

SCHULUNGSUNTERLAGEN

Elektromagnetische Verträglichkeit

und

induktive Bauelemente

NKL GmbH
D-74549 Wolpertshausen

Dipl.-Ing. (FH) Uwe Lorenzen
NKL GmbH

Stand: 16. Oktober 2014

Inhaltsverzeichnis

Einführung in die EMV	Seite 3
Übersicht über Funkstörungen und Abhilfen	Seite 7
Erhöhung der Störfestigkeit	Seite 11
EMV-gerechter Schaltschrank- u. Anlagenbau	Seite 15
Wissenswertes über Funkentstörfilter	Seite 21
Spulen und Drosseln - Eine Einführung	Seite 25

Einführung in die elektromagnetische Verträglichkeit

1 Funkstörungen und Funkentstörung

1.1 Definition, Entstehung, Ausbreitung und Auswirkungen

Als Funkstörungen werden unerwünschte elektromagnetische Störaussendungen bezeichnet, die z. B. den Funkempfang oder andere elektronischen Geräte stören können. Von den z. Zt. aktuellen Normen wird dabei der Frequenzbereich von 9 kHz bis 400 GHz erfaßt.

Dabei wird grundsätzlich in leitungsgeführte Störungen ("Störspannung") und feldgebundene Störungen ("Störstrahlung" bzw. "Störfeldstärke") unterschieden.

Funkentstörung ist die Minderung dieser Störungen meist unter die Grenzwerte, die in den entsprechenden Normen festgelegt sind bzw. bei konkreten Störfällen soweit, daß die Funktion der betroffenen Geräte wieder sichergestellt ist.

Funkstörungen entstehen durch Funkenstrecken, z. B. Kollektoren in Motoren, Schaltkontakte in mechanischen Schaltern und Relais, durch schnelle Spannungs- bzw. Stromänderungen in elektronischen Schaltungen (Phasenanschnitt, digitale Schaltkreise) sowie durch Oszillatorfrequenzen, deren Oberschwingungen und Mischprodukte (Mikroprozessorschaltungen, Schaltregler, Frequenzumformer).

Mit den immer schnelleren elektronischen Bauelementen werden immer höhere Taktfrequenzen und steilere Anstiegsflanken erreicht, die ohne weiteres Funkstörungen im UKW- und Fernsehbereich erzeugen können.

Elektronische Schaltungen mit verstärkenden Bauelementen können auch völlig unbemerkt und unbeabsichtigt schwingen und damit Funkstörungen verursachen. So können z. B. durch Änderung der Leiterbahnführung bisher stabile Schaltungen zu Schwingungen neigen. Deshalb muß sich ein Entwickler auch davon überzeugen, daß seine Schaltung nicht unbeabsichtigt schwingt.

Die durch die Störquellen erzeugten elektromagnetischen Störungen breiten sich zunächst über sämtliche angeschlossenen Leitungen (meistens die Netzleitung) als leitungsgeführte Störungen ("Störspannung") aus und können andere Geräte stören, die mit dieser Leitung, z. B. über das 230V-Niederspannungs-Netz in einem Gebäude, verbunden sind. Je nach Frequenz der Störungen und Länge der Leitungen wird diese Hochfrequenz auch abgestrahlt und kann als Störstrahlung beispielsweise den Funkempfang stören.

Früher wurde durch die Funkstörungen fast ausschließlich der Empfang von Rundfunksendungen und anderen Funkdiensten gestört.

Durch die zunehmende Verbreitung der Elektronik im Alltag gibt es aber immer mehr elektronische Geräte, die auf Funkstörungen empfindlich reagieren können, obwohl sie mit Funk nichts zu tun haben. So kann z. B. ein Schaltknack durch das An- und Abschalten eines Elektromotors ein nicht ausreichend störfestes Gerät mit Mikroprozessor-Steuerung zum Absturz bringen, oder die hochfrequenten Störungen durch eine unentstörte Phasenanschnitt-Steuerung können z. B. in eine Temperaturfühlerleitung, die in der Nähe liegt, einkoppeln und einen Meßwert so verfälschen, daß eine Regelung gestört wird.

1.2 EG-Richtlinien, EMV-Gesetz, Normen und Meßverfahren

Bis zum 31. Dezember 1995, dem Ablauf der Übergangsfrist des deutschen EMV-Gesetzes (EMVG), mit dem der deutsche Gesetzgeber die Vorgaben der europäischen EMV-Richtlinie in deutsches Recht umgesetzt hat, **galt in Deutschland das Hochfrequenzgerätegesetz**. Dieses Gesetz sah Grenzwerte **nur** für die **Funkentstörung**, also die Störaussendung, vor.

Die rechtliche **Verantwortung** für die Einhaltung dieser Grenzwerte lag **beim Betreiber**, nicht beim Hersteller bzw. Importeur eines Geräts!

Dies bedeutete, daß sich z. B. beim Betreiben eines unzureichend entstörten Personal-Computers der ahnungslose Benutzer, der diesen betrieb, strafbar machte, aber nicht der eigentlich verantwortliche Hersteller bzw. Importeur des Geräts! Entsprechend lasch wurde daher auch die Einhaltung der Normen und Grenzwerte durch die Industrie gehandhabt.

Seit dem 1. Januar 1996 dürfen innerhalb der EU nur noch Geräte neu in Verkehr gebracht werden, die den Schutzanforderungen der europäischen EMV-Richtlinie, d. h. in Deutschland dem deutschen EMV-Gesetz entsprechen.

Neu ist, daß zu diesen Schutzanforderungen nicht nur die Funkentstörung, sondern **zusätzlich auch** die **Störfestigkeit** gehört.

Die rechtliche **Verantwortung** für die Einhaltung der Schutzanforderungen des EMVG liegt auch nicht mehr beim Betreiber, sondern **beim Hersteller** bzw. Importeur eines Geräts.

Die **Überwachung** der Einhaltung der Richtlinien erfolgt bei der bei der EMV-Richtlinie und der Telekommunikationsendgeräte-Richtlinie durch die Bundesnetzagentur als Nachfolgerin der in der Zwischenzeit aufgelösten RegTP bzw. BAPT. Die Bundesnetzagentur ist dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie angegliedert.

Normensuche und Bezugsquellen, inhaltliche Fragen zu Normen

Da die meisten europäischen EMV-Normen als **VDE-Normen** klassifiziert werden, empfiehlt sich zuerst die Nachfrage bei der

- **VDE-Verlag** GmbH, Bismarckstr. 33 in D-10625 Berlin, Tel. 030 / 348001-0 bzw. im Internet unter www.vde-verlag.de

Es kann allerdings vorkommen, daß von der Verabschiedung einer Europa-Norm bis zu deren Veröffentlichung als VDE-Norm einige Zeit vergeht. Dann kann die Norm vorab als **Manuskript** bei der

- **DKE** ("Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE"), Stresemannallee 15 in D-60596 Frankfurt a. M., Tel. 069 / 6308-0, Internet: www.dke.de bezogen werden. Über die DKE können auch sonstige internationale elektrotechnische Normen bezogen werden.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß es auch Internationale bzw. Europa-Normen zur EMV gibt, die generell nicht als VDE-, sondern als DIN-Normen veröffentlicht werden, z. B. die DIN EN ISO 14982: EMV Land- u. forstwirtschaftl. Maschinen und Geräte. Diese Normen liefert u. a. die

- **Beuth Verlag** GmbH Burggrafenstr. 6 D-10787 Berlin Tel. 030 / 2601-0
Internet: www.beuth.de.

Kompetente **inhaltliche Auskünfte** zu Europa-Normen gibt üblicherweise die **DKE**, die wiederum in entsprechende Fachreferate untergliedert ist, sowie die Bundesnetzagentur, Fachreferat 413 in D-13405 Berlin, Tel. 030 / 4374 - 0 und deren Aussenstellen.

Einige interessante Internet-Adressen

Hier können die Richtlinien, Leitfäden zu den Richtlinien, die Gesetze und zusätzliche Informationen kostenlos eingesehen oder heruntergeladen werden.

Bundesnetzagentur: www.bundesnetzagentur.de > Sachgebiete > Telekommunikation > Technische Regulierung Telekommunikation > Inverkehrbringen von Geräten.nach EMVG und FTEG

Fachgrundnormen (Störaussendung)

EN 61000-6-3:2007 VDE 0839-6-3	Störaussendung Wohn-, Geschäfts- und Gewerbebereich sowie Kleinbetriebe
EN 61000-6-4:2007 VDE 0839-6-4	Störaussendung Industriebereich

Produktfamiliennormen (Störaussendung, Auswahl)

EN 55011:2009 VDE 0875-11 (04.11)	ISM-Geräte
EN 55012:2007 VDE 0879-1 (04.10)	Entstörung Kfz + Verbrennungsmotoren
EN 55013:2001 VDE 0872-13 (10.06)	Radio- und TV-Empfänger
EN 55014-1:2006 VDE 0875-14-1 (02.10)	Haushaltsgeräte, Elektrowerkzeuge
EN 55015:2006 VDE 0875-15-1 (11.09)	Beleuchtungseinrichtungen
EN 55022:2010 VDE 0878-22 (12.11)	ITE-Geräte
EN 55025:2008 VDE 0879-2 (03.09)	Funkentstörung in Kfz
EN 60601-1-2:2007 VDE 0750-1-2 (12.07)	EMV medizinischer Geräte
EN 61800-3:2004 VDE 0160-103 (07.05)	EMV elektronisch geregelter elektrischer Antriebe
EN 61326-1:2006 VDE 0843-20-1 (10.06)	EMV Betriebsmittel f. Leittechnik u. Laboreinsatz
EN 61000-3-2:2006 VDE 0838-2	Netzstromoberschwingungen und
EN 61000-3-3:2008 VDE 0838-3	Netzspannungsschwankungen (Flicker)

Generell gilt: Sobald es für ein Gerät eine anwendbare Produkt(familien)norm gibt, ist diese anzuwenden, nur wenn es keine entsprechende Produkt(familien)norm gibt, ist die Fachgrundnorm anzuwenden!

Auch ist grundsätzlich die Norm für das Endgerät maßgeblich, nicht die evtl. für einzelne Komponenten innerhalb des Geräts vorhandene Normen, d. h. beispielsweise für eine Haushalts-Waschmaschine mit Frequenzumrichter gilt trotzdem die EN 55014-1, auch wenn für den Frequenzumrichter (als eigenständiges Endprodukt) alleine die EN 61800-3 gelten würde.

Die zivilen EMV-Normen sind immer ein Kompromiss zwischen EMV und Wirtschaftlichkeit, eine hundertprozentige Sicherheit in Bezug auf die EMV ist weder beabsichtigt noch realistisch.

Deshalb kann auch ein Gerät, welches die auf es anzuwendenden EMV-Normen erfüllt, immer noch Störungen verursachen, wenn es sich in der Nähe einer empfindlichen Störsenke (z. B. einer Funkempfangsanlage oder einem Meßgerät) befindet, bzw. umgekehrt gestört werden, wenn es sich nahe an einer starken Störquelle befindet. Dies bedeutet, dass es in der Praxis immer wieder Fälle gibt, in denen zur ordnungsgemäßen Funktion eines Gerätes die Entstörung oder die Störfestigkeit besser sein muß, als in den Normen gefordert wird.

In den zivilen EMV-Normen wird das Gerät als Ganzes nach außen hin betrachtet, nicht jedoch die EMV innerhalb des Gerätes selbst. Diese wird als ein im eigenen Interesse des Herstellers liegendes Qualitätsmerkmal angesehen. In der Praxis sollte deshalb bei der Entwicklung von Geräten auf die interne EMV geachtet und diese im eigenen Interesse genauso berücksichtigt werden, wie die externe EMV.

1.3 Meßverfahren zur Störaussendung

Die **leitungsgebundene Störaussendung** wird üblicherweise mit einem selektiven Funkstörmessempfänger als Störspannung im Frequenzbereich von 9 (150) kHz bis 30 MHz (EN-Normen) gemessen, wobei Versorgungsleitungen (gleichgültig ob AC oder DC) mit einer Netznachbildung und Steuer- oder Signalleitungen mit einem Tastkopf oder speziellen Netznachbildungen (z. B. für Telekommunikations-Leitungen) gemessen werden.

In Ausnahmefällen, z. B. bei Geräten mit sehr hoher Stromaufnahme, für die es keine passenden Netznachbildungen gibt oder bei Vor-Ort-Messungen, bei denen das Netz nicht aufgetrennt werden kann, wird die Störspannung auch auf Versorgungsleitungen ersatzweise mit dem Tastkopf gemessen.

Bei Kraftfahrzeugen wird die Störspannung mit speziellen Netznachbildungen ("Bordnetznachbildung") bis 120 MHz gemessen.

Ein Sonderfall sind die sogenannten "Netzurückwirkungen", d. h. die Netzüberschwingungen und Netzspannungsschwankungen im Bereich 50 Hz..2 kHz. Diese sind im eigentlichen Sinne keine Funkstörungen, sondern Verschlechterungen der Qualität der Netzspannung. Zur Messung dieser Netzurückwirkungen werden spezielle Meßgeräte benötigt, die über einen eingebauten Generator eine sehr saubere Netzspannung erzeugen und über einer definierte Impedanz, meist mittels einer FFT, die Netzstromüberschwingungen und die Netzspannungsschwankungen messen.

Die **feldgebundene Störaussendung** ("Störstrahlung") wird üblicherweise im Frequenzbereich ab 30 MHz aufwärts entweder mit Antennen als elektrische Feldstärke im Freifeld (bzw. in einer Absorberhalle) oder bei Elektrowerkzeugen, Haushaltsgeräten u. ä. als Störleistung mit einer Absorptions-Meßwandler-Zange gemessen.

Bei einigen Geräten, die starke Magnetfelder erzeugen können, z. B. Induktionskochmulden, wird zusätzlich auch die magnetische Feldstärke im Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz mit einer Rahmenantenne gemessen.

2 Systematische Übersicht über Funkstörungen und Abhilfen

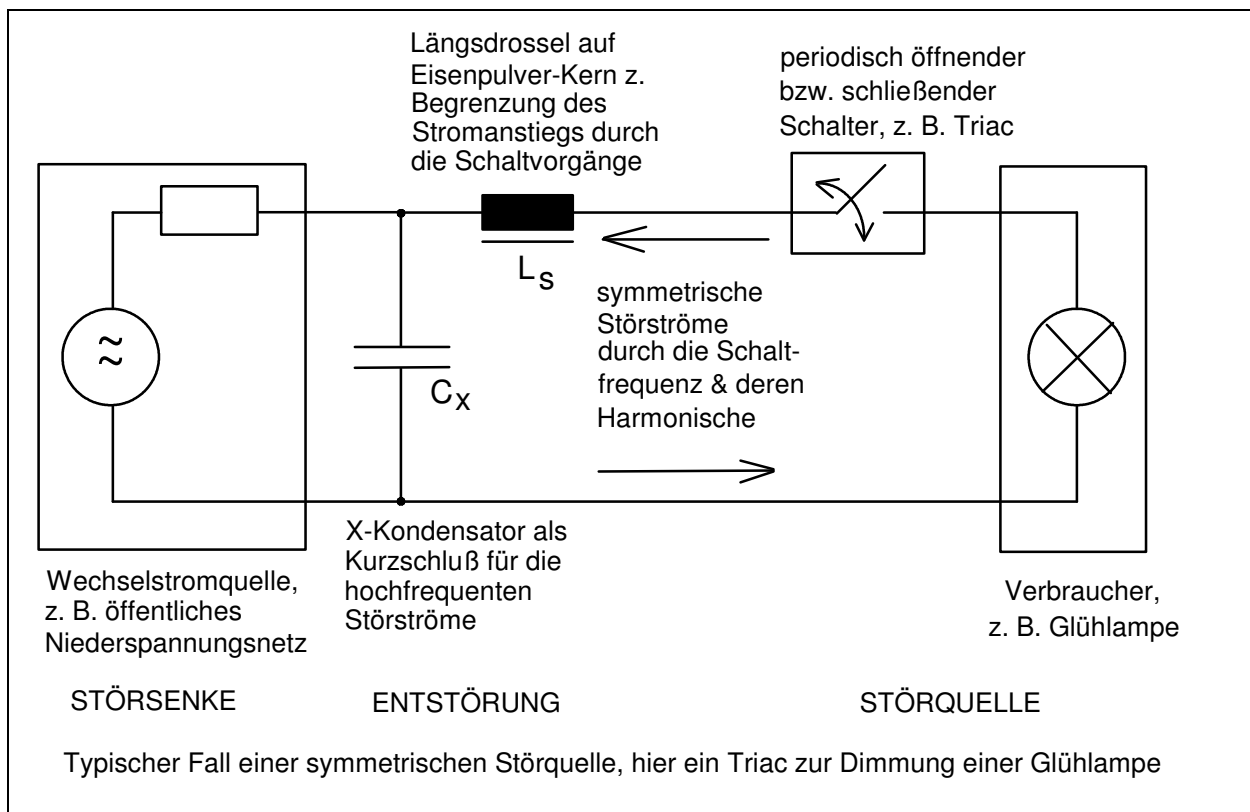
2.1 Störspannungen (geleitete Störungen)

2.1.1 Symmetrische (Gegentakt-) Störungen

(typ. < 1 MHz, z. B. durch Phasenanschnitt-Steuerungen, Gleichrichter, Halbleiter-Relais):

Entstörung durch X-Kondensatoren und Längsdrosseln auf Eisenpulver-Kernen:

Die X-Kondensatoren schließen die hochfrequenten Störungen kurz, während die Längsdrosseln die Impedanz des symmetrischen Störstromkreises erhöhen und dadurch die Störströme verringern.



