen Leitern um Speise- und Erdleitungen handelt: Dickere Leiter oder ganze Erd- und Speisungsflächen (4-lagige Leiterplatten) verwenden.
- Kreise entkoppeln mit völlig getrennter Leitungsführung, z.B. analoge und digitale Schaltungsteile separat speisen (Fig. 7c), oder getrennte Leitungen für verschiedene Schaltungsteile ab Speisegerät führen (Fig 7b).

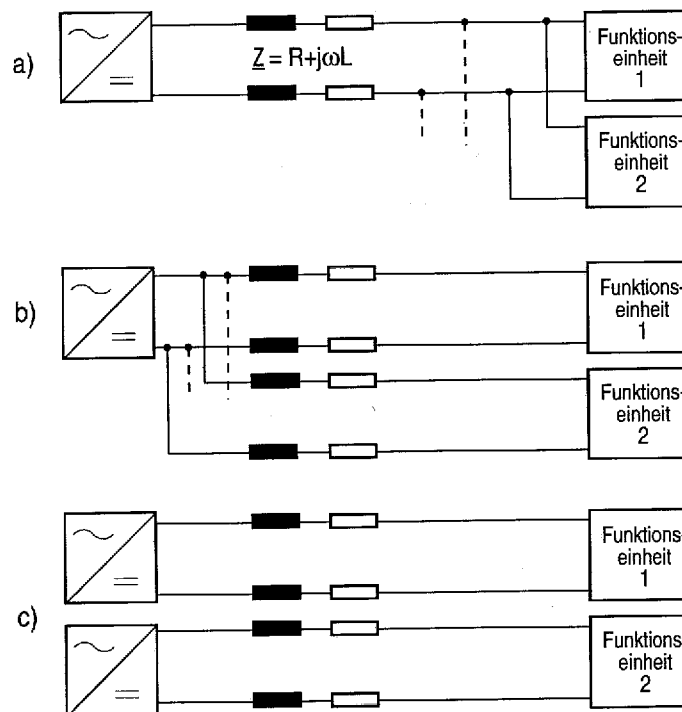


Fig. 7 a) Galvanische Kopplung bei gemeinsamer Speisung. Gegenmassnahmen: b) Speiseleitungen getrennt ab Speisegerät und c) getrennte Speisegeräte.

Oft ist man sich bei galvanischen Störungen nicht bewusst, dass diese durch eine gemeinsame Impedanz im Stromkreis zu Stande kommen. So kann es sein, dass ein schwaches Signal einen knapp dimensionierten Erdfeld auf einer Leiterplatte verwendet, über den auch grosse Erdströme einer digitalen Schaltung fliessen. Letztere dürften, wenn die Speiseanschlüsse der digitalen Schaltung nicht richtig mit einer genügend grossen Kapazität gestützt wurden, zu überlagerten Störspitzen beim schwachen Nutzsignal führen. Besonders kritisch in dieser Hinsicht sind Leiterplatten auf denen heikle analoge Schaltungen, z.B. A/D-Wandler und schnelle Prozessoren vereint sind. Dasselbe gilt natürlich auch, wenn in einem

Sender/Empfänger starke Senderstufen und empfindliche Empfängerschaltungen nahe beieinander liegen.

Galvanische Kopplung: Spezialfall Erdschleife

Erdschleifen, berüht beispielsweise vom Brummen bei Verstärkeranlagen, erzeugen ebenfalls Störungen infolge galvanischer Kopplungen. Der Störkreis kommt durch Mehrfacherdung zustande (Fig. 8). Die Störspannung entsteht durch induktive Einkopplung in die Schleife, welche durch die doppelte Erdung der Geräte einmal über den Mantel des Koaxialkabels und ein zweites Mal über die Schutz Erde der beiden Geräte entsteht. Die gemeinsame Koppelimpedanz Z_k bildet in Fig. 8 der Aussenleiter des Koaxialkabels, oder in andern Fällen die direkte Masseverbindung zwischen Signalquelle und Empfänger.

Gegenmassnahmen:

- Falls realisierbar, wird die Erdverbindung bei der Quelle oder Senke aufgetrennt. Oft ist dies aber aus Gründen der Schutz Erdung nicht möglich.
- Müssen nur Wechselstromsignale übertragen werden, so kann die galvanische Verbindung mit einem Trenntransformator unterbrochen werden. Achtung, die Kapazität zwischen den beiden Transformatorwicklungen ergibt bei höheren Frequenzen eine kapazitive Verbindung, welche die Wirkung des Trenntransformators mit zunehmender Frequenz immer mehr reduziert. Diese Kopplung kann mit einer metallischen Abschirmung zwischen den beiden Wicklungen, die an Erde liegt, unterbunden werden.

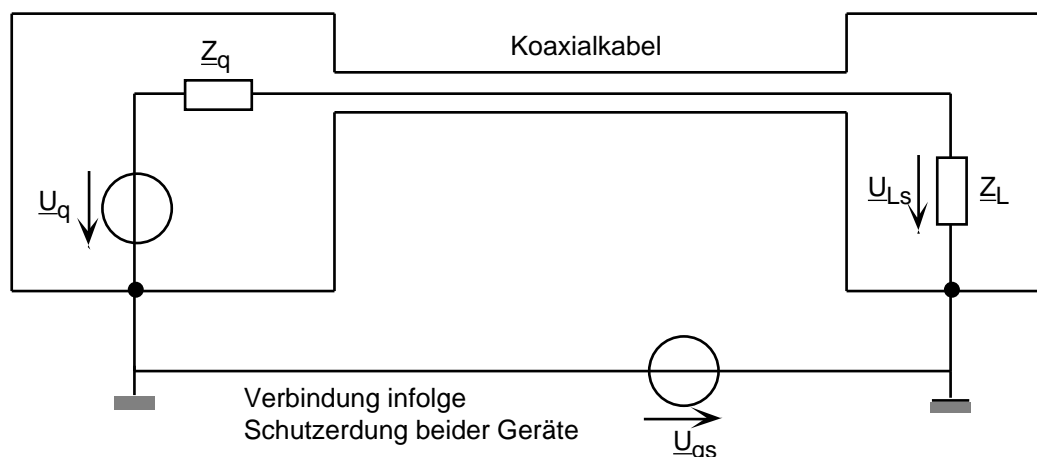


Fig. 8 Erdschleife durch Mehrfacherdung

- Bei niedriger Quellen- und Lastimpedanz teilt sich der Störstrom mehr oder weniger gleichmässig auf die beiden Signalleiter auf. Es handelt sich um Gleichtaktströme I_{sgl} , während der Signalstrom ein Gegentaktstrom ist. Ein Neutralisierungstransformator (Fig. 9) unterdrückt den Gleichtaktstrom, da für diesen die beiden Windungen parallel liegen und somit eine grosse Längsinduktivität im Stromkreis liegt. Der Gegentaktstrom hingegen führt zu keinem magnetischen Fluss im Ringkern, da für diesen die Durchflutung bei idealer Kopplung null ist. Der Neutralisierungstransformator eignet sich zur Gleichtaktunterdrückung immer dann, wenn die Verbindung gleichstromgekoppelt oder sehr breitbandig sein muss.

