

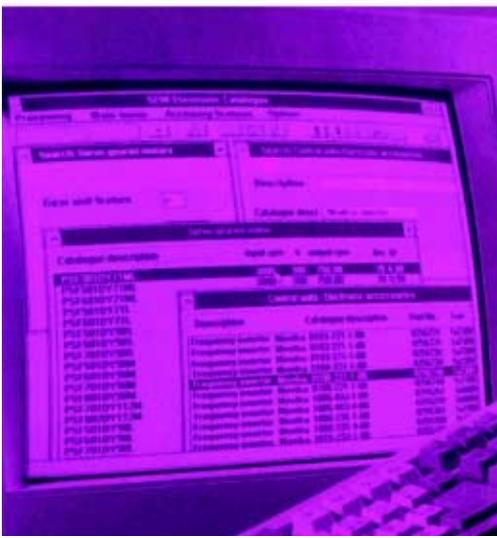
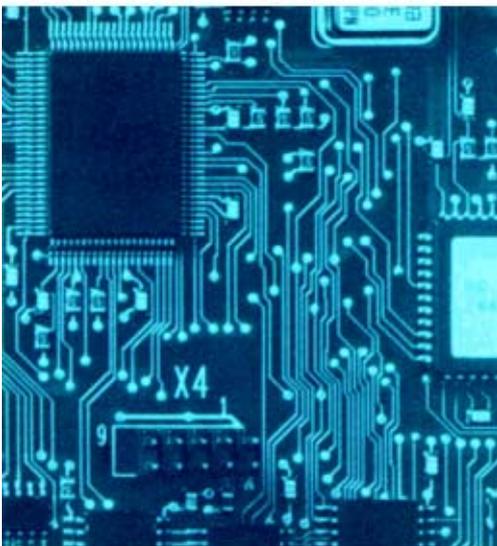


Praxis der Antriebstechnik

Band 9

EMV in der Antriebstechnik

Ausgabe 04/97



0923 1005 / 0798



SEW
EURODRIVE



Getriebe- und Bremsmotoren

- Stirnradgetriebe/ -motoren
- Flachgetriebe/ -motoren
- Kegelradgetriebe/ -motoren
- Schneckengetriebe/ -motoren
- Spiroplan®-Getriebemotoren
- Spielarme Planetengetriebe/ -motoren
- Bremsmotoren
- Explosionsgeschützte Drehstrommotoren



Elektronisch geregelte Antriebe

- Frequenzumrichter MOVITRAC®
- MOVIMOT®-Getriebemotoren
- Antriebsumrichter MOVIDRIVE®
- Servoumrichter MOVIDYN®
- Servomotoren und -Getriebemotoren
- Gleichstrom-Getriebemotoren, -Motoren und -Bremsmotoren



Mechanische Verstellantriebe

- Breitkeilriemen-Verstelltriebemotoren VARIBLOC®
- Reibscheiben-Verstelltriebemotoren VARIMOT®



Dienstleistungen

- Technische Beratung
- Anwender-Software
- Seminare
- Fachdokumentation
- Kundendienst

1	Einleitung	4
2	Störmechanismen	5
2.1	Verhalten einer Leitung bei höheren Frequenzen	6
2.2	Ursache hochfrequenter Störungen	10
2.3	Störquellen und ihre Auswirkungen	11
2.3.1	Netzharmonische	12
2.3.2	Netzschwankungen, Netzunterbrechung, Netzeinbrüche, Überspannungen	14
2.3.3	Blitz	15
2.3.4	Burst	16
2.3.5	Elektrostatische Entladung	19
2.3.6	Strahlung	21
2.4	Koppelmechanismen	22
2.4.1	Galvanische Kopplung (Leitungskopplung)	24
2.4.2	Induktive Kopplung	25
2.4.3	Kapazitive Kopplung	28
2.4.4	Strahlung	30
2.5	Störmechanismen bei Umrichtern	32
2.5.1	Abstrahlung	33
2.5.2	Ableitstrom	34
2.5.3	Netzstromharmonische	35
3	EMV-Planung	36
3.1	Einfluß des Standortes der Anlage	37
3.2	Netzqualität	38
3.3	Schaltschrank-Planung	39
3.4	Komponentenplanung	42
3.4.1	Leitungs-Kategorien	42
3.4.2	Signalübertragung	42
4	EMV-Maßnahmen	43
4.1	Erdung	43
4.2	Verkabelung	46
4.2.1	Leistungsgruppen und Leitungsauswahl	46
4.2.2	Schirmung	50
4.2.3	Allgemeine Verkabelungsregeln	53
4.3	Spannungsversorgung	53
4.3.1	Netzspannung	53
4.3.2	Kleinsignalspannungen	54
4.4	Signalübertragung	54
4.5	Schaltschrankaufbau	55
4.5.1	Anordnung der Komponenten	55
4.5.2	Schirmwirkung	56
4.6	Filtereinsatz	57
4.6.1	Einbauort	57
4.6.2	Erdung	58
4.6.3	Leitungsführung	58
4.6.4	Filterauswahl	59
4.7	Einsatz von Entstörkomponenten bei Umrichtern	61
4.7.1	Netzdrossel	61
4.7.2	Netzfilter	64
4.7.3	Ausgangsfilter (Sinusfilter)	66
4.7.4	Ausgangsdrossel	67
4.7.5	EMV-Modul	69
4.7.6	Schirmung	70
5	Normen und Gesetze	71
5.1	Einteilung in Anwendungsbereiche und deren grundsätzliche Anforderungen	73
5.2	Normen- und Gesetzesübersicht	75
	EMV-Begriffe	76
	Index	78

1 Einleitung

Im Januar 1996 trat innerhalb der Europäischen Union die Richtlinie für elektromagnetische Verträglichkeit (EMV-Richtlinie 89/336/EWG) in Kraft. Diese Richtlinie hat unter Lieferanten, Anlagenbauern und Betreibern für einige Verwirrung gesorgt.

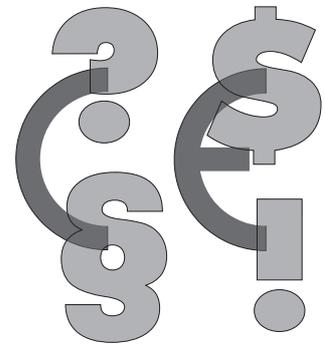
SEW bietet mit diesem Band aus der Reihe „Praxis der Antriebstechnik“ zusätzliche Informationen zu dem Thema „EMV in der Antriebstechnik“.



Die Schwerpunktthemen sind hierbei:

- Störmechanismen – wie es zu EMV-Problemen kommt
- EMV-Planung – was schon bei der Projektierung berücksichtigt werden muß
- EMV in der Praxis – Ausführung und Wirkungsweise von EMV-Maßnahmen

Außerdem bieten wir noch einen Überblick über relevante Richtlinien und Normen.



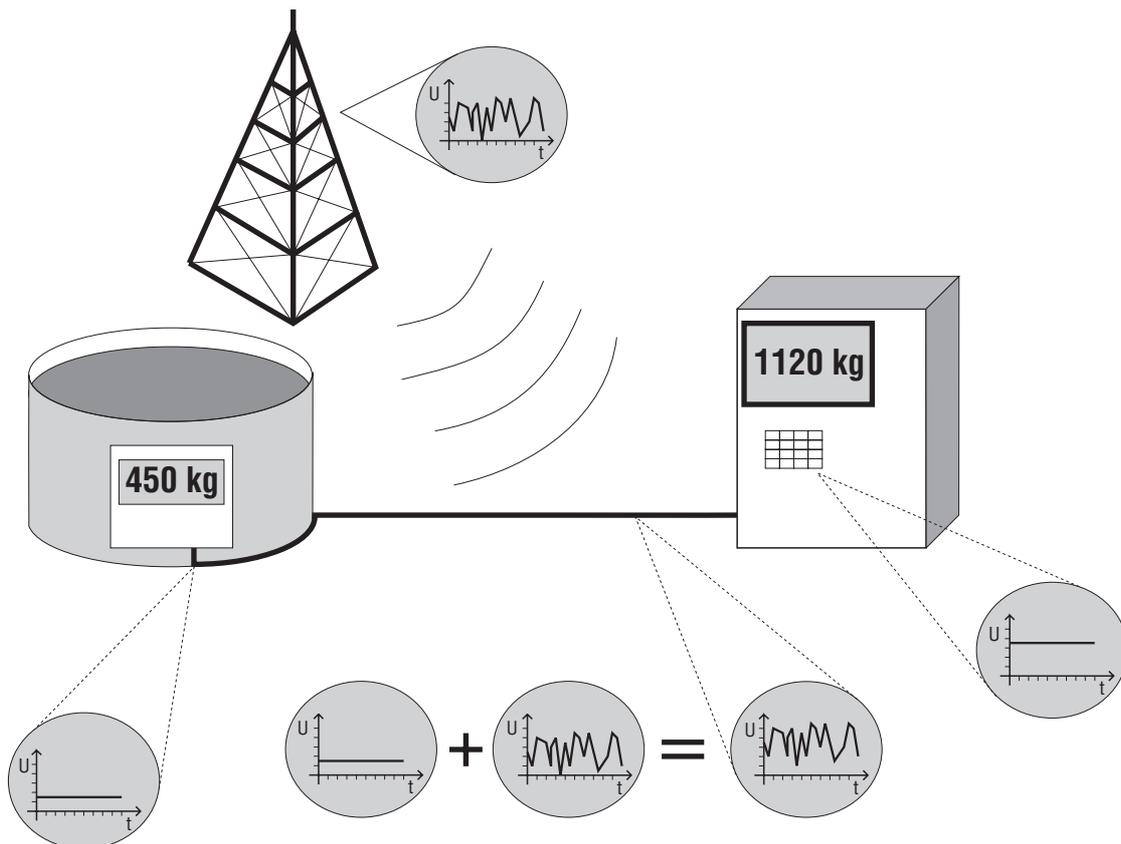
Weitere Informationen zu der CE-Kennzeichnung finden Sie in „Praxis der Antriebstechnik, Band 8“, der sich ausschließlich dem Thema „CE-Kennzeichnung in der Antriebstechnik“ widmet.

Dieser Band orientiert sich nah an praktischen Gegebenheiten und Erfahrungen, weshalb auf die wissenschaftliche Genauigkeit verzichtet wurde, wenn eine exakte Ausführung die Darstellung unnötig kompliziert gestaltet hätte. Die Angaben stellen allgemeine Richtlinien dar. Aufgrund der Vielfalt der Installationsmöglichkeiten können aber für den Einzelfall keine absoluten Richtwerte angegeben werden.

Für eine exakte Projektierung von SEW-Produkten nutzen Sie bitte die Angaben in den entsprechenden Katalogen.

2 Störmechanismen

Die elektromagnetische Verträglichkeit gewinnt in der Antriebstechnik immer mehr an Bedeutung. Bedingt durch den technischen Fortschritt werden immer mehr elektrische und elektronische Komponenten auf immer kleinerem Raum konzentriert. Gleichzeitig steigen die Taktfrequenzen der informationsverarbeitenden Geräte und die der Antriebselektronik. Die Gefahr einer gegenseitigen Beeinflussung und damit verbundenen Funktionsbeeinträchtigungen wird dadurch immer größer. Bild 1 zeigt ein Beispiel für die Beeinflussung einer Meßleitung.



00279AXX

Bild 1: Beeinflussung einer Meßleitung über Füllstandsmesser, Leitung, Auswertung

Damit eine Störung entstehen kann, müssen grundsätzlich drei Voraussetzungen erfüllt sein:

- es muß eine Störquelle geben
- es muß eine Störsenke geben
- es muß eine Kopplungsmöglichkeit zwischen den beiden geben

Auch wenn die oben genannten Bedingungen erfüllt sind, kommt es erst dann zu einer Störung, wenn die Beeinflussung das zulässige Maß überschreitet.

Ziel dieses Abschnitts ist es, die unterschiedlichen Störquellen sowie die Kopplung der Störgrößen zu erläutern. Es wird erklärt, von welchen Einflußgrößen der Störpegel abhängt. Außerdem werden Beispiele für die verschiedenen Störquellen genannt. Vorab werden einige Zusammenhänge und Begriffe erklärt, um den Zugang zu diesem Kapitel zu erleichtern.

Die „Elektromagnetische Beeinflussung“ hat größtenteils erst bei höheren Frequenzen Auswirkungen. Dies bedeutet, daß eine sachgemäße Funktion einer Anlage nur dann erreicht werden kann, wenn die Installation neben den betriebstechnischen Anforderungen auch die Anforderungen der Hochfrequenz (z. B. Erdung, Schirmung, Filterung) erfüllt.

Voraussetzungen für den störungsfreien Betrieb einer Anlage sind:

- eine angemessene Mindest-**Störfestigkeit** der eingesetzten Komponenten
- eine eingeschränkte **Störaussendung** der eingesetzten Komponenten

Einen ganz wesentlichen Anteil an der EMV hat die Art der Installation.

Am einfachsten kann EMV erreicht werden, wenn sie schon bei der Planung berücksichtigt wird. Nachträgliche Maßnahmen sind im allgemeinen wesentlich umfangreicher. Sie sind oft aus Platzgründen überdurchschnittlich teuer und ziehen zusätzliche Montage- und Stillstandskosten nach sich.

Dies gilt auch für die Modernisierung und Instandhaltung bestehender Anlagen. Auch dort ermöglicht nur die Berücksichtigung in der Planungsphase eine kostengünstige EMV (→ Kap. 3).

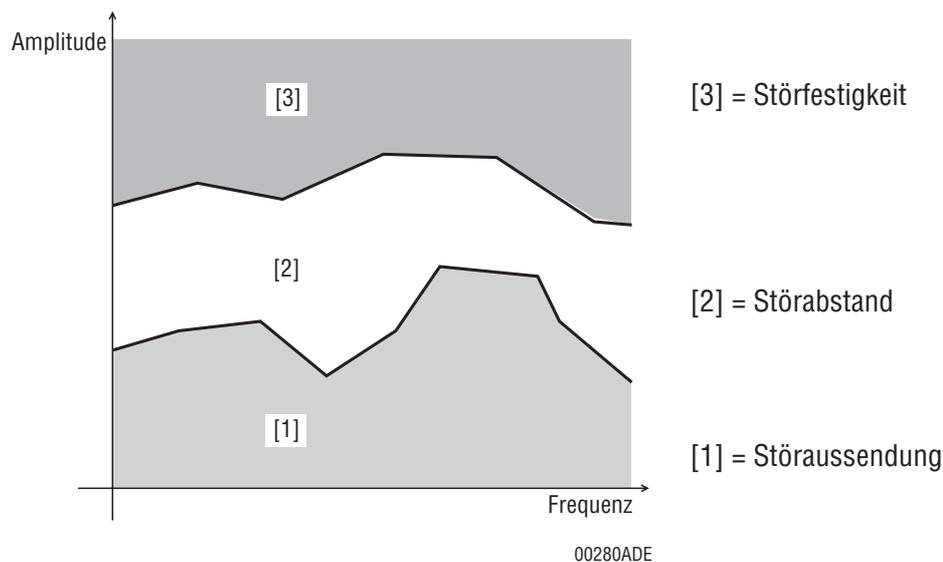


Bild 2: Diagramm mit Störaussendung, Störabstand und Störfestigkeit

Die Auswahl und Installation der Komponenten muß für einen störungsfreien Betrieb einen hinreichenden Störabstand gewährleisten (→ Bild 2).

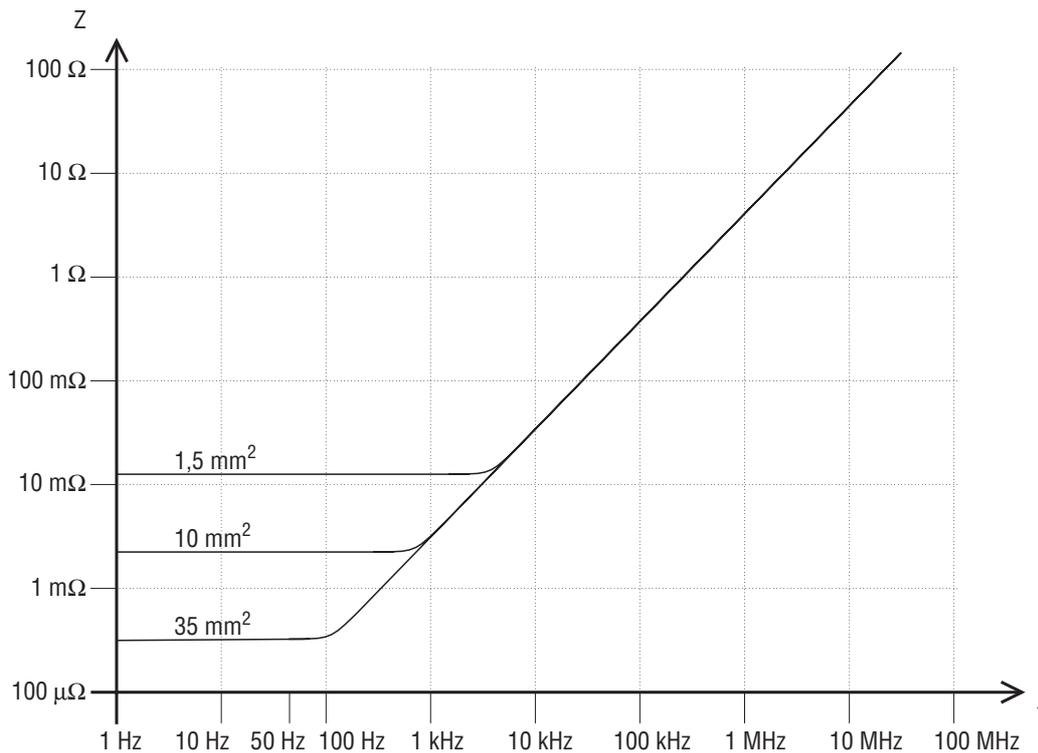
2.1 Verhalten einer Leitung bei höheren Frequenzen

Um die auftretenden Störungen zu verstehen, ist es wichtig, das Verhalten einiger Komponenten zu untersuchen. Diese Komponenten können im Niederfrequenz- und Hochfrequenzbereich unterschiedlich reagieren.

NF-Bereich = Gleichspannung und Netzwechselfspannung

HF-Bereich = Frequenzbereich ab 1 MHz, die Grenze ist fließend und kann in Abhängigkeit von den Abmessungen schon wesentlich tiefer beginnen

Wesentliche Unterschiede im NF- und HF-Bereich werden anhand des Frequenzverhaltens einer Leitung gezeigt. Betrachtet wird der frequenzabhängige Widerstand, die sogenannte Impedanz der Leitung.



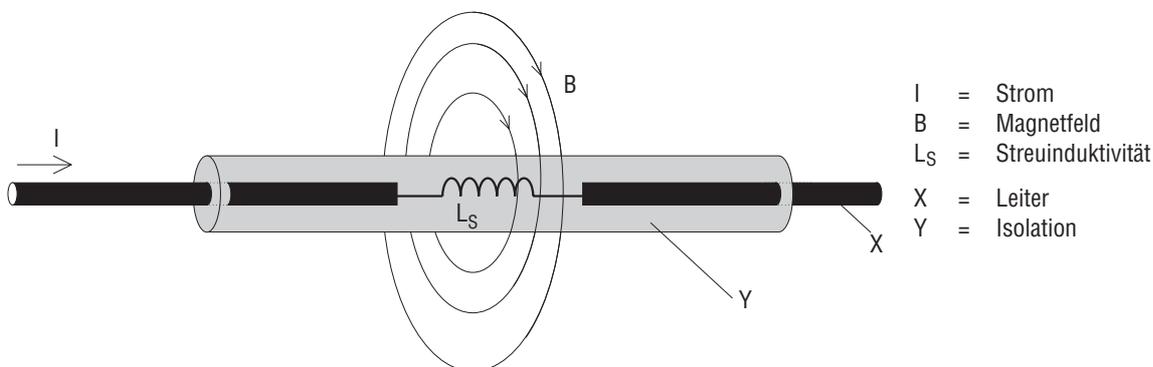
00281AXX

Bild 3: Impedanz Z eines Kupferleiters von 1 m Länge in Abhängigkeit von der Frequenz f

Das Verhalten der Leitung ist durch folgende Punkte gekennzeichnet:

- NF-Bereich: – der Querschnitt der Leitung ist für die Impedanz entscheidend
 – die Impedanz der Leitung ist nur für thermische Gesichtspunkte wichtig (Stromtragfähigkeit)
- HF-Bereich: – die Länge der Leitung ist entscheidend
 – der Querschnitt der Leitung hat nahezu keinen Einfluß auf die Impedanz
 – die Impedanz der Leitung ist ganz wesentlich für das Betriebsverhalten

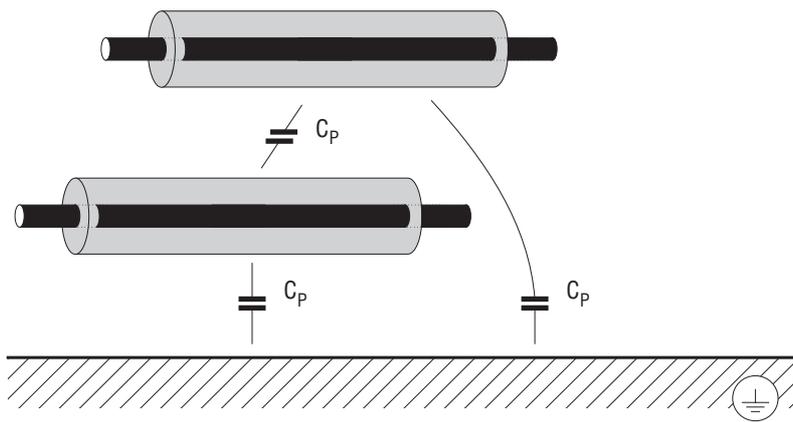
Wodurch ist das Verhalten der Leitung zu erklären? Bild 4 zeigt einen stromdurchflossenen Leiter.



00282AXX

Bild 4: Stromdurchflossener Leiter

Um den Leiter baut sich ein Magnetfeld B auf, das einer Änderung des Stromes I entgegenwirkt, der Leiter wirkt wie eine Induktivität L_S . Die Induktivität für einen geraden, langgestreckten Leiter liegt bei ca. $1 \mu\text{H} / \text{m}$ (Länge $l \gg$ Durchmesser D).

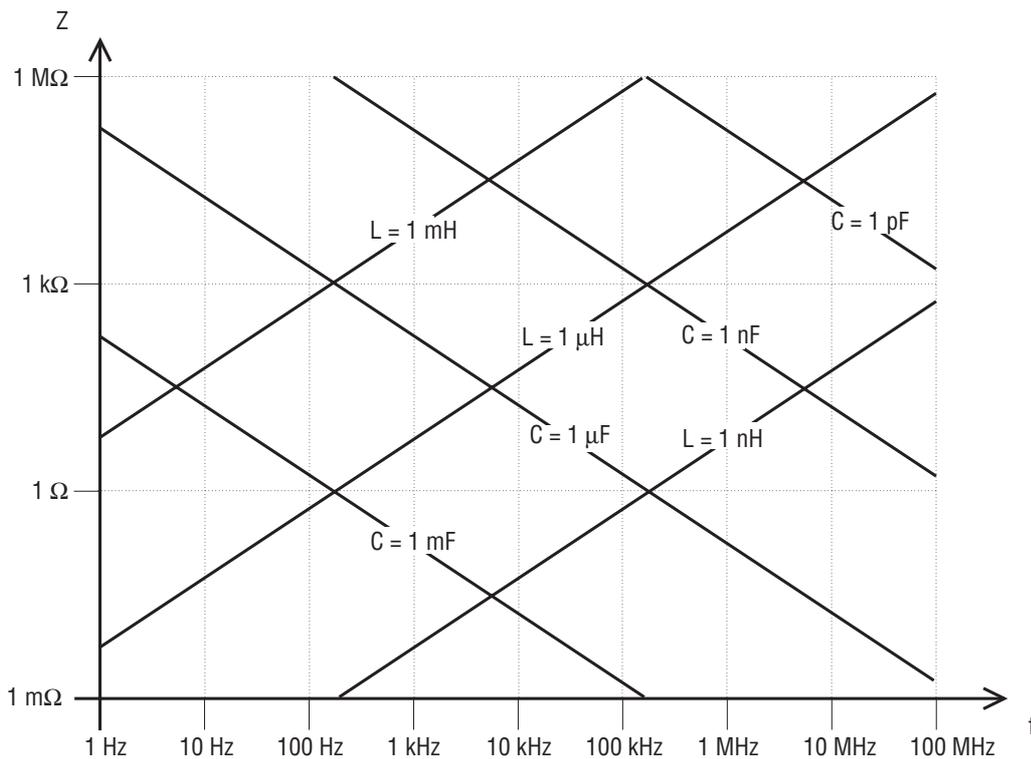


00283AXX

Bild 5: Zwei Leiter unter Spannung

Bild 5 zeigt zwei Leiter mit unterschiedlicher Spannung. Zwischen den Leitern sowie zwischen jedem Leiter und Erde bildet sich ein elektrisches Feld aus, die Leiter wirken wie die Platten eines Kondensators.

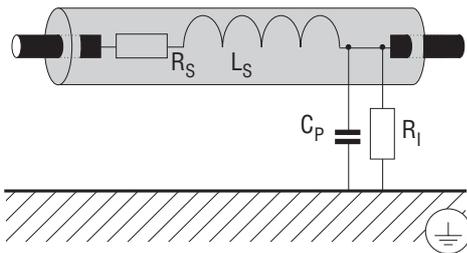
Die Kapazität eines solchen ungewollten Kondensators nennt man **Parasitärkapazität** C_P .



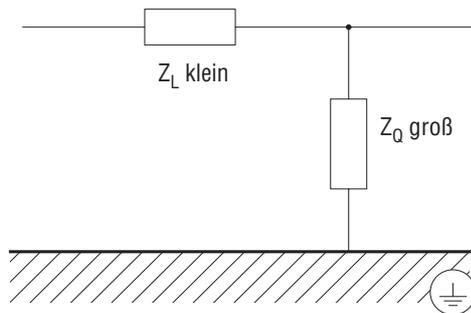
00284AXX

Bild 6: Impedanz Z eines Kondensators und einer Spule in Abhängigkeit von der Frequenz f

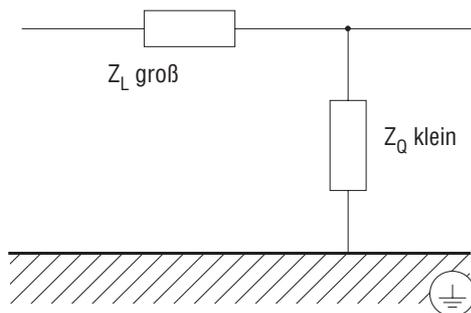
In Bild 6 ist die frequenzabhängige Impedanz Z einer Spule und eines Kondensators dargestellt. Das frequenzabhängige Verhalten einer Leitung zeigt Bild 7.

Ersatzschaltbild für
eine Leitung

R_S = Serienwiderstand
 R_I = Isolationswiderstand
 L_S = Streuinduktivität
 C_P = Parasitärkapazität

Verhalten einer Leitung
im NF-Bereich

Z_L = Längsimpedanz
 Z_Q = Querimpedanz

Verhalten einer Leitung
im HF-Bereich

00285ADE

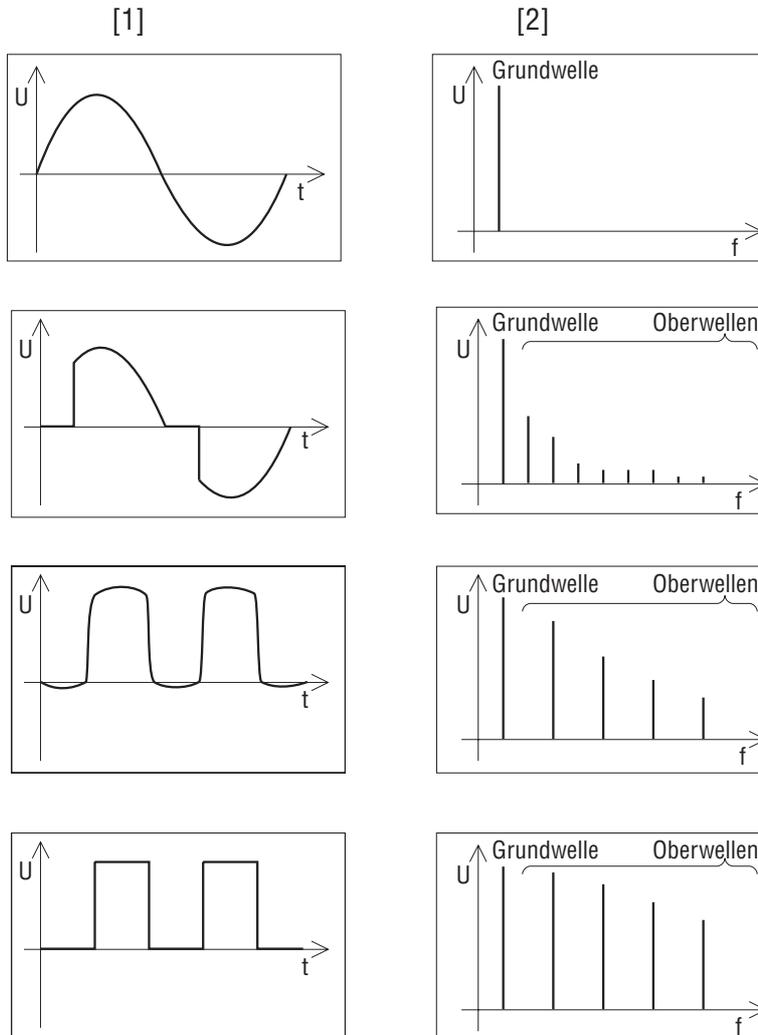
Bild 7: Ersatzschaltbild einer Leitung und Verhalten im NF- und HF-Bereich

Im NF-Bereich ist die Längsimpedanz eines langgestreckten Leiters sehr klein, die Querimpedanz (Isolationswiderstand) hingegen sehr groß.