Hinweis zu den Bildern auf dieser und der nächsten Seite:

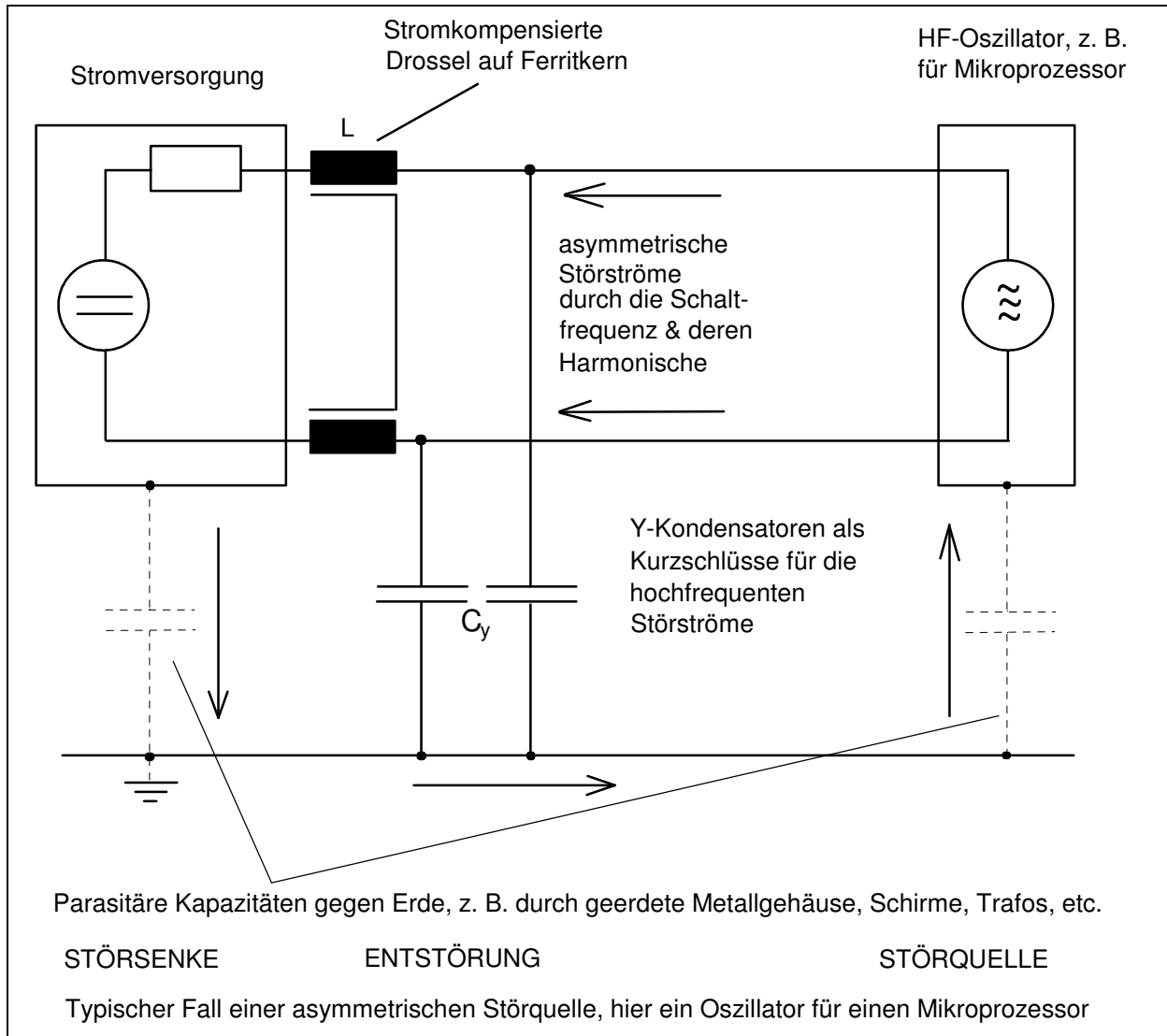
Die Störsenke muß in der Praxis nicht unbedingt das Versorgungsnetz bzw. ein daran angeschlossenes anderes Gerät sein, sie kann auch ein Teil des störenden Geräts selbst sein, beispielsweise eine Waschmaschine mit Drehzahlregelung über einen Frequenzumrichter, dessen ungeschirmte Motorleitung im selben Kabelbaum verläuft wie die Temperaturfühlerleitung für die Laugentemperatur und dadurch Störungen in der Temperaturregelung verursacht.

2.1.2 Asymmetrische (Gleichtakt-) Störungen

(typ. > 1 MHz, z. B. durch Frequenzumrichter, Schaltnetzteile, Quarz-Oszillatoren):

Entstörung durch Y-Kondensatoren, stromkompensierte Drosseln auf Mg-Zn-Ferrit-Kernen (< 5 MHz) und/oder auf Ni-Zn-Ferrit-Kernen einlagig gewickelt (> 5 MHz):

Die Y-Kondensatoren schließen die hochfrequenten Störungen gegen Erde kurz, die stromkompensierten Drosseln erhöhen die Impedanz des asymmetrischen Störstromkreises.



2.3 Störfeldstärke (Abstrahlung)

- Überwiegend asymmetrische Störungen auf Leitungen von oder zum Gerät (Netz-, Schnittstellen-, Signalleitungen), die dann als "Antennen" wirken, seltener Abstrahlung des Gerätes selbst (Faustregel: Für nennenswerte Abstrahlung muß die Abmessung des Gerätes mindestens in der Größenordnung der Wellenlänge liegen).

Abhilfe durch Y-Kondensatoren, stromkompensierte Drosseln oder Stabkerndrosseln einlagig gewickelt auf Ni-Zn-Ferrit-Kernen, Schirmung, gute Erdanbindung, optimierte Leitungsverlegung, alle Geräteteile aus Metall HF-mäßig gut, d. h. flächig miteinander verbinden (Massebänder).

2.4 Funkentstörung

Reduzierung von Störungen durch richtige Entstörmaßnahmen an der richtigen Stelle!

Bevor jedoch zu speziellen Entstörmitteln gegriffen wird, sollte zuerst geprüft werden, ob sich die Störungen nicht schon im Ansatz verringern lassen, z. B. durch Vermeiden unnötig steiler Schaltflanken bei Schalttransistoren, Begrenzung hochfrequenter Signale auf einen möglichst kleinen Bereich auf der Platine bzw. im Gerät, Wahl möglichst niedriger Taktfrequenzen, etc. Dies ist häufig schon ein erheblicher Beitrag zur Verringerung des zusätzlichen Entstöraufwands!

Beim Einsatz spezieller Entstörmittel in einem elektronischen Gerät lassen sich diese **Entstörmaßnahmen am günstigsten** mit **auf der Platine** aufbauen, so daß dadurch ein kostengünstiger "Entstörfilter" entsteht.

Wo dies nicht möglich ist kann die Entstörung durch entsprechende separate Filter gelöst werden, dabei ist aber folgendes zu beachten: Wird die Entstörung durch ein Filter am Netzeingang (z. B. ein Steckerfilter) gelöst, so ist nach dem Filter innerhalb des gesamten Gerätes ein entsprechend hoher Störpegel vorhanden und es muß verhindert werden, daß diese Störungen über andere Leitungen oder fehlende Abschirmung nach außen gelangen können bzw. andere Elektronikteile im selben Gerät in ihrer Funktion stören!

Praktische Tips beim Einsatz von Entstörmitteln

- Störungen möglichst nahe am Ort der Entstehung entstören. Beispiel: In einem Gerät mit Mikroprozessor-Schaltung und Phasenanschnitt-Steuerung ist es meist nicht sinnvoll, ausschließlich am Netzeingang zu entstören, weil die Störungen des Phasenanschnitts auch die Mikroprozessor-Schaltung stören können. Hier sollte man die Störungen durch den Phasenanschnitt zunächst am Triac direkt entstören und danach am Netzanschluß bzw. in der Stromversorgung zur Elektronik die hochfrequenten Störungen der Mikroprozessor-Elektronik filtern.
- Ein Filter wirkt nur dann bei höheren Frequenzen, wenn es entweder direkt an der Störquelle sitzt oder am Übergang zu einem geschirmten System. Besonders sinnlos sind teure Filter in Metallgehäusen, wenn der HF-mäßig saubere Übergang zu einem geschirmten System, z. B. einem leitfähigen Gerätegehäuse oder Schaltschrank, fehlt.
- Werden Sie mißtrauisch, wenn z. B. ein Netzfilter mit einer Induktivität von $2 \times 10 \text{ mH}$ in der Langwelle nicht wirkt. Entweder haben Sie dann noch andere Leitungen, die das Filter umgehen, oder Sie haben asymmetrische Impulsstörungen, die die Ferrit-Ringkerndrossel im Filter sättigen. In diesen Fällen benötigen Sie andere Kernmaterialien, die nicht so schnell in die Sättigung gehen, z. B. Eisenpulverkerne.
- Denken Sie stets an die frühe Sättigung von Ferrit-Ringkernen. Auch wenn diese stromkompensiert sind, kann durch starke asymmetrische Impulse eine Sättigung erreicht werden. Dies gilt erst recht für die neuartigen "nanokristallinen" oder "amorphen" Kernmaterialien, mit denen sich ungewöhnlich kompakte stromkompensierte Funkentstördrosseln herstellen lassen, da die relative Permeabilität dieser Kernmaterialien überproportional stark gegenüber der maximalen Sättigungsflußdichte erhöht wurde.

Vorgehensweise bei der Entstörung

- Die Entstörung sollte vor der Störfestigkeits-Prüfung erfolgen, da durch die Entstörmittel meist auch eine Verbesserung der Störfestigkeit erreicht wird. Nach Anschluß des Störers an die Netznachbildung müssen zuerst die Störungen im unentstörten Zustand gemessen werden. Dann wird die tiefste Frequenz, bei der die Grenzwerte überschritten werden, ermittelt, denn die tiefste kritische Frequenz (z. B. 150 kHz bei Breitbandstörung) entscheidet, welcher Aufwand an Bauteilen zur Entstörung nötig ist!
- Als erste Entstör-Maßnahme folgt der Einsatz eines X-Kondensators steigender Größe netzparallel bis ca. $0,47\ \mu\text{F}$ bei 230 VAC zur Bedämpfung symmetrischer Störungen. Wenn dies nicht genügt, dann zusätzlich den asymmetrischen Anteil der Störungen durch Y-Kondensatoren gegen Erde steigender Größe begrenzen, dabei den maximal zulässigen Ableitstrom beachten!
- Reichen die Kondensatoren zur Entstörung nicht aus, werden zusätzliche Entstör-Drosseln eingesetzt. Die Drosseln sind meistens zum Netz hin einzusetzen, da das Netz üblicherweise die niedrigere Impedanz hat.
- Wenn damit kein Erfolg erzielt wird, muß untersucht werden, ob die Entstörung durch Verkopplung oder Abstrahlung umgangen wird.
- Werden die Grenzen nur noch bei höheren Frequenzen überschritten, muß der Aufbau auf Abstrahlung untersucht werden. Evtl. müssen noch HF-Drosseln (einlagig gewickelt auf Nickel-Zink-Ferrit-Kernmaterial) eingesetzt werden.
- Erst wenn die leitungsgebundenen Störungen bis 30 MHz unter den Grenzwerten liegen, sollte mit der Messung und Entstörung in den höheren Frequenzbereichen begonnen werden. Hier spielen der Aufbau, die Schirmung und gute Masseführung die wichtigsten Rollen und müssen evtl. entsprechend verändert bzw. verbessert werden.
- Zum Schluß erfolgt die Endmessung über den gesamten Frequenzbereich.

Achten Sie aber darauf, daß jede Veränderung der Entstörmittel selbst bzw. deren Anordnung die Meßergebnisse verändern kann. Daher kann eine aussagefähige Endmessung erst im produktionsreifen Zustand erfolgen!

3 Erhöhung der Störfestigkeit

3.1 Allgemeines

In modernen elektronischen Digitalschaltungen sind die benötigten Steuerleistungen zur Befehlsausführung so gering, daß sowohl impulsförmige (und damit breitbandige) als auch schmalbandige hochfrequente Störungen solche Befehle unbeabsichtigt auslösen können. Dies bedeutet, daß selbst eine einzelne kurzzeitige Störung (z. B. durch einen Schütz, der nur gelegentlich betätigt wird) eine Mikroprozessorsteuerung zum Absturz bringen und damit dauerhaft lahmlegen kann.

Auch rein analoge Schaltungen können auf diese Störungen empfindlich reagieren, wobei hier jedoch in der Regel nur während der Dauer der Störung selbst Fehlfunktionen auftreten, einzelne kurzzeitige Störungen also nicht so gravierend und damit auffällig sind.

Seit dem **1. Januar 1996** müssen alle Geräte, die in Europa neu in Verkehr gebracht werden, mit den Schutzanforderungen der EMV-Richtlinie und damit des deutschen EMVG konform sein, was durch die Anbringung des **CE-Zeichens** dokumentiert wird.

Dazu gehört dann auch die **Störfestigkeit** gegen elektromagnetische Beeinflussung als wesentliche Produkteigenschaft, d. h. bisher war die Sicherstellung und der Nachweis der Störfestigkeit von Seiten des Herstellers freiwillig, wenn auch in seinem eigenen Interesse, seit dem 1. Januar 1996 ist sie **Pflicht!**

3.2 Normen (Auswahl)

Fachgrundnormen (Störfestigkeit)

EN 61000-6-1:2007	VDE 0839-6-1	Störfestigkeit Wohn-, Geschäfts- u. Gewerbebereich sowie Kleinbetriebe
EN 61000-6-2:2005	VDE 0839-6-2	Störfestigkeit Industriebereich

Produktfamiliennormen (Störfestigkeit, Auswahl)

EN 55014-2:1997	VDE 0875-14-2	Störfestigkeit Geräte für Haushalt, Gastronomie, Landwirtschaft und Elektrowerkzeuge
EN 55024:2010	VDE 0878-24	Störfestigkeit ITE-Geräte
EN 60601-1-2:2007	VDE 0750-1-2 (12.07)	EMV medizinischer Geräte
EN 61800-3:2004	VDE 0160-103 (07.05)	EMV elektronisch geregelter elektrischer Antriebe
EN 61326-1:2006	VDE 0843-20-1 (10.06)	EMV Betriebsmittel f. Leittechnik u. Laboreinsatz

3.3 Allgemeine Tips zur Erhöhung der Störfestigkeit

Da die **Funkentstörung** nach beiden Seiten wirksam ist, trägt eine richtige Entstörung schon wesentlich zur Erhöhung der Störfestigkeit bei. Auch hier ist der Einsatz eines Filters am Netzeingang nur dann sinnvoll, wenn innerhalb der Schaltung keine größeren Störungen verursacht werden.

Weiter müssen **alle Ein- und Ausgangsleitungen** entweder durch Abblockkondensatoren gegen Erde bzw. Bezugsmasse oder durch Drosseln **abgeblockt** (langsame Signale) oder **geschirmt** werden (schnelle Datenleitungen, empfindliche Meßleitungen), so daß über diese Leitungen keine Störungen nach außen dringen oder von außen eingeschleift werden können.

Häufige Fehler bei Geräten mit Schirmgehäusen:

Oft wird die ankommende Netzleitung erst über Schalter, Sicherungen oder Kontrollampen innerhalb des betreffenden Gerätes geschleift, bevor die Leitung am Netzfilter ankommt. Dieses Stück Netzleitung innerhalb des geschirmten Gerätes strahlt wie eine Antenne alle Störungen in das geschirmte Gerät hinein bzw. nimmt Störungen, die innerhalb des Geräts erzeugt werden, auf und strahlt diese nach außen hin ab.

Dadurch wird das Netzfilter von den hochfrequenten Störungen umgangen und wirkungslos.

Das gleiche gilt für sämtliche Steuerleitungen, deren evtl. vorhandene Schirme sofort beim Eintritt in das geschirmte Gehäuse mit diesem Gehäuse gut verbunden werden müssen.