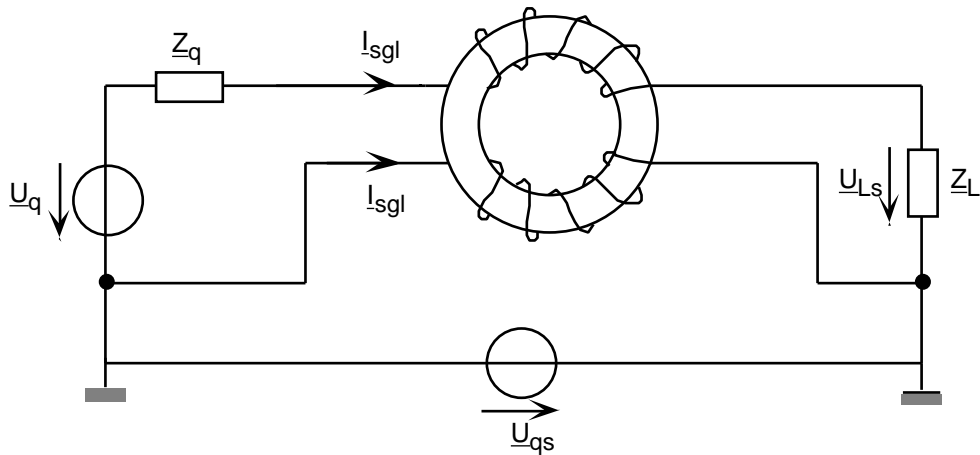


Fig. 9 Neutralisierungstransformator

- Ferritperlen auf dem ganzen Kabel entsprechen einem Neutralisierungstransformator mit einer einzigen Windung auf dem Kern. Man findet sie sehr oft bei Monitor- und andern Kabeln bei Computerverdrahtungen.
- Baut man den Empfänger mit einem Differenzverstärker auf (siehe Fig. 10), so erreicht man eine sehr gute Unterdrückung von Störsignalen infolge von Erdschleifen. Die Voraussetzung ist allerdings, dass beide Eingänge beim Empfänger erdfrei angelegt werden können. Vor allem muss die Eingangsimpedanz des Differenzverstärkers Z_{ein} gross gegenüber Z_q sein. Nur dann erzeugt die Störquelle eine reine Gleichtaktausteerung des Differenzverstärkers, welche mit der Gleichtaktunterdrückung von bis zu 80 dB gegenüber der Signalverstärkung abgeschwächt wird. Das Ausgangssignal entspricht dann weitestgehend nur dem verstärkten Nutzsignal U_q . Bei höheren Frequenzen geht die Gleichtaktunterdrückung des Verstärkers allerdings zurück. Ungleiche Streukapazitäten von beiden Signalleitern gegen Masse stören zusätzlich die Symmetrie der Schaltung und führen zu einer weiteren Reduktion der Gleichtaktunterdrückung mit zunehmender Frequenz.

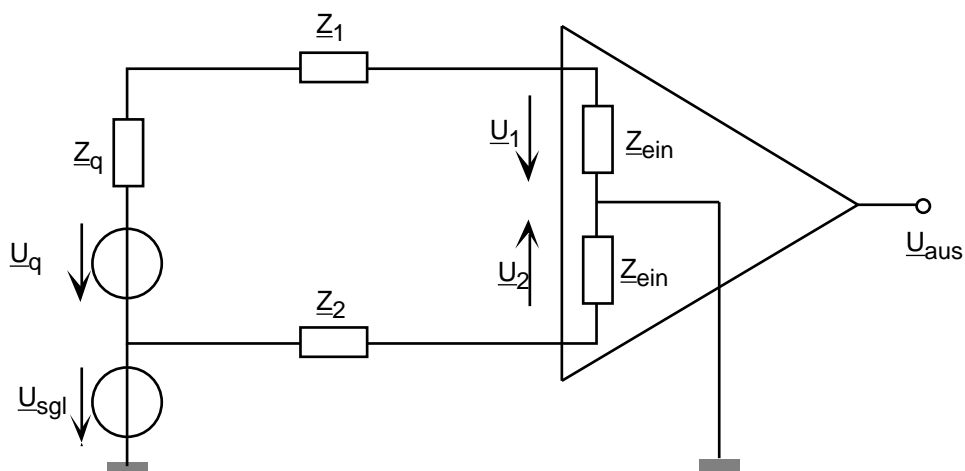


Fig. 10 Differenzverstärker zur Unterdrückung von Gleichtaktstörungen

- Eine praktisch ideale Störunterdrückung bringen Verbindungen über einen Optokoppler oder eine faseroptische Strecke.

Bei Verbindungen zwischen Sender und Empfänger mit einem Koaxialkabel fällt die Koppelimpedanz \underline{z}_k bei höheren Frequenzen gegen null ab, da mit kleiner werdender Eindringtiefe (Skinneffekt) die beiden Kreise entkoppelt werden. Entkopplung tritt also dann auf, wenn die Mantelstärke ein Mehrfaches der Eindringtiefe beträgt. Dies gilt nur für Kabel mit einem massiven Aussenleiter und nicht für solche mit einem Geflecht, bei welchen \underline{z}_k nach einer anfänglichen Abnahme wieder ansteigt, da das magnetische Feld durch die Schlitze im Geflecht zunehmend hindurch dringt.

2.3 Kapazitive Kopplung

Erfolgt die Einkopplung eines Störsignals über das relativ langsam ändernde elektrische Feld (quasistatisches Feld), so spricht man von kapazitiver Kopplung. Sehr häufig geschieht dies vom Netz her, wie in Fig. 11 gezeigt. Das Feldmodell von Fig. 11a kann durch eine Ersatzschaltung mit den beiden Streukapazitäten C_{st1} und C_{st2} ersetzt werden. Die eingekoppelte Störspannung an der Nutzlast, \underline{U}_{Ls} , ergibt sich aus einer Spannungsteilung zwischen der Reaktanz von C_{st1} und der Parallelschaltung von \underline{Z}_q und \underline{Z}_L . Sie ist dann besonders gross, wenn sowohl \underline{Z}_q als auch \underline{Z}_L hochohmig sind. Dies ist z.B. immer bei einer KO-Probe der Fall, die an einen sonst nicht weiter verbundenen Draht angeschlossen ist.

Gegenmassnahmen:

Die kapazitiven Störeinflüsse können mit einem niederohmigen Nutzkreis stark verringert werden. Fast vollständig eliminieren kann man sie durch Abschirmung der Schaltung mit einem geerdeten Schirm, also z.B. bei Leitungen mit einem Koaxialkabel (Fig. 12), bzw. einem geschirmten Mehrleiterkabel. Durch den Schirm werden die über die Streukapazität fliessenden Störströme direkt nach Masse abgeleitet.

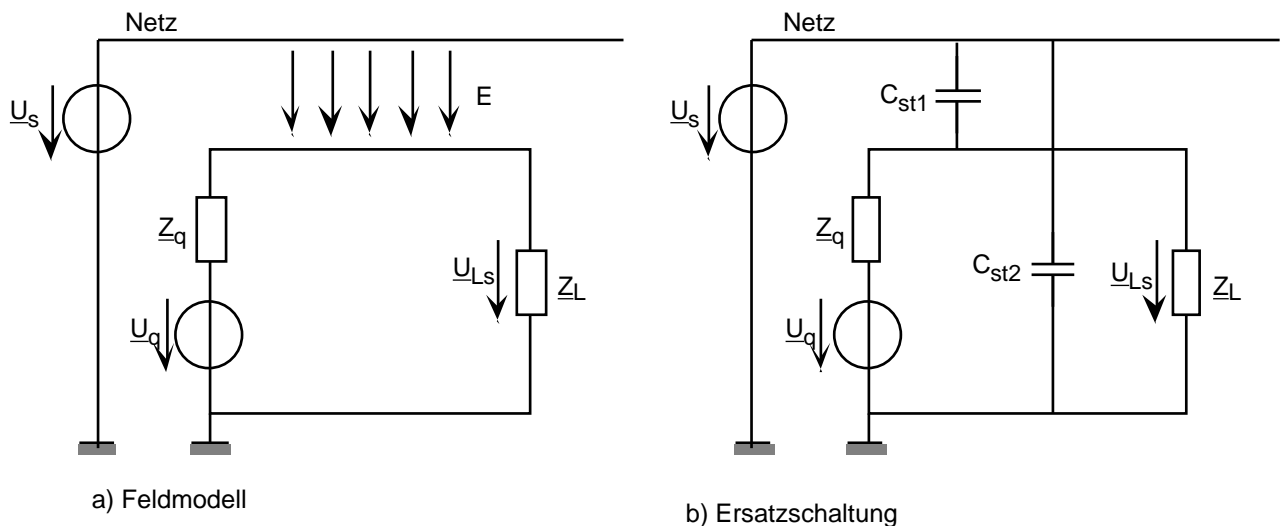


Fig. 11 Elektrische Kopplung zweier Stromkreise über das quasistatische elektrische Feld