Im HF-Bereich wird die Querimpedanz (Isolationswiderstand) durch die Parasitärkapazität überbrückt. Mit steigender Frequenz wird die Kopplung einer Störung über die Kabelisolation immer einfacher, wenn dies nicht durch geeignete Maßnahmen unterbunden wird. Die Längsimpedanz nimmt mit steigender Frequenz zu. Deshalb werden bei höheren Frequenzen durch geringe Ströme relativ hohe Spannungsfälle hervorgerufen.

2.2 Ursache hochfrequenter Störungen

Wie kommen hochfrequente Störungen in eine Anlage, die eigentlich nur mit Gleichspannung oder Netzwechselspannung arbeitet? Bild 8 zeigt den Frequenzgehalt verschiedener Signalformen. Jedes nicht-sinusförmige Signal enthält außer seiner Grundfrequenz auch noch Vielfache der Grundfrequenz, sogenannte Harmonische. Allgemein ist der HF-Gehalt eines Signals um so größer, je schneller sich die Amplitude des Signals ändert.



00286ADE

Bild 8: Signalformen [1] mit ihren Signalspektrumanteilen [2]

Dies bedeutet, daß z. B. jeder Schaltvorgang hochfrequente Signale erzeugt, die Störungen verursachen können.

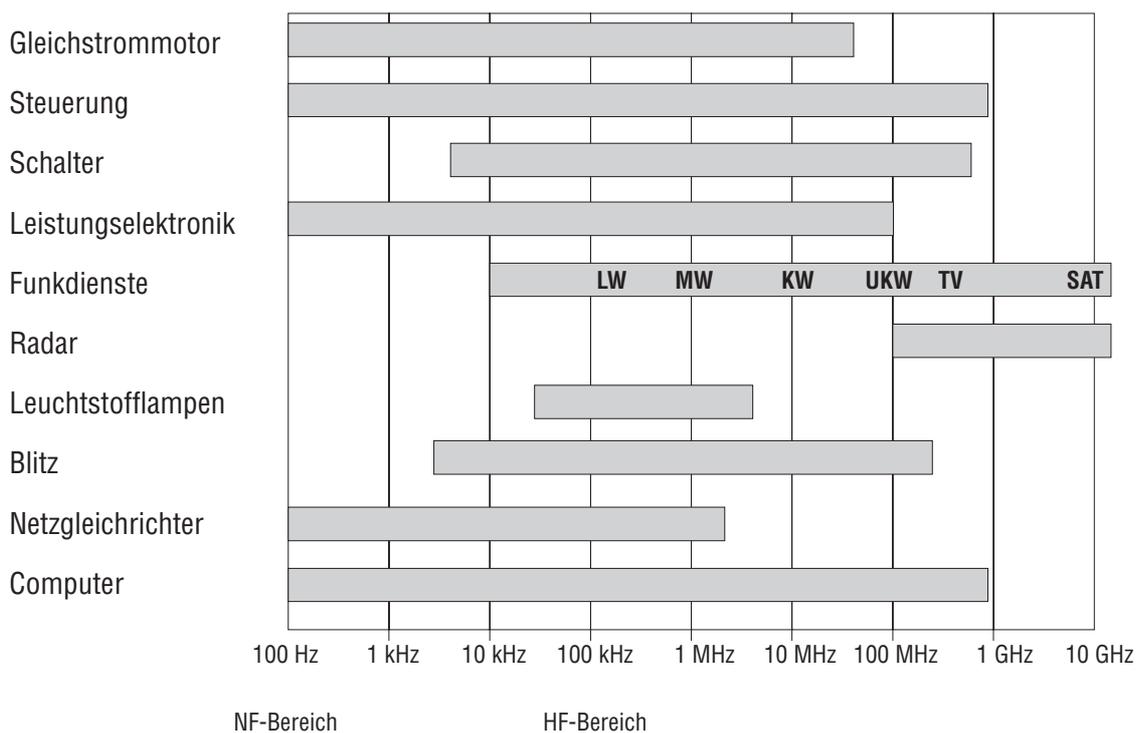
2.3 Störquellen und ihre Auswirkungen

Dieser Abschnitt geht auf unterschiedliche Arten von Störquellen ein und erläutert anhand von Beispielen den Störmechanismus sowie dessen Auswirkung. Tabelle 1 zeigt eine Auswahl verschiedener Störquellen.

Natürliche Störquellen	Technische Störquellen	
	Beabsichtigte Aussendung	Unbeabsichtigte Aussendung
z. B. atmosphärisches Rauschen galaktisches Rauschen Blitz elektrostatische Entladung	z. B. Funkdienste Radar Induktionskochplatte Mikrowellenherde HF-Trocknungsanlage	z. B. Schalter Leuchtstofflampen Motoren Lichtbogenschweißanlagen Leistungselektronik Netzgleichrichter Digitalgeräte (Computer etc.)

Tabelle 1: Störquellen

Es gibt weitere Unterteilungen nach Frequenzbandbreite (schmalbandig oder breitbandig) und Störverhalten, die je nach Betrachtungsweise sinnvoll sein können.



00287ADE

Bild 9: Frequenzbereich verschiedener Störquellen

Bild 9 zeigt den Frequenzbereich, in dem einige Störquellen wirksam sind.

Bild 10 zeigt, bei welchen Abmessungen und Frequenzen leitungsgebundene und eingestrahlte Störungen existieren:

Im Bereich [1] werden Störsignale hauptsächlich über die Anschlußleitungen gekoppelt. Störquelle und Störsenke sind durch Leitungen miteinander verbunden, die die Störung transportieren.

Im Bereich [2] wird das Störsignal zusätzlich von der Störquelle abgestrahlt und kann an der Störsenke über die Anschlußleitungen oder das Gehäuse eingekoppelt werden. Eine direkte Verbindung zwischen Störquelle und Störsenke ist hier nicht notwendig.



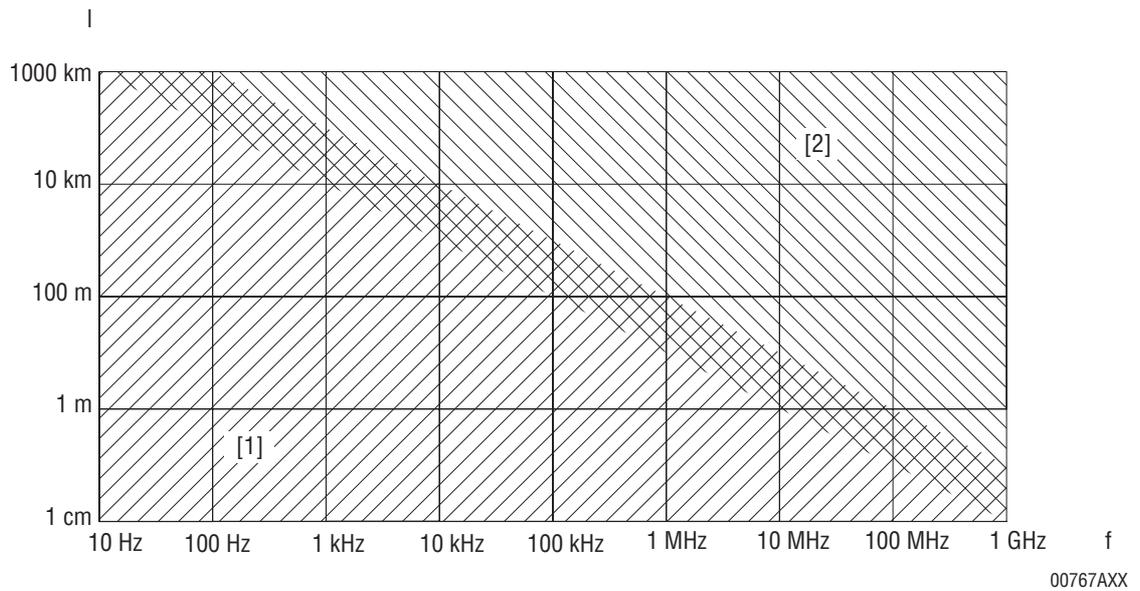


Bild 10: Bereich von leitungsgebundener [1] und eingestrahelter [2] Störung in Abhängigkeit von Störfrequenz f und Abmessung l (l = Leitungslänge, Gerätemaße, Schlitzbreite usw.)

2.3.1 Netzharmonische

Frequenzgehalt: hauptsächlich im NF-Bereich

Energiegehalt: energiereich

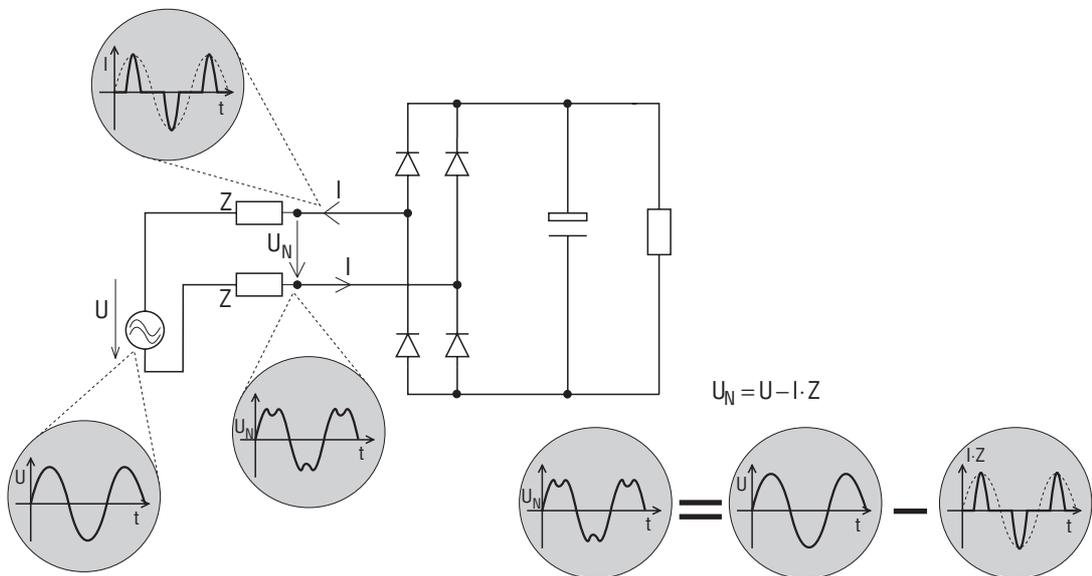


Bild 11: Gleichrichter mit Kondensator am Netz

Bild 11 zeigt das Verhalten eines Gleichrichters mit nachgeschaltetem Kondensator am Netz. Da der Kondensator nur zu den Zeiten nachgeladen wird, in denen die Netzspannung höher als die Spannung am Kondensator ist, fließt der Strom in der Zuleitung in Form von kurzen hohen nicht-sinusförmigen Nachladespitzen. Diese rufen an der Netzimpedanz Z einen Spannungsfall hervor. Dieser macht sich für andere Verbraucher als Verzerrung der Spannung U_N bemerkbar. Sie ist nicht mehr sinusförmig (\rightarrow Kap. 2.1), d. h. sie beinhaltet Oberwellen, sogenannte Netzharmonische.

Ein Maß für den Oberwellengehalt einer Größe (Größe = Strom oder Spannung) ist die THD:

$$\text{THD} = \sum_{n=2}^{50} \left(\frac{S_n}{S_1} \right)^2 \quad [\text{F1}]$$

- THD = total harmonic distortion (Oberwellengehalt)
- S_1 = Grundwelle von Strom oder Spannung
- S_n = n-te Harmonische von Strom oder Spannung

Von Netzharmonischen spricht man bei Netzverzerrungen bis zu einer Frequenz von 2,5 kHz. Es handelt sich um **Störungen im NF-Bereich**.

Der Oberwellengehalt von Strom oder Spannung ist, wie schon in Kap. 2.1 erwähnt, um so größer, je schneller die Änderung von Strom oder Spannung ist. Ein großer Oberwellengehalt kann zu Spitzen und Einbrüchen auf der Netzspannung führen, die stark von den normalen Werten abweichen. Die entstehenden Spannungsspitzen haben wegen ihrer relativ langen Dauer von bis zu einigen ms einen hohen Energiegehalt und können in Extremfällen zur Zerstörung von angeschlossenen Geräten führen. Die Netzharmonischen können permanent oder sporadisch auftreten.

Negatives Zusammenwirken von Oberschwingungen und Kompensationsanlagen

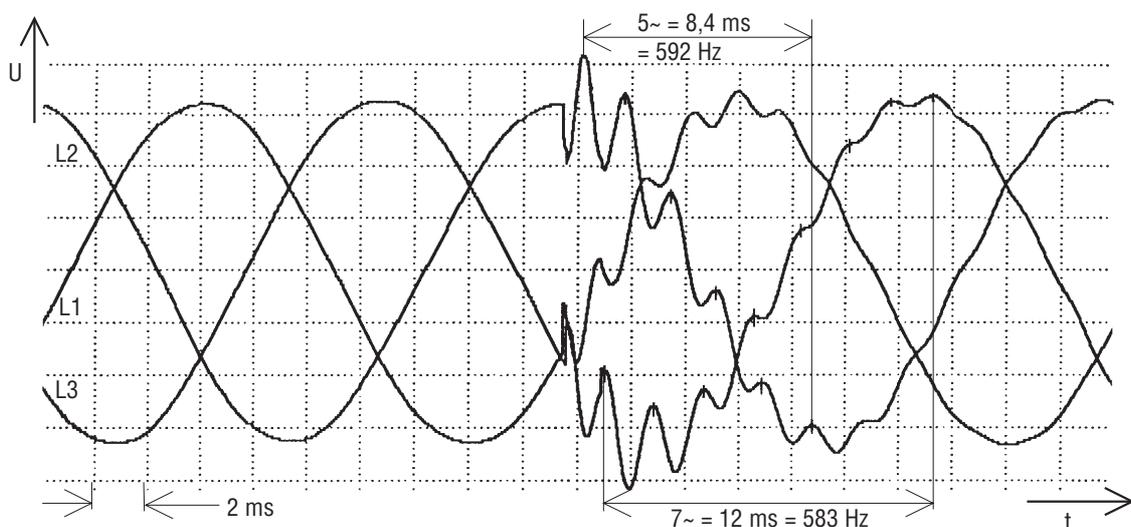
Oberschwingungen können im Netz Schwingkreise vorfinden, die in kritischen Fällen zu erheblichen Überspannungen führen. Ein Parallelschwingkreis kann z. B. durch Kondensatoren der Kompensationsanlage und durch die Hauptinduktivität des Versorgungstransformators gebildet werden. Liegt eine der Harmonischen mit ihrer Frequenz dicht an der Resonanzfrequenz, so kann der Netzspannung durch einen Schaltvorgang (meist Abschaltung von Kondensatoren bei Schwachlast) eine gefährliche Spannungsschwingung überlagert werden.

Um der Gefahr von Netzresonanzen vorzubeugen, empfehlen Kompensationsanlagen-Hersteller ab einem Umrichter-Anteil von ca. 20 – 25 % der Gesamtanschlußleistung verdrosselte Kompensationsanlagen.

Nachweis der Schwingungsfähigkeit von Netzen, verursacht durch Harmonische:

Das 50 Hz-Netz wurde durch die 11. Harmonische (= 550 Hz) infolge eines Schaltvorganges zum Schwingen angeregt.

Die Resonanzfrequenz f_{Res} beträgt für Phase L1 583 Hz und für Phase L2 592 Hz.



00745ADE

Bild 12: Beispiel für die Schwingungsfähigkeit von Netzen

Beispiele für Erzeuger von Netzharmonischen:

- Sanftanlasser, Frequenzumrichter, Servoumrichter, Drehzahlsteller
- Lichtbogenofen
- Induktionsofen
- Leuchtstoffröhren (auch kompensierte)
- gesättigte magnetische Kreise (z. B. Transformator und Drossel in Sättigung)
- Haushaltsgeräte wie Radio, Fernseher, Computer

Beispiele für Auswirkungen von Netzharmonischen:

Gerät	Auswirkung
Transformator	erhöhte Verluste und Erwärmung, es können Sättigungserscheinungen auftreten
Elektromotoren	erhöhte Verluste, Drehzahlschwankungen
Kabel	Erhöhte ohmsche und dielektrische Verluste
Kondensatoren	Erwärmung, Alterung, Resonanzerscheinungen
Meß- und Regeleinrichtungen	Meßfehler, Funktionseinschränkungen, Funktionsverlust
Nullspannungsschalter	Fehlschaltungen

Tabelle 2: Auswirkungen von Netzharmonischen

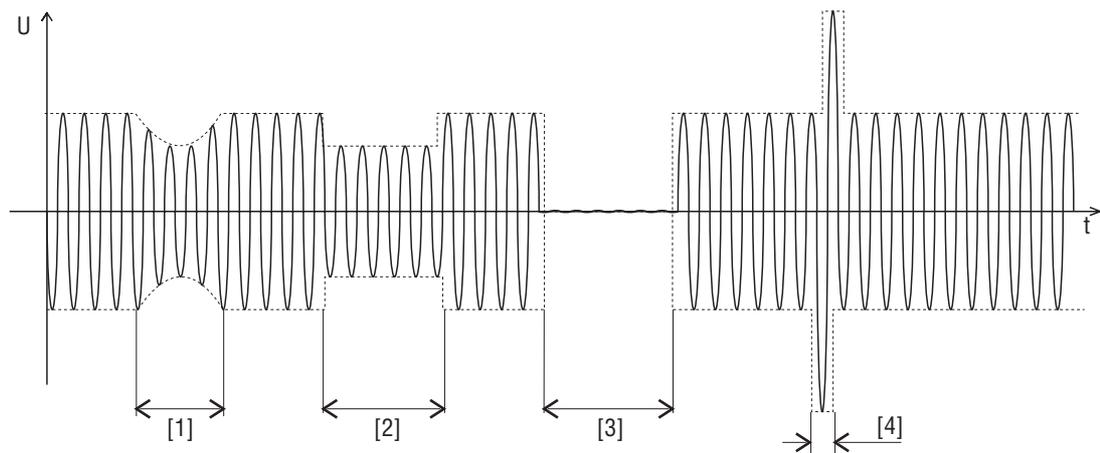
Netzharmonische können mit folgenden Maßnahmen verringert werden:

- mit einer geeigneten Kompensationsanlage
- mit einer Netzdrosselpule vor dem Verursacher
- durch Versorgung mit einem Trenntransformator

2.3.2 Netzschwankungen, Netzunterbrechung, Netzeinbrüche, Überspannungen

Frequenzgehalt: hauptsächlich im NF-Bereich

Energiegehalt: energiereich



00289AXX

Bild 13: Störungen im Niederspannungsnetz

[1] = Netzschwankungen, Flicker

[2] = Netzeinbruch

[3] = Netzunterbrechung

[4] = Netzüberspannung

Bild 13 zeigt verschiedene Störungen im **NF-Bereich**, die im Niederspannungsnetz auftreten können. Geräte, die an einem solchen Netz betrieben werden, müssen eine ausreichende Störfestigkeit aufweisen, um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Andererseits muß das Niederspannungsnetz eine Mindestqualität aufweisen, die durch den Betreiber sicherzustellen ist.

Netzstörungen können folgende Ursachen haben:

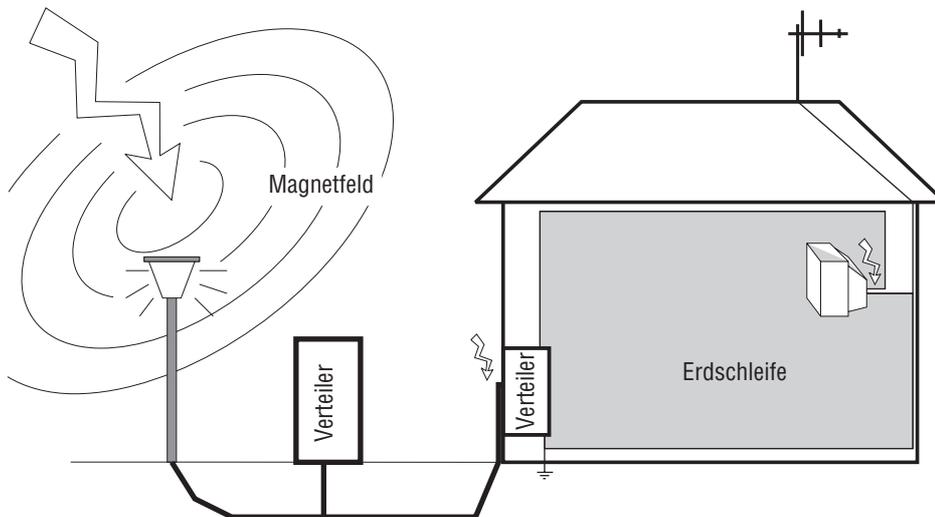
Störungen	mögliche Ursachen	Auswirkungen
Spannungsschwankungen	z. B. Lichtbogenöfen, Schweißgeräte, starke Lastschwankungen (z. B. Fahrstühle, Pressen)	Beleuchtungsschwankungen (Flicker)
Spannungseinbrüche	Schalten großer Lasten (Anlauf großer Motoren, Elektroheizungen, Elektroöfen usw.), Kurzschlüsse im Spannungsnetz ...	Drehmomentschwankungen, evtl. Betriebsstörung
Spannungsunterbrechungen	Zuschalten großer Transformatoren, Motoren, Kondensatoren	Abfall und Prellen von Relais, Abfall der Motorbremse
Überspannungen	Schalthandlungen im Mittelspannungsnetz, Gewitter, Schalten von unverdrosselten Kompensationsanlagen	Zerstörung von elektronischen Geräten, Betriebsstörung

Tabelle 3: Ursachen von Netzstörungen

2.3.3 Blitz

Frequenzbereich: Auswirkungen im NF- und HF-Bereich

Energiegehalt: sehr energiereich



00290ADE

Bild 14: Blitz, direkte Einwirkung und Magnetfeld

Eine der energiereichsten Störquellen ist der Blitz. Er erreicht Spannungen im MV-Bereich und Ströme über 100 kA.

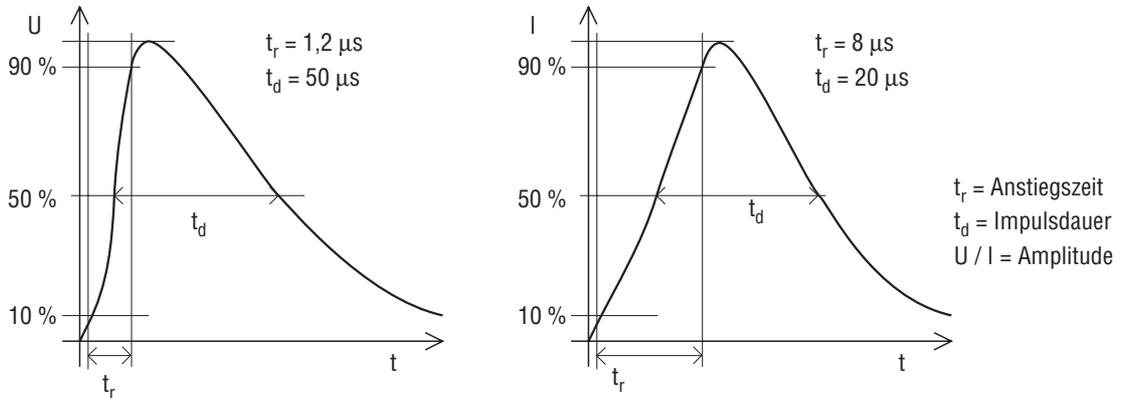
Bild 14 zeigt, daß es hauptsächlich zwei Koppelwege für die Blitzeinwirkung gibt. Einmal ist dies bei direktem Einschlag der Strom und der damit auftretende Spannungsfall, der zu erheblichen Überspannungen in der betroffenen Installation führen kann. Zum anderen verursacht die hohe Blitzstromstärke und deren schnelle Änderung sehr starke Magnetfeldänderungen.

Ähnlich wie beim Transformator induzieren diese Magnetfeldänderungen in benachbarten Leiterschleifen hohe Ströme und Spannungen. Dies kann dazu führen, daß auch hinter einem eingebautem Überspannungsschutz unter ungünstigen Bedingungen unzulässige Überspannungen auftreten.



Die auftretenden Spannungen können von Funktionsstörungen bis zur Zerstörung von elektrischen und elektronischen Geräten führen.

Durch ein geeignetes Konzept bei der Leitungsverlegung können diese Spannungen sehr stark reduziert werden (z. B. Vermaschung und sternförmige Verdrahtung).



00799ADE

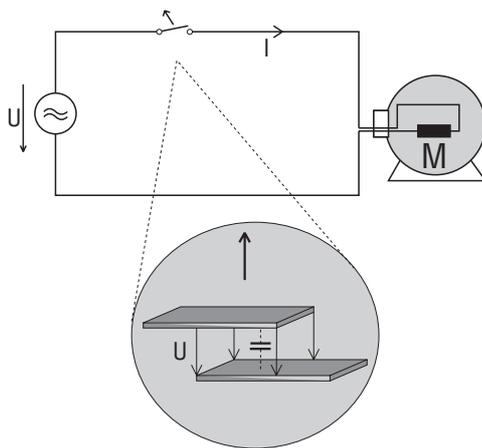
Bild 15: Genormter Überspannungspuls nach IEC 801-5

Bild 15 zeigt den Normimpuls (Surge oder Hybridimpuls), mit dem die Störfestigkeit gegen die Auswirkung von Blitzen im Spannungsnetz getestet wird.

2.3.4 Burst

Frequenzbereich: Auswirkungen hauptsächlich im HF-Bereich

Energiegehalt: gering



00291AXX

Bild 16: Entstehung eines Burst-Impulses

Mit „Burst“ wird eine Folge schneller transients Störgrößen mit steilen Flanken bezeichnet. Burst-Impulse entstehen, wenn elektromechanische Schalter unter Stromfluß geöffnet werden. Ursache sind in dem Stromkreis vorhandene Induktivitäten, die dafür sorgen, daß der Strom nicht sofort auf Null zurückgeht. Diese Induktivitäten können sowohl in konzentrierter Form (Elektromotor, elektrische Bremse, Transformator, Drossel) als auch in Form einer Zuleitungsinduktivität (\rightarrow Kap. 2.1) vorliegen.

Der sich öffnende Schalter stellt in diesem Fall eine Kapazität C dar, deren Wert abnimmt, wenn der Abstand der sich öffnenden Kontakte zunimmt:

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{d} \quad [F2]$$

- C = Kapazität der Schalterkontakte
- ϵ = Dielektrizitätskonstante
- A = Fläche der Kontakte
- d = Abstand der Kontakte

Im Abschaltmoment ist in der Induktivität Energie gespeichert. Die Induktivität prägt den Strom nach dem Abschaltmoment weiter ein. Dieser Strom lädt die Kapazität C des Schalters auf. Es gilt dabei folgender Zusammenhang:

$$\frac{1}{2} C \cdot U^2 = W = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad [F3]$$

- W = im Stromkreis gespeicherte Energie
- C = Kapazität der Schalterkontakte
- U = Spannung über dem Schalterkontakt
- L = Induktivität des unterbrochenen Stromkreises
- I = Strom im Abschaltmoment

Der durch die Induktivität eingepreßte Strom lädt die Schalterkapazität C auf. Da die Kapazität des Schalters sehr klein ist (einige pF), kann die Spannung über dem Schalter sehr hohe Werte erreichen. Wenn der Schalter sich öffnet, hat die Luftstrecke zwischen den Kontakten noch nicht ihre volle Isolationsfähigkeit erreicht: es gibt einen Überschlag. Der Schalterkondensator C entlädt sich.