Es ist grundsätzlich darauf zu achten, daß geschirmte und ungeschirmte Teile von Geräten strikt räumlich voneinander getrennt angeordnet sind.

Augenmerk ist auch auf sämtliche Öffnungen und Schlitze, die größer als $\frac{1}{8}$ der Wellenlänge der maximalen kritischen Frequenz sind, zu richten. Beispiel: Bei 1 GHz können Schlitze größer als 3 cm zu Problemen führen.

Auch metallische Stoßstellen, die keine niederohmige und flächige elektrische Verbindung haben (Stichwort: Schirmungswiderstand), wie Nahtstellen zwischen lackierten, eloxierten oder korrodierten Gehäuseteilen führen häufig zu Problemen.

Dies ist besonders dann der Fall, wenn in der Nähe dieser Stoßstellen Leitungen verlaufen. Diese fangen die hochfrequenten Potentialdifferenzen an diesen Stoßstellen auf und strahlen diese ab, deshalb Leitungen (auch geschirmte!) möglichst nicht in der Nähe von Gehäuse-Nahtstellen führen.

3.4 Störsicherer Layout-Entwurf

Ankommende Versorgungs- und Signalleitungen müssen in der Regel auf der Platine gefiltert werden. Bei geschirmten Signal- und Datenleitungen den Schirm mit dem (geerdeten) Gehäuse oder einer anderen HF-Bezugsfläche (z. B. Montageplatte im Schaltschrank) verbinden, nie direkt mit Elektronik-Masse! Die Elektronik-Masse, falls nötig, als Innenleiter mitführen!

Masse-Schleifen und Schleifen in den Versorgungsspannungen möglichst vermeiden (Ideal: Bifilare Leitungsführung!)

Bei mehrlagigen Platinen sollten die Versorgungsspannungen (Plus und Masse) als Außenlagen angeordnet werden. Die Masse sollte als Bezugspotential möglichst nicht durchkontaktiert sein, da gegen sie alle Störungen kapazitiv abgeleitet werden. Die Versorgungsspannung (Vcc) kann dagegen durchkontaktiert werden, wenn nach jeder Durchkontaktierung ein Abblockkondensator gegen Masse vorgesehen wird.

An jedem IC einen keramischen Abblockkondensator in der Betriebsspannungsversorgung vorsehen, zwischen Abblockkondensator und IC keine Durchkontaktierungen mehr anbringen! IC's mit hohem Störpotential (Treiber, Multivibratoren, Generatoren) sollten gesondert mit Plus und Masse versorgt werden.

Metallgehäuse von Quarzen und die Ziehkondensatoren müssen mit einer separaten Stichleitung mit dem Masseanschluß des Mikroprozessors verbunden werden. Unter den Quarzen Masseflächen anlegen, damit keine anderen Leiterbahnen unter dem Quarz durch oder nahe vorbeilaufen, diese Masseflächen ebenfalls als Stichleitung an Mikroprozessor-Masse führen.

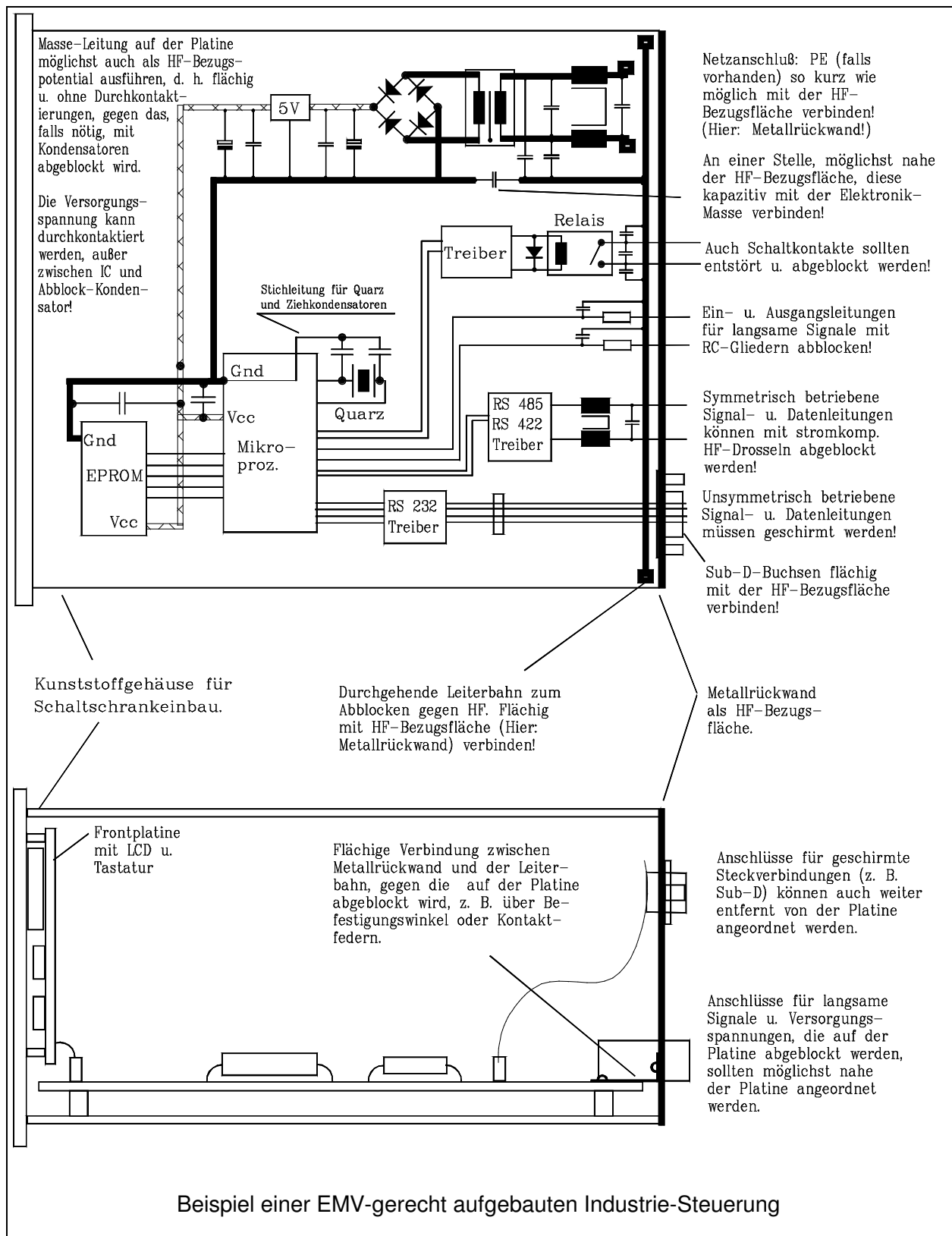
Elektronik-Masse und Erde (Schirm) sollten so verlegt werden, daß eine gute kapazitive Verkopplung möglich ist. Elektronik-Masse und Erde nicht galvanisch miteinander verbinden (Erdschleifen!), sondern über einen Kondensator 1..100 nF.

Alle Metallteile und metallisierten Teile eines Gerätes untereinander HF-mäßig gut, d. h. flächig, verbinden und an einer Stelle mit dem Schutzleiter (falls vorhanden) verbinden!

Systemtakte immer so langsam wie möglich wählen, Datensignale sollten keine Überschwinger aufweisen. Alle Eingänge von Logik- und Mikroprozessor-Bausteinen mit Abblockkondensatoren so langsam wie möglich machen (v. a. Reset- und Interrupt-Eingänge), unbenutzte Eingänge so niederohmig wie möglich auf Masse oder Versorgungsspannung legen. Watch-Dog-Timer verwenden und unbenutzte ROM-Bereiche mit Restart-Kommandos belegen!

Zustandsgesteuerte Logik ist störfester als flankengesteuerte!

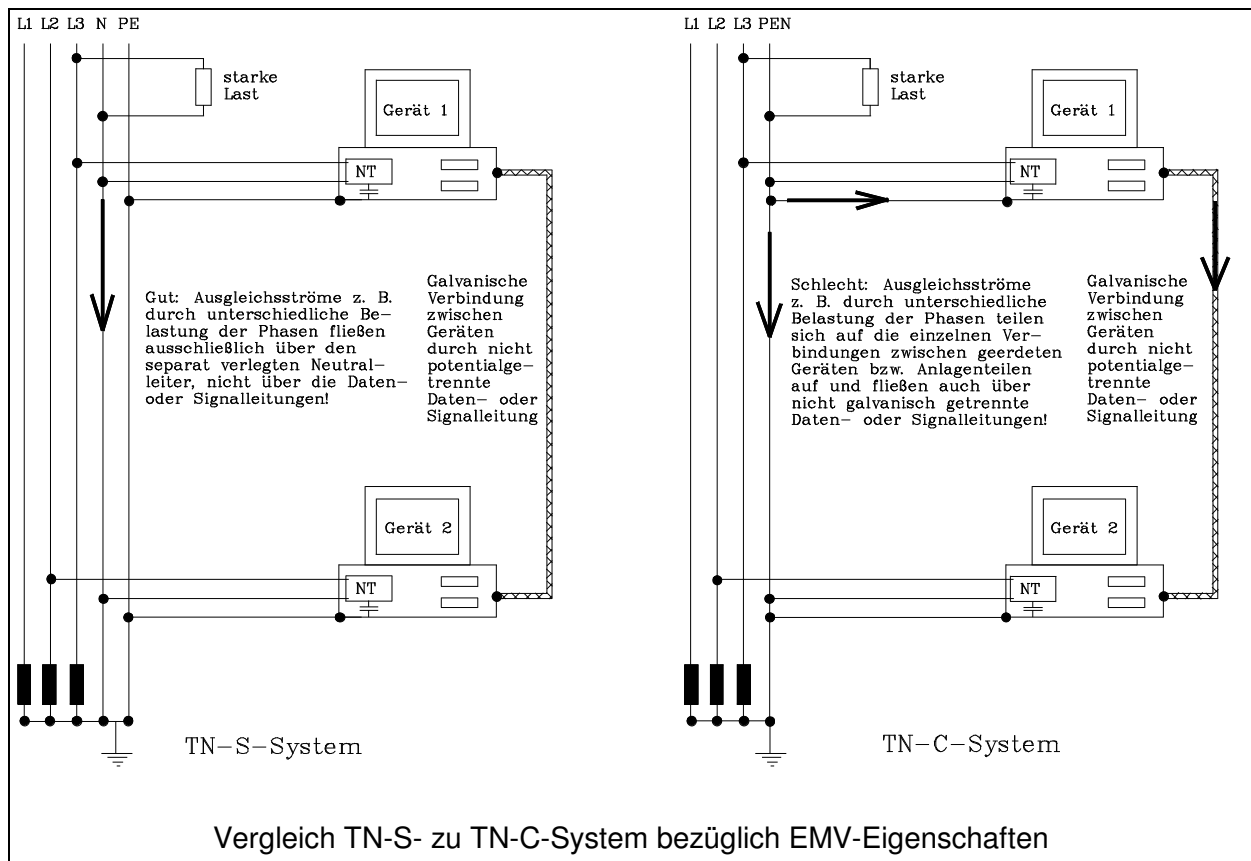
Auch EMV-optimierte Programmierung kann zur Erhöhung der Störfestigkeit beitragen, indem an kritischen Programmstellen Mehrfachabfragen mit Plausibilitätskontrollen eingefügt werden, um z. B. kurzzeitige Störungen durch Schaltvorgänge, die auf einen digitalen Eingang treffen, auszufiltern.



EMV-gerechter Schaltschrank- und Anlagenbau

1 Allgemeine Hinweise zur Elektroinstallation in Gebäuden bzw. großen Anlagen

Die Elektroinstallation sollte, wenn möglich, als TN-S-Netz ausgeführt werden, bei dem der Schutzleiter und der Neutralleiter im kompletten Gebäude getrennt verlegt und nur an einem zentralen Einspeisepunkt miteinander verbunden sind. Dadurch müssen die oft starken Ausgleichsströme, z. B. durch unsymmetrische Belastung der drei Phasen im Netz, über den Neutralleiter fließen, während der Schutzleiter im Normalfall ausschließlich zur Ableitung hochfrequenter Störungen verwendet werden kann.



Bei vorhandenem TN-C-System hilft bei Störungen zwischen verteilten Geräten häufig nur eine konsequente Verwendung potentialgetrennter Signal- und Datenleitungen bzw. Schnittstellen. Dies gilt insbesondere bei Geräten auf PC-Basis: Hier kommt noch erschwerend hinzu, daß bei diesen standardmäßig die Elektronik-Masse direkt mit dem Schutzleiter verbunden ist. Dadurch entsteht nicht nur eine Erdschleife, z. B. über den Schirm einer Datenleitung, sondern eine Masseschleife auf der Datenleitung selbst!

Weiterhin sollten alle größeren Metallstrukturen des Gebäudes (Stahlträger, Armierungen, Kabelkanäle, Rohrleitungen) bzw. der Anlage an möglichst vielen Stellen miteinander verbunden werden, d. h. ein maschenförmiges Massekonzept ist zu bevorzugen. Die Verbindungen sollten möglichst flächig, d. h. über Erdungsbänder, -schellen oder -schienen erfolgen.

2 Schaltschrank allgemein

Der **Schaltschrank** mit den Türen sollte möglichst **aus Metall** bestehen, um eine gewisse Abschirmwirkung zu erzielen. Es muß aber nur in absoluten Ausnahmefällen ein sogenannter EMV-Schaltschrank sein, der um ein mehrfaches teurer gegenüber einem Standardschaltschrank ist.

Wichtig ist, daß alle größeren **Metallteile** des Schaltschranks, d. h. vor allem die Seitenwände, die Montageplatte und die Türen, elektrisch gut, d. h. **flächig und mehrfach miteinander verbunden** sind. Dies ist notwendig, um zu verhindern, daß Teile des Schaltschranks als "Antennen" wirken und Störungen, die entweder durch Geräte innerhalb des Schaltschranks erzeugt werden oder von ausserhalb auf den Schaltschrank einwirken, ab- bzw. einstrahlen.

Im Normalfall reicht es völlig aus, wenn ein Standard-Schaltschrank verwendet wird, bei dem die Seitenwände an den Ecken über Verschraubungen elektrisch leitend miteinander verbunden sind und die Montageplatte über elektrisch leitende Stehbolzen befestigt ist.

Die häufigste **Schwachstelle** sind die **Türen**, da diese meist nur **über** einen grün-gelben Schutzleiter geerdet sind. Hier sollten über den Scharnieren zusätzlich flexible **Massebänder** ("Flachbänder") gelegt werden, um die Türen flächig an das restliche Gehäuse anzubinden.

Falls eine **Montageplatte** verwendet wird, muß diese an den Stellen, an denen Geräte eingebaut werden, die einen guten Massekontakt benötigen (Schaltnetzteile, Frequenzumrichter, Servoantriebe, Entstörfilter, empfindliche Elektronik, etc.) blank gemacht werden, damit eine möglichst gute, d. h. flächige Verbindung dieser Geräte zur geerdeten Montageplatte gewährleistet ist. Vorsicht bei feuchter Umgebung, dann korrodieren die blanken Flächen, und nach einer gewissen Zeit sind diese Maßnahmen wieder unwirksam, daher **am besten** eine **verzinkte Montageplatte** verwenden!

Die Montageplatte muß wiederum an mehreren Stellen mit dem Schaltschrankgehäuse elektrisch leitend verbunden werden, z. B. über Stehbolzen.

3 Anordnung der Geräte im Schaltschrank und Leitungsführung

Wichtig ist, **starke Störer**, z. B. Frequenzumrichter, Motorantriebe oder auch Schütze von vornherein so anzuordnen, daß diese **von empfindlichen Geräten** innerhalb des Schaltschranks, z. B. SPS, Steuerungen, sonstige Elektronik, soweit wie möglich voneinander **entfernt** sind.

Dies allein nützt aber noch gar nichts, wenn dann bei der Leitungsführung der Fehler gemacht wird, die störbehafteten Leitungen, z. B. die Motorleitung eines Frequenzumrichters, parallel zu empfindlichen Signal- u. Datenleitungen zu verlegen. Dann verkoppeln die Störungen über die Leitungen, und die ganze Mühe war umsonst!

Deshalb nicht nur die Geräte mit hohem Störpotential und die störepfindlichen Geräte, sondern auch deren **Zu- und Ableitungen** soweit wie möglich **voneinander getrennt** verlegen! Dabei sollten die **Leitungen mit hohem Störpotential**, v. a. Motorleitungen von Frequenzumrichtern, innerhalb des Schaltschranks **so kurz wie möglich** gehalten werden!

Bei der Anordnung der Geräte im Schaltschrank sollte soweit wie möglich auch schon beachtet werden, wie nachher die Leitungen vom Schaltschrank zu den anderen Maschinen- bzw. Anlagenteilen verlegt werden, um unnötige Verkopplungen durch parallel gelegte Leitungen zu vermeiden.