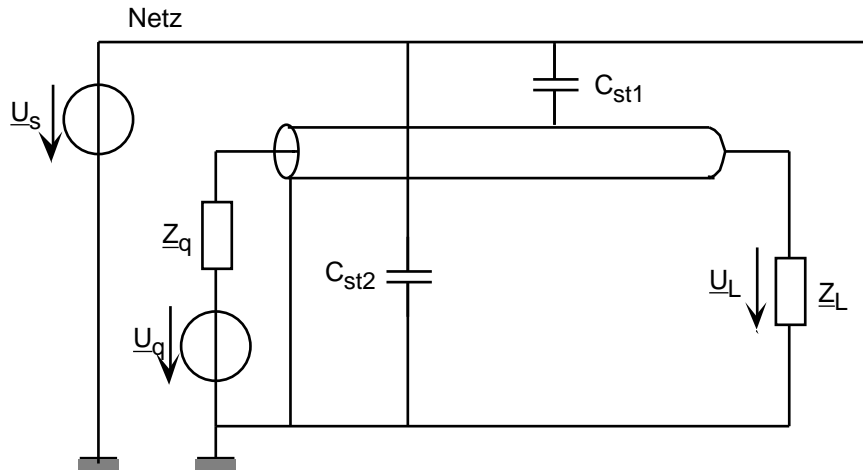


Fig. 12 Verringerung kapazitiver Kopplung durch einen geerdeten Schirm

2.4 Induktive Kopplung

Erfolgt die Einkopplung von Störungen über das magnetische Feld, so spricht man von induktiven Störungen. Fig. 13. zeigt die prinzipielle Anordnung sowohl als Feldmodell, wie auch als Ersatzschaltung, bei welcher die induktive Kopplung mittels gekoppelter Spulen dargestellt ist. Induktive Störungen können von grossen Netzströmen verursacht werden. Bei höheren Frequenzen können aber auch andere Quellen bei kleineren Strömen zu störenden Störspannungen führen.

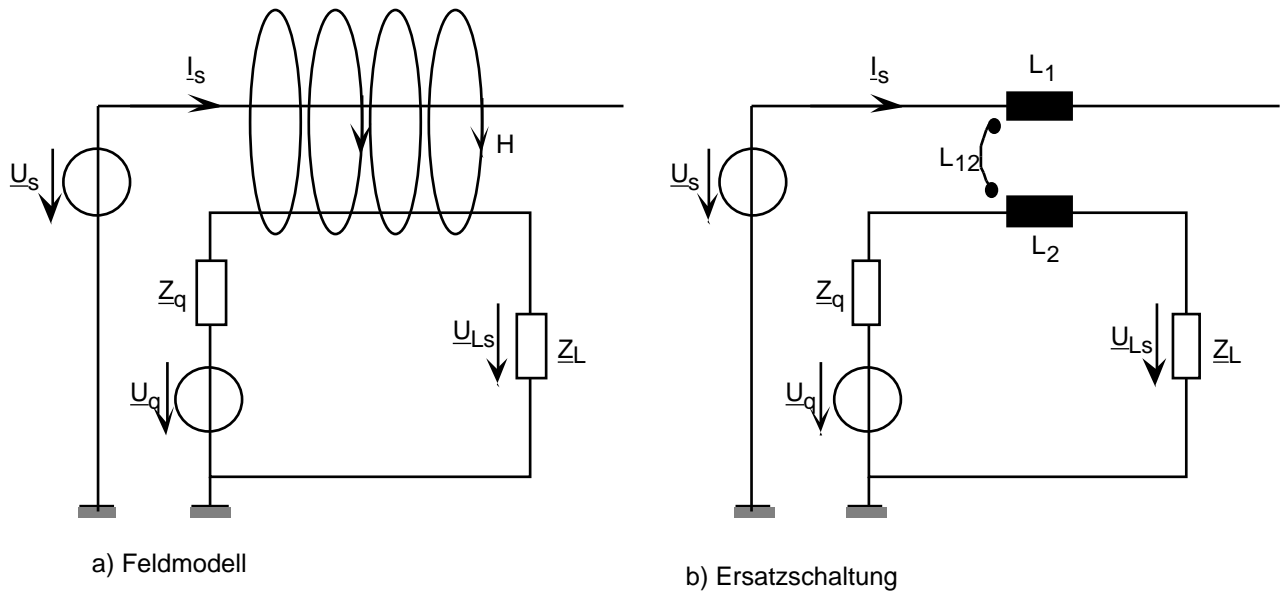


Fig. 13 Beispiel für die magnetische Kopplung zweier Stromkreise über das quasistatische magnetische Feld

Geeignete **Gegenmassnahmen** gibt es hier in grösserer Zahl.

- Schleife verkleinern (Drähte verdrillen). Dies ist die einfachste und meist sehr wirksame Gegenmassnahme.
- Vergrössert man den Abstand zwischen Störkreis und Nutzkreis, so lässt sich der Störeinfluss auch rasch verkleinern. Manchmal ist dies aber nicht möglich.
- Durch geeignete orthogonale Anordnung der Schleifen kann die Kopplung wesentlich reduziert werden. So sollte z.B. die parallele Leitungsführung möglichst kurz gehalten werden.
- Die Schaltung von Fig. 14 bietet bei Frequenzen bis ca. 1 MHz den besten Schutz gegen alle Arten von Störeinflüssen (galvanisch, kapazitiv und induktiv).

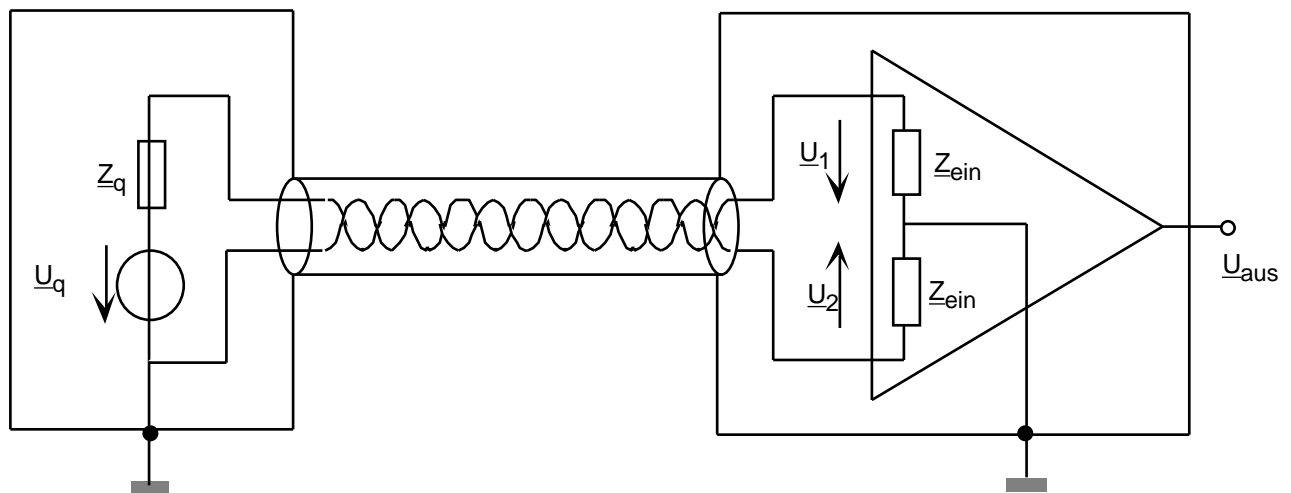


Fig. 14 Optimaler Schutz mit verdrehter, abgeschirmter Leitung und erdfreiem Differenzeingang beim Empfänger.