Nachdem dadurch die Spannung über dem Schalter wieder auf Null gesunken ist, wird die Schalterkapazität erneut durch den Strom aufgeladen. Da sich die Schalterkontakte in der Zwischenzeit weiter voneinander entfernt haben, bricht die Luftstrecke zwischen den Kontakten nun bei einer höheren Spannung durch. Dies wiederholt sich so lange, bis die Isolierfähigkeit der Luftstrecke zwischen den Kontakten groß genug ist, um weitere Überschläge zu verhindern. Der Widerstand im Stromkreis (Leitungswiderstände, Verbraucher usw.) bedämpft die Umladeströme: je größer der Widerstand ist, desto schneller klingt der Burst-Impuls ab.

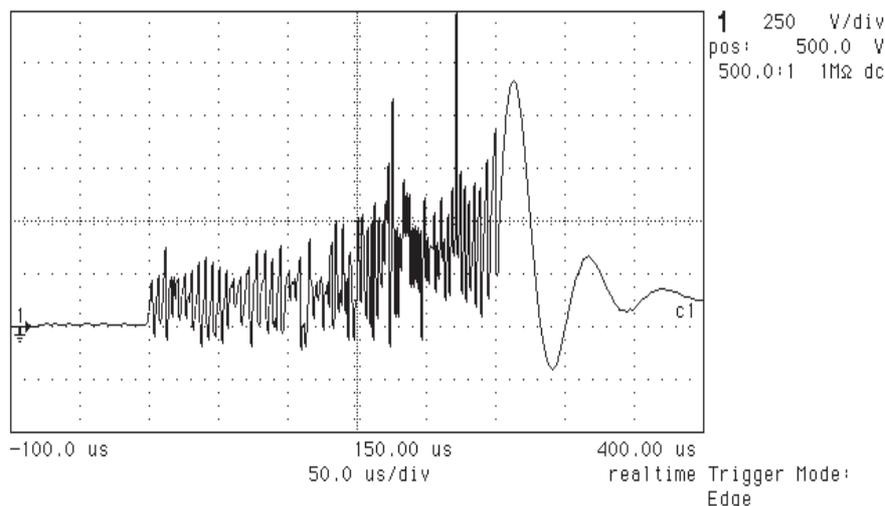
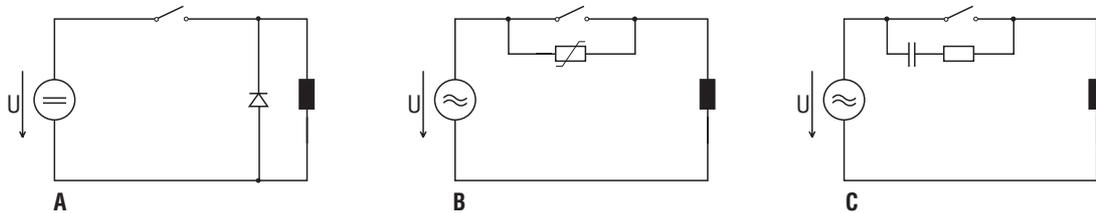


Bild 17: Gemessener Burst-Impuls

00292AXX

Zwischen den Schalterkontakten kann eine Spannung gemäß Bild 17 gemessen werden. Die Spannung wird um so größer, je größer der Strom im Abschaltaugenblick sowie die Induktivität im unterbrochenen Stromkreis ist. Die Spannung wird um so kleiner, je größer die Kapazität zwischen den Schalterkontakten ist. Burst-Impulse erreichen Spannungen von bis zu 10 kV.



00293AXX

Bild 18: Beschaltungen gegen Burst-Störungen: **A** Diodenbeschaltung / **B** Varistorbeschaltung / **C** RC-Beschaltung

Bild 18 zeigt verschiedene Möglichkeiten der Bedämpfung für diese Störungsart:

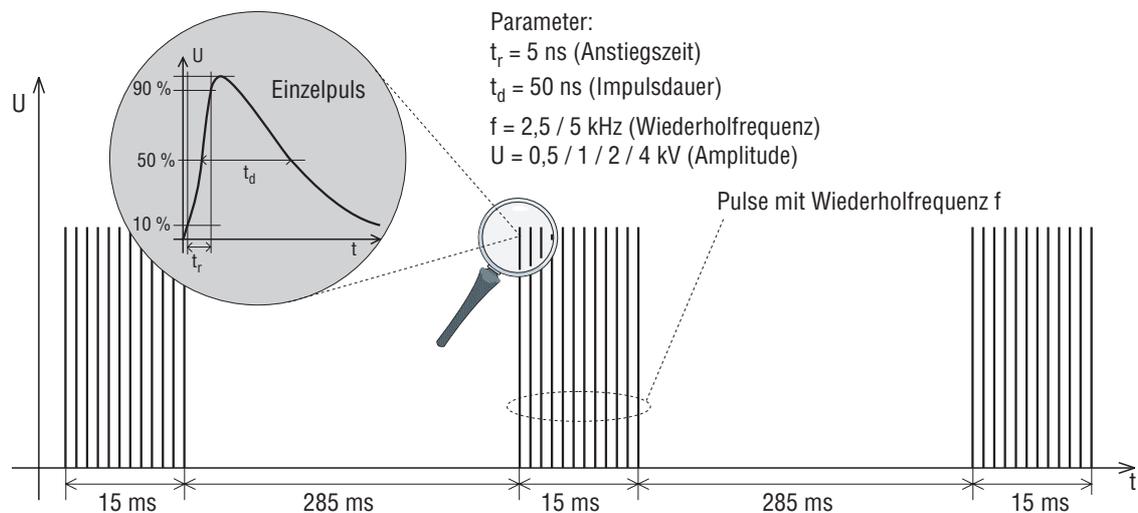
Variante **A** beschaltet die Induktivität mit einer Diode: der Strom kann sich darüber freilaufen, der Stromfluß in der Induktivität wird nicht unterbrochen und über den Schaltkontakten kann sich keine hohe Spannung aufbauen. Diese Beschaltung ist nur bei Gleichspannung möglich.

Variante **B** beschaltet die Kontakte mit einem spannungsabhängigen Widerstand, einem sogenannten Varistor. Dieser begrenzt die Spannung über dem Schalter. Der Varistor muß dabei so ausgewählt werden, daß er die auftretende Energie W und die Schalthäufigkeit verkraften kann. Die Energie kann mit [F3] abgeschätzt werden. Diese Schaltungsvariante ist für Gleich- und Wechselspannung geeignet.

Variante **C** beschaltet die Kontakte mit einem RC-Glied: die Spannung über dem Kontakt sinkt mit steigender Kapazität, der Widerstand sorgt für ein schnelles Abklingen des auftretenden Schaltimpulses.

Die Beschaltungen B und C können sowohl am Schalter als auch an der Induktivität vorgenommen werden.

Für elektrische und elektronische Geräte wird eine der Umgebung angemessene Störfestigkeit gegen Burst-Impulse gefordert. Bild 19 zeigt den dafür definierten Normimpuls.



00294ADE

Bild 19: Genormtes Burst-Prüf-Signal nach IEC 801-4

Prinzipiell ähnliche Störsignale entstehen bei der Verwendung von Halbleiterschaltern. Dort muß durch geeignete Schaltungsmaßnahmen sichergestellt werden, daß die auftretenden Überspannungen nicht zur Zerstörung der Halbleiter führen. Die mit Halbleiterschaltern möglichen hohen Schalt-raten können zu einem erheblichen Störpegel führen. Die sehr kurzen Schaltzeiten erzeugen Störsig-nale mit sehr hochfrequenten Anteilen.

Beispiele für mögliche Auswirkungen von Burst-Impulsen:

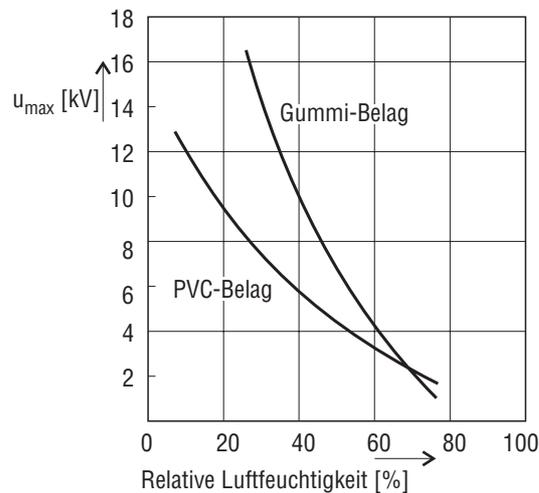
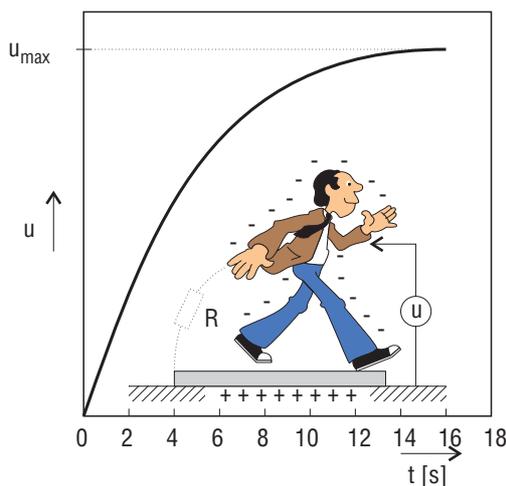
- Absturz oder Störung von Computern und Leitrechnern
- Verfälschung von Analogsignalen
- Fehlschaltungen von Näherungsschaltern und anderen Schaltern
- Zerstörung von empfindlichen Halbleitern

Beim Burst handelt es sich um eine hochfrequente Störung, die leicht benachbarte Leitungen beeinflussen kann.

2.3.5 Elektrostatische Entladung

Frequenzbereich: Auswirkungen im HF-Bereich

Energiegehalt: gering



00295ADE

Bild 20: Elektrostatische Aufladung

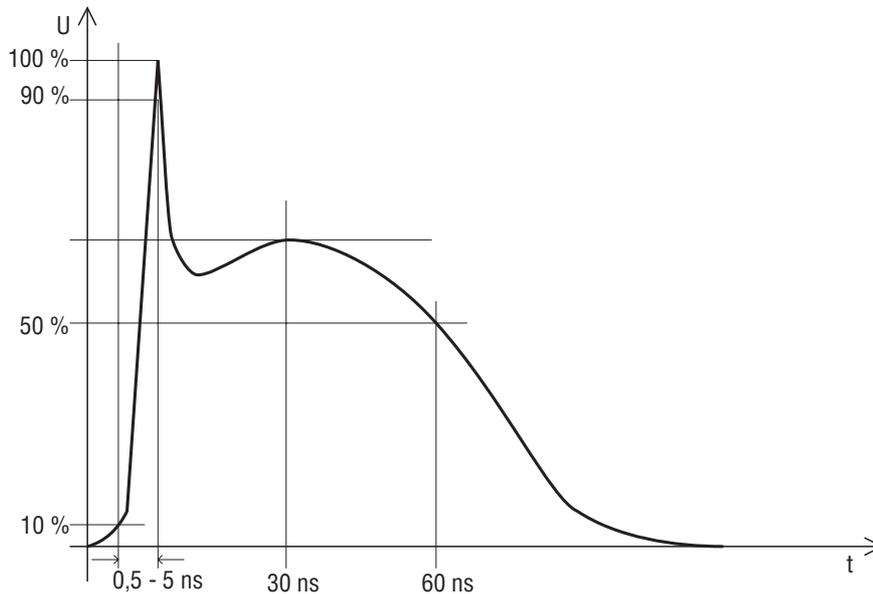
Bewegt sich eine Person mit Gummisohlen über einen synthetischem Teppich, so kann eine elektrostatische Aufladung beobachtet werden. Dieser Effekt tritt auch bei anderen Materialien auf. Nähert sich diese Person einem ungeladenen leitenden geerdeten Gegenstand, so erfolgt eine elektrostatische Entladung (engl. ESD = **e**lectrostatic **d**ischarge).

Elektrostatische Aufladung erfolgt durch das Trennen zweier sich berührender Materialien, von denen zumindest eines ein Isolator sein muß, da die Ladungen ansonsten gleich wieder abfließen.

Elektrostatische Aufladungen entstehen zum Beispiel beim Gehen auf isolierenden Teppichen, beim Aufstehen von Stühlen, bei der Handhabung von Kunststoffteilen, beim Ablaufen von Kunststoff- und Papierbahnen von Rollen, beim Fließen isolierender Flüssigkeiten durch Leitungen usw. Bei ungünstiger Materialkombination und geringer Luftfeuchtigkeit können Spannungen bis zu 30 kV beobachtet werden.

Beim Entladen entstehen sehr schnelle, impulsförmige Ströme, die Störungen verursachen können.

Elektrostatische Entladungen können auch in und an Geräten auftreten, wenn die Voraussetzungen dafür vorhanden sind.



00296ADE

Bild 21: Genormter ESD-Impuls nach IEC 801-2

Für elektrische und elektronische Geräte wird eine der Umgebung angemessene Störfestigkeit gegen ESD gefordert. Bild 21 zeigt den Normimpuls. Die Entladung erfolgt in sehr kurzer Zeit, der Impuls hat ein hochfrequentes Spektrum. Der hochfrequente Stromstoß, der bei der Entladung entsteht, kann vor allem Halbleiterschichten beschädigen oder zerstören. Die elektrostatistische Aufladung kann durch leitende Bodenbeläge, spezielle Schuhe, Erdungsbänder und ähnliches vermieden werden.

Mögliche Auswirkungen:

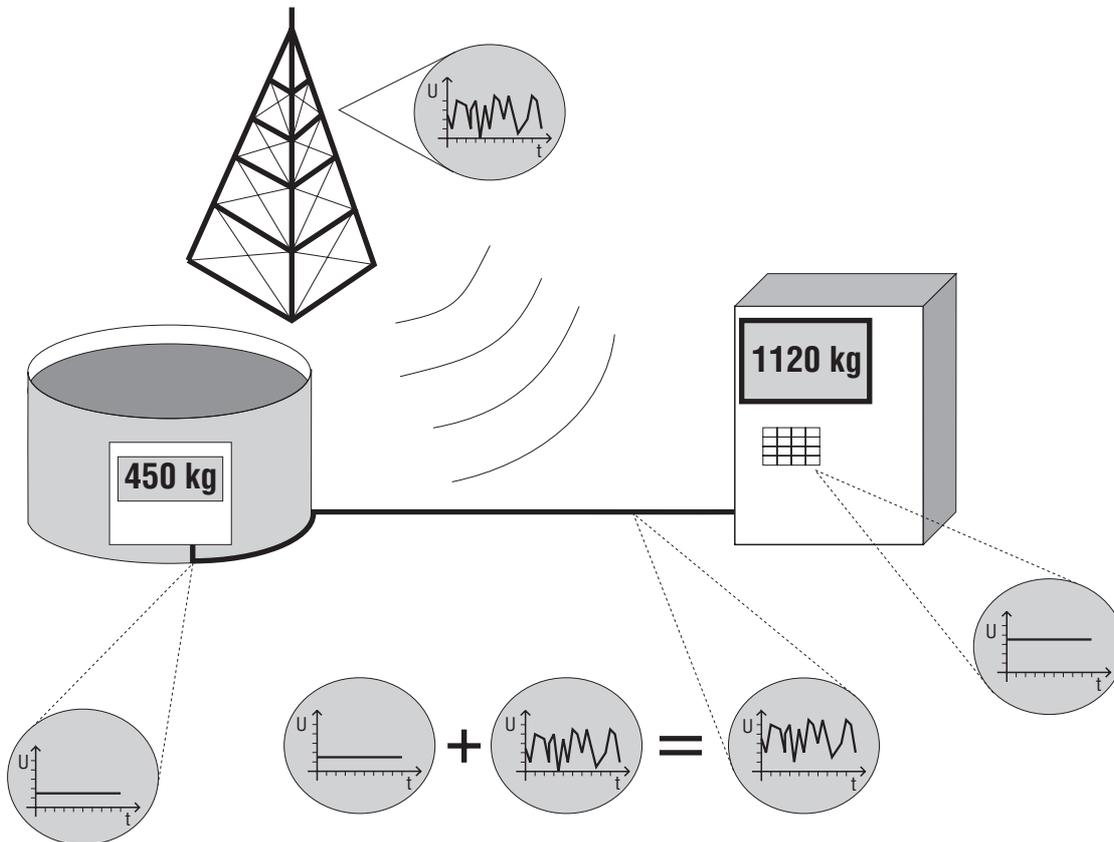
- Störungen von Digitalsystemen
- Zerstörung von Halbleitern, schleichende Defekte

Bei ESD handelt es sich um eine hochfrequente Störung, die leicht benachbarte Leitungen beeinflussen kann.

2.3.6 Strahlung

Frequenzbereich: HF-Bereich

Energiegehalt: meist gering, kann jedoch in Sonderfällen sehr groß werden
(z. B. in direkter Nähe zu Fernseh- und Radiosendern)



00279AXX

Bild 22: Störung durch Strahlung über Füllstandsmesser, Leitung, Anzeige

Bild 22 zeigt, wie eine Störung durch Strahlung über eine Leitung auf eine Störsenke koppeln kann. Die Meßleitung wirkt in diesem Fall als Empfangsantenne. Wesentlich für die Stärke der Kopplung ist dabei die Wellenlänge λ der Strahlung und die Länge der Leitung.

Es gilt folgender Zusammenhang:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [F4]$$

- λ = Wellenlänge der Strahlung in Luft in m, z. B. 30 m bei 10 MHz
- c = Lichtgeschwindigkeit (ca. 300.000.000 m/s)
- f = Frequenz der Strahlung in Hz

Als Faustregel kann davon ausgegangen werden, daß die Leitung wesentliche Strahlungskomponenten empfangen kann, sobald ihre Länge ein Zehntel der Wellenlänge erreicht. Die Leitung wirkt als Empfangsantenne. Umgekehrt gilt, daß eine Leitung, die ein hochfrequentes Signal transportiert, ab einer Länge von einem Zehntel der Wellenlänge merklich mit dem Abstrahlen des Signals beginnt. Sie wirkt als Sendeantenne.

Als Gegenmaßnahme können Geräte in Metallgehäuse montiert werden (Faradayscher Käfig), Leitungen können geschirmt werden (\rightarrow Kap. 4.2.1). Über Schirmunterbrechungen, Gehäuseschlitze und

Gehäusedurchbrüche, die 10 % der Wellenlänge erreichen, können jedoch wieder merkliche Signalanteile abgestrahlt oder empfangen werden.

Mögliche Störsender:

- Radiosender, Fernsehsender, Mobiltelefon, Sprechfunkgeräte
- HF-Materialtrocknungsanlagen, Mikrowellenöfen
- Lichtbogenschweißgeräte
- kurze, pulsformige Störungen (ESD, Burst ...)
- hochfrequent getaktete Systeme (Computer, Prozeßrechner etc.)

Mögliche Auswirkungen:

- verfälschte Analogsignale
- Fehlfunktionen
- Fehlmessungen

2.4 Koppelmechanismen

Im letzten Abschnitt wurden verschiedene Störquellen beschrieben. Hier soll nun betrachtet werden, auf welchen Wegen die Störungen S zur Störseuke gelangen. Es werden vier Kopplungsarten unterschieden, wobei es sich bei den letzten drei im Prinzip um unterschiedliche Erscheinungsformen der Strahlungskopplung handelt:

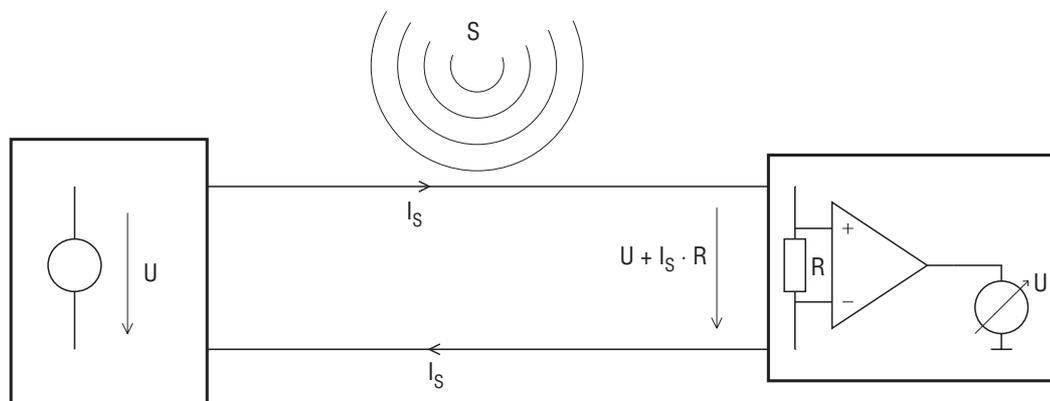
- galvanische Kopplung
- induktive Kopplung
- kapazitive Kopplung
- Strahlung

Je nach Ausbreitungsweg der Störung werden zwei unterschiedliche Störungsarten unterschieden:

- Gegentaktstörung (Bild 23)
- Gleichtaktstörung (Bild 24)

Gegentaktstörung (symmetrische Störung):

Sie dominiert bei niedrigen Frequenzen; der Störstromkreis wird durch die vorhandenen Leitungen geschlossen. Ein Störstrom I_S verursacht hier direkt einen Störspannungsfall am Meßwiderstand R .



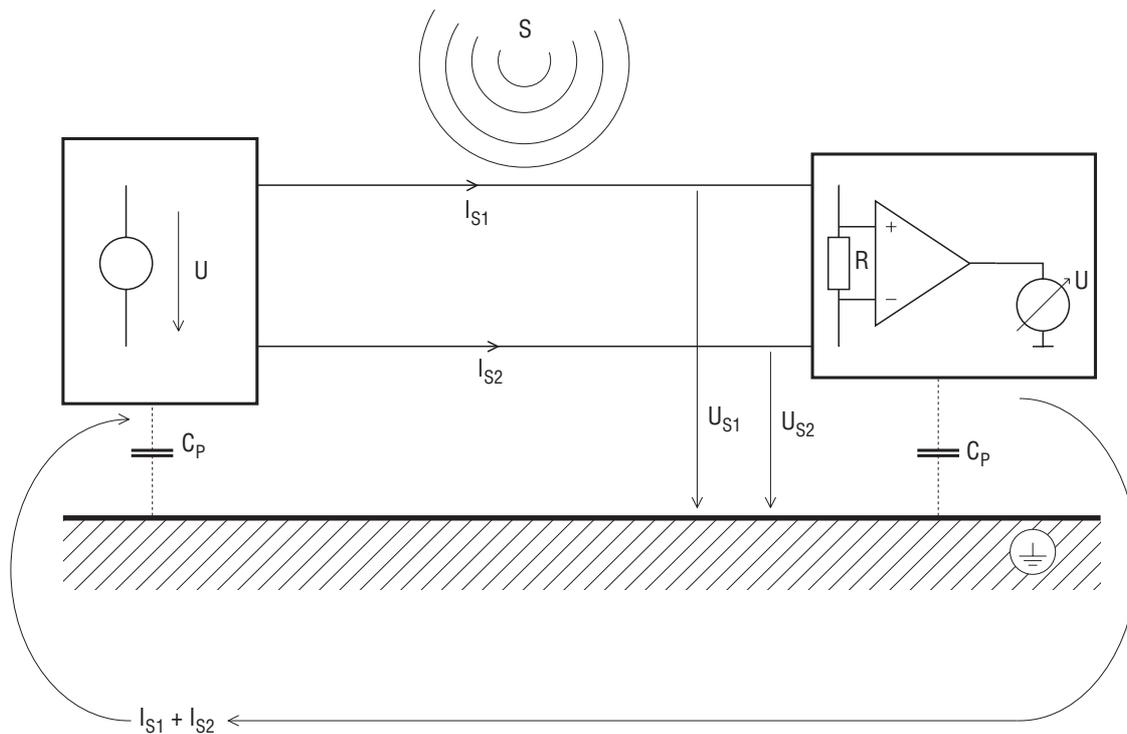
00297AXX

Bild 23: Gegentaktstörung

S = Störung
 I_S = Störstrom

Gleichtaktstörung (unsymmetrische Störung):

Der Störstromkreis wird hier durch parasitäre Kapazitäten C_P geschlossen. Da diese bei niedrigen Frequenzen eine hohe Impedanz besitzen, können Gleichtaktstörungen im NF-Bereich vernachlässigt werden. Nennenswerte Störströme I_{S1} und I_{S2} fließen erst bei höheren Frequenzen. Am Meßwiderstand R wirkt sich hier der unterschiedliche Spannungsfall an Hin- und Rückleiter $U_{S1} - U_{S2}$ aus. Im HF-Bereich stellen Gleichtaktstörungen das Hauptproblem dar. Sie sind oft sehr schwierig zu ermitteln, da nicht immer ersichtlich ist, wo der Störstromkreis durch parasitäre Kapazitäten geschlossen wird.



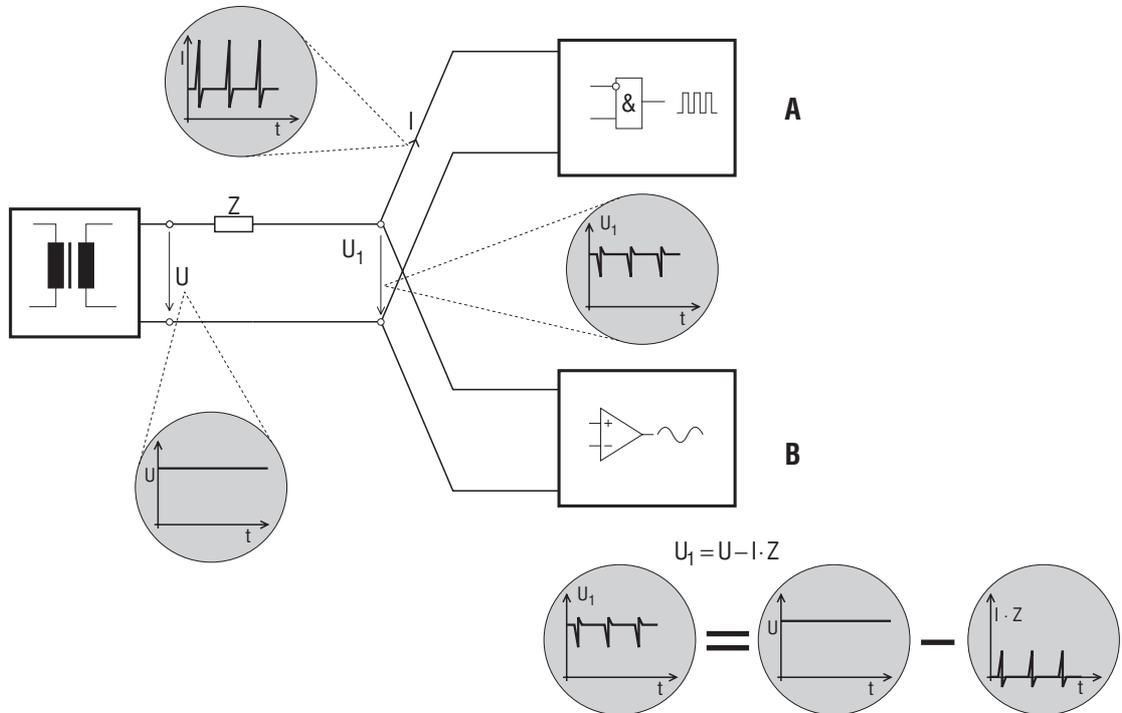
00298AXX

Bild 24: Gleichtaktstörung

- S = Störung
- I_{S1} = Störstrom 1
- I_{S2} = Störstrom 2
- C_P = Parasitärkapazität

2.4.1 Galvanische Kopplung (Leitungskopplung)

Frequenzbereich: sowohl im NF- als auch im HF-Bereich wirksam



00299AXX

Bild 25: Beispiel für galvanische Kopplung

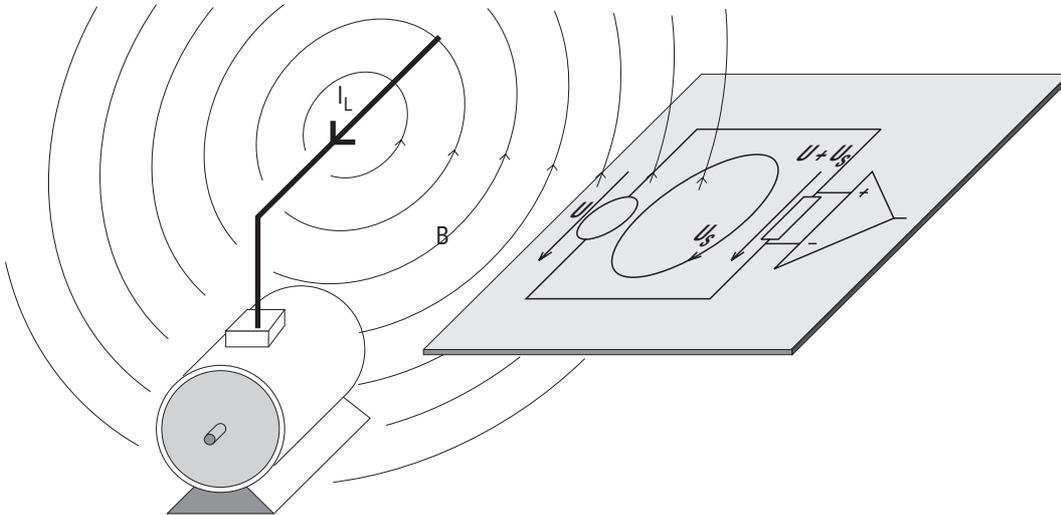
Galvanische Kopplung tritt auf, wenn mehrere Stromkreise sich Spannungsquellen, Leiterzüge, Leitungen o. ä. teilen. Bild 25 zeigt das zugrunde liegende Prinzip. Der Strom in Stromkreis A (Digitalschaltung) verursacht an der gemeinsamen Impedanz Z einen Spannungsfall. Dieser Spannungsfall macht sich in Stromkreis B (Analogschaltung) als Versorgungsspannungseinbruch bemerkbar. Der Spannungsfall ist um so größer, je größer der Strom und je größer die gemeinsame Koppelimpedanz Z ist.