Ist eine **Kreuzung** zwischen einer störbehafteten Leitung und einer Signal- u. Datenleitung unumgänglich, sollte diese möglichst **rechtwinklig** ausgeführt sein, um die Verkopplung so gering wie möglich zu halten!

4 Filterung von Störungen

Für Geräte, die starke Störungen erzeugen, z. B. Frequenzumrichter oder Servo-Antriebe, werden vom Hersteller oder Zubehörfirmen meist passende Entstörfilter angeboten.

Wichtig hierbei ist erstens, daß diese **Filter** so **nah** wie möglich **am** zu entstörenden **Gerät** angeordnet werden, damit die Verbindungsleitung, auf der der hohe Störpegel vorhanden ist, so kurz wie möglich gehalten wird und die Störungen nicht in andere Leitungen oder Geräte in der Nähe einkoppeln können. Zweitens enthalten diese Filter meist sogenannte Y-Kondensatoren, d. h. Kondensatoren von Phase bzw. Neutralleiter gegen Erde. Damit diese die Störungen optimal ableiten können, muß der **Erdanschluß** des Filters so **kurz und flächig** wie möglich **mit** der geerdeten **Montageplatte verbunden werden**.

Auch der Erdanschluß und das Metallgehäuse des Frequenzumrichters (sofern vorhanden) sollte mit der Montageplatte kurz und möglichst flächig elektrisch kontaktiert werden.

Einige Anmerkungen zu Frequenzumrichtern: In der Mehrzahl der Fälle, in denen eine Anlage aufgrund von EMV-Problemen nicht funktioniert, sind unentstörte oder falsch entstörte Frequenzumrichter mit im Spiel!

Deshalb folgende Ratschläge beachten:

Jeder **Frequenzumrichter** muß **netzseitig** unbedingt mit einem passenden **Entstörfilter** ausgerüstet werden, sofern er nicht schon werksseitig entsprechend entstört ist.

Lastseitig gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder wird die **Leitung zum Motor geschirmt** und der Schirm auf beiden Seiten, d. h. am Frequenzumrichter und am Motor so kurz und flächig wie möglich aufgelegt **oder** es wird ein sogenanntes **Ausgangsfilter** verwendet, daß die Störungen auf der Motorleitung entsprechend verringert.

Die **Schirmung** der Motorleitung kann **für kurze** bis mittellange **Leitungen** angewendet werden. Nachteilig ist, daß mit länger werdender Motorleitung die Lastkapazität zunimmt und dadurch die Schalttransistoren im Frequenzumrichter überlastet werden können. Außerdem wird durch die zusätzliche Lastkapazität der geschirmten Leitung der Entstöraufwand auf der Netzseite höher!

Bei der Lösung mit **Ausgangsfilter** muß dieses dann ebenso wie das Netzfilter so **nah** wie möglich **am Frequenzumrichter** sitzen! Ein Ausgangsfilter gegen hochfrequente Störspannungen auf der Motorleitung ist nicht zu verwechseln mit einem du/dt-Filter ("Sinus-Filter"). Diese Sinusfilter begrenzen die Anstiegszeit der Schaltflanken und sollen dadurch die Motorwicklung vor zu hohen Schaltspitzen schützen sowie die Geräuschentwicklung durch die Schaltfrequenz des Frequenzumrichters verringern. Als Nebeneffekt verringern sie dadurch ebenfalls die Störungen. Diese Sinus-Filter sind jedoch meist relativ aufwendig, teuer und werden wegen der EMV alleine in vielen Fällen nicht benötigt. **Oft reicht** für den Zweck der Entstörung alleine schon eine **stromkompensierte Drossel** in der Motorleitung, im einfachsten Fall wird die ungeschirmte Motorleitung mehrmals locker durch einen Ferrit-Ringkern gewickelt.

Keinesfalls darf ausgangsseitig jedoch ein normales Netzfilter verwendet werden, da dieses meist hohe Kapazitäten gegen Erde besitzt, die dazu führen können, daß die Schalttransistoren im Frequenzumrichter auf eine kapazitive Last schalten müssen, dadurch überlastet werden und dann durchbrennen.

5 Schirmung von Leitungen

Bei der Schirmung von Leitungen gibt es in der Praxis die meiste Verwirrung, bewährt haben sich folgende Maßnahmen:

Schirme von Leitungen mit hohem Stör- bzw. Signalpegel, z. B. Motorleitungen von Frequenzumrichtern **sowie digitale Signal- u. Datenleitungen: Schirm auf beiden Seiten** direkt so kurz und flächig wie möglich **auflegen**, d. h. auf Schaltschrank- oder Maschinengehäuse legen. Dies ist unter EMV-Gesichtspunkten die beste Lösung!

Es kann aber bei weiter auseinander liegenden und separat geerdeten Anlagenteilen durch unterschiedliche Erdpotentiale zu Ausgleichsströmen ("Erd"- bzw. "Brummschleifen") kommen, die wiederum Störungen verursachen können.

Dann sollte zunächst von einem zentralen Punkt aus, z. B. dem Schaltschrank, ein separater Erdleiter zu den anderen Anlagenteilen verlegt und deren lokale Erdung, soweit möglich und sicherheitstechnisch zulässig, aufgetrennt werden.

Hilft dieses nicht, oder ist dieses aus installations- oder sicherheitstechnischen Gründen nicht möglich, sollten die Schirme am zentralen Punkt direkt und an den verteilten anderen Anlagen- oder Maschinenteilen kapazitiv über einen Kondensator von 10..100 nF aufgelegt werden.

Schirme von analogen Signalleitungen, z. B. Temperatur-Sensoren **nur einseitig**, und zwar auf der Seite der Auswerte-Elektronik, **auflegen**. Hier werden durch die Elektronik sehr niedrige Spannungen im mV- oder μ V-Bereich ausgewertet, die schon durch geringe niederfrequente Brummspannungen stark verfälscht werden können. Andererseits haben diese Signale selbst kein nennenswertes Störpotential, da sie meist quasistatisch sind, d. h. sich zeitlich nur sehr langsam ändern.

Es kann unter ungünstigen Umständen jedoch zu Problemen kommen, wenn in der Nähe des Sensors eine starke Störquelle vorhanden ist, die in den Sensor einkoppelt. Dann sollte der Schirm sensorseitig über einen Kondensator von 10..100 nF aufgelegt werden.

Einige Anmerkungen zur **Schirmauflegung im Schaltschrank**: Die Schirme der Leitungen von und zum Schaltschrank sollten **direkt am Rand** des Schaltschranks auf die Schaltschrankerde aufgelegt werden. Auf keinen Fall den Schirm z. B. von unten in den Schaltschrank einführen und dann erst nach einem Meter links oben an der SPS auflegen. Dann werden nämlich alle Störungen, die über den Schirm gegen die Schaltschrank-Erde abfließen, komplett durch den Schaltschrank geschleift und können innerhalb des Schaltschranks in andere Geräte oder Leitungen einkoppeln!

Ist die geschirmte Leitung nach der Einführung und Schirmauflegung am Rand innerhalb des Schaltschranks noch länger und hat es im Schaltschrank starke Störer, kann es erforderlich sein, den Schirm ein zweites Mal innerhalb des Schaltschranks direkt an der Empfangs-Elektronik aufzulegen.

Am Besten z. B. alle Leitungen von unten her in den Schaltschrank einführen und dann gleich nach dem Eintritt in den Schaltschrank entweder die Schirme mit Erdungsschellen flächig auf die Montageplatte auflegen oder bei ungeschirmten Leitungen diese auf kürzestem Weg zum Entstörfilter führen.

6 Komponenten im Schaltschrank

Hier kommt es in der Praxis immer wieder zu Mißverständnissen:

Auch wenn ein Schaltschrank vollständig aus Komponenten aufgebaut wird, die zu Recht mit dem CE-Zeichen (nach der EMV-Richtlinie) versehen sind, sollten zusätzlich zu den Einbau-Anweisungen des Herstellers die vorstehend beschriebenen Ratschläge beachtet werden!

Beispiel 1: 24 VDC-Schaltnetzteil für den Schaltschrank mit 230 VAC-Eingang und CE-Zeichen: Die Europa-Normen schreiben die leitungsgebundene Funkentstörung (d. h. im Frequenzbereich bis zu 30 MHz) nur für Wechselspannungs-Netzanschlüsse vor, d. h. für 230 (110) oder 400 VAC-Netze.

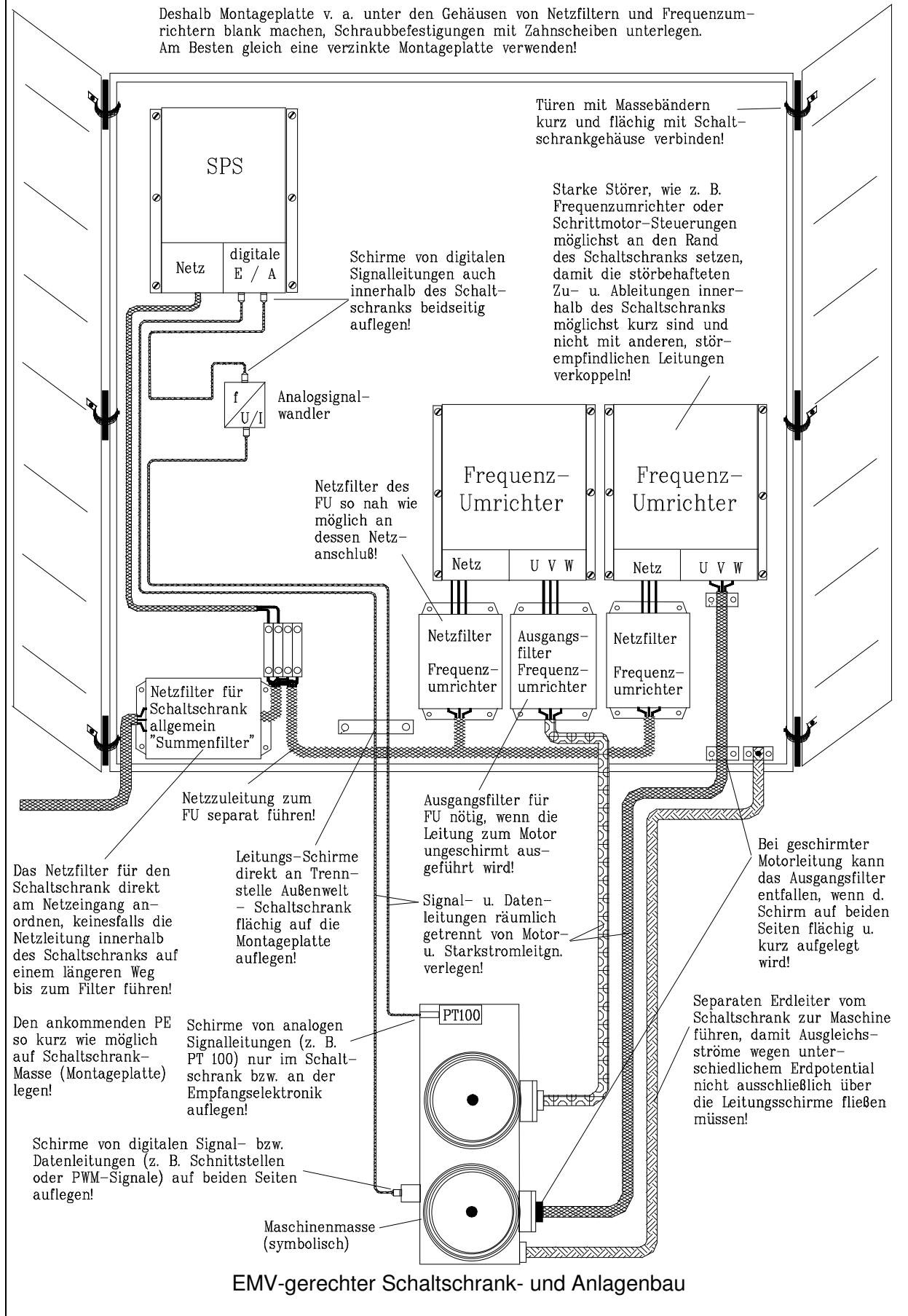
Dies bedeutet, daß der lastseitige Anschluß eines CE-konformen Schaltnetzteils überhaupt nicht entstört sein muß! Werden nun die lastseitigen Anschlußleitungen im Schaltschrank parallel zur Netzanschlußleitung verlegt, können die hochfrequenten Störungen, die von der Lastseite herrühren, wieder in die für sich alleine entstörte Netzanschluß-Leitung (oder andere Komponenten im Schaltschrank) einkoppeln und dadurch wieder Probleme verursachen.

Beispiel 2: Schnittstellenwandler für Industrie-Bus mit CE-Zeichen und 24 VDC Versorgung: Hier muß der Hersteller nach den z. Zt. gültigen Europa-Normen keinerlei leitungsgebundene Entstörung durchführen, d. h. im Frequenzbereich bis herauf zu 30 MHz kann das Gerät praktisch beliebig hohe Störungen aussenden und ist trotzdem normkonform! Werden jetzt empfindliche Fühler- oder Datenleitungen parallel zu den Anschlußleitungen des Schnittstellenwandes verlegt, kann es zu Störungen kommen, ebenso, wenn an die 24 VDC-Versorgung des Wandlers parallel noch andere empfindliche Komponenten angeschlossen werden.

Es gibt aber viele Hersteller, die ihre Komponenten besser entstören, als es nach den Europa-Normen sein müßte, deshalb technische Daten beachten oder sicherheitshalber beim Hersteller nachfragen, das CE-Zeichen bzw. die Konformitätserklärung nach der EMV-Richtlinie alleine kann oft nicht ausreichend sein.

Alle Geräte mit Metallgehäuse oder Erdanschluß müssen so niederohmig wie möglich, d. h. kurz und flächig, mit der Montageplatte des Schaltschranks verbunden werden.

Deshalb Montageplatte v. a. unter den Gehäusen von Netzfiltern und Frequenzumrichtern blank machen, Schraubbefestigungen mit Zahnscheiben unterlegen. Am Besten gleich eine verzinkte Montageplatte verwenden!



EMV-gerechter Schaltschrank- und Anlagenbau

Wissenswertes über Funkentstörfilter

1 Allgemeines


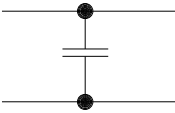
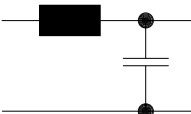
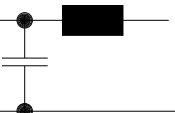
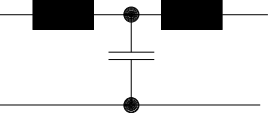
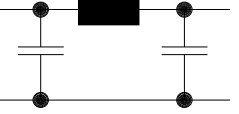
Funkentstörfilter sind Kombinationen aus mehreren, üblicherweise passiven, elektronischen Bauelementen, die das niederfrequente Nutzsignal möglichst wenig und die unerwünschten hochfrequenten Störsignale möglichst stark bedämpfen.

Funkentstörfilter gibt es als einbaufertige, komplette Einheiten, sie lassen sich aber ebenso, und das meist preiswerter, beispielsweise auf der Platine des zu entstörenden Gerätes aufbauen.

Die Filterwirkung beruht darauf, daß Entstörfilter für die hochfrequenten Störsignale eine möglichst große Impedanz-Fehlanpassung der Störquelle zur Störsenke hin darstellen. Dadurch werden die Störsignale weitgehend zur Störquelle zurück reflektiert.

Im Gegensatz zu Filtern zur Übertragung von Nutzsignalen, deren Impedanzen möglichst gut angepaßt sein sollten, um Reflektionen zu vermeiden, beruht die Wirkung von Entstörfiltern also auf einer möglichst großen Impedanz-Fehlanpassung für die Störsignale!

Eine kleine Hilfe bei der Auswahl der geeigneten Filterstruktur gibt die folgende Übersicht:

Impedanz der Störquelle	geeignete Filter	Impedanz der Störsenke
niedrig		niedrig
hoch		hoch
niedrig		hoch
hoch		niedrig
niedrig unbekannt		niedrig unbekannt
hoch unbekannt		hoch unbekannt

Übersicht über geeignete Strukturen von Funkentstörfiltern

2 Anwendungsgebiete

Eingesetzt werden Funkentstörfilter einmal als

- einbaufertige Komponenten zur Entstörung von Geräten, Maschinen und Anlagen, bei denen der Anwender keinen Einfluß mehr auf die EMV-Eigenschaften der Komponenten hat und diese daher an seine elektromagnetische Umgebung anpassen muß, oder bei denen es aus Preisgründen keinen Sinn macht, alle Komponenten einzeln zu entstören bzw. störfest zu machen, sowie als
- diskrete Schaltungen direkt auf der Leiterplatte aufgebaut zur Entstörung von elektronischen Schaltungen, was bei größeren Stückzahlen wirtschaftlicher ist.