2.5 Strahlungskopplung

Sind die Abmessungen des Geräts oder die Verbindungen zwischen Geräten, welche Störspannungen aufnehmen, nicht mehr klein gegenüber der Wellenlänge der Störquelle, so erfolgt die Kopplung nicht nur über das magnetische oder elektrische Feld, sondern es sind beide Felder an der Kopplung beteiligt. Man spricht dann von Strahlungskopplung, da man dann davon ausgehen kann, dass sich der gestörte Apparat im Fernfeld eines elektromagnetischen Strahlers befindet. (zur Definition des Übergangs vom Nahfeld zum Fernfeld einer Antenne siehe Beilage Antennen). Im Fernfeld einer Antenne sind beide Felder, das elektrische und das magnetische vorhanden und das Verhältnis von E/H in Transversalrichtung entspricht dem freien Feldwellenwiderstand $\eta_0 = 377 \Omega$. In den meisten Fällen entsprechen Störquellen keinen Antennen mit ausgeprägter Richtwirkung, so dass dies schon im Abstand von $\lambda/4$ vom Störer der Fall sein kann. Eine Störquelle bei 100 MHz ohne ausgeprägte Richtwirkung erzeugt also bereits im Abstand von 75 cm ein elektromagnetisches Feld, das ein elektronisches System stören kann.

Die Einkopplung im Fall der Strahlungskopplung geschieht sowohl kapazitiv als auch induktiv. Jeder Schaltungsteil der Störquelle ist je nach Ausführung eine potentielle Empfangsantenne und damit empfindlich auf Störungen. Gegen Strahlungskopplung gibt es nur ein gutes Rezept: Das gestörte Gerät möglichst vollständig in eine metallische Hülle einpacken. Dasselbe gilt natürlich umgekehrt auch für potentielle Störer, welche mit derselben Massnahme am Abstrahlen

unerwünschter Signale gehindert werden können. Selbstverständlich will man bei einem Funkgerät die gewollte Abstrahlung nicht verhindern. Der Schutz anderer Geräte vor Störungen durch solche Strahlung kann nur mit einem entsprechenden EMV-gerechten Entwurf dieser Geräte selber sichergestellt werden.

Elektromagnetische Kopplung tritt ebenfalls bei parallel verlaufenden Leitungen auf, wenn ihre Länge nicht mehr klein ist gegenüber der Wellenlänge. Sie bilden dann gekoppelte Leitungen, wie wir sie kurz im Kapitel der Richtkoppler behandelt haben. Zwei parallele Zweidrahtleitungen bilden z.B. einen sog. Rückwärtskoppler mit maximaler Kopplung, wenn die Länge der parallel geführten Leitungen $l/4 + n \cdot l/2$ ist.

Im folgenden Abschnitt werden Entstörkomponenten behandelt, welche geeignet sind, verschiedene Arten von Störungen bei Störseken zu reduzieren oder weitgehend zu verhindern

3. Entstörkomponenten

Unter der Bezeichnung Entstörkomponenten verstehen wir Filter, Überspannungsableiter und andere Komponenten, welche sowohl auf der Seite des Störsenders zur Reduktion der Emissionen als auch auf der Seite des Störempfängers zur Verringerung der Störempfindlichkeit eingesetzt werden können. Diese Komponenten werden überall dort eingesetzt, wo Leitungen verschiedenster Art (Speise-, Steuer- und Signalleitungen) durch geschirmte Gehäusewände hindurch geführt werden müssen. Ein weiteres Thema sind Schirme und Verbindungselemente zwischen einzelnen Schirmteilen wie Federleisten und leitende Gummidichtungen, welche einen entscheidenden Beitrag zu einem EMV-gerecht konstruierten Gerät ausmachen.

Den besten Schutz sowohl gegen unerwünschte Abstrahlung als auch gegen unerwünschte Beeinflussung durch Störeinstrahlung bietet ein metallisch dichtes, d.h. rundum geschlossenes Gehäuse². Eine Teilfrage lautet damit, wie man in der Praxis solche metallisch rundum geschlossenen Gehäuse trotz abnehmbarer Deckel, ausziehbarer Einschübe oder abklappbarer Frontplatten bauen kann. Alle Geräte von praktischem Nutzen haben zudem zahlreiche Verbindungen nach aussen, seien das zu- und wegführende Leitungen, Antennenanschlüsse, Anzeigen, Druckknöpfe etc., welche durch die metallische Gehäuseschale dringen. Diese müssen, vereinfacht gesagt, so gestaltet sein, dass nur die gewünschten Ausschnitte aus dem gesamten Spektrum an den jeweiligen Anschlüssen durchgelassen werden. Jeder Ein- oder Ausgang muss deshalb grundsätzlich mit einem Filter ausgerüstet sein. Daneben gibt es aber Störungen, welche im richtigen Frequenzbereich liegen, deren Amplitude aber zu gross ist, z.B. Überspannungen infolge Blitzschlags. Gegen solche Störungen helfen Überspannungsableiter, welche die Amplituden der Eingangssignale auf einen unschädlichen Wert begrenzen.

3.1 Filter

Grundsätzlich eignen sich alle Formen von L-C-Filtern auch als Entstörfilter, angefangen von einem einfachen C parallel zur Leitung, über ein Filter zweiter Ordnung mit einem zusätzlichen Serie-L bis zu Filtern noch höherer Ordnung. Von den ersten beiden gibt es spezielle Bauformen, welche sich gut zum Einbau in Gehäusewände eignen, sog. Durchführfilter. Eine Sonderstellung nehmen Netzentstörfilter ein, da sie für Störungen im Gleichtaktmode eine höhere Störunterdrückung bieten als für den Gegentaktmode.

a) **L-C-Filter:** Fig. 15 zeigt je ein Tiefpassfilter erster und zweiter Ordnung. Beide sind eingebettet zwischen eine Quelle mit endlichem Quelleninnenwiderstand und eine endliche Last. Leider sind in vielen Störfällen der Quelleninnenwiderstand und der Lastwiderstand

2 Wir schliessen hier den Einfluss statischer oder langsam ändernder magnetischer Felder aus, welche gesondert behandelt werden müssen.

nicht genau bekannt. Es lässt sich daher die mit dem Filter erzielbare Dämpfung in der realen Anwendung nicht immer exakt errechnen. Die Hersteller von Entstörfiltern geben darum die Filterkurven für angenommene Widerstände, z.B. 50 Ω an. Die in einem konkreten Fall erzielbaren Werte müssen experimentell ermittelt werden. Das einfache Filter 1. Ordnung ist immer dann unwirksam, wenn der Quelleninnenwiderstand sehr klein ist. Dann ist man gezwungen ein Filter 2. Ordnung einzusetzen.