Die galvanische Kopplung zwischen zwei Stromkreisen kann mit folgenden Maßnahmen verringert werden:

- getrennte Versorgung von Leistungsstromkreisen und Kleinsignalstromkreisen
- Verringerung der Koppelimpedanz Z durch sternförmige Verdrahtung; der Sternpunkt sollte so nah wie möglich an der Versorgungsquelle liegen, da für höhere Frequenzen die Impedanz der Zuleitung in erster Linie durch deren Länge bestimmt wird (→ Kap. 2.1, Bild 3).

2.4.2 Induktive Kopplung

Frequenzbereich: sowohl im NF- als auch im HF-Bereich wirksam



00300AXX

Bild 26: Induktive Kopplung zwischen Motorzuleitung und Steuerstromkreis auf Leiterplatte

I_L = Strom in der Motorzuleitung
 B = Magnetfeld
 U_S = Störspannung

In Kap. 2.1 wurde beschrieben, daß sich um jeden stromdurchflossenen Leiter ein Magnetfeld B aufbaut, das dem Strom I_L durch den Leiter proportional ist. Durchdringt dieses Magnetfeld eine senkrecht dazu liegende Leiterschleife, so wird dort eine Spannung induziert, wenn das Magnetfeld seine Stärke ändert (Transformator-Prinzip). Die Spannung ist proportional der Leiterschleifen-Fläche und der Stärke der Magnetfeldänderung. Dies bedeutet, daß eine Störspannung nur induziert wird, wenn sich die Stromstärke im Lastkreis ändert (Wechselstrom oder geschalteter Gleichstrom). Ein konstanter Gleichstrom verursacht hier keine Störspannung.

Folgende Faktoren haben Einfluß auf die Störspannung:

- Der Abstand: Die Störspannung sinkt mit wachsendem Abstand zwischen Lastkreis und gestörtem Kreis.
- Die Orientierung: Liegt die Leiterschleife parallel zu den Magnetlinien, so wird keine Störspannung induziert. Bei einem rechten Winkel zwischen Leiterschleife und Magnetlinien tritt die maximale Störspannung auf.
- Die Frequenz: Mit steigender Frequenz des Laststromes wird die Störspannung größer.
- Die Fläche der Leiterschleife: Die Störspannung ist proportional der Fläche der Leiterschleife.

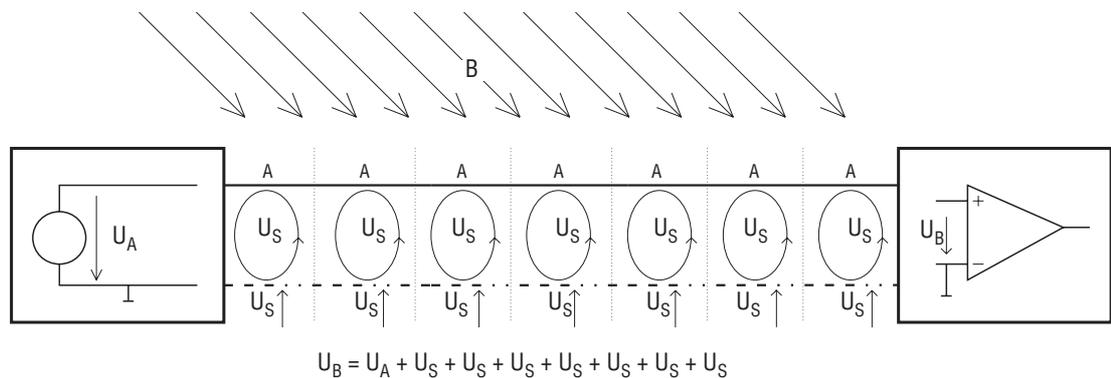
Störspannungen können sich auch ausbilden, wenn die Leiterschleife im Magnetfeld bewegt wird (Dynamo-Prinzip), z. B. durch Vibration.

Maßnahmen gegen induktive Kopplung

Verdrillung

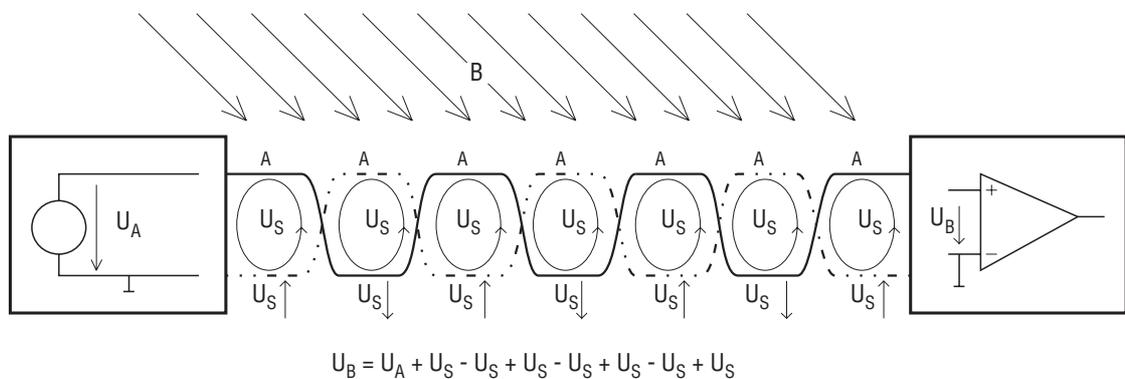
Besonders effektiv zur Verringerung der induktiven Kopplung ist die Verdrillung von Hin- und Rückleiter (Bild 28). Es werden dabei viele kleine Flächen A gebildet, in die Teilstörspannungen mit abwechselnden Vorzeichen induziert werden. Am Meßwiderstand ist nur noch eine kleinere Störspannung wirksam. Die Störspannung wird im allgemeinen nicht exakt null, da die Schleifenflächen A nicht gleich sind und weil das Magnetfeld B in den Schleifen unterschiedlich ist (z. B. wegen unterschiedlichem Abstand zur Störquelle).

Die Verdrillung wird effektiver, je kleiner die Schleifenflächen sind. Dies erreicht man durch eine größere Schlagzahl.



00696AXX

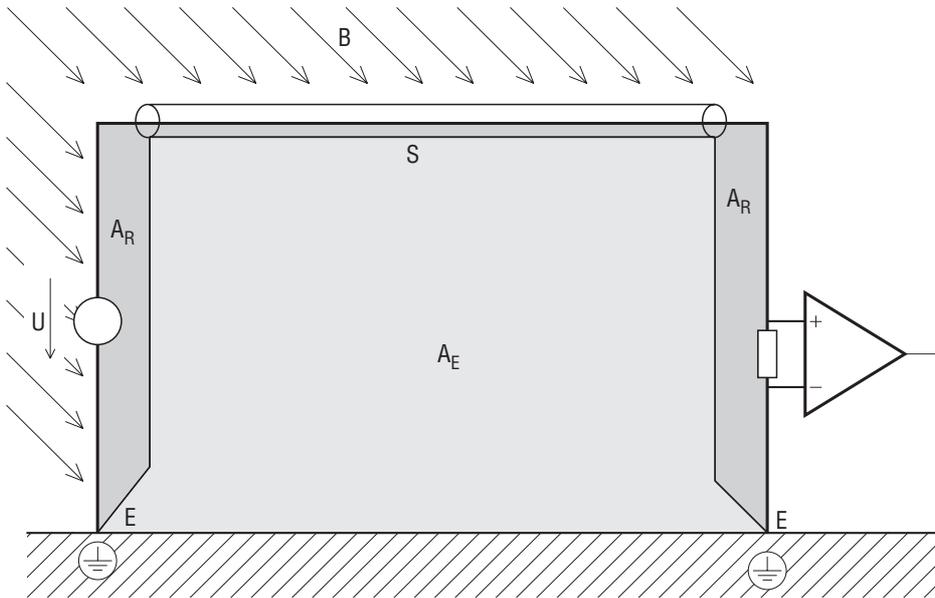
Bild 27: Unverdrillte Zuleitung mit Magnetfeld B, Schleifenflächen A und Teilstörspannungen U_S



00697AXX

Bild 28: Verdrillte Zuleitung mit Magnetfeld B, Schleifenflächen A und Teilstörspannungen U_S

Schirmung



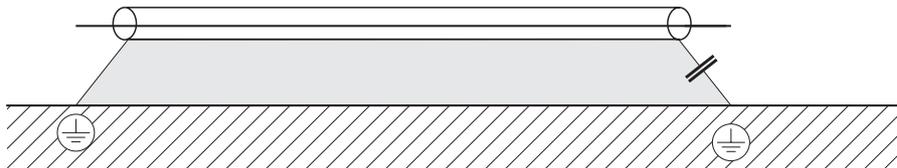
00698ADE

Bild 29: Schirmung gegen magnetische Felder

- B = Magnetfeld
- E = Schirmerdung
- A_E = Erdschleifenfläche
- A_R = Restschleifenfläche
- S = Schirm

Bild 29 zeigt, wie ein Schirm aus elektrisch leitfähigem Material gegen induktive Kopplung wirkt, indem er die für die Kopplung wirksame Fläche verkleinert (Schirme aus magnetischem Material werden in Abschnitt 2.4.4 erklärt). Dies bedeutet auch, daß ein Schirm aus nichtmagnetischem Material nur dann wirken kann, wenn der Schirm an beiden Enden aufgelegt wird, da er ansonsten keine Kurzschlußschleife für das Störmagnetfeld bildet. Am Meßwiderstand fällt nur eine kleine Störspannung ab.

Der Schirm schließt den Hauptteil der Störspannung kurz, auf dem Schirm fließt ein Kurzschlußstrom, der hohe Werte erreichen kann. Zur Vermeidung zu großer Schleifenströme kann ein Ende des Schirmes über einen Kondensator aufgelegt werden.



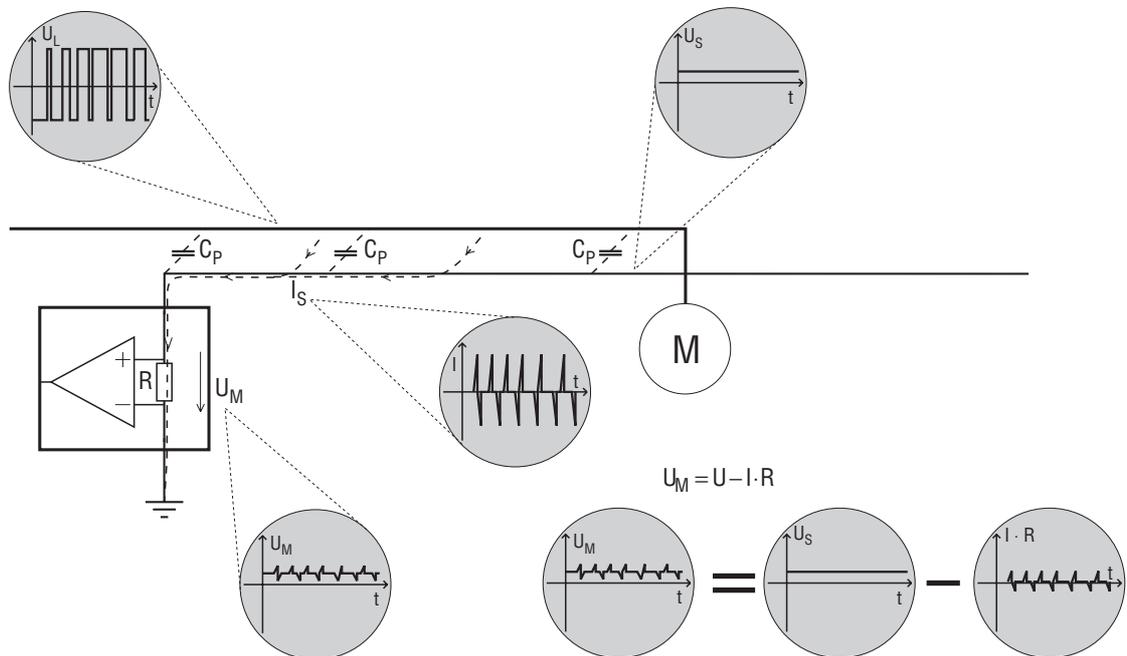
00870AXX

Bild 30: Ein Schirmende über Kondensator aufgelegt

Die Schirmung ist um so effektiver, je kleiner die Restschleifenfläche ist. Deshalb müssen die ungeschirmten Anschlüsse der Leitungen möglichst kurz gehalten werden. Auch die Anschlußlängen des Schirms müssen möglichst kurz gehalten werden.

2.4.3 Kapazitive Kopplung

Frequenzbereich: HF-Bereich



00699AXX

Bild 31: Kapazitive Kopplung zwischen Leistungs- und Signalleitung

Zwei benachbarte Leitungen besitzen eine Parasitärkapazität (\rightarrow Kap. 2.1). Findet auf einer Leitung eine Spannungsänderung statt, so fließt über die Parasitärkapazität C_p ein Störstrom I_s in die benachbarte Leitung und ruft am Meßwiderstand eine Störspannung hervor. Für den Störstrom gilt folgende Formel:

$$I_s = C_p \cdot \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad [\text{F5}]$$

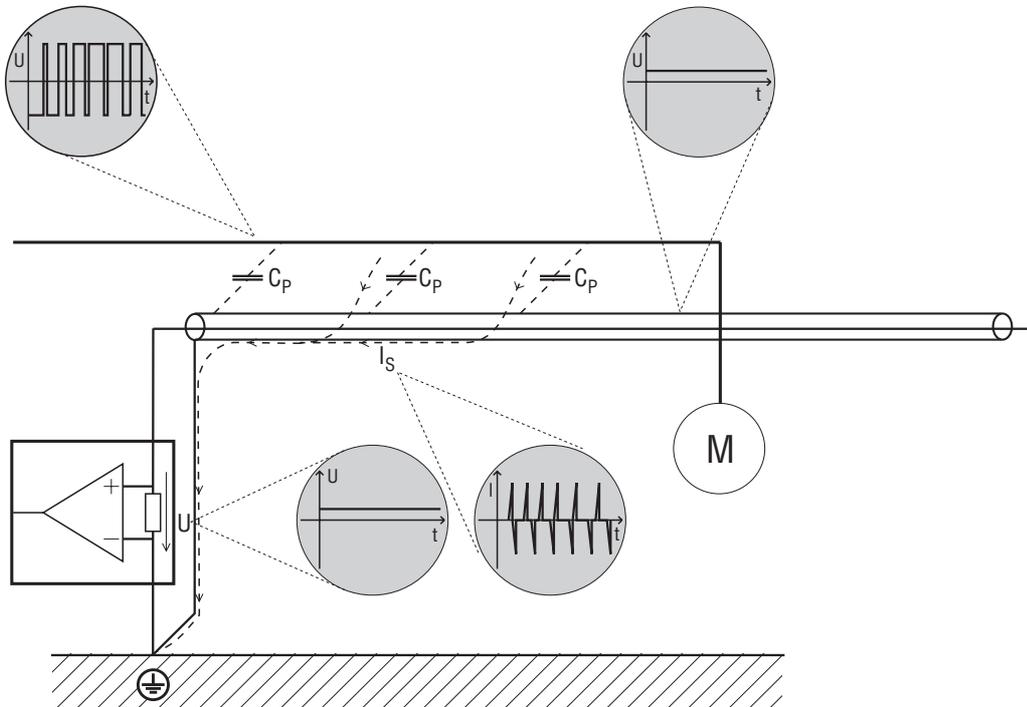
- I_s = Störstrom
- C_p = Parasitärkapazität
- ΔU = Spannungsänderung auf der störenden Leitung
- Δt = Dauer der Spannungsänderung

Folgende Faktoren haben einen Einfluß auf den Störstrom:

- Der Eingangswiderstand R : Je hochohmiger der Eingangswiderstand ist, um so höher ist die Störspannung, die durch den Störstrom verursacht wird.
- Der Abstand der Leitungen: Je größer der Abstand, desto kleiner die Parasitärkapazität, um so kleiner der Störstrom. Die Parasitärkapazität wächst mit kleinerem Leitungsabstand (dies entspricht dem Abstand der Kondensatorplatten) und mit der Länge, über die die Leitungen parallel liegen (die Länge mal dem Leiterdurchmesser entspricht in etwa der Fläche der Kondensatorplatten) (\rightarrow Kap. 2.3.4, [F2]).
- Die Amplitude der Störspannung: Der Störstrom wächst mit steigender Amplitude der Spannung auf der störenden Leitung.
- Die Flankensteilheit der Störspannung (Änderungsgeschwindigkeit): Der Störstrom steigt mit steigender Flankensteilheit der Störspannung.

Maßnahmen gegen kapazitive Kopplung

Schirmung



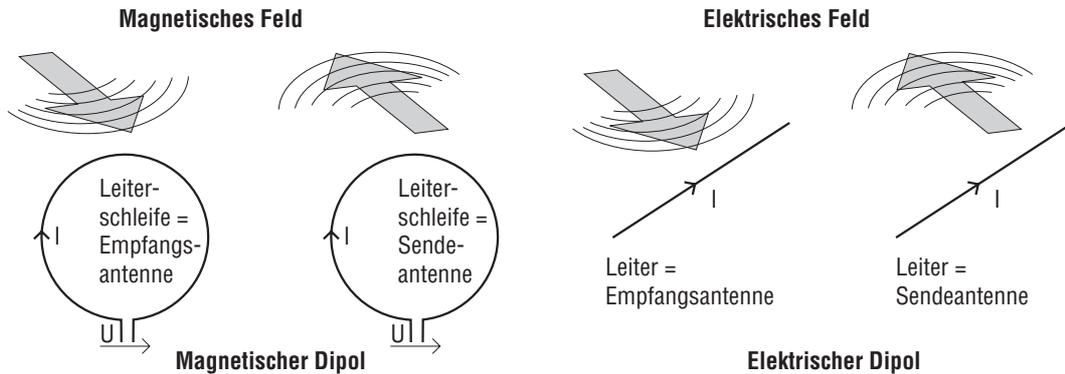
00700AXX

Bild 32: Einseitige Schirmerdung

Für die Schirmung gegen kapazitive Kopplung genügt es theoretisch, den Schirm nur an einem Ende aufzulegen, da der geerdete Schirm den Gegenpol des parasitären Kondensators bildet. Der abgeschirmte Innenleiter befindet sich in einem Faradayschen Käfig. Der Störstrom fließt nun über den Schirm ab.

Die einseitige Schirmerdung wirkt jedoch nicht gegen Magnetfelder (\rightarrow Kap. 2.4.2); es empfiehlt sich daher praktisch immer die beidseitige Schirmerdung. Die zur Kopplung notwendigen parasitären Kondensatoren werden erst bei hohen Frequenzen niederohmig, so daß die kapazitive Kopplung praktisch nur im HF-Bereich auftritt.

Im wesentlichen gibt es zwei Grundformen von Antennen:



00702ADE

Bild 34: Magnetischer Dipol und elektrischer Dipol

Magnetischer Dipol:

Jede Leiterschleife kann sowohl als Sende- als auch als Empfangsantenne wirken. Sie wirkt dabei als magnetischer Dipol, der ein magnetisches Feld abstrahlt oder empfängt. Ursache für die Abstrahlung ist der Strom, der in der Leiterschleife fließt. Beim Empfang wird ein Strom in der Schleife induziert. Die untere Grenzfrequenz liegt um so tiefer, je größer die Fläche der Schleife ist. Nahe am magnetischen Dipol ist das Magnetfeld die dominierende Komponente der Welle. Entstörmaßnahmen wirken daher nahe am magnetischen Dipol nur dann effektiv, wenn sie das Magnetfeld beeinflussen.

Elektrischer Dipol:

Jeder Leiter kann sowohl als Sende- als auch als Empfangsantenne wirken. Er wirkt dabei als elektrischer Dipol, der elektrische Felder abstrahlt oder empfängt. Ursache für die Abstrahlung ist der Spannungsfall, der längs der Leitung auftritt. Beim Empfang wird eine Spannung in dem Leiter induziert. Die untere Grenzfrequenz liegt um so tiefer, je länger der Leiter ist. Nahe am elektrischen Dipol ist das elektrische Feld die dominierende Komponente der Welle. Entstörmaßnahmen wirken daher nahe am elektrischen Dipol nur dann effektiv, wenn sie das elektrische Feld beeinflussen.

Maßnahmen gegen Strahlung: Schirmung

Ein wirksames Mittel gegen elektromagnetische Strahlung ist die Schirmung. Der Schirm wirkt im wesentlichen dadurch, daß er eine Komponente der elektromagnetischen Welle kurzschließt. Da beide Komponenten miteinander verknüpft sind, wird dadurch die andere Komponente mit bedämpft. Mit einem elektrisch leitfähigen Schirm (meist Kupferschirm) wird die elektrische Feldkomponente kurzgeschlossen und mit einem magnetisch leitfähigen Schirm (meist hochpermeable Materialien) die magnetische Komponente.

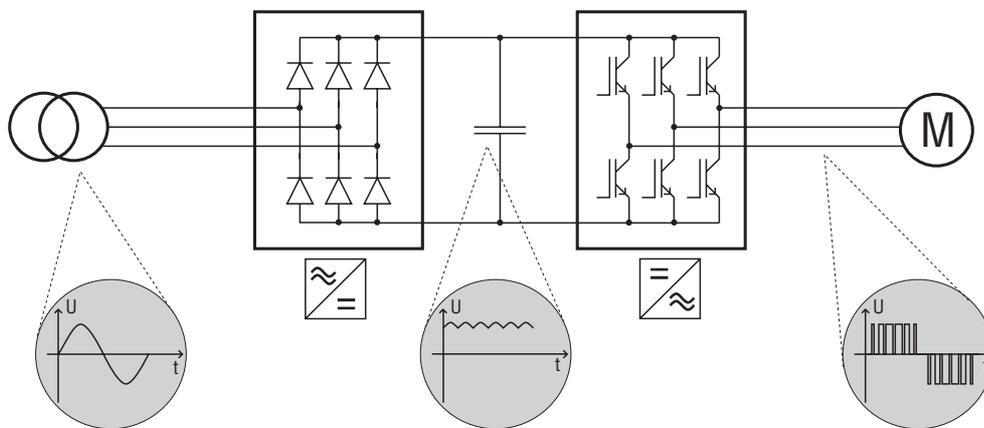
Der elektrisch leitfähige Schirm ist überall dort effektiv, wo die Welle eine wesentliche elektrische Komponente hat. In der Nähe eines magnetischen Dipols besitzt er nur eine sehr geringe Wirksamkeit, die allerdings mit steigender Schirmdicke zunimmt (das Magnetfeld wird durch Wirbelströme, die sich im Material ausbilden, kompensiert). Dünne Folien und aufgetragene Metallschichten sind aus diesem Grund für eine effektive Schirmung dort nicht geeignet. Der elektrisch leitfähige Schirm ist vor allem für den höherfrequenten Bereich geeignet.

Die wesentliche Eigenschaft des magnetisch leitfähigen Schirms ist die Permeabilität des Materials. Da die Permeabilität bei hohen Frequenzen stark nachläßt, wird der magnetische Schirm hauptsächlich bei tieferen Frequenzen in der Nähe von magnetischen Dipolen eingesetzt. Die Wirkung bei höheren Frequenzen beruht hauptsächlich auf Magnetisierungsverlusten im Schirmmaterial, der magnetische Schirm wirkt wie ein Bedämpfungswiderstand für die Welle. Da der magnetische Schirm gegenüber dem elektrischen Schirm relativ teuer ist, findet er nur in wenigen Fällen Anwendung.

2.5 Störmechanismen bei Umrichtern

Beim Betrieb von Umrichtern mit Gleichspannungs-Zwischenkreis treten einige Effekte auf, die nur mit genauer Kenntnis der Funktionsweise erklärbar sind.

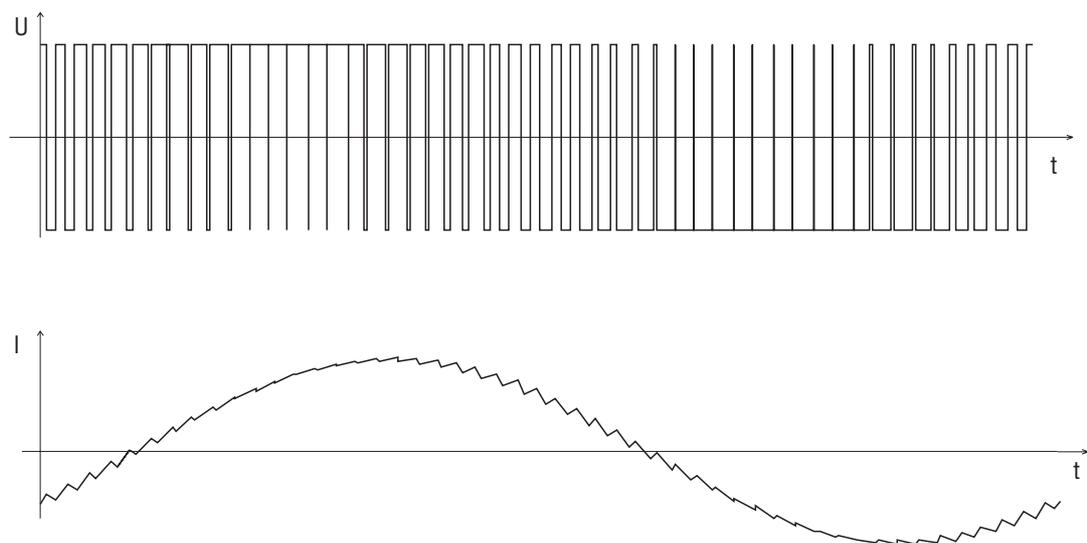
Ein Umrichter erzeugt aus der sinusförmigen Netzwechselspannung eine Ausgangsspannung, deren Amplitude und Frequenz in einem weiten Bereich verstellt werden kann. Hierzu wird die Netzspannung zu der sogenannten Zwischenkreisspannung gleichgerichtet. Aus dieser Zwischenkreisspannung wird mit Hilfe eines Wechselrichters eine pulsformige Ausgangsspannung erzeugt. Mit einem Regler wird die Pulsbreite der Ausgangsspannung so variiert, daß sich an der Induktivität des Motors ein annähernd sinusförmiger Strom einstellt (Pulsweitenmodulation = PWM). Das Schalten der Ausgangsspannung ist notwendig, um die Verluste im Wechselrichter klein zu halten und damit einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Bild 35 zeigt das Prinzipschaltbild eines Umrichters mit Gleichspannungs-Zwischenkreis.



00769AXX

Bild 35: Prinzipschaltbild eines Umrichters mit Gleichspannungs-Zwischenkreis

Die getaktete Ausgangsspannung und der Ausgangsstrom sind in Bild 36 dargestellt. Die Flankensteilheit der Rechteckimpulse ist sehr groß, es werden Werte von einigen $\text{kV}/\mu\text{s}$ erreicht.



00770AXX

Bild 36: Ausgangsspannung und Ausgangsstrom eines Umrichters

Gemäß Kap. 2.2 enthält ein Signal um so mehr hochfrequente Anteile, je größer die Spannung und die Flankensteilheit des Signals ist. Da bei einem Frequenzumrichter beide Größen sehr hohe Werte annehmen, ist der Störpegel entsprechend hoch. Bild 37 zeigt ein typisches Frequenzspektrum der Ausgangsspannung.