3 Montagehinweise

Wichtig bei Funkentstörfiltern ist, daß sie so nahe wie möglich am zu entstörenden Gerät bzw. der zu entstörenden Baugruppe sitzen, damit die Verbindungsleitungen zum Gerät so kurz wie möglich gehalten werden. Dies ist deshalb so wichtig, weil diese Verbindungsleitungen zwischen Entstörfilter und Gerät wie Sende- bzw. Empfangsantennen wirken, die die Störungen, die aus dem Gerät herauskommen in die Umgebung abstrahlen, bevor sie zum Filter gelangen.

Umgekehrt fangen sich diese Leitungen Störungen aus der Umgebung des Geräts ein, die dann ungefiltert in das Gerät einkoppeln können.

Ein häufiger Fehler in der Praxis ist, daß die netzseitigen und die lastseitigen Anschlußleitungen des Filters überkreuzt oder schlimmer noch, teilweise parallel gelegt werden. Dann wird das Filter durch die direkte Verkopplung über die Leitungen nahezu unwirksam!

Bei Entstörfiltern, die Kondensatoren gegen Erde (Y-C's) enthalten (dies ist bei den meisten Filtern der Fall), ist darauf zu achten, daß die Verbindung vom Erd-Anschlußpunkt zur Geräte- bzw. Schaltschrankmasse so kurz und flächig wie möglich ist. Bei Filtern mit Metallgehäuse oder Metall-Bodenplatte sollte diese unbedingt flächig elektrisch leitend mit der Gerätemasse verbunden werden, z. B. über Befestigungs-Schrauben mit Zahnscheiben etc.

4 Wichtige Kriterien bei Funkentstörfiltern sind

4. 1 Nenn-Strom, maximaler Dauer-Betriebsstrom und Umgebungstemperatur

Nennstrom ist der maximale Dauer-Betriebsstrom bei ohmscher Last, korrektem Einbau, 50..60 Hz Netzfrequenz und der maximal zulässigen Umgebungstemperatur (üblich: 40 °C).

Bei höherer Umgebungstemperatur nimmt der zulässige Dauer-Betriebsstrom entsprechend ab, ebenso bei Lasten, die Netzüberschwingungen erzeugen, z. B. Phasenanschnitt-Steuerungen, Triac's, Halbleiter-Relais oder primär getaktete Schaltnetzteile. Durch die Netzüberschwingungen erhöhen sich die Verluste v. a. in den induktiven Bauelementen, was sich in einer verstärkten Wärmeentwicklung ausdrückt.

Kurzzeitige Überströme sind zulässig, wenn anschließend eine entsprechend geringere Strombelastung erfolgt, dies muß aber immer individuell ausgetestet werden.

4.2 Gehäuseabmessungen und Art der Anschlüsse

Die preiswerteste Variante sind Kunststoffgehäuse und Flachsteckzungen, bei Strömen größer als 16 A sind spezielle Durchführungsklemmen erforderlich, die alleine einen Aufpreis von ca. 5..10 € pro Filter bedeuten! Bei Verwendung von geraden Flachsteckzungen und isolierten Flachsteckhülsen gelten diese Anschlüsse als berührungsgeschützt nach VBG.

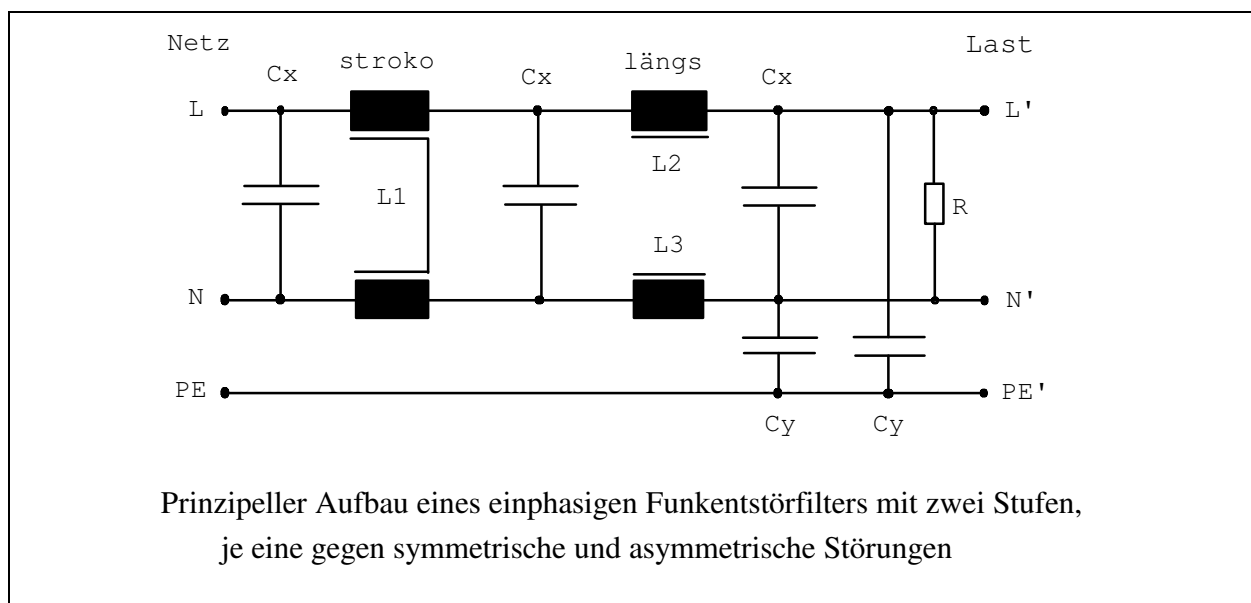
Bei Filtern für höhere Stromstärken als ca. 4 x 16 A sind spezielle Kunststoff- bzw. Metallgehäuse unvermeidlich, diese schlagen mit ca. 5..10 € Aufpreis pro Filter zu Buche.

4.3 Filterwirkung

Entscheidend für den Aufwand und den Preis des Entstörfilters ist v. a. die benötigte Filterwirkung. Diese hängt von der Art des zu entstörenden Geräts, dem einzuhaltenden Störgrad und anderen Randbedingungen, z. B. dem zulässigen Ableitstrom, ab.

Prinzipiell gibt es zwei Arten leitungsgebundener elektromagnetischer Störungen: Symmetrische (Gegentakt-) Störungen und asymmetrische (Gleichtakt-) Störungen. In der Praxis liegt fast immer eine Kombination aus beiden Störarten vor.

Asymmetrische Störungen sind gegen Erde gerichtet und werden hauptsächlich von Frequenzumrichtern, Schaltnetzteilen und hochfrequenten Signalquellen erzeugt. Sie werden entweder mit Y-Kondensatoren gegen Erde kurzgeschlossen oder mit stromkompensierten Drosseln abgeblockt. Prinzipiell läßt sich dieselbe Filterwirkung mit Y-C's gegen Erde oder mit einer stromkompensierten Drossel erreichen. Im Normalfall sind die Y-C's billiger als eine Drossel. Deshalb versucht man zunächst, die maximal erlaubte Y-Kapazität gegen Erde auszuschöpfen. Dazu muß man allerdings den maximal zulässigen Ableitstrom kennen, der je nach Gerätesicherheitsvorschriften unterschiedlich ausfallen kann. Anschließend erhöht man, falls notwendig, die asymmetrische Dämpfung durch eine oder mehrere stromkompensierte Drosseln.



Bei symmetrischen Störungen durch Kommutierungseinbrüche von Gleichrichtern oder Thyristor- oder Phasenanschnittsteuerungen setzt man zunächst X-Kondensatoren steigender Kapazität ein. Reichen diese nicht aus, setzt man zusätzliche Längsdrosseln auf Eisenpulver-Kernen ein. Diese werden üblicherweise zur Last hin eingesetzt, während die stromkompensierte Drossel zur Netzseite hin eingesetzt wird.

Bei mehrstufigen Filtern ist zu beachten, daß häufig nur mehrere stromkompensierte Drosseln eingesetzt werden, die zwar die asymmetrische Dämpfung erhöhen, nicht jedoch die im Industrie-Bereich ebenfalls sehr wichtige symmetrische Dämpfung.

Wir stellen zweistufige Filter üblicherweise mit einer Stufe gegen asymmetrische und einer Stufe gegen symmetrische Störungen her, was erheblich aufwendiger ist als nur zwei stromkompensierte Drosseln in Reihe zu schalten.

Bei vielen anderen Herstellern sind Entstörfilter mit zusätzlichen Eisenpulverdrosseln gegen symmetrische Störungen durch die Bezeichnung "sehr hohe Dämpfung auch unter 150 kHz" oder "höchste Dämpfung" gekennzeichnet, da diese Eisenpulverdrosseln relativ aufwendig herzustellen sind und erst als letztes Mittel eingesetzt werden.

4.4 Dämpfungskurven

Dämpfungskurven von Entstörfiltern oder -bauteilen werden von Entwicklern häufig zu wichtig genommen: Sie eignen sich allenfalls zum prinzipiellen Vergleich mehrerer Bauteile oder Filter untereinander, aber es darf nicht aus der Dämpfungskurve eines Filters oder Bauteils direkt auf dessen Eignung für einen praktischen Anwendungsfall geschlossen werden!

Bei der Ermittlung der Dämpfungskurven werden drei Voraussetzungen angenommen, die in der Praxis fast nie gegeben sind: Das Filter wird im Leerlauf betrieben, d. h. es fließt kein Laststrom, das Filter ist auf beiden Seiten mit derselben Impedanz (üblicherweise 50 Ohm reell) abgeschlossen und es wird nur die Filterwirkung bei Kleinsignalbetrieb gemessen (wenige mV Meßsignal). Dadurch werden insbesondere Effekte, die in der Praxis durch die Sättigung des Kernmaterials der Induktivitäten (Betriebsstrom bzw. starke pulsformige Störungen) auftreten, vernachlässigt.

Deshalb kann aus der Dämpfungskurve alleine keinesfalls auf eine konkrete Filterwirkung in der Praxis unter Lastbedingungen geschlossen werden !

Ein Filter mit einer "schlechteren" Dämpfungskurve kann in der Praxis eine bessere Entstörfunktion besitzen als ein Filter mit der "besseren" Dämpfungskurve !

5 CE-Kennzeichnung

Übliche Funkentstörfilter sind rein passive Bauteile und benötigen weder eine CE-Kennzeichnung nach der Niederspannungs- noch nach der EMV-Richtlinie!

Ausnahmen können Filter mit aktiven Komponenten oder Überspannungsableitern sein.

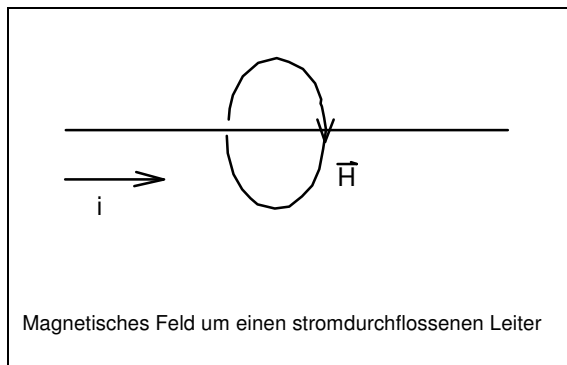
Unsere Funkentstörfilter für Netzspannung werden grundsätzlich nach VDE 565-3 bzw. EN 60969-1 aufgebaut und geprüft.

Spulen und Drosseln - eine Einführung

1 Allgemeines

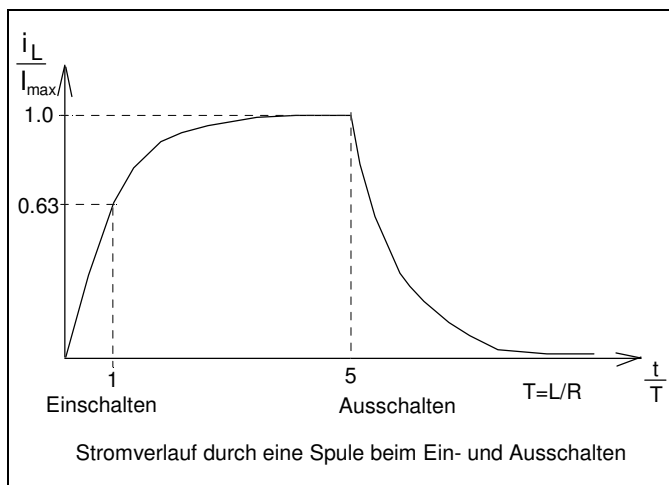
Spulen bzw. Drosseln sind passive elektronische Bauelemente, die

- einen frequenzabhängigen Blindwiderstand besitzen, der mit zunehmender Frequenz größer wird, also ein induktives Verhalten aufweist und
- elektrische Energie speichern und wieder abgeben können.



Die einfachste Spule ist ein elektrischer Leiter, um den herum sich ein magnetisches Feld aufbaut, sobald er von einem Strom durchflossen wird.

Wird der Strom eingeschaltet, kommt dieser nicht sofort mit voller Stärke am anderen Ende des Leiters an, sondern steigt exponentiell verzögert, da sich zuerst das Magnetfeld um den Leiter herum aufbauen muß.



Wird der Strom abgeschaltet, baut sich das Magnetfeld wieder ab. Dabei wird im Leiter ein Strom induziert, der zeitlich exponentiell abnimmt, bis das Magnetfeld vollständig abgebaut ist, d. h. die Spule wird kurzzeitig zu einer Stromquelle.

Die Energie steckt also in dem magnetischen Feld um den Leiter und stellt eine elektromagnetische Trägheit dar, die versucht, sich jeder Änderung des Stromflusses durch den Leiter zu widersetzen.

Ein Maß für diese Trägheit ist die Induktivität. Je größer die Induktivität,

desto größer ist die Fähigkeit der Spule, sich einer Änderung des sie durchfließenden Stroms zu widersetzen.

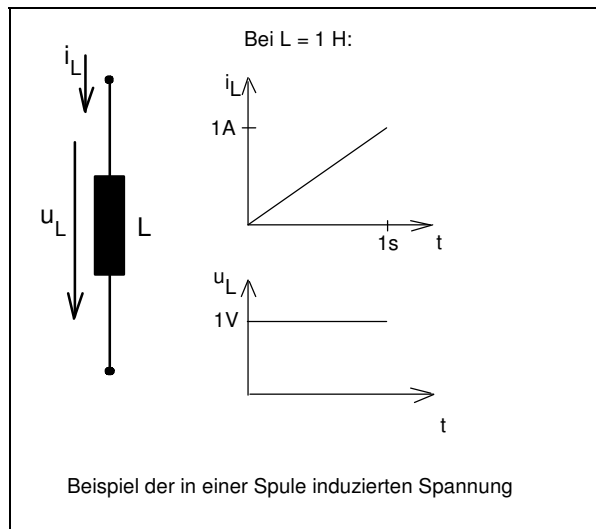
Zur Erhöhung der Induktivität wickelt man üblicherweise den Leiter mehrfach auf einen Spulenkörper, um durch die erhöhte Windungszahl eine Addition der einzelnen Magnetfelder und damit eine konzentrierte magnetische Durchflutung innerhalb eines möglichst kleinen Volumens zu erreichen.

Bringt man nun in den Raum, der vom Magnetfeld durchflutet wird, eine Substanz ("Kern") ein, die mehr Elementarmagnete enthält als das Vakuum bzw. die Luft, verstärkt sich der Effekt abermals.

Das Maß, um das sich dieser Effekt, und damit auch die im Magnetfeld gespeicherte Energie verstärkt, nennt sich relative Permeabilität μ_r . $\mu_r = 1$ entspricht dem Vakuum, $\mu_r = 85$ bedeutet, daß die gespeicherte Energie im gleichen Volumen 85 mal höher ist als im Vakuum.

Hier eine Zusammenstellung wichtiger Formeln zu Spulen:

1.1 Induktivität (auch "Selbstinduktionskoeffizient" genannt)



Eine Spule hat eine Induktivität von 1 Henry, wenn in ihr bei gleichmäßiger Änderung des Spulenstroms von 1 A in 1 Sekunde eine Spannung von 1 V induziert wird.

$$u_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \text{ [V] mit}$$

u_L : Spannung über der Spule

Δi : Stromänderung

Δt : Zeitdauer der Stromänderung

Die Vorzeichen und die Pfeilung in der nebenstehenden Zeichnung entsprechen dem Verbraucherzählpfeilsystem.