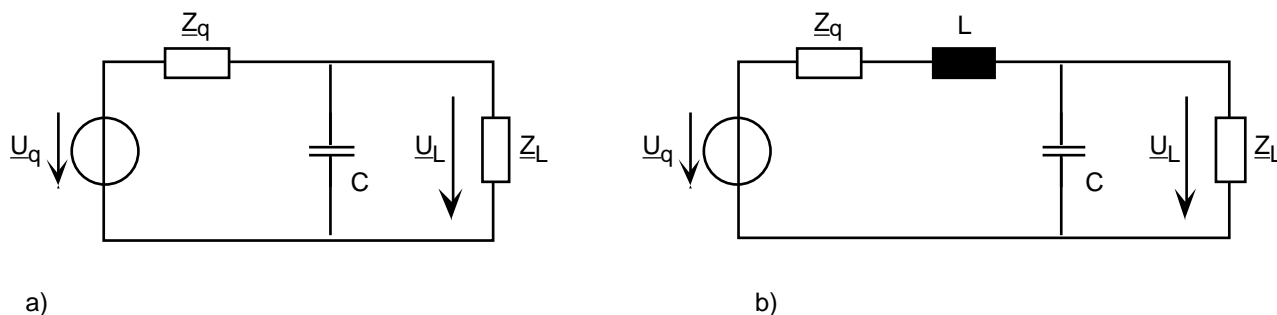


Fig. 15 Tiefpassfilter a) 1. und b) 2. Ordnung als Entstörfilter

Praktische L-C-Filter haben immer einen beschränkten Sperrbereich. So hört beispielsweise bei Tiefpassfiltern der Sperrbereich bei genügend hohen Frequenzen irgendwo auf und es treten unvorhersehbare Durchlassbereiche auf. Auch in diese fallen mögliche Störsignale, welche unterdrückt werden müssen. Ein Beispiel möge dies verdeutlichen. Der Eingang für ein digitales 2-Mbit/s-Signal kann sicher ab 5 MHz gesperrt werden. Ein normales L-C-Filter für diese Anwendung wird oberhalb von 200 MHz kaum noch eine garantierte Sperrdämpfung aufweisen. Man behilft sich in diesen Fällen mit Filtern mit verlustbehafteten Ferriten, welche sehr breite Sperrbereiche weit in den GHz-Bereich hinein gewährleisten. Die Spulen mit verlustbehafteten Ferriten wirken bei tiefen Frequenzen primär wie eine Spule. Mit zunehmender Frequenz wird infolge der Verluste im Ferritmaterial das Störsignal absorbiert. In einem Ersatzschema müsste man dessen Wirkung mit einem frequenzabhängigen Widerstand parallel zur Induktivität eintragen.

- b) Durchführkondensatoren oder -filter.** Bei diesen handelt es sich um spezielle Bauformen von Filtern, welche sich in eine Gehäusewand schrauben oder löten lassen. Das Entscheidende bei allen Entstörfiltern ist die kurze Verbindung von Innenleiter über das Parallel-C nach Masse. Man erreicht dies bei den Durchführ-C oder -filtern in optimaler Weise, indem der Mehrschichtkondensator direkt zwischen Innenleiter und Gehäuseteil, der in die Wand montiert werden kann, eingebaut wird (Fig. 16). Enthält das Element nur ein Parallel-C so spricht man von einem Durchführkondensator. Wird dem C noch ein Serie-L mit einem verlustbehafteten Ferritkern hinzugefügt, so spricht man von einem Durchführfilter. Diese erreichen über breite Frequenzbereiche Dämpfungswerte von 60 und mehr dB.
- c) Netzentstörfilter** sind so aufgebaut, dass sie auch sehr niederfrequente Gleichtaktstörströme I_{sgl} (vgl. Fig. 5) wirksam unterdrücken können. Sie enthalten zu diesem Zweck neben Kondensatoren einen Neutralisierungstransformator (vgl. Fig. 9). Fig. 17 zeigt das Schema eines Netzentstörfilters. Für Gleichtaktstörungen, wie sie von Erdschleifen entstehen können, wirken die beiden Kondensatoren C_y und die Hauptinduktivität der gekoppelten Spulen als Tiefpassfilter 2. Ordnung. Für diese Störungsart spielt C_x keine Rolle da es keine Spannung führt. Für Gegentaktstörungen, welche zu gleich polarisierten Strömen wie der Netzstrom führen, wirkt die Spule nur mit der viel kleineren Streuinduktivität. Dafür kommt für diese Störungen C_x zum Zug. R_E dient der Entladung der relativ grossen Kapazität C_x .

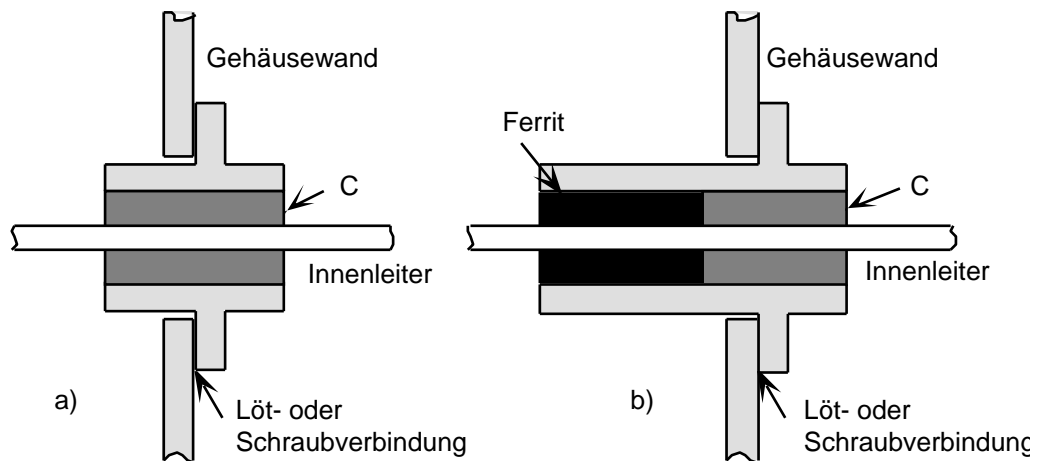


Fig. 16 a) Durchführkondensator und b) Durchführfilter

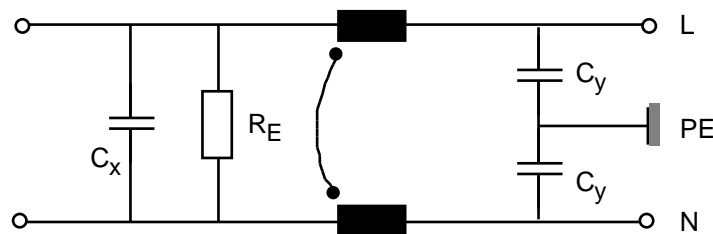


Fig. 17 Einphasiges Netzentstörfilter

- d) **Verlustbehaftete Ferritperlen** eignen sich gut zur Unterdrückung von unerwünschten hochfrequenten Strömen auf Speiseleitungen oder ganzen Kabeln. Sie stellen eine Spule mit einer einzigen Windung dar. Ihre Wirkung beruht vor allem auf der Absorption unerwünschter Ströme aufgrund der Verluste im Ferritmaterial. Man findet Ferritperlen sehr häufig auf DC-Zuführungen von HF-Schaltungen, aber auch auf fast jedem Monitorkabel eines PC's.