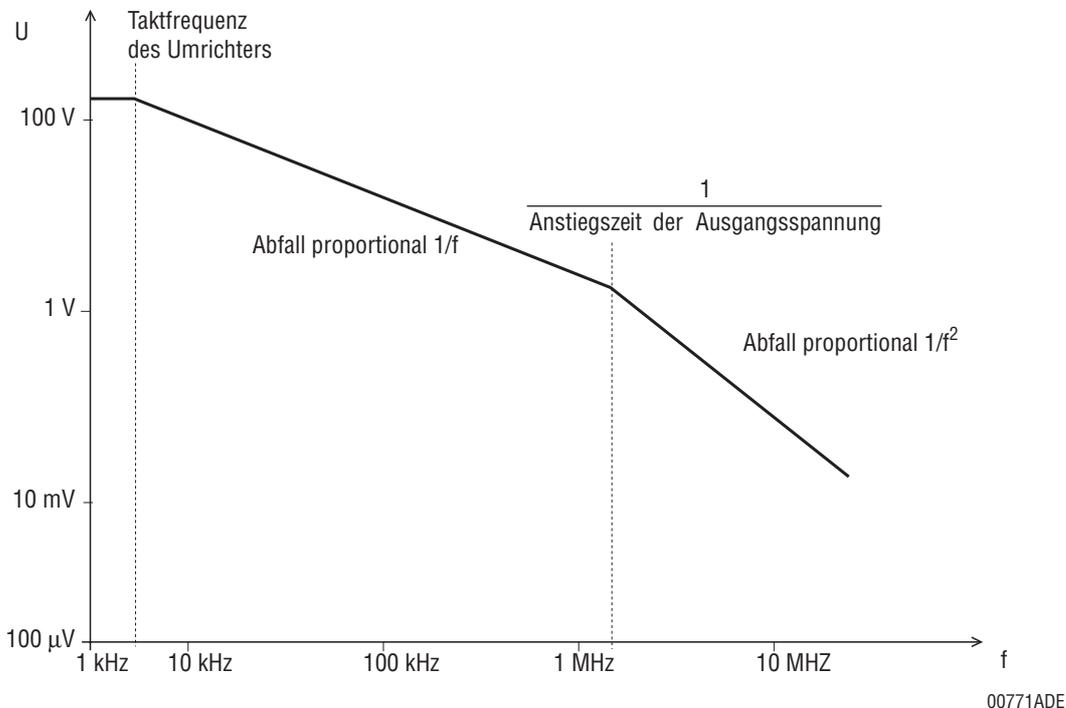


Bild 37: Hüllkurve des Frequenzspektrums der Ausgangsspannung eines Umrichters

Die grundsätzliche Funktionsweise eines Umrichters hat einige typische Störmechanismen zur Folge, die nun genauer betrachtet werden sollen.

2.5.1 Abstrahlung

Die Ausgangsspannung eines Frequenzumrichters enthält funktionsbedingt hochfrequente Komponenten. In Abhängigkeit von der Schaltgeschwindigkeit der Leistungshalbleiter im Wechselrichter (meist IGBTs) besitzen die Spannungskomponenten nicht vernachlässigbare Anteile bis zum Frequenzbereich um 100 MHz. Gemäß Kap. 2.3.4 [F2] erfolgt also schon bei kleinen Leitungslängen eine merkbare Abstrahlung.

Dies kann dazu führen, daß für das Einsatzgebiet existierende Abstrahlungsgrenzwerte überschritten werden und Störungen auf benachbarte Leitungen koppeln können. Folgende Maßnahmen wirken dem entgegen:

Schirmung

Durch sachgerechte Schirmung kann die Abstrahlung deutlich vermindert werden. Der Schirm muß dazu beidseitig aufgelegt werden (→ Kap. 4.2.2). Die Schirmwirkung kann bei größeren Leitungslängen dadurch verbessert werden, daß der Schirm über der Länge mehrmals aufgelegt wird. Auch die Verlegung mit einer Stahlarmierung, in einem metallischen Rohr oder in einem metallischen Kabelkanal dämpfen die Abstrahlung, wenn auch nicht so effektiv wie ein Kupferschirm.

Ferritkerne

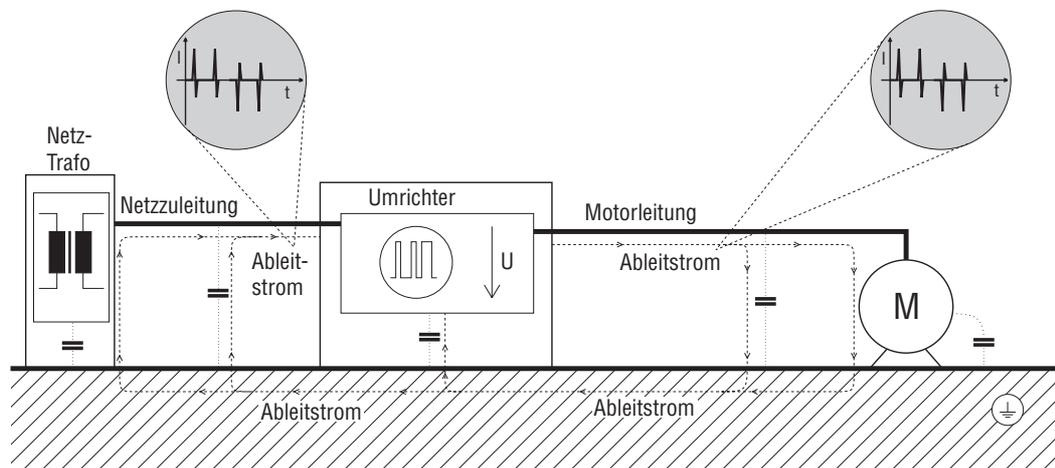
Ferritkerne wirken für hohe Frequenzen wie die Serienschaltung einer Induktivität und eines Widerstandes. Zusammen mit der Leitungskapazität bildet der Ferritkern einen Tiefpaßfilter, mit dem die Flanken der Ausgangsspannung verschliffen werden. Es ist damit bei geeigneter Auslegung möglich, die existierenden Abstrahlungsgrenzwerte zu erfüllen. Auch das Störpotential der Ausgangsleitung wird dadurch deutlich verringert.

Denselben Effekt hat ein sogenanntes Flankenbrecher-Filter; dort sind schon kleine Kondensatoren eingebaut.

Ausgangsfilter (Sinusfilter)

Ein Sinusfilter erzeugt aus der getakteten Ausgangsspannung eine annähernd sinusförmige Ausgangsspannung. Bei geeignetem Filteraufbau wird der Störpegel auf der Leitung und damit auch die Abstrahlung sehr stark verringert.

2.5.2 Ableitstrom



00772ADE

Bild 38: Umrichter mit Ausgangsleitungen und Motor

Wie in Kap. 2.1 dargestellt, besitzt jede Leitung eine Parasitärkapazität. Über diese Kapazität fließen, verursacht durch die getaktete Ausgangsspannung, hochfrequente Ströme gegen Erde ab, sogenannte Ableitströme. Diese Ströme können in Form von kurzen, spitzen Nadelimpulsen gemessen werden.

In einer Anlage mit ungenügendem, nicht HF-gerechtem Potentialausgleich können diese Ableitstromspitzen Potentialsprünge hervorrufen, die zu Störungen führen. Die Ableitströme verursachen außerdem hochfrequente Magnetfelder, die in Leiterschleifen Störspannungen induzieren können.

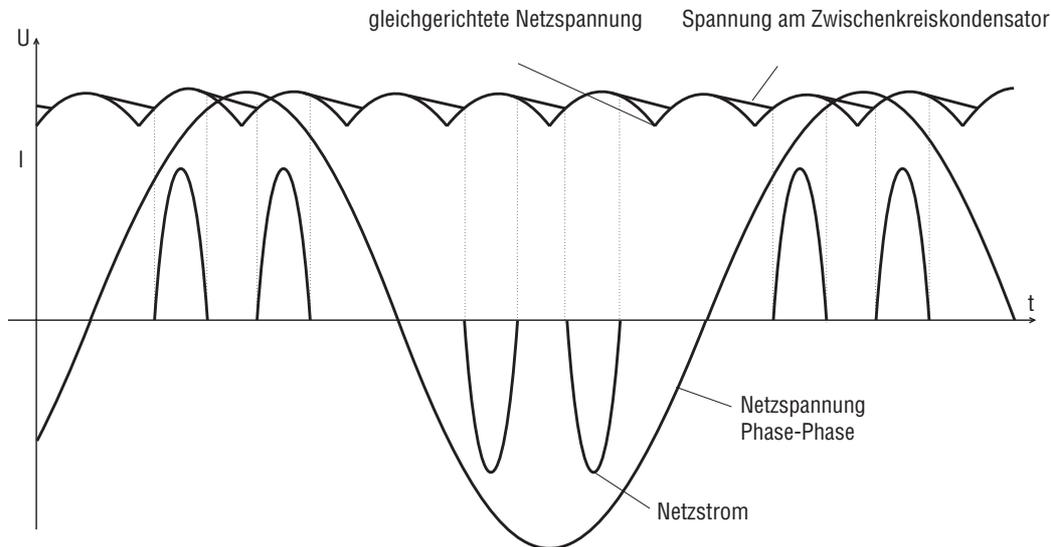
Die Parasitärkapazität einer Leitung wird durch Schirmung deutlich (typisch Faktor 2–3) erhöht. Es kann daher in ungünstigen Fällen durch Schirmung der Ausgangsleitungen zu Störungen kommen, da durch eine Erhöhung der Parasitärkapazität die Ableitströme zunehmen und einen größeren HF-Anteil bekommen. In solchen Fällen müssen Ausgangsfilter oder Ferritkerne anstatt geschirmter Leitungen zur Entstörung verwendet werden.

Das wichtigste Entstörmittel gegen die Auswirkungen von hochfrequenten Ableitströmen ist ein hochfrequenzgerechtes Erdungskonzept in Schaltschrank und Anlage.

Bei Umrichtern liegt der Ableitstrom üblicherweise über 3,5 mA. Dies stellt besondere Ansprüche an die Erdung (→ Kap. 3.3).

2.5.3 Netzstromharmonische

Bild 35 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Umrichters. Im Netzeingang arbeitet ein Gleichrichter auf einen Zwischenkreiskondensator zur Energiepufferung. Diese Anordnung kann nur dann vom Netz nachgeladen werden, wenn der Momentanwert der Netzspannung über dem Momentanwert der Zwischenkreisspannung liegt (Bild 39).



00773ADE

Bild 39: Spannungen und Ströme im Umrichter

Der Netzstrom ist nicht sinusförmig, er enthält hochfrequente Harmonische, die zu einer Verzerrung der Netzspannung führen. Wie in Kap. 2.3.1 ausgeführt, hat dies erhöhte Verluste und Funktionseinschränkungen zur Folge. Die Netzharmonischen verursachen außerdem einen im Vergleich zum Ausgangsstrom deutlich höheren Netzstrom. Tabelle 4 zeigt den typischen Anteil von Harmonischen im Netzstrom verschiedener Frequenzumrichter bei Vollast.

Harmonische	herkömmliches Gerät	herkömmliches Gerät mit Netzdrossel	modernes Gerät mit „schlankem“ Zwischenkreis (z. B. MOVITRAC® 31)
5.	86 %	42 %	25 %
7.	72 %	17 %	13 %
11.	42 %	8 %	9 %
Ausgangsstrom	7,3 A	7,3 A	7,3 A
Netzstrom	9,4 A	6,9 A	6,7 A

Tabelle 4: Anteil der Netzharmonischen bezogen auf die Grundwelle bei verschiedenen 3 kW-Umrichtern

Die Werte moderner Umrichter mit „schlankem“ Zwischenkreis liegen nahe dem theoretischen Wert, der mit Netzgleichrichtung erreicht werden kann; auch mit einer Netzdrossel kann hier keine weitere Verbesserung erreicht werden.

Bessere Werte sind nur noch durch Verwendung eines Trenntransformators oder durch eine sehr aufwendige Eingangsbeschaltung mit sinusförmiger Netzstromentnahme zu erreichen.

Durch eine Kompensationsanlage kann der Oberwellengehalt verringert werden. Kompensationsanlagen-Hersteller empfehlen ab einem Umrichter-Anteil von ca. 20 – 25 % der Gesamtanschlußleistung verdrosselte Kompensationsanlagen, um der Gefahr von Netzresonanzen zu begegnen.

3 EMV-Planung

Die heute erforderliche CE-Kennzeichnung von elektrischen Geräten und Maschinen bezieht sich auf verschiedene EG-Richtlinien. Dies sind je nach Produktart:

- Niederspannungs-Richtlinie 73/23/EWG (betrifft die elektrische Sicherheit)
 - Betrifft im wesentlichen alle elektrischen Betriebsmittel.
- Maschinenrichtlinie 89/392/EWG (betrifft die Sicherheit zur Unfallverhütung)
 - Betrifft alle Maschinen und Anlagen mit bewegten Teilen.
- EMV-Richtlinie 89/336/EWG
 - Betrifft alle elektrischen Geräte, jedoch nicht Komponenten, die nicht allgemein erhältlich sind.

Die Konformitäts-Erklärung zur CE-Kennzeichnung für nicht gebrauchsfertige Geräte¹ muß nicht zwingend auch die EMV-Richtlinie einschließen. Dies ist in aller Regel auch gar nicht möglich, weil die Sicherstellung EMV-gerechten Einsatzes nicht nur geeignete Komponenten, sondern auch deren fachgerechte Montage und Verdrahtung erfordert.

Wie wichtig eine EMV-Planung für Maschinen und Anlagen ist, zeigen folgende Erfahrungen aus der Praxis:

- kostengünstiger Anlagenbau durch Vermeidung von nachträglichen kostspieligen EMV-Maßnahmen
- kurze Inbetriebnahmezeit durch Vermeidung von Störungssuchen
- sicherer Betrieb durch Vermeidung von Maschinen- und Anlagenstörungen
- höhere Lebensdauer der elektrischen Ausrüstteile durch Schutz vor schädlichen EMV-Einflüssen

Die EMV-Planung hat die Verhältnisse am Aufstellort zu berücksichtigen. Damit wird der EMV-Aufwand auf das notwendige Maß begrenzt. Der Besteller oder der spätere Betreiber der Anlage muß deshalb Informationen liefern, die es dem Anlagenplaner ermöglichen, gemäß EMV-Umgebung die richtigen EMV-Maßnahmen zu treffen (→ Kap. 3.1). Auch muß er dem Planer Informationen über bestehende Netzverhältnisse und die Netzqualität liefern, weil diese ebenfalls Einfluß auf die EMV-Planung haben (→ Kap. 3.2).

1 Die neue EMV-Produktnorm (Entwurf 11.95) für elektrische Antriebe spricht von sog. „eingeschränkter Erhältlichkeit“, d. h. sie meint einen Vertriebsweg, bei dem das Inverkehrbringen auf Händler, Kunden oder Anwender beschränkt ist, die über EMV-Sachverstand verfügen.

3.1 Einfluß des Standortes der Anlage

Die EMV-Normen (→ Kap. 5) definieren für verschiedene „Umgebungen“ verschiedene EMV-Anforderungen in Form von Grenzwerten. Unter Umgebung wird die typische Standortsituation unter dem Aspekt der EMV verstanden. Folgende grundsätzlichen Anforderungen werden damit an elektrische Ausrüstungen gestellt:

Umgebung	Störfestigkeit	Störaussendung	Erläuterung
Gewerbe- und Wohnbereiche = „Erste Umgebung“ gem. EMV-Norm	Relativ geringe Anforderungen gegen elektromagnetische Störungen	Hohe Anforderungen, d. h. selbst bestmöglich entstört Grenzwert Kl. B	Rundfunk-, Fernsehempfangs- und Telekommunikationseinrichtungen sowie Datenverarbeitungsanlagen bestimmen diese Bereiche maßgeblich. Sie sind vor unzulässigen elektromagnetischen Störungen zu schützen, d. h. elektrische Ausrüstungen müssen einen hohen Entstörgrad aufweisen.
Industriebereiche = „Zweite Umgebung“ gem. EMV-Norm	Hohe Anforderungen gegen elektromagnetische Störungen	Relativ geringe Anforderungen, d. h. selbst nur grundentstört Grenzwert Kl. A	Der Standort selbst ist elektromagnetisch relativ hoch belastet. Erfahrungen zeigen, daß ein elektrisches Gerät für niedrige Anforderungen gegen elektromagnetische Störungen durch zusätzliche Maßnahmen nur sehr schwer für hohe elektromagnetische Belastungen aufrüstbar ist. Die notwendige Störfestigkeit muß schon bei der Konstruktion des elektrischen Gerätes erreicht werden.
Industriebereiche Anlagen, die am Betriebsstandort zusammengesetzt werden (siehe EMV-Gesetz § 5 Abs. 5)	Hohe Anforderungen gegen elektromagnetische Störungen	keine Anforderungen vorgeschrieben	Es gelten keine Grenzwerte, die Schutzziele müssen aber eingehalten werden. Es gilt die Vermutung, daß bei fachkundiger Installation unter Beachtung der Herstellerhinweise die EMV-Schutzziele eingehalten werden. In seltenen Fällen kann es sein, daß bei Streitfällen um beeinflusste Geräte außerhalb der Anlagengrenzen Filtermaßnahmen nachgerüstet werden müssen.

Tabelle 5: Anforderungen an die Umgebung

Die unterschiedlichen Anforderungen an die verschiedenen Umgebungen verlangen standortbezogene Maßnahmen. Hersteller und Lieferanten von elektrischen Komponenten müssen die Produkteigenschaften auf die jeweilige Umgebung einstellen. Dies wird erreicht, indem elektrische Komponenten mindestens Eigenschaften gemäß „zweiter Umgebung“ (Industriebereiche) besitzen, d. h. sie haben eine hohe Störfestigkeit, sind selbst jedoch nur grundentstört. Für den Einsatz in „erster Umgebung“ (Gewerbe-/Wohnbereich) kann man mit selektiven Zusatzmaßnahmen die Störaussendung durch Zusätze (Netzfilter, EMV-Module, geschirmte Leitungen) weiter verringern.

EMV-Planung am Beispiel Frequenzumrichter MOVITRAC® 31C:

Störfestigkeitsanforderungen		
Einsatzbereich	Maßnahmen	Relevante Norm
Geräte, die nur zum Anschluß an das öffentliche Niederspannungsnetz in Wohngebieten vorgesehen sind.	Keine weiteren Komponenten / Geräte notwendig. Verdrahtungs-/Installationsvorschrift beachten.	EN 50 082-1
Geräte, die vorgesehen sind zum Gebrauch in industrieller Umgebung .	Keine weiteren Komponenten / Geräte notwendig. Verdrahtungs-/Installationsvorschrift beachten.	EN 50 082-2
Störaussendungsanforderungen		
Einsatzbereich	Maßnahmen	Relevante Norm
Geräte, die an ein öffentliches Niederspannungsnetz angeschlossen sind, welches auch Haushaltsgebäude versorgt .	EMV-Modul EF... oder Netzfilter NF... + Ausgangsdrossel HD... oder Netzfilter NF... + Ausgangsfilter HF... oder statt Ausgangsfilter HF... Motorkabelschirmung	EN 50 081-1
Anlagen, die an ein industrielles Niederspannungsnetz angeschlossen sind und am Betriebsort zusammengesetzt werden.	Keine weiteren Komponenten / Geräte notwendig. Verdrahtungs-/Installationsvorschrift beachten.	EMV-Gesetz
Geräte, die an ein industrielles Niederspannungsnetz angeschlossen sind oder an öffentlichen Netzen, die keine Haushalte versorgen und nicht am Betriebsort zusammengesetzt werden.	EMV-Modul EF... oder Netzfilter NF... + Ausgangsdrossel HD... oder Netzfilter NF... + Ausgangsfilter HF... oder statt Ausgangsfilter HF... Motorkabelschirmung	EN 50 081-2

Tabelle 6: EMV-Planung für MOVITRAC® 31C

3.2 Netzqualität

Folgende Störungen beeinflussen die Netzqualität:

Art	Ursachen
Spannungsschwankungen	Netztransformatoren mit fehlenden Leistungsreserven. Lange Versorgungsleitungen (z. T. mit zu knappem Leiterquerschnitt), an denen stark wechselnde Lasten betrieben werden. Notstromaggregate.
Frequenzschwankungen	Tritt nur in „Inselnetzen“, d. h. bei Netzen ohne Kopplung an das öffentliche Stromversorgungsnetz auf. Die Belastung des Generators erzeugt einen Drehzahlabfall = Frequenzeinbruch.
Spannungseinbrüche / Flicker	Netzbereiche, an denen Verbraucher mit sehr hohen Einschalt- oder Anlaufströmen betrieben werden, z. T. in Kombination mit langen Versorgungsleitungen. Netztransformatoren mit fehlenden Leistungsreserven.
transiente Überspannungen	Erzeugung durch Schalten von induktiven Verbrauchern (z. B. Widerstandsschweißen). Nicht abgestimmte / defekte Kompensationsanlagen (Entladewiderstände der Kondensatoren). Atmosphärische Überspannung (Blitzeinschlag).
Oberschwingungsanteil (Harmonische) der Netzspannung	Verbraucher mit nicht sinusförmiger Stromaufnahme: Geräte mit Gleichrichter-Schaltungen und Kondensatorlast, z. B.: Geräte, die mit Phasenanschnitt arbeiten (Stromrichter für Gleichstromantriebe, Sanftanlaufgeräte, Drehstromsteller, Dimmer, Wechselstromsteller). Umrichter / Geräte mit Schaltnetzteilen (PCs, Fernseher...) Sie erzeugen durch Stromverzerrung über den Netzimpedanzen Netzspannungs-Oberschwingungen (Harmonische). Deren Frequenz ist ein ganzzahliges Vielfaches der Netzfrequenz. Die wesentlichen Anteile sind meistens alle ungeradzahlig Harmonischen bis ca. zur 15. Harmonische belasten Netzleitungen, Sicherungen und Transformator. Sie können Netzresonanzen verursachen und zu Funktionsstörungen anderer Verbraucher führen.

Tabelle 7: Kriterien für Netzqualität

Planungs-Hinweise:

Spannungs- und Frequenzschwankungen können durch Anpassung der Netzleistung an den tatsächlichen Bedarf in verträgliche Grenzen gebracht werden, d. h. durch einen größeren Versorgungstransformator; ggf. in Verbindung mit sorgfältig projektierten Versorgungsleitungen.

Spannungseinbrüche sind in ihrer Entstehung weitgehend unvermeidbar, ihre Auswirkungen können aber begrenzt werden. Verbraucher mit sehr hohen Einschalt- oder Anlaufströmen können entkoppelt betrieben werden (separate Versorgungsleitung oder separater Versorgungstransformator).

Transiente Überspannungen sind in ihrer Entstehung ebenfalls unvermeidbar. Ihnen muß durch die Installation eines Überspannungsschutzes begegnet werden. Derartige Schutzeinrichtungen bestehen aus Varistoren und Gasableitern, z. T. in Kombination. Sie werden auf der Niederspannungsseite vor den zu schützenden elektrischen Komponenten installiert. Eigene Sicherungen mit Meldekontakt sorgen dafür, daß ein eingetretener Defekt sofort erkannt wird.

Netzüberschwingungen (Netzharmonische) können in ihrer Entstehung begrenzt oder reduziert werden. Geräten mit hoher Netzstromverzerrung werden Netzdrosseln vorgeschaltet. Diese „glätten“ den Eingangsstrom, machen ihn nahezu sinusförmig und reduzieren damit die Oberschwingungen. Außerdem haben Netzdrosseln durch ihre Impedanz entkoppelnde Wirkung und verbessern den Überspannungsschutz von Geräten durch Begrenzung der Stromanstiegsgeschwindigkeit.

Heute sind Meßgeräte verfügbar, mit denen der Oberschwingungsanteil der am Netz betriebenen Verbraucher selektiv und summarisch einfach ermittelt werden kann.

Damit sind dann auch gezielte Gegenmaßnahmen planbar:

- Verbrauchern mit hoher Oberschwingungs-Rückwirkung Netzdrosseln ($u_K \geq 4\%$) vorschalten
- Kompensationsanlagen verdrosseln (mit Kompensationsanlagen-Hersteller absprechen)
- Saugkreisschaltung im Niederspannungsnetz installieren (Kurzschluß für Harmonische)

3.3 Schaltschrank-Planung

Der Stahlblech-Schaltschrank ist aus EMV-Sicht eine gute Lösung, weil er gegenüber anderen gebräuchlichen Werkstoffen (Edelstahl, Aluminium, Kunststoff) auch Eigenschaften zur magnetischen Abschirmung besitzt. Kunststoff-Schaltschränke sind aus EMV-Sicht ungünstig, außerdem führen sie die im Innern erzeugte Verlustleistung über ihre Oberfläche schlecht ab.

Der Schaltschrank-Montageplatte ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Sie dient neben der Befestigung der Einbauten auch der flächigen Erdung von Einbaugeräten mit Metallgehäusen. Verzinkte Stahlplatten sind dafür am besten geeignet.

Ungünstig sind:

- Lackierte Montageplatten: der Lack unter den Einbaustellen muß sorgfältig entfernt werden, danach ist der Korrosionsschutz nicht mehr gewährleistet.
- Blanke Aluminium-Montageplatten: blankes Aluminium überzieht sich mit einer Oxydschicht, welche einen hohen Widerstand hat.
- Eloxierte Aluminium-Montageplatten: die aufgebraute Schicht hat einen hohen Widerstand und läßt sich schwer entfernen.

Die Montageplatte muß flächigen Kontakt mit dem Schaltschrank haben. Dieser wiederum muß guten leitenden Kontakt mit der Maschinen-/Hallenkonstruktion haben.

Die PE-Schiene ist der zentrale Anschlußpunkt für die PE-Leiter jedes einzelnen Gerätes im Schaltschrank (sternförmige Erdung). Der PE-Anschluß ersetzt keine HF-Erdung und keine Schirmung, er ist aus sicherheitstechnischen Gründen vorgeschrieben für die Schutzerdung.

Anordnung der Geräte im Schaltschrank

- EMV-Komponenten (Netzfilter / Ausgangsfilter / EMV-Filter für Ein- und Ausgang) müssen so dicht wie möglich am zugehörigen Gerät platziert werden, damit die Leitungen zwischen EMV-Komponente und Gerät kurz bleiben (max. Abstand: 50 cm). Notwendige Lüftungsfreiräume der Geräte sind zu beachten.
- Geräte mit umfangreichem Signalaustausch nah beieinander anordnen, damit lange Leitungswegen vermieden werden: Je kürzer die Verbindung, desto weniger können die Signale gestört werden.
- Koppelrelais sind in die Nähe des Signal-Einganges zu setzen. Dieser ist hochimpedant, also stöempfindlicher als der Signal-Ausgang.
- Trennung von Leitungen mit hohem Störpotential von Kleinspannungs-Signalleitungen durch Verlegung in getrennten Kabelkanälen. Ein Abstand von 20 cm ist in den meisten Fällen ausreichend. Leitungen mit hohem Störpotential sind z. B. ungeschirmte Leitungen am Umrichter-Ausgang und Bremschopperausgang, Schütz-Steuerleitungen; Leitungen von Magnetventilen und elektromagnetischen Bremsen.
- Geschirmte Leitungen nicht über Schaltschrank-Klemmen, sondern direkt zum Gerät führen. Das Schirmgeflecht dieser Leitungen ist direkt am Gerätegehäuse oder unterhalb des Gehäuses an der Schaltschrank-Montageplatte mit einer Metall-Kabelschelle zu erden. Eine Verlängerung des Schirms durch angelötete Drähte ist unzulässig.
- Ergänzender Hinweis (kein Hinweis aus EMV-Sicht): Wärmeempfindliche Geräte nicht in den obersten Bereich des Schaltschrankraumes platzieren. In einem 200 cm hohen Schaltschrank kann sich bei ungünstigen Lüftungsbedingungen ein Temperaturgefälle $> 30\text{ K}$ zwischen unten und oben ergeben.

Sinnvoll ist eine Einteilung der Komponenten nach der Art der verarbeiteten Signale. Hier wird eine Einteilung in 4 Gruppen vorgenommen (→ Kap. 4.2 Verkabelung):

Gruppe I (sehr empfindlich):

- Analog-Sensoren (mit Auflösung im mV-Bereich)
- Meßleitungen (Sonden, Meßempfänger etc.)
- kapazitive Näherungsschalter

Gruppe II (empfindlich):

- Kleinsignal-Leitungen (Feldbusse etc.)
- Kleinsignal-Schaltleitungen (Binärein- und -ausgänge etc.)
- Kleinsignal-Versorgungen (10 V, 24 V etc.)