Der A_L -Wert ("Spulenkonstante") gibt an, welche Induktivität eine Windung auf dem entsprechenden Kern hat und wird meist vom Hersteller des Kerns in Datenbüchern angegeben. Er dient in der Praxis meist zum Bestimmen der notwendigen Windungszahl für eine gewünschte Induktivität auf einem gegebenen Kern.

$$L = N^2 A_L \quad [\text{H} = \text{Vs/A} = \Omega\text{s}]$$

$$A_L = \frac{\mu_0 \mu_r A}{l_m} \quad [\text{H}]$$

N : Windungszahl

L : Induktivität

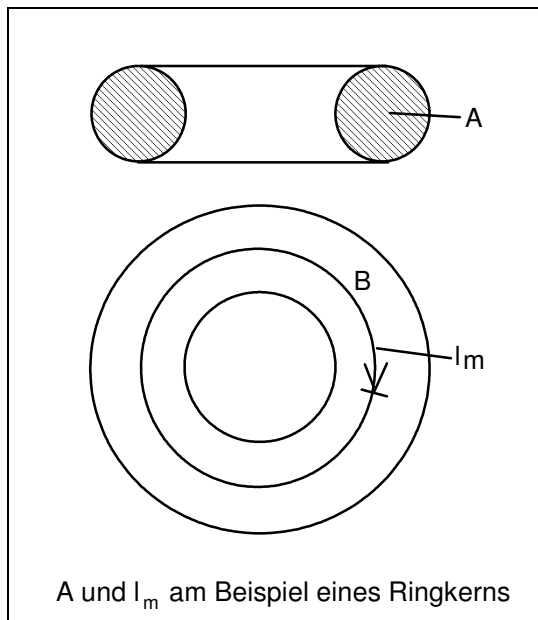
A_L : "Spulenkonstante" (A_L -Wert)

μ_0 : magnet. Feldkonstante $1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

μ_r : relative Permeabilitätszahl

A : Querschnitt der Spulenfläche

l_m : Mittlere Länge der magnetischen Feldlinien



Beispiel:

Gesucht ist eine Induktivität von ca. 300 μH .

Gegeben ist ein Ferrit-Ringkern mit einem A_L -Wert von 2 250 nH. Wieviele Windungen müssen auf den Kern aufgebracht werden, um die gewünschte Induktivität zu erreichen?

Lösung: $N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{300\mu\text{H}}{2.25\mu\text{H}}} = 11,5$ Windungen, in der Praxis also 12 Windungen.

Achtung: Die Windungen werden stets auf der Innenseite des Kerns gezählt, d. h. auch wenn ein Leiter nur gerade durch den Kern gesteckt wird, zählt dies bereits als eine volle Windung!

1.2 Induktiver Blindwiderstand

$$Z_L = j \omega L \quad [\Omega]$$

ω : Kreisfrequenz = $2 \pi f$

1.3 Zusammenhang zwischen Impedanz und Einfügungsdämpfung

$$Z_L = 2Z_S(10^{\frac{a}{20}} - 1) \quad [\Omega]$$

Z_L : Impedanz der Induktivität

Z_S : Impedanz des Bezugssystems (z. B. 50 Ω)

$$a = 20 \log \left(\frac{Z_L}{2Z_S} + 1 \right) \quad [\text{dB}]$$

a : Einfügungsdämpfung innerhalb des Bezugssystems

1.4 Energie im magnetischen Feld

$$W = 1/2 L I^2 \quad [\text{Ws}]$$

1.5 Magnetische Feldstärke

$$H = N \frac{I}{l_m} \quad [\text{A/m}]$$

l_m : mittlere Länge der magnet. Feldlinien

1.6 Magnetische Flußdichte (auch "Induktion" genannt)

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad [\text{T} = \text{Vs/m}^2]$$

μ_0 : magnet. Feldkonstante $1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

μ_r : relative Permeabilitätszahl (Vakuum: $\mu_r = 1$)

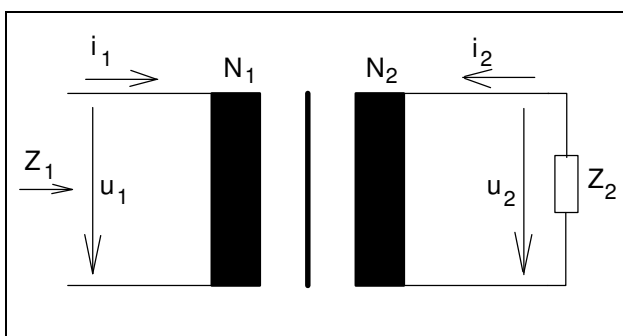
1.7 Zeitkonstante der Spule

Wichtig zur Berechnung von Ein- und Ausschaltvorgängen: Nach einer Periode der Zeitkonstante hat sich der Strom durch die Spule um den Faktor 0,63 erhöht oder vermindert, nach 5 Perioden um den Faktor 0.99.

$$\tau = \frac{L}{R} \quad [\text{s}]$$

R : Wirkwiderstand der Spule (Wicklungswiderstand)

1.8 Verlustloser Übertrager



Übersetzungsverhältnis:

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{i_2}{i_1}$$

N_1, N_2 : Windungszahl Wicklung 1 bzw. 2

u_1, u_2 : Spannung an Wicklung 1 bzw. 2

i_1, i_2 : Strom durch Wicklung 1 bzw. 2

Impedanzverhältnis: $\ddot{u}^2 = \frac{Z_1}{Z_2}$ Z_1, Z_2 : Impedanzen an den Anschlüssen der Wicklung 1 bzw. 2

Beispiel:

Gegeben: Übertrager mit $Z_2 = 100 \text{ Ohm}$ reell, $N_1 = 2 N_2$.

Gesucht: Impedanz Z_1 , d. h. die transformierte Impedanz von Z_2 , die an den Anschlüssen der Wicklung 1 erscheint.

Lösung: $\ddot{u} = N_1/N_2$, mit $N_1 = 2 N_2$ folgt $\ddot{u} = 2$. Daraus ergibt sich $Z_1 = \ddot{u}^2 Z_2$, also 400 Ohm reell.

2 Anwendungsgebiete

Im Folgenden werden Spulen v. a. zur Dämpfung hochfrequenter Signale beschrieben, d. h. sogenannte "Drosseln", aber auch Übertrager und Speicherdrosseln.

Zur Funkentstörung werden eine oder mehrere Drosseln, meist zusammen mit Kondensatoren, zu Filtern zusammengeschaltet. Diese sollen das Nutzsignal, z. B. den Betriebsstrom, möglichst ungehindert durchlassen und ab einer bestimmten Frequenz an aufwärts die Störungen, die im Gerät erzeugt werden, z. B. Taktfrequenzen von Digitalschaltungen oder Schaltnetzteilen und deren Harmonische, möglichst effektiv bedämpfen. Natürlich wirken Filter auch in der umgekehrten Richtung, indem sie Störungen, die von angeschlossenen Netz- oder Signalleitungen her kommen, daran hindern, wirkungsvoll in das Gerät einzukoppeln.

Der Aufbau eines solchen Filters sieht so aus, daß im Gegensatz zur konventionellen Nachrichten-Übertragungstechnik versucht wird, am Ein- und Ausgang des Filters eine möglichst große Fehlanpassung der Impedanzen für die Störsignale zum Gerät bzw. zur Umgebung hin zu erreichen, um die ungewollten Frequenzen am Filter zurück ins Gerät bzw. in die angeschlossenen Leitungen zu reflektieren.

Ein weiterer häufiger Anwendungszweck ist die Energiespeicherung durch sogenannte Speicherdrosseln in Schaltnetzteilen. Sie liefern den benötigten Strom in den Schaltphasen des Schalttransistors.

Zur galvanischen Trennung z. B. zum galvanisch getrennten Ansteuern von Schalttransistoren oder zur Impedanz-Anpassung von Signalen werden Spulen mit mehreren Wicklungen als Übertrager verwendet.

Zur Stromerfassung bzw. Stromerkennung von Wechselströmen werden sogenannte Stromwandler auf Ringkernbasis eingesetzt. Sie bestehen aus einem Kern mit einer Sekundär-Wicklung mit hoher Windungszahl, während der Leiter, dessen Strom erfaßt werden soll, als Primärwicklung durch ein zentrales Loch in der Mitte gesteckt wird.

Auf weitere Anwendungsgebiete von Spulen, z. B. für Schwingkreise, HF-Filter, Elektromagnete oder z. B. zur Ablenkung oder Fokussierung von Elektronenstrahlen in Bildröhren wird hier nicht weiter eingegangen.

3 Kernmaterialien

3.1 Eisenpulver

Eisenpulverkerne bestehen aus mit Bindemittel verpresstem Eisenpulver. Die Eisenpartikel sind durch eine Oxidschicht voneinander isoliert. Durch diese Isolation und das Bindemittel entsteht ein im Kern gleichmäßig verteilter Luftspalt und damit geringe Wirbelstromverluste.

Haupteinsatzgebiet für Eisenpulverkerne sind Längsdrosseln mit üblicherweise einer Wicklung zur Funkentstörung und Speicherdrosseln für Schaltnetzteile. Die typischen relativen Permeabilitäten sind relativ niedrig und liegen zwischen $\mu_r = 35$ für Speicherdrosseln und $\mu_r = 85$ für Funkentstördrosseln.

Die maximale Sättigungsflußdichte liegt für Eisenpulverkerne bei typisch 1,5 T.

Wichtig ist hierbei, daß der Kern bereits durch den Betriebsstrom teilweise gesättigt wird und daher die Induktivität mit zunehmendem Betriebsstrom abnimmt. Im Normalfall wird im Datenblatt die Leerlaufinduktivität angegeben, die nicht der Induktivität beim Nennstrom entspricht! Anders bei Speicherdrosseln: Hier wird im Normalfall die Induktivität bei Nennstrom angegeben, manchmal auch der Verlauf der Induktivität als Funktion des Betriebsstroms.

Für Funkentstörzwecke werden die Drosseln zur Dämpfung der symmetrischen Störungen eingesetzt, die üblicherweise im unteren Frequenzbereich bis ca. 1 MHz auftreten. Typische Anwendungsfälle sind z. B. Phasenanschnittschaltungen (Dimmer), die starke symmetrische Störungen bis etwa 500 kHz erzeugen. Als Sonderausführung gibt es dann noch Eisenpulverdrosseln mit eingelegten Eisenringen, die die Kernverluste absichtlich erhöhen und den Rippel verkleinern. Da diese symmetrischen Störungen nur bei relativ niedrigen Frequenzen eine Rolle spielen, können Funkentstördrosseln auf Eisenpulverkernen mehrlagig gewickelt werden, um eine hohe Induktivität zu erzielen. Die kapazitive Verkopplung über die Wicklung spielt erst bei höheren Frequenzen eine Rolle, bei denen symmetrische Störungen ohnehin praktisch nicht mehr auftreten.

Typische Werte der Leerlaufinduktivität für unsere Funkentstördrosseln sind 150..1000 μH , der Nennstrom geht von 0,5..300 A.

Für Speicherdrosseln wird üblicherweise Kernmaterial mit relativ niedriger Permeabilität verwendet, damit die Induktivität bei Strombelastung nicht zu stark absinkt. Der Arbeitspunkt des Stroms wird bei typ. 60..75 % der Leerlaufinduktivität festgelegt. Wichtig ist hier, daß sich im Eisenpulver bei Umkehr der Stromrichtung, und damit der Ummagnetisierung des Kerns, Wirbelstromverluste bilden, die den Kern sehr stark erwärmen können. Daher darf der Stromrippel über der Drossel nicht zu groß werden. Als Faustregel gilt hier: Hohe Induktivität bewirkt kleinen Rippel, niedrige Induktivität großen Rippel.

Hier eine Übersicht zum sinnvollen Einsatz der verschiedenen Eisenpulver-Kernmaterialien:

relative Permeabilität	Schaltfrequenz d. min. Kernverluste	rel. Preisindex bei gleicher Kerngröße
$\mu_r = 35$	200..500 kHz	3,5
$\mu_r = 55$	50..250 kHz	2,5
$\mu_r = 75..85$	DC..50 kHz	1,0 (Standardmaterial zur Funkentstörung)

Üblicherweise werden die Drosseln mit normalem Kupferlackdraht bewickelt. Die selten verwendete HF-Litze verringert zwar den Skin-Effekt, dieser wird aber bei den gängigen Drahtdurchmessern (bis 2 mm) erst bei Frequenzen über 200 kHz wirksam. Außerdem erhöht die größere parasitäre Kapazität der Wicklung die Schaltverluste in den Transistoren, von den produktionstechnischen Schwierigkeiten bei der Bewicklung ganz abgesehen.

3.2 Molypermalloy-Pulver (MPP)

MPP-Kerne bestehen hauptsächlich aus gepresstem Nickel- bzw. Eisenpulver und werden ähnlich wie Eisenpulverkerne zur Energie-Speicherung eingesetzt. Die maximalen relativen Permeabilitäten liegen etwas höher als bei Eisenpulver ($\mu_r = 25..300$). Der entscheidende Unterschied ist der, daß dieses Material im Vergleich zum Eisenpulver sehr kleine Ummagnetisierungsverluste hat, d. h., daß sich die Stromrichtung über der Drossel auch umkehren kann, ohne daß sich der Kern zu stark erwärmt.

Der typische Einsatzfall für diese Drosseln sind die sogenannten Power-Factor-Correction-Controller, die den Blindleistungsanteil v. a. von primär getakteten Schaltnetzteilen begrenzen, um die Grenzwerte für Netzüberschwingungen einzuhalten, in Einzelfällen werden MPP-Kerne auch als Speicherdrosseln in Schaltnetzteilen mit hohen Taktfrequenzen (bis ca. 300 kHz) eingesetzt.

Vom Preis her sind diese Kerne durch den hohen Nickel-Anteil sehr teuer, ca. um den Faktor 10 gegenüber einem gleichgroßen Standard-Eisenpulver-Kern ($\mu_r = 75..85$).

Als Sonderform gibt es noch die "Kool-M μ -" bzw. "Super-MSS-" Kerne, die eine ähnliche maximale Flußdichte erlauben wie MPP, von den Kernverlusten und dem Preis zwischen Eisenpulver und MPP liegen und ebenfalls zur Power-Factor-Korrektur eingesetzt werden.

3.3 Ferrite

Ferrite sind keramische Materialien, die hart, brüchig und chemisch inert sind. Sie bestehen aus verschiedenen Mischungen von Metalloxiden, die gepresst und anschliessend gesintert werden. Im Vergleich zu Eisenpulver sind die erzielbaren maximalen Permeabilitäten um ein Vielfaches höher, die maximalen Sättigungsflußdichten jedoch deutlich geringer. Mit Ferrit lassen sich aufgrund seiner hohen relativen Permeabilität hohe Induktivitäten bei kleiner Bauform erzielen. Ferritkerne werden üblicherweise entweder als Einfach-Drosseln mit Luftspalt oder als stromkompensierte Mehrfach-Drosseln eingesetzt, weil das Ferrit aufgrund seiner hohen Permeabilität durch den Betriebsstrom sehr schnell magnetisch gesättigt und damit als Induktivität unwirksam werden würde. Deshalb erhöht man entweder den magnetischen Widerstand des Kerns durch Einfügen eines Luftspalts oder man bringt mehrere Wicklungen auf und schaltet sie elektrisch so, daß sich die durch die Betriebsströme induzierten magnetischen Flüsse im Kern gegenseitig aufheben. Dann werden praktisch nur noch die asymmetrischen (Gleichtakt-) Störströme gedämpft.

Bei Ferriten für Entstördrosseln wird in zwei häufig verwendete Material-Zusammenstellungen unterschieden: Mangan-Zink-Ferrit (Mg-Zn) und Nickel-Zink-Ferrit (Ni-Zn).

Die typischen relativen Permeabilitäten liegen bei Mg-Zn-Ferrit im Bereich von $\mu_r = 4300..10000$, bei Ni-Zn-Ferrit von $\mu_r = 250..1200$.

Die typischen maximalen Sättigungsflußdichten liegen bei 380 mT bei Mg-Zn-Ferrit und 270 mT bei Ni-Zn-Ferrit (jeweils bei 25 °C Betriebstemperatur).

Achtung: Diese maximalen Sättigungsflußdichten sind von der relativen Permeabilität des Ferrits nahezu unabhängig!

Beispiel: Ein Mg-Zn-Ferrit mit $\mu_r = 15\,000$ hat nur eine unwesentlich höhere Sättigungsflußdichte als das mit $\mu_r = 5000$. Dies bedeutet, daß sich auf einem gleichgroßen Kern mit derselben Windungszahl zwar mit dem hochpermeablen Ferrit eine Drossel mit der dreifachen Induktivität herstellen läßt, aber zwangsläufig geht das hochpermeable Material auch schon bei einem Drittel des Störstroms in die Sättigung, d. h. es wird u. U. für die Entstörung unwirksam. Dieser Zusammenhang wird von Entwicklern häufig nicht bedacht, die dem Trugschluß unterliegen, daß die Entstörfunktion alleine von der Nenn-Induktivität abhängt und dabei die Sättigungsproblematik übersehen!