3.2 Überspannungsableiter

Überspannungsableiter schützen empfindliche Eingänge gegen Überspannungen, wie sie von Blitzeinwirkungen, elektrostatischen Entladungen, Abschaltüberspannungen induktiver Verbraucher und dem NEMP (nuclear electromagnetic puls) verursacht werden. Sie sollen im Betrieb kaum in Erscheinung treten und nur bei Überspannungen sehr niederohmig werden und die hohen Überspannungen auf ein unschädliches Mass begrenzen. Für diesen Zweck gibt es eine Reihe geeigneter Bauelemente. Man schaltet sie in aller nächster Nähe des Gehäuseeingangs parallel zur Eingangsleitung hinzu, d.h. unmittelbar neben einem möglichen Durchführfilter. Dabei ist es sehr wichtig, dass Überspannungsableiter wie Durchführkondensatoren mit geringst möglicher zusätzlicher Serieinduktivität zwischen den beiden zu schützenden Leitern eingefügt werden. Jede zusätzliche Serieinduktivität verringert die Schutzwirkung (Stromanstieg im Überspannungsableiter verzögert sich) und es entstehen unter Umständen starke magnetische Felder im Innern des Geräts, welche zu weiteren Schäden führen können. Die maximalen Ableitströme, die fließen können, hängen vom Innenwiderstand der Störquelle ab.

- a) **VDR (Varistoren)**. Varistoren bestehen aus Metalloxyd, vornehmlich ZnO. Sie weisen in beiden Spannungsrichtungen einen ausgeprägten Knick auf, welcher die Spannung auf

einem gewünschten Niveau begrenzt³. Aus einer grossen Auswahl von Komponenten muss der Anwender das richtige Bauteil nach zu begrenzender Spannung, maximalem Stossstrom und Energieaufnahmevermögen auswählen. Im normalen Betriebszustand wirkt der Varistor als Kapazität, welche unter Umständen berücksichtigt werden muss.

- b) **Silizium-Lawinendioden** (Transzorb-Dioden, Transzorb = Transient Zener Absorber). Diese funktionieren nach dem gleichen Prinzip wie Zenerdioden. Sie sind aber für den Einsatz im Überspannungsschutz optimiert. Da es sich um Halbleiterdioden handelt, leiten sie in einer Richtung wie normale Dioden. Zum Schutz eines Eingangs für beide Polaritäten müssen deshalb zwei Transzorb-Dioden in Serie geschaltet werden.
- c) **Funkenstrecken**. Auch Funkenstrecken sind zur Spannungsbegrenzung geeignet. Sie haben aber gegenüber den Varistoren und den Transzorb-Dioden den Nachteil, dass ihre Zündspannung meist viel höher ist als die Brennspannung. Sie arbeiten eher wie ein Schalter. Wenn sie einmal gezündet haben, bricht die Spannung über der Funkenstrecke drastisch zusammen. Dafür haben Funkenstrecken im ungezündeten Zustand einen sehr hohen Isolationswiderstand und die kapazitive Belastung fällt ebenfalls fast nicht ins Gewicht. In der Praxis benötigt man meist eine Kombination von zwei oder drei dieser Elemente für einen optimalen Schutz.

3.3 Gehäuseaufbau und Schirmzubehör

Wie weiter oben beschrieben, ist eine geschlossene metallische Hülle die Voraussetzung für einen guten EMV-Schutz eines elektronischen Geräts, aber auch für einen Schutz vor unerwünschten Abstrahlungen aus dem Gerät selber. Was auf den ersten Blick relativ einfach aussieht, ist in Wirklichkeit gar nicht so einfach. Eine Reihe von praktischen Randbedingungen erschweren dem Ingenieur die Realisierung des geschlossenen metallischen Käfigs. Neben unvermeidlichen Öffnungen im Gehäuse für Lüftung oder Bedienelemente, Deckel und auswechselbare Einschübe, wie sie bereits oben erwähnt wurden, treten auch Fragen auf, in welchem Abstand zwei Gehäuseelemente miteinander verschraubt oder auf andere Art miteinander kontaktiert werden müssen.

Bevor wir uns diesen Fragen zuwenden, sind noch einige theoretische Überlegungen angebracht. Warum wirken metallische Hüllen überhaupt gegen quasistatische elektrische und magnetische aber auch hochfrequente elektromagnetische Felder? Bei quasistatischen elektrischen Feldern haben wir die Wirkung einer Abschirmung bereits im Abschnitt 2.3 kennengelernt. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Ableitströme, welche über den metallischen Schirm wegfließen, auch überall auf der Oberfläche abfließen können. Je höher die Frequenz, umso kritischer werden Öffnungen in der Hülle, welche von den Ableitströmen auf Umwegen umflossen werden müssen. Sie führen zu magnetischen Feldern, welche via Öffnung auch ins Innere des Geräts dringen können. Dies gilt besonders bei hochfrequenten elektromagnetischen Feldern.

Statische magnetische Felder werden von metallischen Hüllen überhaupt nicht abgeschirmt. In diesen Fällen nützen nur hochpermeable ferromagnetische Schirme. Quasistatische Felder werden aber auch durch ein nichtferromagnetisches Gehäuse gut geschützt. Das geschlossene Gehäuse wirkt dabei als Kurzschlusswindung eines Transformators und erzeugt im Innern des Geräts ein Gegenfeld, welches das ursprünglich auftretende kompensiert. Entscheidend für diese Funktion ist aber wiederum ein guter Kontakt zwischen allen Teilen eines Gehäuses. So genügt es nicht, wenn ein Deckel nur an einigen Punkten mit dem restlichen Gehäuse verbunden ist. Ein möglichst umfassender Kontakt ist notwendig, damit die induzierten Kurzschlussströme ungehindert fließen können.

Auch hochfrequente elektromagnetische Felder erzeugen auf der Gehäuseoberfläche bei der Reflexion Ströme. Wird deren Fließen durch Schlitze oder Löcher erschwert, so treten

³ Vergleiche dazu auch den ELP-Versuch nichtlineare Kennlinien.

magnetische Felder auf, welche ins Innere des Geräts streuen und dort zu Störungen Anlass geben. Die Frage wie gross noch Löcher oder Schlitz in einer Gehäusewand sein dürfen ist daher sehr wichtig. Sie kann meist nur experimentell beantwortet werden. Bei relativ dicken Deckeln von massiven, verschraubten Gehäusen empfiehlt es sich, den Abstand der Schrauben kleiner als $\lambda/10$ bei der höchsten zu beachtenden Frequenz zu wählen.

Für getrennte Gehäuseteile, besonders wenn sie leicht auseinandergenommen und wieder zusammengefügt werden sollen, gibt es eine grosse Zahl von Dichtungen für Schirmfugen in der Form von Federblechen mit Federkontakten, Federleisten, Dichtungen aus leitendem Gummi oder metallischen Gewebeschnüren.

Kritisch sind auch Öffnungen für die Lüftung oder Durchführungen für nichtmetallische Teile wie Glasfasern oder Bedienelemente. Für beide eignen sich sog. Kamindurchführungen. Es handelt sich dabei um wabenförmig angeordnete, parallel verlaufende Kamine. Jedes Kamin entspricht einem Hohlleiter, der bei der höchsten zu beachtenden Störfrequenz weit unter seiner Grenzfrequenz betrieben wird. Verwendet man zur Wärmeabfuhr gelochte Bleche, so ist die Schirmwirkung gegenüber dem undurchbrochenen Blech beeinträchtigt. Die einzelnen Löcher koppeln einen Teil des Feldes von der einen zur andern Blechseite. Diese Kopplung hängt vom Verhältnis der gesamten Lochfläche zur gesamten Blechfläche ab. Bei gegebenem Verhältnis ist es günstiger viele kleine Löcher als wenige grosse zu wählen.

4. EMV-gerechter Entwurf von Leiterplatten und Geräten

An Hand zweier Beispiele soll gezeigt werden, auf welche Aspekte beim Aufbau von Leiterplatten und Geräten besonders geachtet werden muss, wenn sie bei hohen Frequenzen oder hohen Taktraten störungsfrei arbeiten sollen.