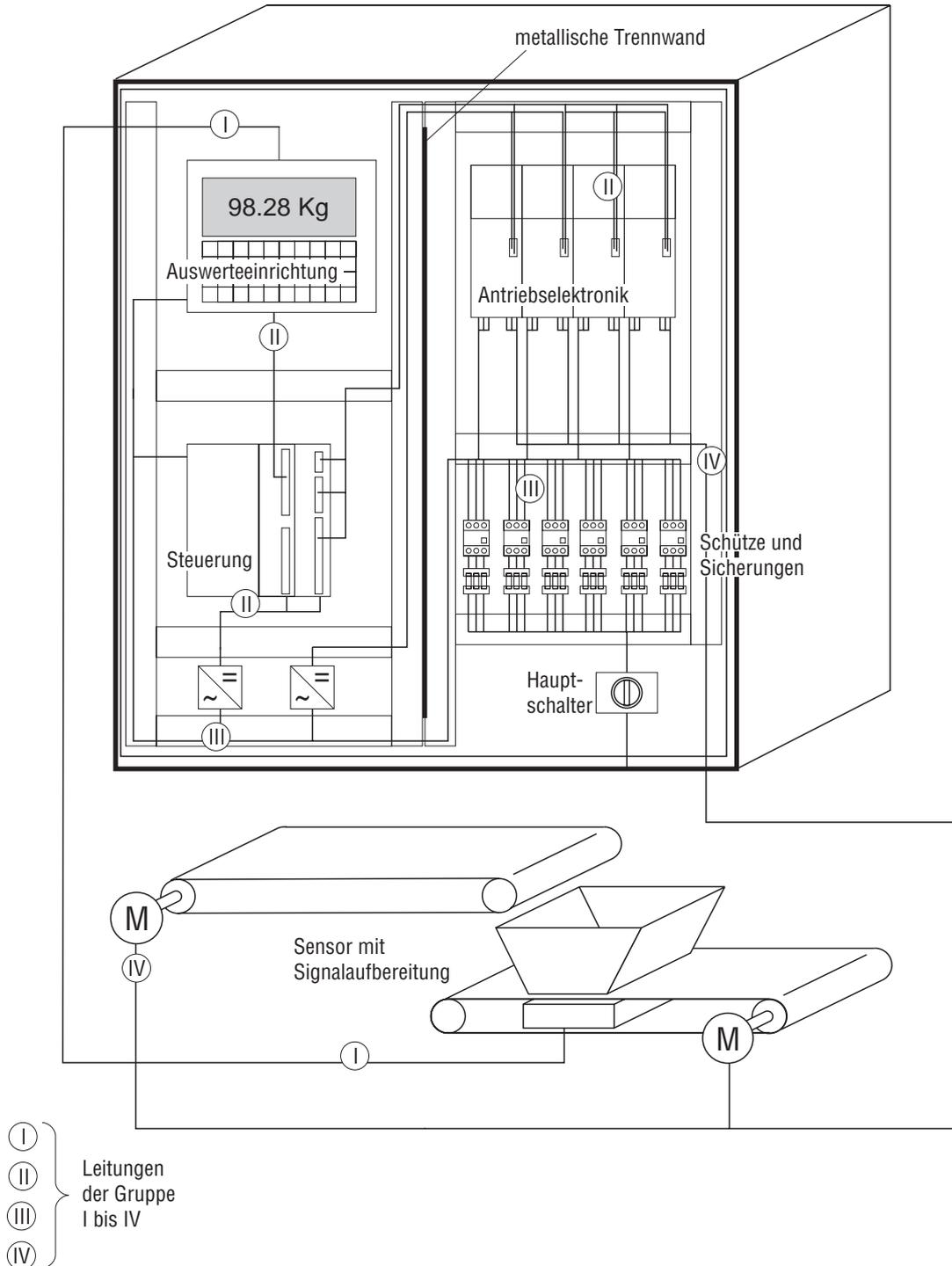
Gruppe III (Störer):

- Steuerleitungen für induktive Last (Bremsen, Schütze, Relais etc.)
- entstörte Leistungsleitungen (z. B. gefilterte Umrichter-Ausgangsleitung)
- Netzleitungen (nicht geschaltet)

Gruppe IV (starke Störer):

- Zuleitungen zu Schweißanlagen
- Leistungskreise
- geschaltete Leistungsleitungen (Umrichter, elektronische Drehzahlsteller etc.)

Geräte verschiedener Gruppen müssen in verschiedene Schaltschrankfelder installiert werden. Geräte der Gruppen I und II und der Gruppen III und IV sollten in getrennten Schaltschränken untergebracht werden. Ist dies nicht möglich, so müssen die Felder durch eine rundum kontaktierte Blechwand getrennt werden (→ Kap. 4.5).



00778ADE

Bild 40: Beispiel für Leitungsführung im Schaltschrank

3.4 Komponentenplanung

Die Auswahl der Komponenten bestimmt die erreichbare Störsicherheit der Anlage. Wesentliches Kriterium für die Auswahl ist der Standort der Anlage. Die Komponenten müssen den geltenden Mindestanforderungen gemäß Tabelle 6, Seite 38 (Beispiel MC 31C) oder der entsprechenden Produktnorm genügen.

Beim Einsatz der Komponenten sind die Installationsvorschriften der Hersteller in Bezug auf EMV zu beachten. Diese betreffen im allgemeinen die Art der zu verwendenden Leitungen (geschirmt / ungeschirmt, paarweise verdrillt etc.), die Erdung der Geräte sowie eventuell notwendige Filter.

Bei der Planung müssen auch folgende Komponenten berücksichtigt werden:

- Beleuchtung (Leuchtstoffröhren z. B. haben ein hohes Störpotential)
- Schütze und Relais in der Nähe von Geräten der Gruppen I und II müssen entstört werden
- Teile, die dem Potentialausgleich dienen, müssen HF-gerecht verbunden werden (→ Kap. 4.1)
- Netzteile (nicht entstörte Schaltnetzteile z. B. haben ein hohes Störpotential)

3.4.1 Leitungs-Kategorien

Die ausgewählten Leitungen müssen primär den durch die Betriebsbedingungen gestellten Anforderungen genügen (Querschnitt, Spannungsfestigkeit, Umweltbedingungen etc.). Die Ausführung (mit / ohne Schirm, verdrillt) sollte gemäß der Tabellen in Kap. 4.2.1 erfolgen.

Werden geschirmte Leitungen über große Distanzen verlegt, so kann die Schirmwirkung verbessert werden, indem der Schirm in praktikablen Abständen mit einer Kabelschelle großflächig geerdet wird. Die Wirkung eines Schirmes läßt mit der Länge nach. Gemeinsame Kabel für Leitungen verschiedener Gruppen müssen vermieden werden, weil aufgrund des sehr kurzen Abstandes der Leitungen zueinander die gegenseitige Beeinflussung sehr groß ist.

3.4.2 Signalübertragung

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Planung einer Anlage ist die Signalübertragung. Dies gilt sowohl für Steuer- als auch für Meßleitungen. Die Tabelle in Kap. 4.4 gibt einen Überblick über gebräuchliche Übertragungsverfahren.

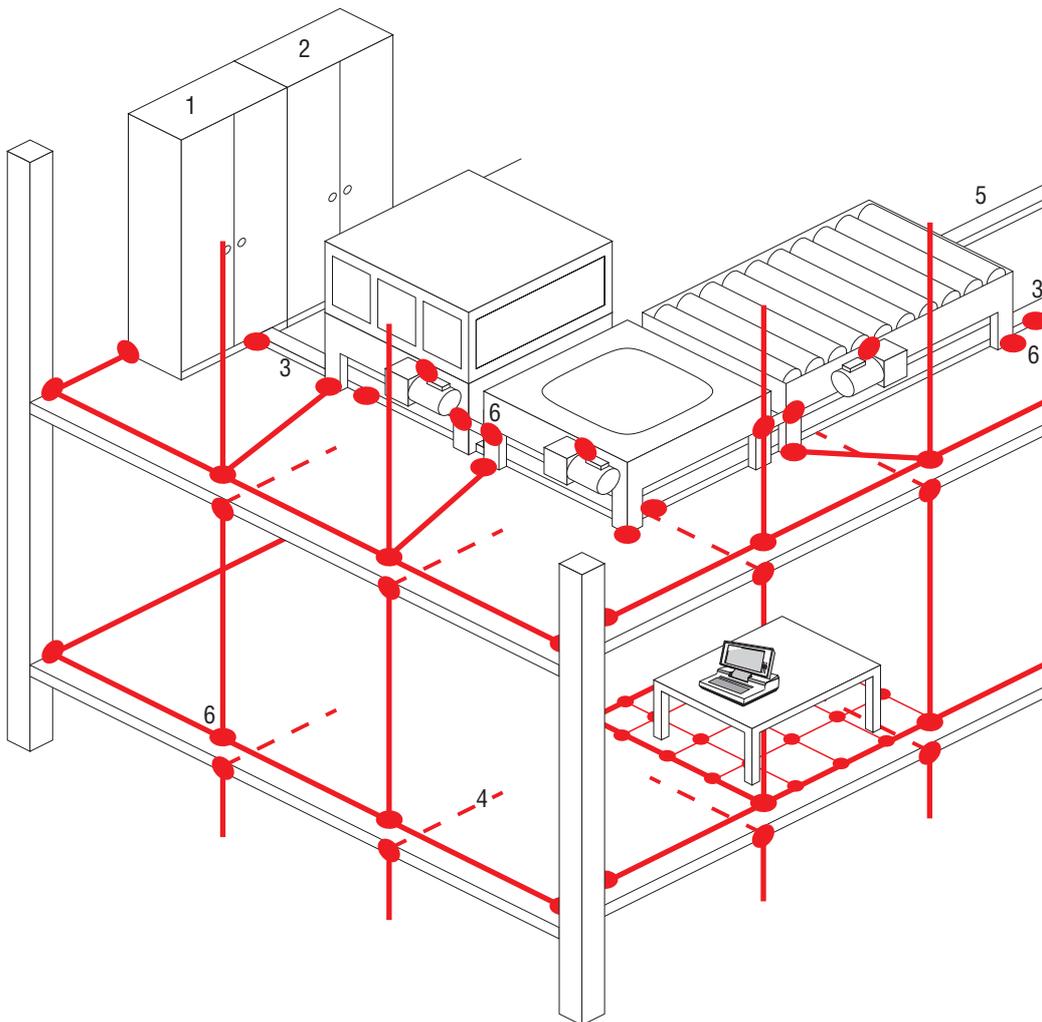
Kleine Meßsignale sollten direkt am Sensor verstärkt und aufbereitet und erst danach zur eigentlichen Auswertung übertragen werden. Schwache Analogsignale dürfen nicht über große Längen transportiert werden. Solche Signale können nur mit großem Aufwand vor Störeinflüssen geschützt werden.

Eine potentialbehaftete, unsymmetrische Signalübertragung (z. B. RS-232) eignet sich in einer Industrieumgebung nur zu Diagnose- und Wartungszwecken sowie zur Kommunikation auf kurzen Strecken. Sie darf nicht zu Steuerungszwecken über große Entfernungen verwendet werden.

4 EMV-Maßnahmen

4.1 Erdung

Die Erdung spielt eine besonders wichtige Rolle für das störungsfreie Funktionieren einer Anlage. Von zentraler Bedeutung bei einer Anlage ist, daß ihre Komponenten sowohl im NF- als auch im HF-Bereich denselben Erdbezug haben. Deshalb muß schon bei der Planung einer Anlage auch die HF-gerechte Erdung berücksichtigt werden. Alle Komponenten der Anlage müssen niederohmig geerdet werden (sowohl für Niederfrequenz (NF) als auch für Hochfrequenz (HF)). Deshalb muß in der Anlage ein Erdungsnetz existieren, das auch für hohe Frequenzen ein einheitliches Bezugspotential zur Verfügung stellt. Bild 41 zeigt ein Beispiel für solch ein Erdungsnetz.



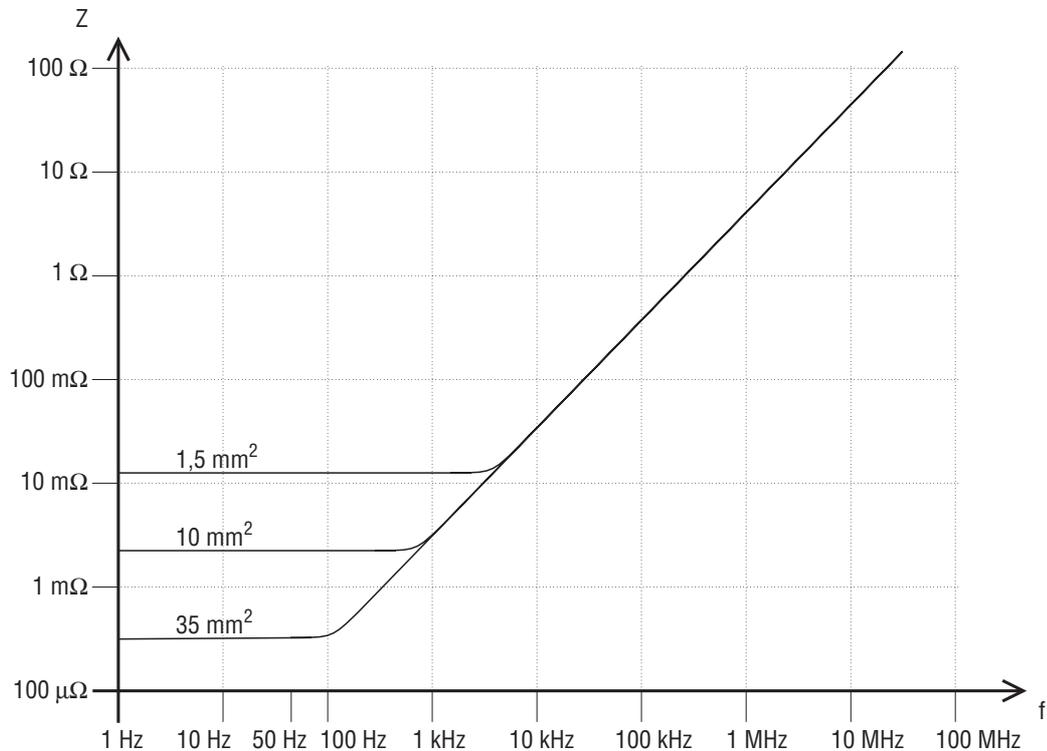
00711BXX

Bild 41: Erdungsnetz in einer Anlage in einem Gebäude

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1 Schaltschrank Leistungsteil | 4 verschweißte Eisenarmierung |
| 2 Schaltschrank Kleinspannungen | 5 Kabelkanal Kleinspannungen |
| 3 Kabelkanal Leistungskomponenten | 6 Erdverbindungen |

Für die meisten elektromagnetischen Störmechanismen stellt der Schutzleiter eine sehr hohe HF-Impedanz dar. Erdleitungen haben nur einen Nutzen, wenn sie vermascht werden.

Bild 42 zeigt die Impedanz einer Kupferleitung in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Leitung stellt für Hochfrequenz unabhängig vom Querschnitt eine hohe Impedanz dar. Sie ist daher auch zur HF-gerechten Erdung von Schirmen ungeeignet.



00281AXX

Bild 42: Impedanz Z eines Kupferleiters von 1 m Länge in Abhängigkeit von der Frequenz f

Es ist sicherzustellen, daß überall in der Anlage sowohl für NF als auch für HF der gleiche Erdbezug zur Verfügung steht. Es ist wichtig, die Komponenten niederohmig an dieses Netz anzubinden.



00727AXX

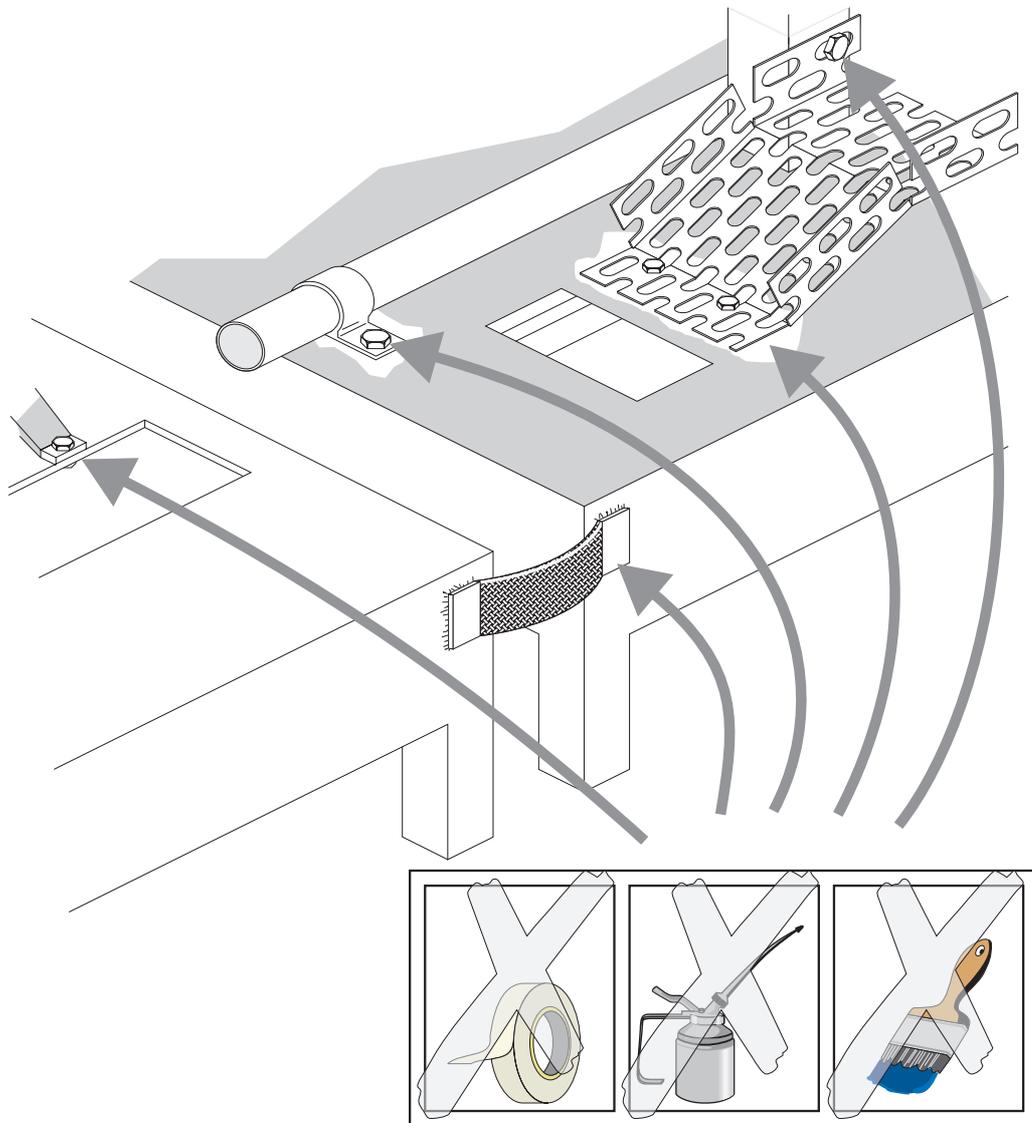
Bild 43: Erdverbindungen: A – Blech / B – HF-Litze

Bild 43 zeigt Erdverbindungen, die auch für Hochfrequenz eine niederohmige Verbindung darstellen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, einen niederohmigen Massebezug sicherzustellen:

- eine breitflächige Verbindung ($1:3 < X:Y < 3:1$, siehe Bild 43), die an beiden Enden flächig mit dem Bezugspotential verbunden ist
- eine Verbindung aus vielen einzelnen, gegeneinander isolierten Einzelleitern (Erdungslitze)
- eine geschirmte Leitung: der Schirm stellt für HF eine sehr niederohmige Verbindung dar

Alle diese Möglichkeiten haben eine sehr geringe Induktivität und damit einen sehr geringen Hochfrequenzwiderstand.

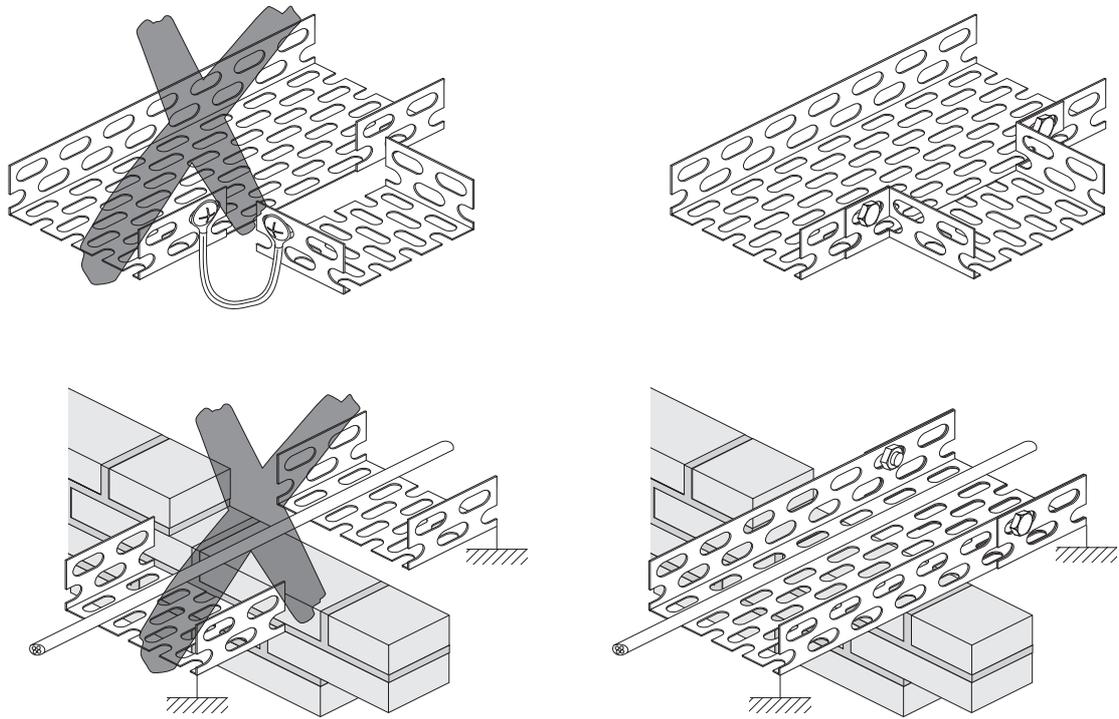
Einen wesentlichen Einfluß auf die Güte einer Erdverbindung hat deren Kontaktierung. Die Wirkung des besten Erdleiters kann durch eine nachlässige oder unzweckmäßige Kontaktierung zunichte gemacht werden. Bild 44 zeigt, was bei der Kontaktierung zu beachten ist.



00729AXX

Bild 44: Kontaktierung von Erdleitern

Bild 45 zeigt, was bei der Verbindung von Kabelkanälen zu beachten ist:



00730AXX

Bild 45: Verbindung von Kabelkanälen

4.2 Verkabelung

4.2.1 Leitungsgruppen und Leitungsauswahl

Die Verkabelung trägt einen wesentlichen Teil zur EMV einer Anlage bei. Für die folgenden Betrachtungen wurden die Leitungen in vier verschiedene Gruppen eingeteilt (→ Kap. 3.3):

Leistungsgruppe	Störer	Empfindlich	Beispiel
I (sehr empfindlich)	–	++	Leitungen für analoge Kleinsignale Meßleitungen (Sonden, Empfänger usw.)
II (empfindlich)	*	+	Leitungen für digitale Kleinsignale (z. B. Busleitungen) Schaltleitungen für Kleinsignale (24 V Binärschalter usw.) Versorgung von Kleinsignalen (10 V, 24 V usw.)
III (Störer)	+	*	Steuerleitungen für induktive Last (entstört) entstörte Leistungsleitungen (Schütze, Bremsen usw.) Netzleitungen (nicht geschaltet)
IV (starker Störer)	++	–	Zuleitung zu Schweißanlagen Leistungskreise elektronische Drehzahlsteller Ausgangsleitungen von Umrichtern

Tabelle 8: Einteilung der Leitungen in Gruppen

zutreffend nicht zutreffend
++ + ○ – --

Für die in Tabelle 8 definierten Leitungsgruppen werden folgende Leitungstypen empfohlen:

Leitungsgruppe	Eigenschaft	Einzelader	verdrillte Aderpaare	verdrillte Aderpaare, armiert	Schirm (Geflecht)	Schirm (Geflecht & Folie)
I	Sehr empfindlich	–	○	+	++	++
II	empfindlich	*	+	+	++ ¹⁾	++ ¹⁾
III	Störer	*	+	+	++ ¹⁾	++ ¹⁾
IV	starker Störer	--	–	*	+	++

¹⁾ Teuer, meist nicht notwendig

gut----- schlecht
++ + ○ – --

Tabelle 9: Zuordnung Leitungstypen zu Leitungsgruppen

Eignung der Leitungstypen nach EMV-Gesichtspunkten:

Leitung	0 – 50 Hz	HF < 5 MHz	HF > 5 MHz	Gleichtaktunterdrückung	Gegentaktunterdrückung	geeignet für	Anwendungsgebiet
Einzelader	*	– ¹⁾	--	--	--		nur bis 60 Hz
Aderpaar parallel	*	–	--				nur bis 60 Hz
verdrillte Aderpaare	+	+ bis 100 kHz	*	--	+	schwache Störer	wenig gestörte Industrieumgebung
verdrillte Aderpaare, armiert	+	+	*	+	++	schwache Störer	wenig gestörte Industrieumgebung, Signale unter 10 MHz
Folien-schirm	–	*	+			schwache Störer	gestörte Industrieumgebung, Signale unter 10 MHz
Schirmgeflecht	++	++	+			industrielle Störer	Industrieumgebung, Messen, Steuern, Regeln
Schirm (Geflecht & Folie)	++	++	++			starke Störer	sensible Leitungen in stark gestörter Umgebung

¹⁾ wenn Hinleiter und Rückleiter gemeinsam in kleinem Abstand verlegt sind

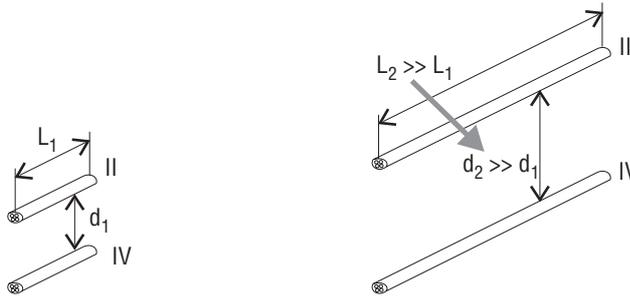
gut----- schlecht
++ + ○ – --

Tabelle 10: Eignung der Leitungstypen nach EMV-Gesichtspunkten

Die Störbeeinflussung von Leitungen verschiedener Leitungsgruppen kann durch eine gut geplante Verlegung stark vermindert werden. In vielen Fällen ist so der Betrieb mit ungeschirmten Leitungen möglich.

Auch durch Verdrillung kann die Störkopplung stark vermindert werden. Die Verdrillung ist um so effizienter, mit je mehr Schlägen pro Längeneinheit die Leitungen verdrillt werden.

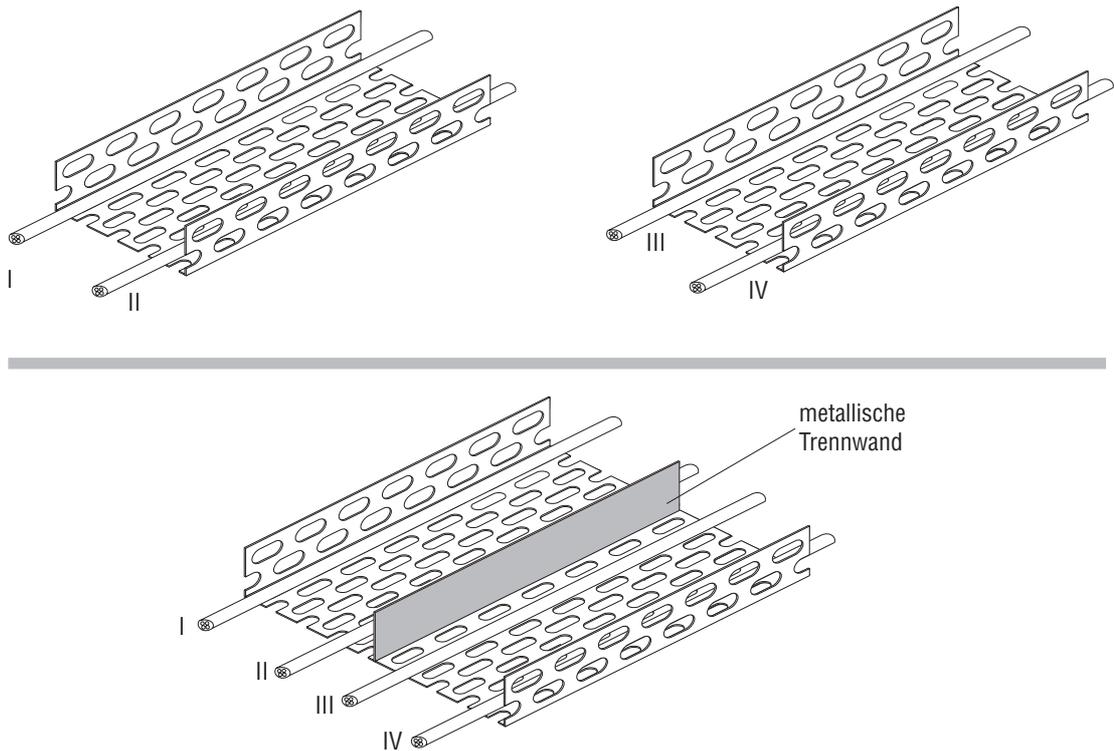
Für eine geringe Störkopplung muß der Abstand der Leitungen um so größer werden, je länger die Leitungen parallel laufen.