Das Mg-Zn-Ferrit ist das Standardmaterial für die Herstellung stromkompensierter Funkentstördrosseln. Es besitzt nicht nur eine höhere Permeabilität als Ni-Zn-Ferrit, sondern auch eine etwas höhere Sättigungsflußdichte. Da es aber elektrisch gut leitet, treten bei höheren Frequenzen (> 1 MHz) zunehmend Wirbelstromverluste auf, die es für Anwendungen bei Frequenzen oberhalb ca. 5 MHz ungeeignet machen.

Für hochfrequente Anwendungen, d. h. mit Schwerpunkt über 5 MHz, kommt daher nur das Ni-Zn-Ferrit in Frage, das elektrisch hochohmig ist.

Generell gilt jedoch für beide Ferrit-Arten: Je höher die relative Permeabilität, desto niedriger ist die obere Grenzfrequenz.

Eine weitere Besonderheit von Ferriten ist die Empfindlichkeit gegen mechanische Beanspruchung. Wird ein Ferritkern zusammengedrückt, sinkt die Induktivität stark ab. Deshalb darf Ferrit nur bis zu einer bestimmten Drahtstärke mit Massiv-Draht bewickelt werden. Wird ein größerer Querschnitt benötigt, muß auf verseilte Litze zurückgegriffen werden, da diese sich leichter der Kernform anpasst und keinen zu großen Druck auf den Kern ausübt. Dies ist allerdings mit einem deutlich höheren Produktionsaufwand und Preis verbunden, da sich verseilte Litze praktisch nicht maschinell verarbeiten läßt.

Auch beim Vergießen der fertig bewickelten Drossel in einem Gehäuse muß darauf geachtet werden, daß die Vergußmasse elastisch genug bleibt, um die Ausdehnung des Kerns bei Erwärmung auszugleichen. Andernfalls kann der Kern durch den Druck zerbrechen oder die Drossel ihre Induktivität weitgehend einbüßen.

Bei großen Ferritkernen muß der Kern vor dem Bewickeln mit Gewebefband bandagiert werden, um eine elastische Zwischenschicht zwischen Wicklung und Kern zu erhalten.

Nicht zu vernachlässigen sind auch die Einflüsse der Temperatur auf die Eigenschaften des Ferrits: Die Permeabilität, und damit linear die Induktivität, nimmt mit steigender Temperatur zunächst kontinuierlich zu, bis sie ab ca. 130 °C, der typischen "Curie-Temperatur", abrupt abfällt. Daher darf der Ferrit-Kern möglichst nie heißer als 125 °C werden, um die vorgesehene Dämpfung sicherzustellen.

Im Gegensatz dazu nimmt die maximale Sättigungsflußdichte mit steigender Temperatur ab:

Beispiel Mg-Zn-Ferrit mit einer Nenn-Permeabilität $\mu_r = 6000$ bei 25 °C und Sättigungsflußdichte $B_s = 350$ mT.

Bei -40 °C sinkt μ_r auf ca. 3000, bei 125 °C steigt μ_r auf ca. 12500, dagegen sinkt B_s bei 100 °C auf 150 mT ab! Dies bedeutet, daß z. B. bei einer bei 40 °C Kerntemperatur dimensionierten Drossel bei steigender Temperatur die Dämpfung zunächst etwas zunehmen, aber durch die abnehmende Sättigungsflußdichte der Kern bei einer höheren Temperatur plötzlich in die Sättigung gehen und die Dämpfung einbrechen kann. Daher sollte die Entstörfunktion einer stromkompensierten Ferrit-Drossel unbedingt unter realistischen Lastbedingungen und maximaler Temperatur überprüft werden.

Bei Ni-Zn-Ferrit gelten prinzipiell die gleichen Zusammenhänge, allerdings nicht ganz so extrem ausgeprägt.

3.4 Nanokristalline Werkstoffe ("amorphe" Kerne)

Diese Kerne bestehen aus nanokristallinem Magnetwerkstoff, der in Ringbandform hergestellt wird. Die prinzipiellen Eigenschaften sind ähnlich denen von Mangan-Zink-Ferrit, d. h. diese Kerne werden ebenso wie diese überwiegend zur Herstellung stromkompensierter Funkentstördrosseln verwendet. Das besondere an diesen Kernen sind die erzielbaren, sehr hohen relativen Permeabilitäten von typisch 30 000 bis zu 80 000. Daher lassen sich mit diesen Kernen bei erheblich kleinerem Volumen deutlich höhere Induktivitäten erzielen als mit üblichen Mg-Zn-Ferriten ($\mu_r = 5000..10000$).

Vorsicht: Da die maximale Sättigungsflußdichte maximal ca. 1,2 T beträgt, d. h. nur etwa um den Faktor 3 höher ist als bei Mg-Zn-Ferrit, die relative Permeabilität jedoch typisch um den Faktor 5..10 höher ist, besteht die Gefahr, daß die Drosseln bei gleicher Nenn-Induktivität wie solche auf Mg-Zn-Ferrit v. a. bei impulsförmigen Störungen eher in die Sättigung gehen und damit unwirksam werden können. Dieses Problem tritt v. a. dann auf, wenn bisher verwendete stromkompensierte Drosseln auf Ferrit-Kernen z. B. aus Platzgründen durch solche gleicher Induktivität auf kleineren nanokristallinen Kernen ersetzt werden sollen.

Zu beachten ist ferner, daß das "nanokristalline" Kernmaterial um eine mehrfachen teurer gegenüber Ferrit ist und daß es z. Zt. nur wenige Hersteller dieses Materials gibt, d. h. es muß u. U. mit längeren Lieferzeiten gerechnet werden.

3.5 Bandringkerne

Diese Kerne bestehen aus aufgewickeltem Metallband, ähnlich einem Trafoblech. Dadurch werden sehr hohe Permeabilitäten erreicht, allerdings nur bei sehr niedrigen Frequenzen, z. B. 50..60 Hz.

Haupteinsatzzweck dieser Kerne sind Stromwandler zur Strommessung bei 50..60 Hz Wechselstrom. Dabei wird der stromführende Leiter durch den Kern geführt. Dessen Strom induziert dann in der Wicklung des Bandringkerns an einem definierten Lastwiderstand ("Bürde") eine sehr genau dem Strom entsprechende Spannung (I-U-Wandler) bzw. im Kurzschluß-Betrieb einen entsprechenden Strom (I-I-Wandler).

Vereinzelt werden diese Bandringkerne auch für Längsdrosseln zur Entstörung von Phasenanschnittschaltungen mit speziellen Lasten verwendet.

4 Typische Bauformen

4.1 Stabkerne

Stabkerne bestehen aus einem länglichen, zylindrischen Ferrit-Kern und sind üblicherweise einlagig bewickelt. Dadurch besitzt diese Kernform einen sehr großen Luftspalt, was die erzielbare Induktivität klein hält (typisch 5..20 μH), dafür eine Sättigung praktisch ausschließt. Durch den Luftspalt ist das Streufeld jedoch sehr groß.

Stabkerndrosseln können auch mit symmetrischem Betriebsstrom belastet werden, ohne daß sich die Induktivität nennenswert verringert. Üblicherweise werden Sie zusammen mit entsprechenden Kondensatoren in Kollektormotoren zur Reduzierung der Funkstörungen durch das Bürstenfeuer eingesetzt, seltener auch zur Entstörung von Datenleitungen, da sie im Gegensatz zu stromkompensierten Drosseln auch das Nutzsignal bedämpfen.

Es gibt auch Stabkerndrosseln mit mehreren Wicklungen, die stromkompensiert sein können, diese sind jedoch sehr selten und werden nur für Spezialzwecke eingesetzt.

Durch die üblicherweise einlagige Wicklung, bei der der Wicklungsanfang und das Wicklungsende räumlich weit voneinander entfernt sind und die dadurch kleine Koppelkapazität

eignen sich Stabkerndrosseln für einen sehr weiten Frequenzbereich auch über 100 MHz hinaus.

Stabkerndrosseln lassen sich auf Automaten vollautomatisch fertigen und sind daher bei großen Stückzahlen im Vergleich zu anderen Bauformen verhältnismäßig preisgünstig.

4.1 Ringkerne

Ringkerne bestehen aus einem kreisförmigen Kern, dessen Querschnitt einem Kreis oder einem Rechteck mit abgerundeten Kanten entspricht.

Da die magnetischen Feldlinien einen geschlossenen Kreis im Kern bilden, haben Ringkerndrosseln das kleinste Streufeld aller Drosselbauformen und die höchste magnetische Flußdichte. Dadurch besteht bei Ferriten allerdings die Gefahr, daß diese sehr schnell in die Sättigung gehen. Deshalb werden bei Ferrit-Ringkernen meistens mehrere Wicklungen aufgebracht, die so geschaltet werden, daß sich die symmetrischen Betriebsströme bzw. Nutzsignale kompensieren und die Drossel nur für asymmetrische (Stör-) Signale mit ihrer vollen Induktivität wirksam ist, während für die Nutzsignale bzw. den Betriebsstrom nur die Streuinduktivität (typisch 1 % der Nenninduktivität) wirksam ist.

Eine Ausnahme sind die sogenannten "Schutzleiter-Drosseln", die nur eine Wicklung auf einem geschlossenen Ferritkern besitzen, weil über Sie im Normalfall kein Betriebs- sondern nur der Ableitstrom (wenige mA) fließt.

Ringkerne sind bei gleichen elektrischen Daten die kompakteste Bauform für einen in sich geschlossenen Spulenkern, dies wird allerdings mit einem höheren Produktionsaufwand und damit einem höheren Preis erkaufte, da sich Ringkerne nicht vollautomatisch bewickeln lassen.

Einen Kompromiss stellen sogenannte Rahmen- oder D-Kerne dar, die aus einem rechteckförmigen, geschlossenen Kern bestehen und sich vollautomatisch mit einem garnrollenförmigen Spulenkörper bewickeln lassen. Nachteilig ist hier jedoch, daß sich die Wicklung nicht gleichmäßig über den Kern verteilt, was bei gleicher Windungszahl bezogen auf einen vergleichbaren Ringkern zu erhöhten parasitären Kapazitäten und damit einer niedrigeren Resonanzfrequenz führt sowie zu einer schlechteren Wärmeableitung der Kupferverluste der Wicklung.

5 Wicklungsarten

5.1 Einlagige Wicklung

Diese Wicklung wird hauptsächlich bei HF-Drosseln angewendet, um die Koppelkapazität von einer Windung zur nächsten möglichst gering zu halten. Zusätzlich sollten der Wicklungsanfang und das Wicklungsende räumlich möglichst weit voneinander entfernt sein.

5.2 Mehrlagige Wicklung

Bei der mehrlagigen Wicklung gibt es zwei Varianten:

Die optisch sauberste, die Lagenwicklung, bei der eine Lage vor und dann die nächste Lage wieder zurückgewickelt wird, ist HF-mäßig nicht die Beste, denn dann liegen Wicklungsanfang und -ende eventuell sehr nahe beieinander (übereinander), was eine starke Verkopplung von Eingang und Ausgang der Drossel bewirkt und dadurch die Wirksamkeit der Drossel bei höheren Frequenzen stark beeinträchtigt.

Die sogenannte "wilde Wicklung", bei der sofort mehrere Lagen übereinander aufgebracht werden und die Drossel nur in eine Richtung bewickelt wird, sieht optisch nicht schön aus, ist aber für höhere Frequenzen besser geeignet als die Lagenwicklung.

5.3 Mehrere Wicklungen auf einem Kern

5.3.1 Stromkompensation

Dieses Verfahren wird üblicherweise bei Ferrit und anderen hochpermeablen Kernmaterialien verwendet, um die magnetischen Flüsse im Kern, die durch den Betriebsstrom bzw. das Nutzsignal bei Datenleitungs-drosseln entstehen, zu kompensieren. Damit ist die Drossel nur für asymmetrische (Gleichtakt-) Störströme mit ihrer vollen Induktivität wirksam, für symmetrische (Gegentakt-) Ströme nur mit ihrer Streuinduktivität.

Dieses Prinzip läßt sich auf beliebig viele Leiter anwenden, wichtig ist nur, daß sich die Summe der Betriebsströme wirklich aufhebt. Üblich sind zwei- bis vierfach stromkompensierte Drosseln.

Bei Drosseln für Netzspannung ist es wichtig, daß die Spannungsfestigkeit zwischen den einzelnen Wicklungen entsprechend den einschlägigen Sicherheitsvorschriften sichergestellt wird. Dies wird üblicherweise durch einen entsprechenden Sicherheitsabstand zwischen den Wicklungen erreicht, der meist durch einen Trennsteg oder getrennte Wickelkammern gewährleistet wird.

In Sonderfällen kann dies jedoch zur Empfindlichkeit gegen magnetische Streufelder in der Nähe führen, die dann in die stromkompensierte Drossel wie in eine Rahmenantenne einstreuen. Läßt sich das Problem nicht durch eine andere Platzierung der Bauelemente lösen, hilft außer einer aufwendigen Abschirmung nur die bifilare Wicklung, bei der alle Drähte zuerst miteinander verdreht und danach zusammen auf den Kern gewickelt werden. Dies geht bei Kupferlackdraht wegen der dünnen Isolation nur bei Kleinspannung, bei höheren Spannungen muß z. B. PVC-isolierte Litze verwendet werden.

Stromkompensierte Drosseln werden nicht nur zur frequenzabhängigen Dämpfung hochfrequenter Signale verwendet, sondern auch zur Trennung zwischen symmetrischen (Gegentakt-) Nutzsignalen und asymmetrischen (Gleichtakt-) Störsignalen.

Typischer Anwendungsfall sind Datenleitungs-drosseln für symmetrisch betriebene Datenleitungen wie z. B. Stromschleifen (4..20 mA), RS 485, CAN, Telefon etc. Hier sind für die Nutzsignale nur die Streu-Induktivität, die sich aus der Differenz der Serien- bzw. Nenn-Induktivitäten der Wicklungen ergibt, wirksam. Für die asymmetrischen Störsignale ist dagegen die volle Nenn-Induktivität wirksam.

Bei stromkompensierten Drosseln mit räumlich getrennten Wicklungen, z. B. für Netzspannung, ist die Streu-Induktivität typischerweise um ca. den Faktor 100 geringer als die Nenn-Induktivität. Soll jedoch die Dämpfung gegen asymmetrische Störsignale auch schon bei tieferen Frequenzen wirksam sein, wird eine relativ hohe Nenn-Induktivität benötigt, die damit

zwangsläufig auch eine höhere Streu-Induktivität bewirkt, die das Nutzsignal trotz Stromkompensation noch mehr als zulässig bedämpfen kann.

Da die Nutzsignale auf Datenleitungen jedoch meist im Kleinspannungsbereich liegen, kann zur Lösung dieses Problems eine bifilar gewickelte Drossel verwendet werden. Bei diesen Drosseln liegt die Streu-Induktivität um den Faktor 5000..10000 unter der Nenn-Induktivität.

Beispiel:

NKL-Drossel R1405X11 2x6 mH (bifilare Wicklg.) 1 A: Streu-Induktivität typ. 0.8 μ H.