4.1 Leiterplattenentwurf

Bei jedem Leiterplattenentwurf stellt sich schnell die Frage nach der Zahl der Leiterlagen. Je höher ihre Zahl umso einfacher wird die Handhabung der EMV-Probleme, aber umso teurer verständlicherweise der Preis der Baugruppe. Sobald EMV-Probleme zu erwarten sind, sollte man mindestens eine zweilagige Leiterplatte als Minimallösung ansehen. Die eine Leiterschicht sollte man, wenn es die Dichte der Bauteile zulässt, möglichst grossflächig mit Masse belegen. Ideal sind vierlagige Leiterplatten, bei welchen normalerweise die eine der beiden inneren Lagen für Masse, die andere für eine Speisespannung, z.B. 5 V verwendet wird. Damit erreicht man eine durchgehende Massefläche, aber auch eine niederohmige Speisespannungszuführung.

Fig. 18 zeigt eine zweilagige Leiterplatte mit einigen typischen Bauteilen. Bei der Auslegung achte man besonders auf folgende Punkte:

- Speisung der digitalen Schaltkreise und der analogen trennen. Dies ist besonders wichtig, wenn es sich beim analogen Schaltteil um einen hochauflösenden A/D-Wandler handelt, der sehr empfindlich auf Speisespannungsschwankungen und Erdschleifen reagiert.
- Alle IC's mit Stützkondensatoren versehen, welche auf dem **kürzest möglichen Weg** den Masse- und den Speiseanschluss jedes IC's miteinander verbinden.
- Hin- und Rückführungen der Speiseleitungen so nahe wie möglich beieinander führen. Man vermeidet so grosse Schleifen, welche sonst bei Stromänderungen (digitale IC's!) in einem weiten Umfeld induktive Störspannungen induzieren können.
- Signalpfad auf der Leiterplatte durch die Verarbeitungsstufen hindurch möglichst von einem Ende der Platte zum andern ziehen.
- Längere Signalleitungen ($\ell > \lambda/10$, besser schon bei kürzeren Leitungslängen) bei hohen Frequenzen als Leitungen ausbilden (definierter Wellenwiderstand) und Quelle wie Last richtig abschliessen. Geeignet sind Leitungen in Form von Mikrostreifenleitungen (Masse

durchgehend!) oder Paralleldrahtleitungen bei symmetrischen Leitungen. Führen solche Leitungen auf Rückwand- oder Verbindungsleiterplatten, so müssen die Wellenwiderstände der Leitungen dort selbstverständlich weiter beibehalten werden.

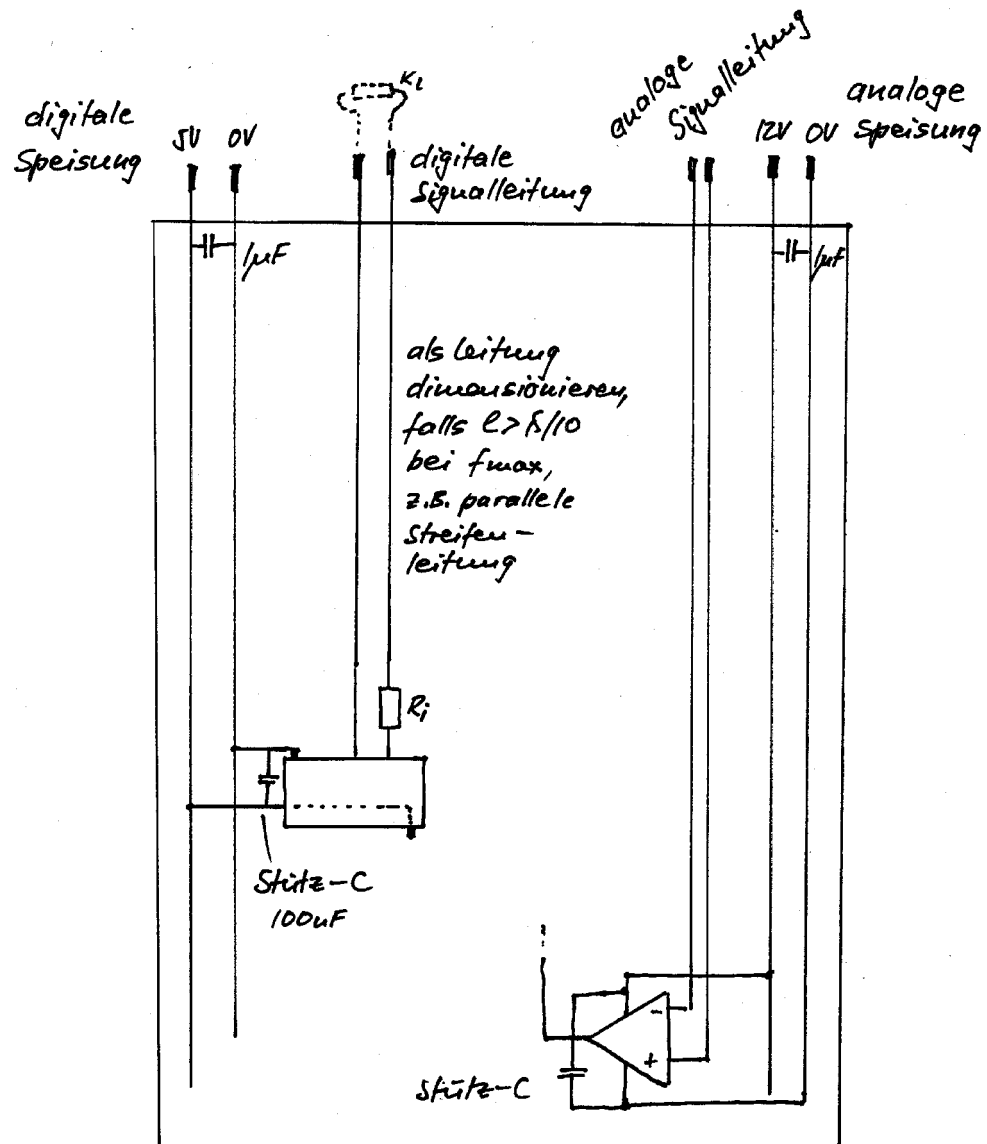


Fig. 18 Zur EMV-gerechten Auslegung von Leiterplatten

- Kritische Teile wie Oszillatoren sind unter Umständen auf der Leiterplatte separat abzuschirmen. Dazu gibt es von verschiedenen Lieferanten eine beschränkte Zahl von Kleinteilen, die eingesetzt werden können. So könnte man auf der Oberseite einer Leiterplatte einen zu schirmenden Teilbereich mit einem Massering umgeben, der mit zahlreichen Durchplattierungen mit einer durchgehenden Massefläche auf der Rückseite verbunden ist. Auf den Massering auf der Oberseite wird eine metallische Abdeckhaube aufgesetzt. Die wenigen Speise- und Signalleitungen werden auf der Masseseite zu- oder weggeführt. Wo notwendig können die Leitungen mit einem Kondensator gegen Masse gefiltert werden.
- Verschiedene Signalleitungen soll man bei hohen Frequenzen nicht über längere Strecken parallel führen, da sonst Übersprechen erfolgt. Bei ACT-Bausteinen kann dies schon bei

Leiterlängen von 10 cm zu Störungen führen. Als Abhilfe bieten sich kurze Leitungslängen und möglichst grosse Abstände zwischen den parallelen Leiterbahnen an. Auch richtig abgeschlossene Leitungen reduzieren den Störeinfluss. In ganz kritischen Fällen sind zusätzliche, geerdete Leiter zwischen parallel verlaufende Leitungen zu legen.