00750AXX

Bild 46: Abstand zwischen Leitungen unterschiedlicher Leitungsgruppen (hier II und IV)

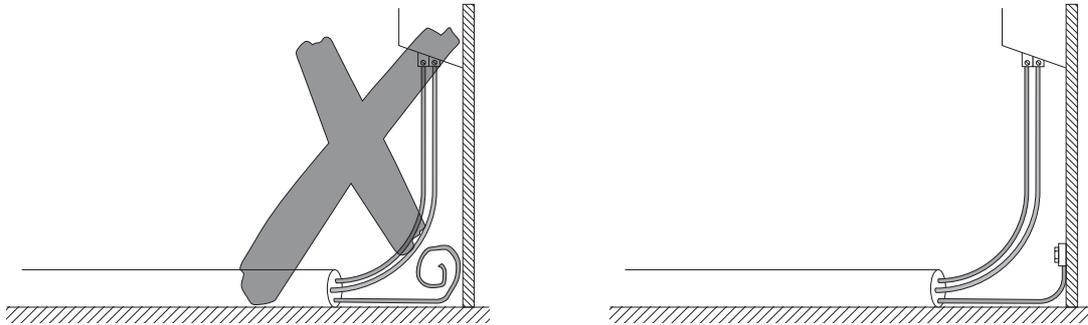
Leitungen der Gruppen I und II und der Gruppen III und IV auf größtmöglichen Abstand zu verlegen ist sehr effektiv. In vielen Fällen hat sich ein Abstand von 10 cm zwischen Leitungen der Gruppen I und II, 20 cm zwischen Leitungen der Gruppen II und III und ebenfalls 20 cm zwischen Leitungen der Gruppen III und IV bewährt. Bei größeren Leitungslängen und/oder besonderen Verhältnissen können jedoch größere Werte notwendig sein.



00751BXX

Bild 47: Verschiedene Lösungen zur Verlegung der Gruppen I, II, III und IV

Nicht benutzte Leiter müssen an beiden Enden geerdet werden. Bei Leitern der Gruppe I können von der Erdverbindung unter Umständen Brummstörungen ($NF \approx 50 \text{ Hz}$) auf das Nutzsignal gekoppelt werden.



00752AXX

Bild 48: Erdung nicht benutzter Leiter

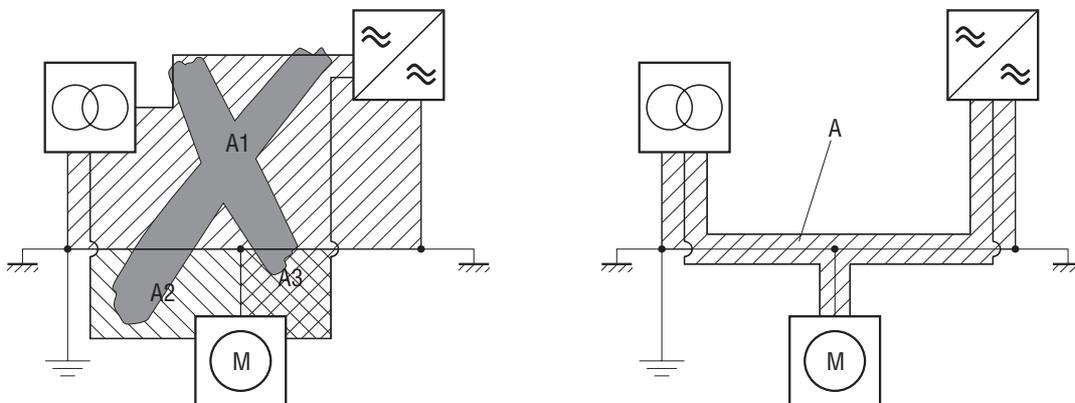
Leitungen der Gruppen I und II und der Gruppen III und IV immer rechtwinklig kreuzen.



00753AXX

Bild 49: Kreuzen von Leitungen unterschiedlicher Gruppen

Zwischen zwei Anlagenkomponenten muß eine durchgehende Massebezugsfläche existieren. Alle Leitungen müssen entlang der Massebezugsfläche geführt werden.

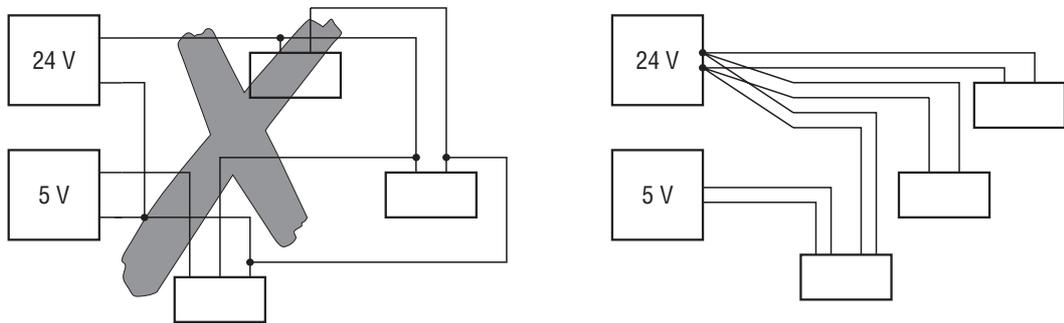


00706AXX

Bild 50: Führen der Leitungen entlang der Massebezugsfläche

$A / A1 / A2 / A3$ = Fläche der Erdschleifen

Hin- und Rückleiter müssen auf der gesamten Länge gemeinsam geführt werden. Jede Versorgungs-
spannungsleitung muß zusammen mit der dazugehörigen Masseleitung verlegt werden.

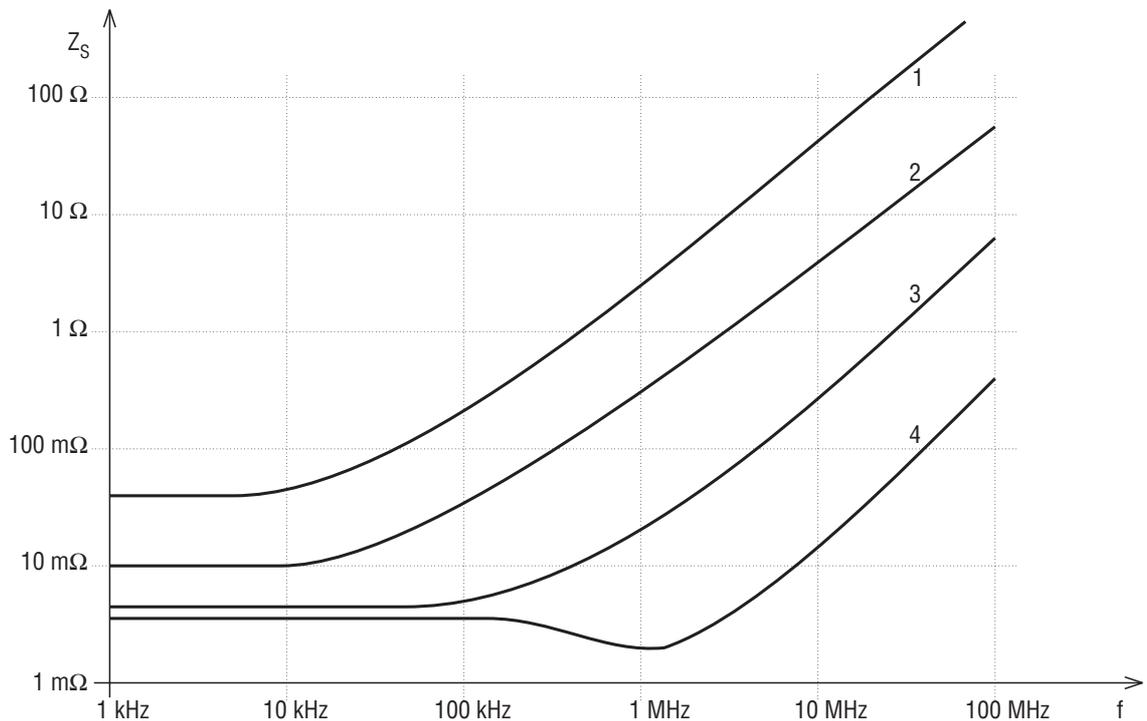


00710AXX

Bild 51: Hin- und Rückleiter zusammen führen

4.2.2 Schirmung

Die Störkopplung auf eine Leitung kann durch Verwendung von geschirmten Leitungen stark verringert werden (→ Kap. 2.4.2, 2.4.3, 2.4.4). Wesentlich für die Schirmdämpfung ist der Schirmanschluß. Bild 52 zeigt den Einfluß der Länge des Schirmanschlusses auf die Schirmimpedanz.



00754AXX

Bild 52: Schirmimpedanz Z_s in Abhängigkeit der Anschlußlänge und der Frequenz f

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1 Schirmanschlußlänge 1000 mm | 4 Schirm rundum kontaktiert
(konzentrische Verschraubung) |
| 2 Schirmanschlußlänge 50 mm | |
| 3 Schirmanschlußlänge 4 mm | |

Schirmanschlußlänge = Länge der am zusammengedrehten Schirmende angeschlossenen Leitung

Folgender Zusammenhang besteht zwischen der Schirmdämpfung und der Schirmimpedanz:

$$D = \frac{Z_I}{Z_S} \quad [F7]$$

- D = Schirmdämpfung; entspricht dem Faktor, um den eine Störung gegenüber einer ungeschirmten Leitung abgeschwächt wird
- Z_I = HF-Impedanz der Innenleiter
- Z_S = HF-Impedanz des Schirms

Anhand dreier Rechenbeispiele soll gezeigt werden, wie die Schirmdämpfung ein und desselben Kabels von dem Schirmanschluß abhängt. Die Rechnungen gelten für die betrachtete Leitung und können nicht verallgemeinert werden.

Rechenbeispiele für Schirmdämpfung

Beispiel 1: Schirmdämpfung mit rundum kontaktiertem Schirmanschluß bei 1 MHz

Annahme: $Z_I = 3 \Omega$ (Impedanz des Innenleiters bei 1 MHz)

$Z_S = 3 \text{ m}\Omega$ (Impedanz des Schirmes bei 1 MHz aus Bild 52)

$$D \approx \frac{Z_I}{Z_S} \approx 1000 \quad \text{Störsignale werden bei 1 MHz um Faktor 1000 gedämpft.}$$

Beispiel 2: Schirmdämpfung mit Schirmanschlußlänge 50 mm bei 1 MHz

Annahme: $Z_I = 3 \Omega$ (Impedanz des Innenleiters bei 1 MHz)

$Z_S = 0,3 \Omega$ (Impedanz des Schirmes bei 1 MHz aus Bild 52)

$$D \approx \frac{Z_I}{Z_S} \approx 10 \quad \text{Störsignale werden bei 1 MHz um Faktor 10 gedämpft.}$$

Beispiel 3: Schirmdämpfung mit Schirmanschlußlänge 1000 mm bei 1 MHz

Annahme: $Z_I = 3 \Omega$ (Impedanz des Innenleiters bei 1 MHz)

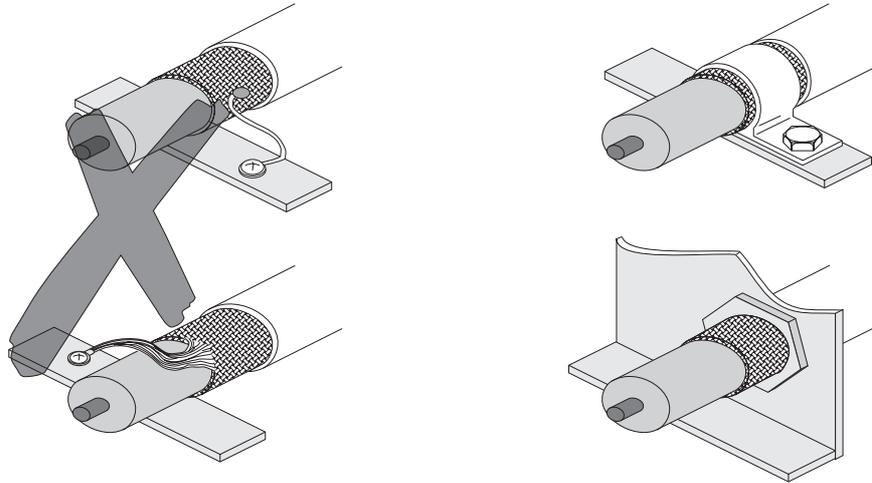
$Z_S = 3 \Omega$ (Impedanz des Schirmes bei 1 MHz aus Bild 52)

$$D \approx \frac{Z_I}{Z_S} \approx 1 \quad \text{Störsignale werden bei 1 MHz um Faktor 1, d. h. überhaupt nicht, gedämpft.}$$

Wie die Beispiele 1 – 3 zeigen, kann durch einen schlechten Schirmanschluß die Schirmwirkung erheblich verschlechtert oder sogar komplett zunichte gemacht werden.

In der Praxis können mit handelsüblichen geschirmten Leitungen breitbandig Schirmdämpfungsfaktoren von ca. 1000 erreicht werden.

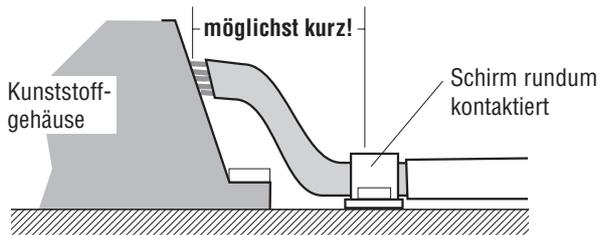
Wichtig für den Schirmanschluß ist die flächige Kontaktierung auf dem ganzen Umfang des Schirms. Der Schirm muß auf dem Gehäuse oder einer geerdeten Fläche (blankes Metall) aufgelegt werden. Bild 53 zeigt, wie dies ausgeführt werden kann.



00755AXX

Bild 53: Beispiele für Schirmanschluß mit Metallschelle, Metall-PG-Verschraubung

Schirmanschluß bei Kunststoffgehäusen:



Bei Kunststoffgehäusen wird der Schirm möglichst nah am Gehäuse aufgelegt. Er wird dann bis zur Klemme im oder am Gehäuse weitergeführt.

00816ADE

Bild 54: Schirmanschluß bei Kunststoffgehäusen

Bild 55 zeigt, wie die Verlegung in Kabelkanal (K) oder an Eckprofil (E) zur Verminderung der Abstrahlung benutzt werden können (S = Schirmeffekt).



00756AXX

Bild 55: Abstrahlungsverminderung

Die Schirmwirkung wird durch einen geschlossenen Kabelkanal verbessert.

4.2.3 Allgemeine Verkabelungsregeln

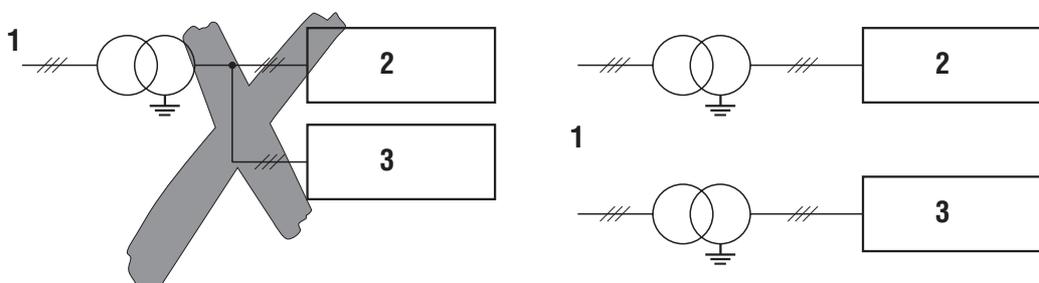
- Stellen Sie sicher, daß überall in der Anlage derselbe Erdbezug (Erdung NF- / HF-tauglich) besteht (→ Bild 41).
- Führen Sie niemals Leitungen der Gruppen I und II mit Leitungen der Gruppen III und IV im gleichen Kabel oder im gleichen Bündel.
- Verringern Sie die Länge, auf der Leitungen der Gruppen I und II mit Leitungen der Gruppen III und IV parallel laufen, auf das absolute Minimum. Verlegen Sie diese Leitungen mit maximalem Abstand.
- Halten Sie den Abstand zwischen den Leitungsgruppen ein (→ Bild 47).
- Minimieren Sie die Fläche der Masseschleifen (→ Bild 50).
- Verlegen Sie den Hinleiter immer so nahe wie möglich am Rückleiter (→ Bild 51). Verdrillen von Hin- und Rückleiter vermindert die Störeinkopplung.
- Die Benutzung von geschirmten Kabeln erlaubt die Benutzung desselben Kabelkanals auch bei unterschiedlichen Leitungsgruppen..
- Erden Sie Schirme beidseitig, legen Sie die Schirmenden flächig auf. Einseitige Erdung ist nicht effektiv. Wird der Schirm nicht aufgelegt, so können hohe Berührungsspannungen entstehen!
- Erden Sie nicht benutzte Leitungen innerhalb eines Kabels an beiden Enden (→ Bild 48).
- Leitungen der Gruppen I und II und der Gruppen III und IV dürfen sich nur rechtwinklig kreuzen (→ Bild 49).

4.3 Spannungsversorgung

4.3.1 Netzspannung

Bei der Versorgung mehrerer Geräte über eine gemeinsame Quelle entstehen Spannungsschwankungen am gemeinsamen Netzanschluß, die zu Störungen führen können (→ Kap. 2.3.1). Deshalb müssen Geräte gemäß ihrer Netzanschlußleistung einem geeigneten Versorgungsstrang zugeordnet werden. Sind große Spannungsschwankungen am Netz zu erwarten, so muß für empfindliche Geräte wie Steuergeräte, Meßgeräte und ähnliches mit einem Trenntransformator eine getrennte Versorgung aufgebaut werden.

Bild 56 zeigt ein Beispiel einer solchen Netzversorgung (1) von Leistungskomponenten (2) und empfindlichen Geräten (3).



00757AXX

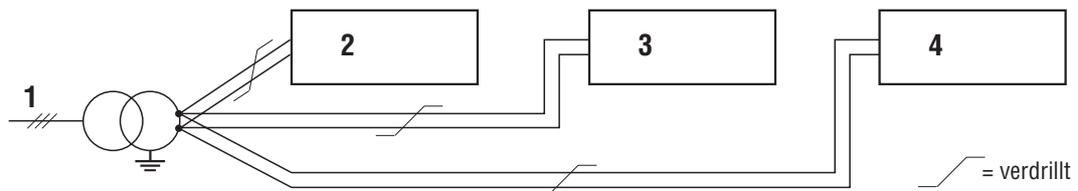
Bild 56: Versorgungskonzept für die Netzversorgung

Die Geräte müssen sternförmig an die Versorgungsquelle angeschlossen werden. Werden empfindliche Geräte oder Geräte hoher Leistung verwendet, so sind getrennte Versorgungsstränge notwendig.

4.3.2 Kleinsignalspannungen

Für Kleinsignalspannungen (z. B. 24 V_{DC}) ist es wichtig, daß analoge Verbraucher (z. B. Meßsonden, Näherungsschalter u. ä.) und digitale Verbraucher (Relais, Schütze, Bremsen u. ä.) auf verschiedene Netzteile oder zumindest auf verschiedene Stränge verteilt werden, die sternförmig vom Netzteil abgehen. Hin- und Rückleiter müssen immer gemeinsam verlegt werden.

Bild 57 zeigt ein Versorgungskonzept für die Kleinsignalversorgung (1) von Leistungskomponenten (2), schwächeren Leistungskomponenten (3) und Kleinsignalkomponenten (4)



00758ADE

Bild 57: Versorgungskonzept für Kleinsignalversorgung

4.4 Signalübertragung

Das Betriebsverhalten einer Anlage wird maßgeblich durch die Art der Signalübertragung beeinflusst. Die Störimpfindlichkeit einer Signalübertragung ist bei gleicher Übertragungsart um so geringer, je höher der Signalpegel ist. In Umgebungen mit hohem Störpegel sind nur Differenzsignale mit Potentialtrennung zwischen Sender und Empfänger einsetzbar. Tabelle 11 gibt eine Übersicht über die Störimpfindlichkeit verschiedener Signalübertragungsarten.

Übertragungsart	empfohlener Einsatz
Analogsignal	Nur in störrarmer Umgebung und bei hohem Signalpegel und / oder geringen Anforderungen an die Signalqualität. Jede Störspannung verfälscht das Meßergebnis.
unsymmetrische Übertragung (z. B. RS-232)	Nur in störrarmer Umgebung. Schon kleine Potentialunterschiede zwischen Empfänger und Sender können zu Übertragungsfehler führen. Vornehmlich benutzt als Diagnose- oder Inbetriebnahmeschnittstelle.
symmetrische Übertragung (z. B. RS-485)	Geeignet für Industrieumgebung. Potentialunterschiede bis zu einigen 10 Volt werden unterdrückt. Höhere Gleichtaktstörspannungen führen zu Übertragungsfehlern oder zum Defekt.
potentialgetrennt	Geeignet für Industrieumgebung. Potentialunterschiede zwischen Sender und Empfänger wirken sich nicht auf die Signalübertragung aus.
frequenzmoduliert	Geeignet für stark gestörte Industrieumgebung. Störungen wirken sich nur aus, wenn das Übertragungssignal total deformiert wird.
optische Übertragung	Geeignet für stark gestörte Industrieumgebung. Elektromagnetische Störungen können die Übertragung nicht beeinflussen (wohl aber direkt den Sender oder Empfänger).

Tabelle 11: Störimpfindlichkeit verschiedener Signalübertragungsarten

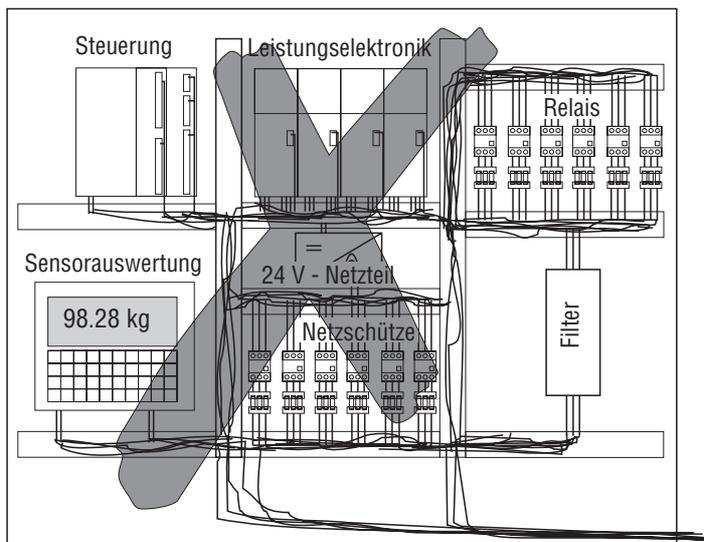
Empfindliche Analogsignale müssen direkt beim Sensor ausgewertet und als verstärktes Signal mit geeigneter Übertragungsart weitergeleitet werden.

Kommunikationsleitungen, die den Schaltschrank verlassen, sollten mit symmetrischer, potentialgetrennter Übertragung betrieben werden. Frequenzmodulierte und optische Übertragungen sind sehr störsichere Übertragungsarten, die für viele Einsatzfälle jedoch zu aufwendig sind.

4.5 Schaltschrankaufbau

4.5.1 Anordnung der Komponenten

Großen Einfluß auf die EMV eines Schaltschranks hat die Aufteilung der Komponenten auf die Schaltschrankfelder. Die Anordnung muß so gewählt werden, daß es möglich ist, Leitungen verschiedener Leitungsgruppen (→ Kap. 4.2.1) räumlich zu trennen. Die Komponenten müssen so gewählt werden, daß sie den Anforderungen an die Störfestigkeit und Störaussendung gerecht werden. Bild 58 zeigt ein Beispiel für den Schaltschrankaufbau mit besonderem Augenmerk auf die räumliche Trennung.



Wichtig:

- Kurze Leitungen
- Trennung der Gruppen
- Gruppen I / II und III / IV rechtwinklig kreuzen
- Trennwand rundum kontaktiert
- Getrennte Schaltschränke für Leistungselektronik und Kleinsignale
- Schirme bei Schaltschrankein- und -austritt und an Geräten auflegen

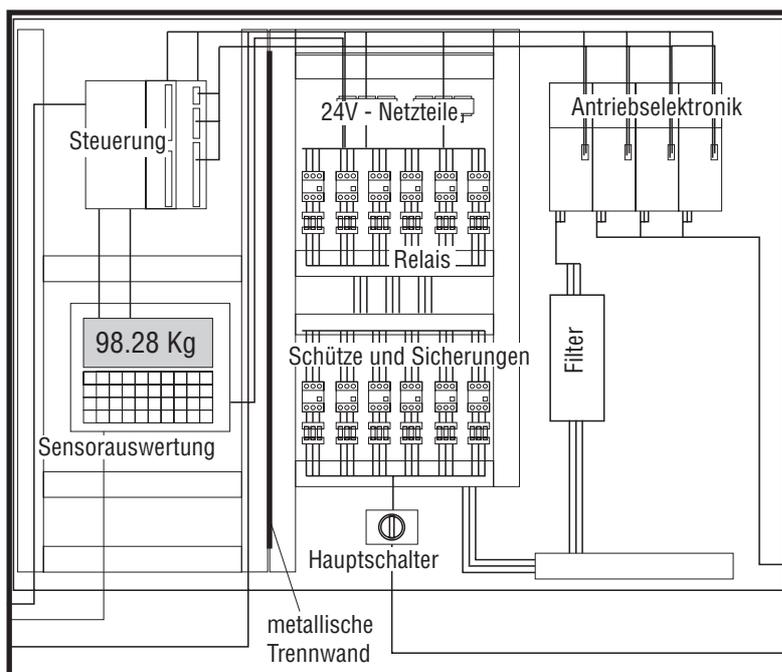


Bild 58: Schaltschränke mit Versorgung, Leistungskomponenten usw.

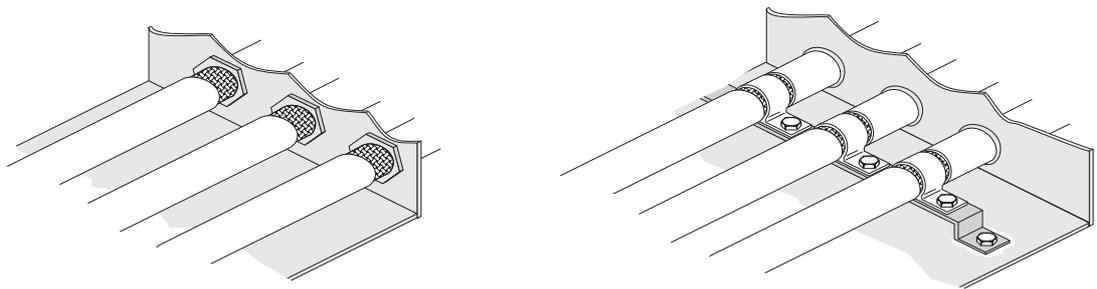
00765ADE

Sehr wichtig für die korrekte Funktion der Anlage ist der gemeinsame Erdbezug der Schaltschrankkomponenten. Um diesen zu gewährleisten, muß die Montageplatte als verzinkte, nicht lackierte Platte ausgeführt sein. Mit der Erdungsschiene muß eine niederinduktive Verbindung bestehen. Benachbarte Schaltschrankfelder, mit Geräten der Gruppen I und II und der Gruppen III und IV, müssen durch eine rundum kontaktierte Blechwand getrennt werden. Leuchtstoffröhren können als Aussenender von hochfrequenten Signalen zu Störungen führen.

4.5.2 Schirmwirkung

Der Schaltschrank kann als Faradayscher Käfig zur Verminderung der Abstrahlung beitragen. Es gibt Spezialausführungen, die mit Kontaktfedern zur Tür die Störabstrahlung sehr effektiv verhindern. Diese aufwendige Lösung ist nur in Ausnahmefällen notwendig. Der Schaltschrank behält seine Schirmwirkung nur, wenn alle hinein- und herausgeführten Leitungen geschirmt sind, da diese ansonsten als Antenne wirken. Die Kabelschirme müssen direkt an der Durchführung aufgelegt sein. Bild 59 zeigt dafür verschiedene Realisierungsmöglichkeiten. Alternativ können diese Leitungen auch gefiltert werden. Die Filter müssen direkt an der Durchführung montiert werden oder die Leitung zwischen Filter und Kabelaustritt muß geschirmt werden.

Eine einzelne ungeschirmte oder ungefilterte Leitung kann alle anderen Maßnahmen zunichte machen.



00775AXX

Bild 59: Korrekte Kabeldurchführungen am Schaltschrank (Metallverbindungen)

4.6 Filtereinsatz

Eine wichtige Maßnahme zur Einhaltung der EMV ist die Filterung von Leitungen. Die Filterung wirkt immer in beide Richtungen, d. h. sie erhöht die Störfestigkeit und vermindert die Störaussendung auf der gefilterten Leitung. Die korrekte Funktion des Filters hängt wesentlich vom sachgemäßen Einbau ab.