NKL-Drossel R1405XB1 2x27 mH (2 Kammern) 0,5 A: Streu-Induktivität typ. 250 μ H

5.3.2 Übertrager

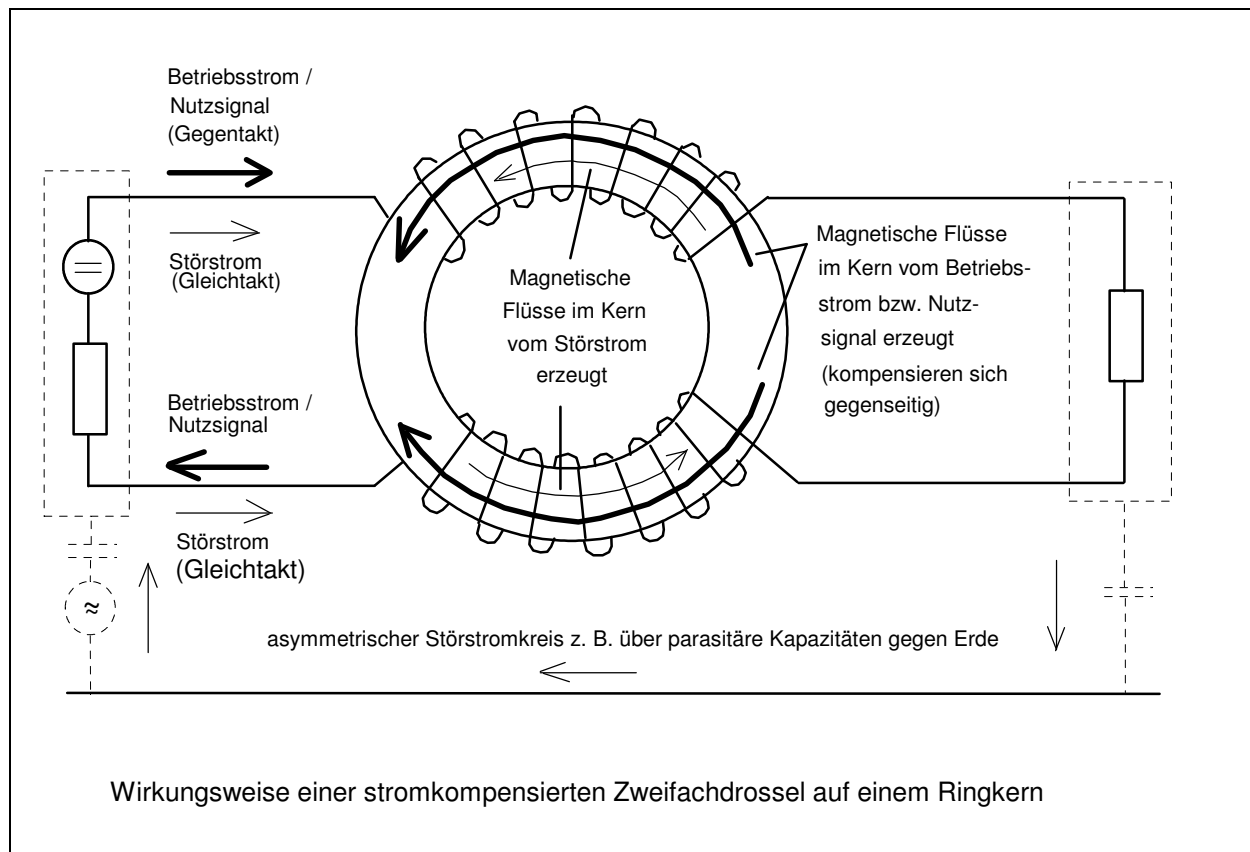
Übertrager dienen zum galvanisch getrennten Übertragen elektrischer Signale bzw. dem transformieren elektrischer Signale in ein günstigeres Strom/Spannungsverhältnis.

Dazu werden zwei oder mehr Wicklungen auf einen Kern aufgebracht, sodaß ein Strom in der Primärwicklung einen vom Zeitverlauf her möglichst ähnlichen Strom in der Sekundärwicklung erzeugt.

Häufig werden für 1:1 Übertrager der Einfachheit halber stromkompensierte Zweifach-Drosseln verwendet, wobei deren Anschlüsse jedoch entsprechend anders verschaltet werden.

Bei Übertragern mit zusätzlicher Impedanzanpassung kann es notwendig sein, die Windungszahlen je nach gewünschtem Transformationsverhältnis unterschiedlich zu wählen.

Gebräuchlich sind auch Bauformen mit einer Primär und zwei Sekundärwicklungen zur galvanisch getrennten Ansteuerung von zwei Schalttransistoren in Brückenschaltung mit einem Impuls.



5.3.3 Spezialfälle

Es gibt noch andere Fälle in denen mehrere Wicklungen auf einen Kern aufgebracht werden, z. B. bei PFC-Drosseln, um den PFC-Controller mit Energie zu versorgen, oder bestimmte Spannungs- bzw. Stromverhältnisse in der Induktivität zu erfassen.

Gelegentlich werden auch Entstördrosseln auf Eisenpulver-Kernen mit mehreren Wicklungen versehen, um nicht in jeden Leiterpfad eine einzelne Drossel einsetzen zu müssen. Zu beachten ist dabei jedoch, daß die Wicklungen in diesem Fall nicht stromkompensiert verschaltet werden und sich dadurch die Vormagnetisierung durch den Betriebsstrom entsprechend erhöht bzw. die für die Entstörung wirksame Induktivität entsprechend verringert.

6 Sonstige Besonderheiten

In Sonderfällen kann es sinnvoll sein, z. B. zwei Kerne unterschiedlicher Materialzusammensetzung aufeinander zu legen und zusammen zu bewickeln, z. B. einen Mangan-Zink- und einen Nickel-Zink-Ferrit-Kern, um die Eigenschaften beider Kernmaterialien miteinander zu kombinieren.

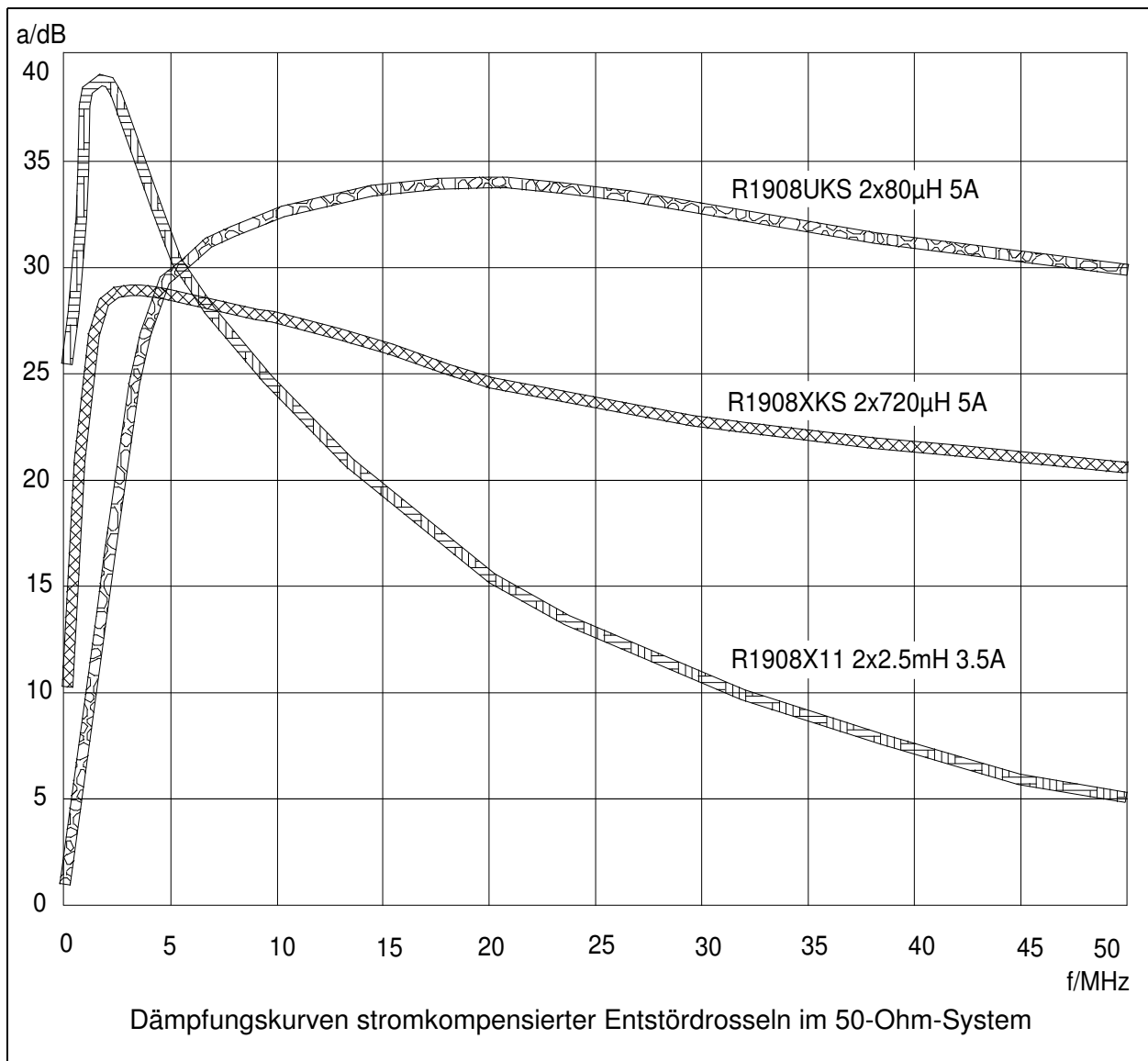
7 Typische Dämpfungskurven von Entstördrosseln und deren Anwendungsbereich

Dämpfungskurven dienen dazu, verschiedene Bauteile hinsichtlich ihrer HF-Eigenschaften untereinander zu vergleichen.

Die Dämpfungskurven geben die asymmetrische Einfügungsdämpfung im 50-Ohm-System bei Leerlauf, d. h. ohne Betriebsstrom und bei Kleinsignalbetrieb an.

Die Bauteile sind auf beiden Seiten mit 50 Ohm reell gegen Masse abgeschlossen.

Aufgrund der o. a. Meßbedingungen (Kleinsignalbetrieb, Leerlauf und beidseitiger Abschluß mit 50 Ohm reell), die in der Praxis normalerweise nicht zutreffen, wird schon deutlich, daß alleine aus der Dämpfungskurve nicht auf die Eignung eines Bauelements für einen bestimmten Einsatzzweck geschlossen werden kann!



Die drei Dämpfungskurven in obigem Diagramm sind von drei verschiedenen Standard-NKL-**Entstördrosseln** aufgenommen, die alle **auf Ferrit-Ringkernen** mit denselben geometrischen Abmessungen gewickelt wurden:

1. R1908X11 2x2.5 mH 3.5 A

Diese Type ist eine weit verbreitete Standard-Funkentstördrossel auf einem Mangan-Zink-Ferritkern ($\mu_i = 6000$), wie sie auch bei vielen anderen Herstellern üblich ist. Sie ist zur Erzielung einer hohen Nenn-Induktivität mehrlagig gewickelt.

Die Dämpfungswerte steigen bei niedrigen Frequenzen schon stark an und erreichen ihr Maximum bei ca. 1,5 MHz mit 38 dB. Anschließend erfolgt ein relativ steiler Abfall der Dämpfung, die Drossel erreicht bei 50 MHz nur noch ca. 5 dB Dämpfung.

Diese Entstördrosseln werden zur Entstörung überwiegend asymmetrischer Störer eingesetzt, deren Hauptstörpegel im unteren Frequenzbereich bis maximal ca. 1 MHz liegt. Typische Beispiele sind Schaltnetzteile und Frequenzumrichter. Hier kommt es auf eine hohe Dämpfung schon bei niedrigen Frequenzen an, die restlichen höherfrequenten Anteile des Störspektrums werden dann meist mit entsprechenden Y-Kondensatoren gegen Erde abgeleitet.

2. R1908XKS 2x720 μ H 5 A

Diese Drossel besitzt exakt den gleichen Kern wie die Erste, ist im Gegensatz zu dieser allerdings nur einlagig gewickelt mit einer entsprechend geringeren Nenn-Induktivität.

Die Dämpfungskurve steigt bei dieser Drossel zunächst etwas flacher an und erreicht eine maximale Dämpfung von 28 dB bei ca. 2,5 MHz. Durch die einlagige Wicklung und die damit verringerte parasitäre Verkopplung über die Wicklung ist der Abfall der Dämpfungswerte zu den hohen Frequenzen hin deutlich flacher ausgeprägt, die Drossel erreicht bei 50 MHz immerhin noch 22 dB Dämpfung.

Der Einsatzzweck dieser Drossel ist ähnlich der ersten, überwiegend bei asymmetrischen Störern, jedoch höherer Taktfrequenz, z. B. einem Gerät mit schnellem Schaltnetzteil oder einem Mikroprozessor bis ca. 12 MHz Taktfrequenz: Hier muß die Dämpfung bei niedrigen Frequenzen nicht so hoch sein, dafür aber relativ breitbandig, um auch die Harmonischen der Schalt- bzw. Taktfrequenzen noch ausreichend zu bedämpfen.

3. R1908UKS 2x80 μ H 5 A

Diese Drossel besitzt einen Kern aus Nickel-Zink-Ferrit mit einer relativen Permeabilität von $\mu_r = 900$. Der Kern ist von der Größe genau gleich wie bei den ersten beiden Drosseln, die Wicklung ist identisch mit der zweiten Drossel, d. h. ebenfalls einlagig.

Die Dämpfungskurve steigt nochmals etwas flacher an als bei den ersten beiden Drosseln, erreicht ihr Maximum bei 20 MHz mit 34 dB Dämpfung und fällt zu den höheren Frequenzen deutlich flacher ab, bei 50 MHz sind noch 30 dB Dämpfung vorhanden.

Haupteinsatzzweck dieser Drossel ist die Entstörung hochfrequenter asymmetrischer Störungen, wie Mikroprozessor-Taktfrequenzen oder HF-Oszillatoren und deren Harmonische sowie die Erhöhung der Störfestigkeit von elektronischen Schaltungen gegen starke HF-Störer wie Radio- oder Funksignale oder der Schutz vor breitbandigen Störimpulsen wie z. B. schnellen Transienten ("Burst"). Diese Drossel wird häufig zusätzlich zu einer Drossel der ersten oder zweiten Type eingesetzt, z. B. wenn ein Gerät keinen Schutzleiter-Anschluß besitzt, gegen den die hochfrequenten Störungen mit Y-Kondensatoren wirksam abgeleitet werden können.

8 Einige Hinweise zu Speicherdrosseln

In Schaltnetzteilen dienen diese Drosseln mit ihrer Speicherenergie zur Überbrückung der Schaltpausen des Transistors.

Daher gelten für solche Drosseln andere Bedingungen als für Entstördrosseln:

Der Kern wird magnetisiert und soll eine möglichst hohe Energie bei kleinem Volumen speichern können, um in den Schaltpausen diese Energie abgeben zu können.

Sämtliche richtigen Berechnungen einer solchen Drossel geben die nötigen Induktivität beim höchsten Strom an. Bei geringer Aussteuerung steigt die Induktivität je nach Kernmaterial teilweise erheblich an. Dies muß beim Prüfen im Leerlauf beachtet werden. Bei frequenz geregelter Schaltung ist dies erwünscht, es kann aber bei pulsbreitenmodulierten Schaltungen nachteilig sein. Daher ist es wichtig, die Betriebsart zu kennen.

Weiterhin sind die Verluste im Kernmaterial zu beachten. Sie entstehen durch den Stromrippel. Bei der Ermittlung der Kernverluste ist der Stromrippel und die Frequenz zu berücksichtigen.

Langjährige praktische Erfahrungen haben gezeigt

1. Daß die Kernverluste in der Regel nicht mehr als 25 % der Gesamtverluste ausmachen. Daher ist das Hauptaugenmerk auf die Verringerung des ohmschen Widerstandes zu legen.

2. Es ist nicht sinnvoll, Speicherdrosseln mit HF-Litze zu bewickeln. Der Nachteil der höheren Wickelkapazität sowohl zum Kern als auch über die Wicklung (bei mehreren Lagen) ist weit- aus schädlicher. Diese parasitäre Kapazität wird mit hohen Stromspitzen auf- und entladen, die die Verluste im Schalttransistor erhöhen. Hinzu kommt, daß die höheren Kapazitäten bedeutend höhere Funkstörungen mit sich bringen, die wiederum einen erhöhten Aufwand bei der Funkentstörung erfordern.

3. Der Stromrippel ist für die Kernverluste verantwortlich und sollte daher möglichst klein sein. Wenn der Strom in der Drossel bei wechselnder Last abreißt und dann wieder voll fließt, sind die Kernverluste erheblich. Wenn der Kern erhitzt wird, steigt die Permeabilität und die Sättigung tritt früher ein. Daher kann es bei Überhitzung zu Lawineneffekten kommen: Der Strom ist zu hoch, der Kern wird heiß, die Sättigung setzt früher ein, der Regler sucht durch höhere Frequenz oder größere Einschaltzeiten zu kompensieren. Dadurch entstehen noch höhere Verluste, usw. bis ein Defekt eintritt.

4. Es muß beachtet werden, daß v. a. Eisenpulver-Kerne nicht ummagnetisiert werden sollten, da dabei sehr hohe Verluste im Kern entstehen. Daher sind diese Kerne für Gegentaktschaltungen kaum einsetzbar. Ferrit-Ringkerne kommen wegen der frühen Sättigung nur für kleinere Leistungen in Frage. Hier muß noch auf Ferrit-Kerne mit Luftspalt zurückgegriffen werden. Der Luftspalt sollte innen liegen, damit das Streufeld gering bleibt. Für Sonderanwendungen, bei denen der Betriebsstrom über die Drossel umgepolt werden muß, aber trotzdem die Vorteile des Ringkerns gewünscht werden, z. B. Leistungsfaktor-Korrektur (PFC), kommen höherwertige MPP- oder Kool- μ -Kerne zum Einsatz, bei denen die Kernverluste um ein Mehrfaches unter denen von Eisenpulver liegen, die dafür jedoch deutlich teurer sind.

5. Um unerwünschte Verkopplung der Störungen zu vermeiden, sollten Entstördrosseln möglichst nicht parallel zur oder in unmittelbarer Nähe der Speicherdrossel angeordnet werden.