4.2 Geräteentwurf

Die wichtigsten Regeln, die beim Aufbau EMV-gerechter Geräte eingehalten werden müssen, wurden bereits erwähnt. Fig. 19 zeigt ein Beispiel, wie ein solches Gerät mit einer Reihe von Schnittstellen nach aussen aufgebaut sein könnte. An wichtigen Punkten seien noch folgende erwähnt.

- Die Netzeinführung ist mit einem Netzfilter wie in Abschnitt 3.1 beschrieben ausgeführt. Die meisten Netzfilter sind mit einem metallischen Gehäuse versehen, welches direkt mit der Gehäuseerde verbunden wird.
- Moderne Schaltnetzteile arbeiten mit Taktfrequenzen bis zu 100 kHz und sind immer potentielle Störquellen. Für das Netzteil gelten daher selber wieder die gleichen Schirmprinzipien wie für das Gerät als ganzes.
- Wird ein Signal (hier symmetrisch angenommen) über ein geschirmtes Buskabel eingeführt, so benötigt dies theoretisch keinen Schutz. Ob allerdings die Schirmdämpfung in allen möglichen Störfällen genügt, wäre zu überprüfen.
- Eine symmetrische Telefonleitung oder eine andere symmetrische Zuführung, welche über längere Strecken geführt wird, ist blitzgefährdet. Eine solche Leitung braucht unbedingt einen Überspannungsschutz, der hier mit einer Kombination von Funkenstrecke, Transzorb-Diode und einem L-C-Tiefpassfilter realisiert ist.
- Koaxialzuführungen sind bei geerdetem Mantel geschirmt. Sie können höchstens bei Erdschleifen zu Störspannungen führen. Bei hohen Frequenzen muss allerdings die abnehmende Schirmdämpfung eines flexiblen Kabels berücksichtigt werden, was ev. ein zusätzliches Filter erfordert.
- Ungeschirmte Steuer- oder Signalleitungen sind mit geeigneten Filtern zu schützen.
- Beim Gehäuse wurde ein geschlossener metallischer Kasten angenommen. Zu Lüftungszwecken besitzt er allerdings oben und unten ein Lochblech, welches eine reduzierte Schirmwirkung aufweist. Auf der Frontseite kann ein Deckel durch Herunterklappen geöffnet werden. Der Kontakt zwischen dem Deckel und dem Rest des Gehäuses wird mit Federleisten sichergestellt.

5. Schlussbemerkungen

Diese Beilage gibt nur einen kurzen Überblick über EMV-Probleme und mögliche Lösungsansätze. Wer mehr über dieses nicht einfache und doch sehr wichtige Gebiet wissen möchte, nehme die einschlägige Literatur zur Hand. Diese Beilage basiert in Teilen auf einem sehr gut geschriebenen Buch, das zahlreiche praktische Hinweise enthält [1].

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

- Eine Untersuchung über die häufigsten Störquellen und ihre Störspektren.
- Eine präzisere Analyse der Kopplungsmechanismen, insbesondere die Wirkung von Schirmen .

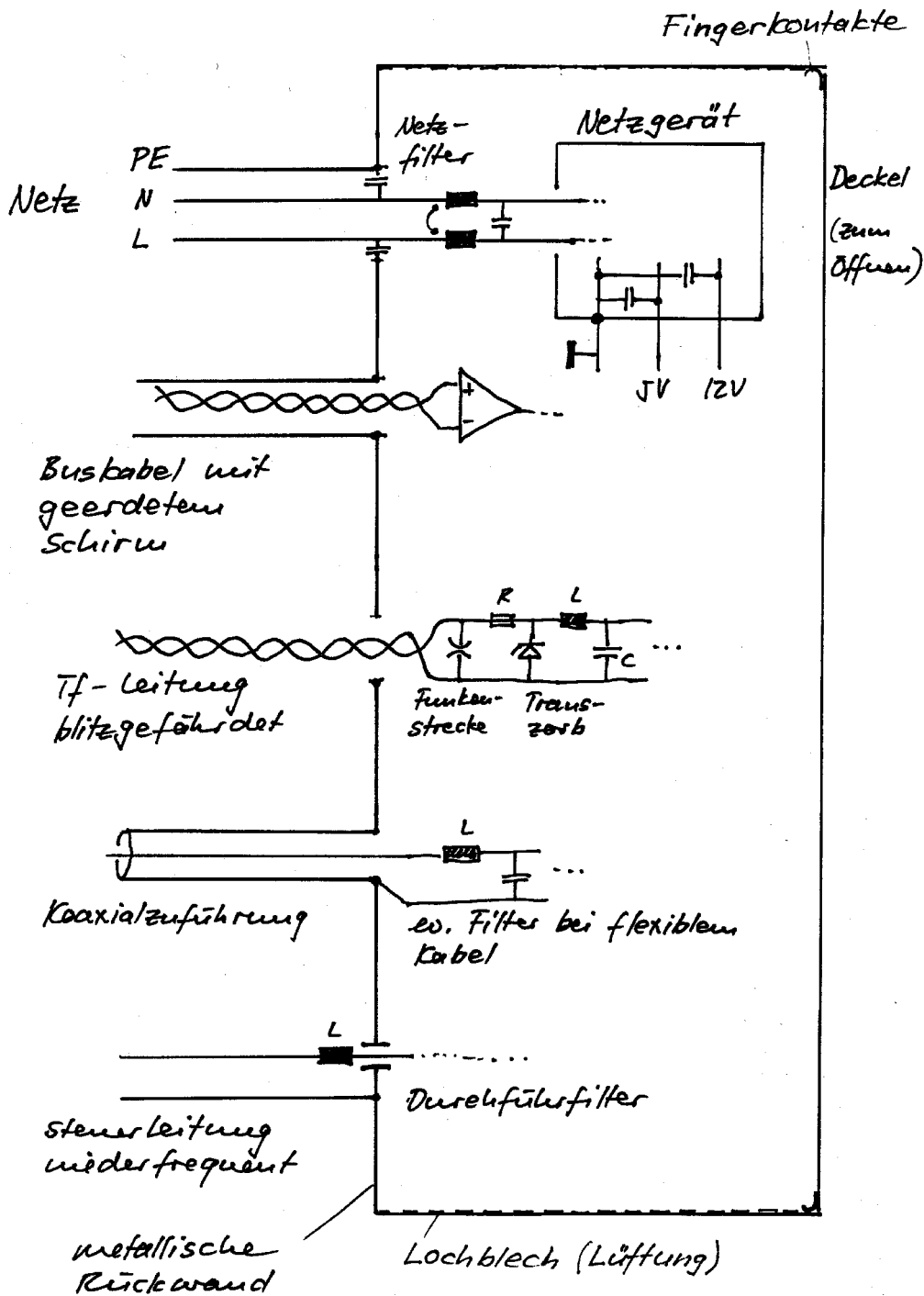


Fig. 19 Zur EMV-gerechten Gestaltung von Geräten

- Die umfangreiche EMV-Messtechnik, ohne die eine Bestätigung (oder eben auch nicht) 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. Aus diesem Grund gibt es in diesem Gebiet zahlreiche Berater. Meist arbeiten sie mit einem

Messlabor zusammen, so dass sie auch gleich die notwendigen Messungen vornehmen können. Bei etwas kniffligeren Problemen empfiehlt es sich deshalb fast immer, frühzeitig einen Experten beizuziehen. Ist ein Gerät fertig entwickelt, erfüllt aber die EMV-Spezifikationen nicht, so gelingen Schnellschüsse zur Behebung der Mängel sehr selten. Kostengünstig ist allein eine Entwurfsmethodik, welche die EMV-Problematik von allem Anfang an einbezieht.

Literatur:

[1] A. Schwab, Elektromagnetische Verträglichkeit, Springer Verlag, Berlin, 3. Auflage, 1994