Dabei spielen hauptsächlich drei Faktoren eine Rolle:

- Einbauort
- Erdung
- Leitungsführung.

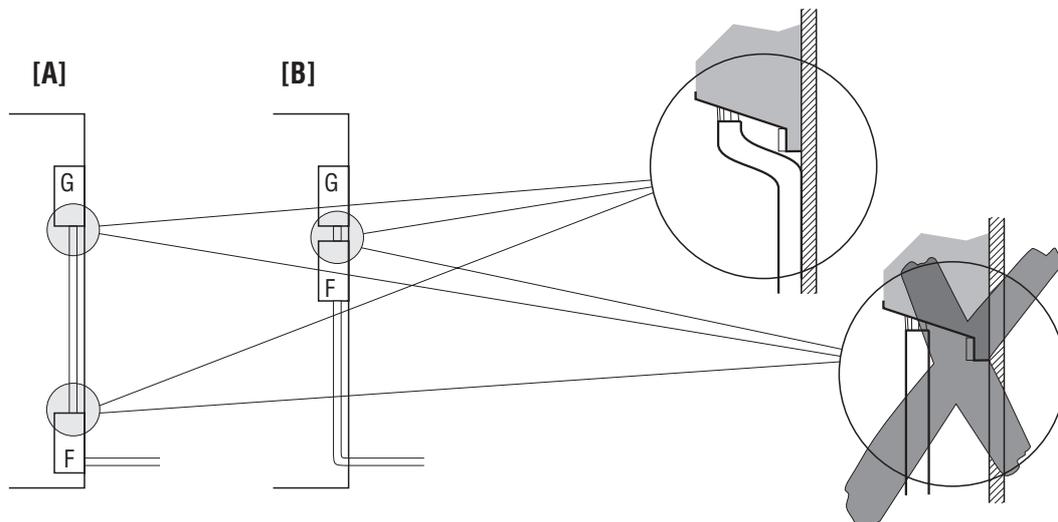
Werden diese Faktoren nicht berücksichtigt, so kann die Filterwirkung teilweise oder ganz verloren gehen.

4.6.1 Einbauort

Es gibt zwei günstige Einbauorte für Filter:

[A] Ein guter Einbauort für ein Filter ist direkt an der Durchführung der gefilterten Leitung ins Metallgehäuse. In diesem Fall kann die Leitung zwischen Filter und Gerät Probleme bereiten, weil auf diesem Leitungsstück Störungen koppeln können. Diese Probleme können durch Schirmung dieses Leitungsstücks behoben werden.

[B] Ebenfalls ein guter Einbauort für ein Filter ist direkt an dem dazu gehörenden Gerät. In diesem Fall kann die Leitung zwischen Filter und Gehäusedurchführung Probleme bereiten, weil hier Störungen koppeln können. Diese Probleme können durch Schirmung dieses Leitungsstücks behoben werden.



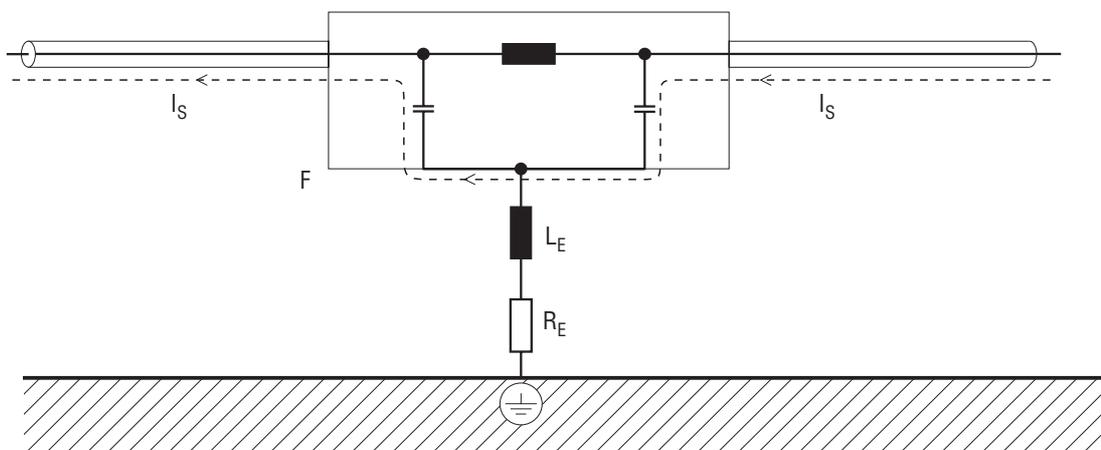
00776AXX

Bild 60: Installationsmöglichkeiten von Gerät (G) und dazugehörendem Filter (F)

4.6.2 Erdung

Da nahezu alle Filter Ableitkondensatoren gegen Erde verwenden, hängt die Filterwirkung wesentlich von der Erdung des Filters ab. Eine schlechte Erdung kann durch einen Widerstand R_E und eine Induktivität L_E dargestellt werden (→ Bild 61). Die schlechte Erdung verhindert, daß bei hohen Frequenzen die Störspannung durch die Ableitkondensatoren kurzgeschlossen wird. Sie kann dazu führen, daß das Filter F komplett überbrückt wird.

Da ein Filter im allgemeinen die Störspannungen kurzschließt, um die Störströme I_S zum Störer zurückfließen zu lassen, muß die Verbindung zwischen Filter und Störer so niederinduktiv wie möglich sein. Eine gemeinsame blanke, metallische Montageplatte oder eine geschirmte Leitung zwischen Filter und Störer sind hierbei sehr effektiv.



00759AXX

Bild 61: Ersatzschaltbild für Filter mit schlechter Erdung

F	Filter	L_E	Erdungsinduktivität
I_S	Störstrom	R_E	Erdungswiderstand

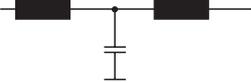
4.6.3 Leitungsführung

Die Filterwirkung kann nur dann gewährleistet werden, wenn die gefilterte und die ungefilterte Leitung in größtmöglicher Entfernung zueinander verlegt werden. Anderenfalls können Störungen von der ungefilterten auf die gefilterte Leitung koppeln. Ist eine getrennte Verlegung dieser beiden Leitungen nicht möglich, so muß die ungefilterte Leitung geschirmt werden.

4.6.4 Filterauswahl

Eine korrekte Filterauswahl ist nur durch Messung möglich. Es werden zwar von allen Filterherstellern Meßkurven für die Dämpfung veröffentlicht, diese Kurven werden aber immer mit 50 Ohm Impedanz an Filterein- und -ausgang ermittelt. Da die tatsächlich in der Anlage existierenden Abschlußwiderstände von diesen Werten abweichen, werden andere Dämpfungswerte erreicht. Das kann dazu führen, daß Filter mit identischen Katalogwerten in der Praxis stark unterschiedliche Dämpfungswerte erreichen.

Bild 62 zeigt, nach welchen Kriterien die Filterauswahl erfolgen sollte.

Impedanz am Eingang	Filteraufbau	Impedanz am Ausgang
Hoch		Hoch
Niedrig		Hoch
Hoch		Niedrig
Niedrig		Niedrig

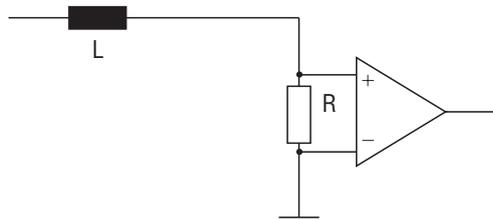
00761ADE

Bild 62: Kriterien für die Filterauswahl

Für viele Anwendungsfälle bieten Filterhersteller angepaßte Filter an.

Für Entstörzwecke werden meistens Tiefpaßfilter benötigt, die das tieffrequente Nutzsignal passieren lassen und das hochfrequente Störsignal herausfiltern.

Als einfachste Filter bieten sich Kondensatoren und Drosseln an. Bild 63 zeigt die Wirkung dieser Bauelemente. Für niedrige Frequenzen eignen sich Elektrolytkondensatoren und geblechte Eisenkerndrosseln, für höhere Frequenzen werden Folien- und Keramikkondensatoren und Ferritkerne verwendet.

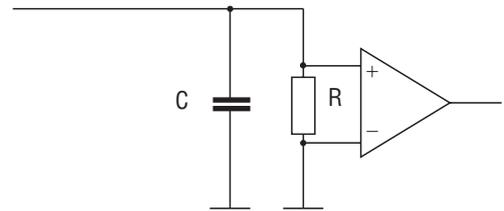
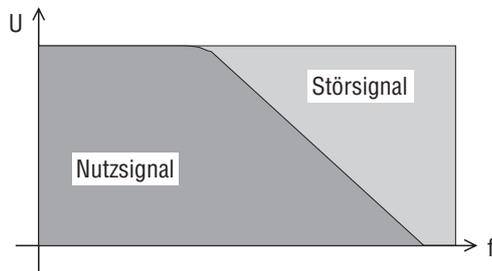


Induktive Entstörung, besonders effektiv bei kleinem R

$$\text{NF: } R \gg Z_L$$

$$\text{HF: } R \ll Z_L$$

$$Z_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

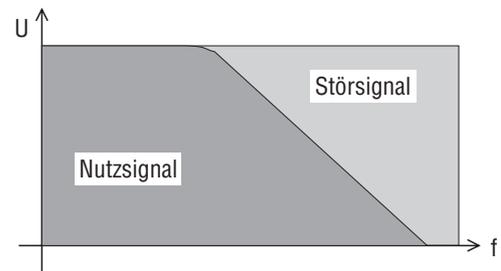


Kapazitive Entstörung, besonders effektiv bei großem R

$$\text{NF: } R \ll Z_C$$

$$\text{HF: } R \gg Z_C$$

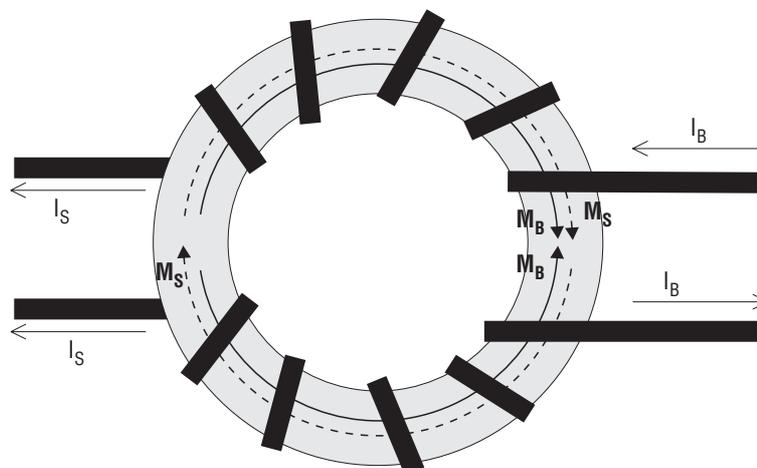
$$Z_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$



00774ADE

Bild 63: Wirkung von induktiver und kapazitiver Entstörung

Zur Unterdrückung von hochfrequenten Gleichtaktstörungen eignet sich besonders ein Ferrit-Ringkern, durch den Hin- und Rückleiter gemeinsam geführt werden. Für den Betriebsstrom I_B ist praktisch keine Induktivität wirksam, da sich die Magnetflüsse im Kern gegenseitig aufheben. Für Gleichtaktstörströme I_S ist eine sehr hohe Induktivität wirksam, die diese Ströme stark bedämpft. Der Ferrit-Ringkern wirkt wie ein Tiefpaßfilter.



I_S = Störstrom
 I_B = Betriebsstrom

M_S = Magnetfluß Störstrom
 M_B = Magnetfluß Betriebsstrom

00762AXX

Bild 64: Ferrit-Ringkern

4.7 Einsatz von Entstörkomponenten bei Umrichtern

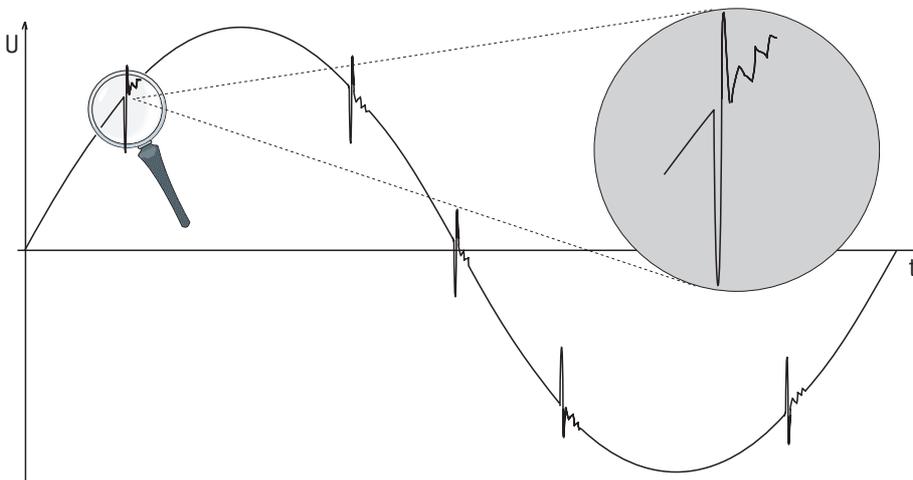
Dieses Kapitel gibt Hinweise zur Projektierung. Für eine exakte Projektierung von SEW-Produkten nutzen Sie bitte die Angaben in den entsprechenden Katalogen.

4.7.1 Netzdrossel

Eine Netzdrossel kann folgende Funktionen übernehmen:

Verminderung von Kommutierungseinbrüchen:

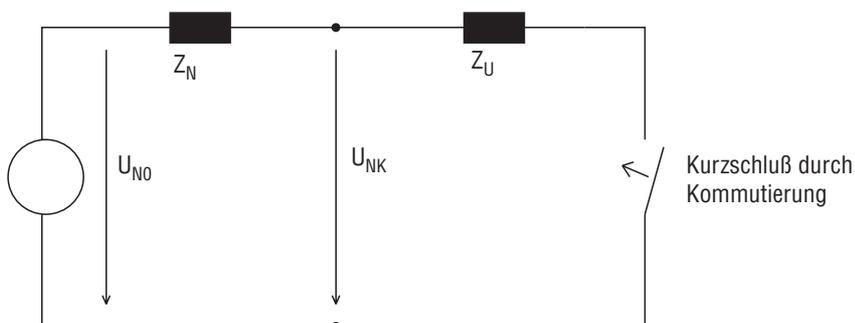
Wie in Kapitel 2.5 dargestellt, besitzt ein Umrichter im Netzeingang meist einen Gleichrichter. Der Betriebsstrom des Umrichters fließt jeweils über zwei Dioden des Gleichrichters in den Gleichspannungszwischenkreis. Während des Betriebs kommutiert der Strom von einer Diode zur nächsten. Im Kommutierungs Augenblick schließt der Gleichrichter das Netz solange kurz, bis die Diode, die zuvor den Strom geführt hat, ihre Sperrfähigkeit wieder erreicht hat. Bild 65 zeigt solche Kommutierungseinbrüche auf der Netzspannung.



00788AXX

Bild 65: Kommutierungseinbrüche in der Netzspannung

Bild 66 zeigt das einphasige Ersatzschaltbild für einen Kommutierungseinbruch.



00789ADE

Bild 66: Ersatzschaltbild für einen Kommutierungseinbruch (Erläuterung siehe folgende Seite)

Im Kommutierungsaugenblick bildet die Diode einen Kurzschluß, am Netzanschluß bricht die Spannung U_N ein. Die Impedanzen Z_N und Z_U bilden dann einen Spannungsteiler, über dem die Netzspannung anliegt. Es ergibt sich folgende Spannung am Anschlußpunkt:

$$U_{NK} = \frac{Z_U}{Z_U + Z_N} \cdot U_{NO} \quad [F8]$$

- U_{NK} = Netzspannung im Kommutierungsaugenblick am Anschlußpunkt
- U_{NO} = Netzspannung im Kommutierungsaugenblick im Netztransformator
- Z_U = Impedanz vor dem Gleichrichter (Zuleitung, Netzdrossel etc.)
- Z_N = Netzimpedanz (Impedanz des Netztransformators)

Oft wird eine Netzdrossel mit $u_K = 4\%$ verwendet; die Netzspannung kann dann maximal um 20 % einbrechen. Dies hat vor allem für Geräte mit Thyristoren im Netzgleichrichter Bedeutung, da dort der Kommutierungseinbruch mehrere 100 μ s dauern kann.

Für Umrichter mit Dioden im Netzgleichrichter sind die Zeiten deutlich kürzer, außerdem erfolgt die Kommutierung meist stromlos. Darum sind Einbrüche auf der Netzspannung kaum zu beobachten. Eine Netzdrossel muß hier nicht eingesetzt werden.

Verbesserung der Überspannungsfestigkeit:

Beim Auftreten von Überspannungsimpulsen im Netz fließt im ersten Augenblick ein sehr hoher Strom in den Umrichter, da der Zwischenkreis-Kondensator nun auf die höhere, an den Anschlußklemmen liegende Spannung aufgeladen wird. Zu diesem Strom addiert sich der Strom, der durch eventuell vorhandene Überspannungsableiter fließt. Bei sehr starken Überspannungspulsen kann die zulässige Spannung der Halbleiter überschritten werden. Der Netzgleichrichter kann durch den hohen Strom thermisch zerstört werden.

Eine Netzdrossel verringert den Strom, der durch den Überspannungspuls hervorgerufen wird. Außerdem ruft der Strom an der Netzdrossel einen Spannungsfall hervor. An den Geräteklemmen ist nur noch die um diesen Spannungsfall verminderte Überspannung wirksam.

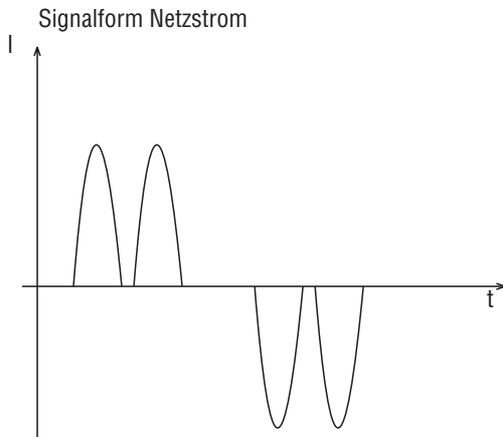
Ursache für solche Überspannungsimpulse können z. B. Kurzschlüsse und Schalthandlungen im Netz sein, aber auch fehlerhaft arbeitende Kompensationsanlagen (Kap. 2.3.1).

Verminderung von Netzharmonischen:

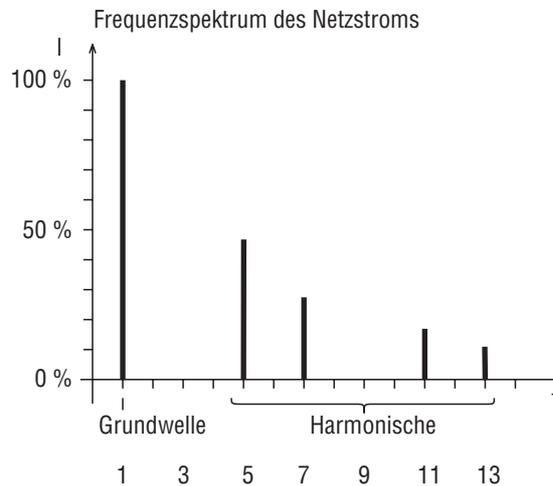
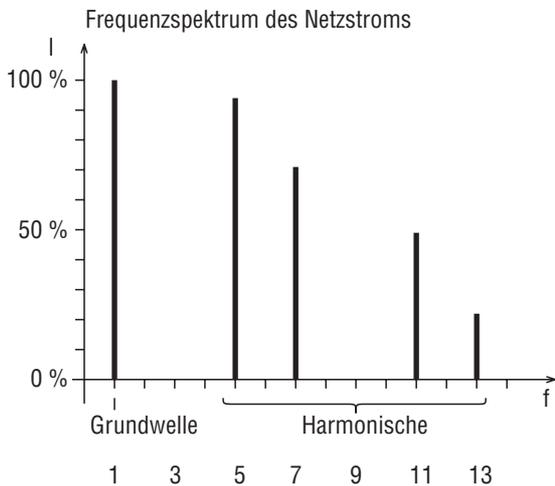
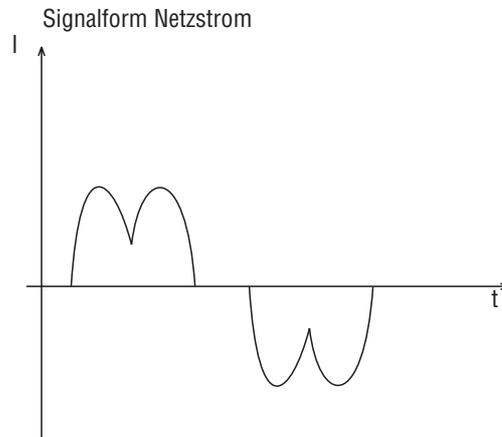
Wie bereits in Kapitel 2.5.3 dargestellt, enthält der Netzstrom von herkömmlichen Umrichtern einen hohen Anteil an Harmonischen. Ursache dafür ist der nicht sinusförmige Netzstrom (\rightarrow Bild 39, Seite 35). Eine Netzdrossel kann den pulsförmigen Strom stark glätten. Der Anteil an Harmonischen sinkt dadurch erheblich (für die 5. Harmonische typisch um Faktor 2).

Bei modernen Umrichtern mit schlankem Zwischenkreis sind die Harmonischen im Netzstrom bereits so weit gesenkt, daß mit einer Netzdrossel keine nennenswerten Verbesserungen mehr möglich sind.

Netzstrom
herkömmlicher Umrichter
mit 3phasigem Netzanschluß
ohne Netzdrossel



Netzstrom
herkömmlicher Umrichter
mit 3phasigem Netzanschluß
mit Netzdrossel



00790ADE

Bild 67: Signalform und Frequenzspektrum des Netzstroms mit und ohne Netzdrossel

Verminderung des Einschaltstroms:

Werden mehrere Geräte gleichzeitig mit einem Netzschütz eingeschaltet, so addiert sich deren Einschaltstrom. Ursache für den Einschaltstromstoß ist das Aufladen des Zwischenkreiskondensators. Vor allem bei kleinen Netzschützen kann ein zu hoher Einschaltstromstoß zum Verkleben oder Verschweißen der Schützkontakte führen. Eine Netzdrossel kann den Einschaltstromstoß wesentlich verringern.

Auswahl der Netzdrossel:

Eine Netzdrossel wird nach dem Nennstrom des Umrichters und der Netzspannung, an der der Umrichter betrieben wird, ausgewählt. Die Induktivität wird nach Maßgaben des Herstellers bestimmt.

Eine gemeinsame Netzdrossel für mehrere Umrichter muß für den Summenstrom bemessen werden.

Beispiel: Umrichter 1 $I_N = 7 \text{ A}$
 Umrichter 2 $I_N = 7 \text{ A}$
 Umrichter 3 $I_N = 12 \text{ A}$
 Umrichter 4 $I_N = 20 \text{ A}$
 Netzspannung $U_N = 3 \times 400 \text{ V}_{AC}$

→ Mindestnennstrom Netzdrossel $I_{Dr} = 7 \text{ A} + 7 \text{ A} + 12 \text{ A} + 20 \text{ A} = 46 \text{ A}$

→ Mindestnennspannung Netzdrossel $U_N = 3 \times 400 \text{ V}_{AC}$

Der Mindestnennstrom der Netzdrossel kann reduziert werden, wenn die Umrichter nicht gleichzeitig unter Nennlast laufen (Gleichzeitigkeits-Faktor).

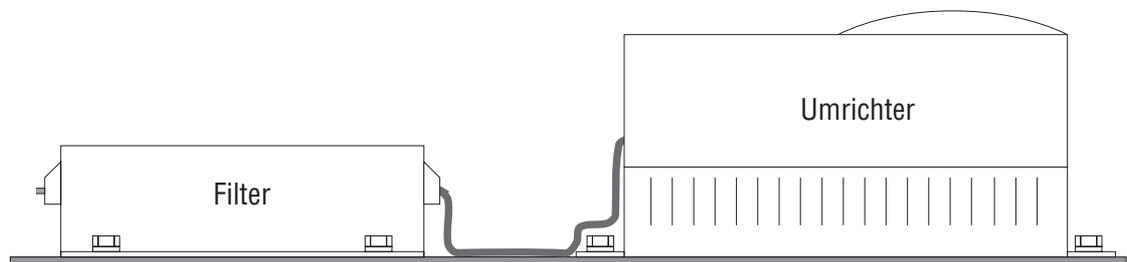
Einsatz der Netzdrossel:

Der Einsatz einer Netzdrossel empfiehlt sich in folgenden Fällen:

- Betrieb an einem Netz, in dem hohe Überspannungen zu erwarten sind
- Betrieb mehrerer kleiner Umrichter an einem gemeinsamem Netzschütz
- Hoher Anteil von herkömmlichen Umrichtern an der Gesamtanschlußleistung des Netzes

4.7.2 Netzfilter

Das Netzfilter hält die vom Umrichter erzeugten Störspannungen vom Netz fern. Wie in Kap. 4.6.1 dargestellt, muß das Netzfilter so nah wie möglich am dazu gehörenden Umrichter platziert sein, die Gehäuse von Netzfilter und Umrichter müssen HF-gerecht geerdet und über eine Montageplatte miteinander verbunden sein (z. B. durch Montage auf eine metallische, unlackierte Schaltschrankrückwand; → Bild 68).

**Wichtig!**

Flächiger metallischer Kontakt zwischen Filter und Umrichter

00791ADE

Bild 68: Montage Netzfilter / Umrichter

Statt eines Netzfilters pro Umrichter kann auch ein gemeinsames Netzfilter für den gesamten Schaltschrank verwendet werden. Für Umrichter genügt meist ein 3-Phasen-Netzfilter, das für den Summenstrom der Umrichter ausgelegt ist. Sollen auch einphasige Verbraucher gefiltert werden, so muß ein 4-Leiter-Netzfilter verwendet werden. Das Netzfilter muß so nah wie möglich am Eintritt der Netzleitung in den Schaltschrank plaziert werden. Die gefilterte Leitung darf nicht parallel zu ungefilterten Leitungen liegen.

Auslegung:

Ein Netzfilter wird nach dem Umrichterstrom sowie der Netzspannung gewählt, an der der Umrichter betrieben wird. Ein Summennetzfilter wird analog zur Netzdrossel nach dem Summenstrom der verwendeten Umrichter gewählt (siehe Beispiel Kap. 4.7.1). Um eine ausreichende Filterdämpfung sicherzustellen, ist der vom Umrichterhersteller angegebene Typ zu verwenden.

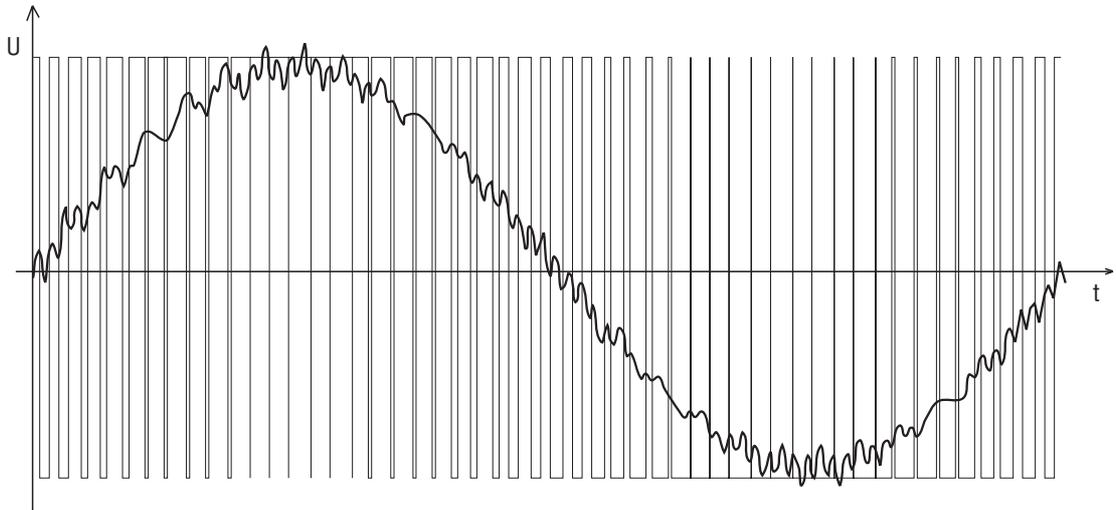
Für die Auswahl von 4-Leiter-Filtern können oft die Filterhersteller geeignete Hilfestellung geben.

Verwendung von Netzfiltern:

Der Einsatz von Netzfiltern empfiehlt sich unter folgenden Bedingungen:

- Betrieb im Wohngebiet
- Einhaltung von Grenzwerten im Industriegebiet (siehe Kap. 3.1)
- Betrieb von empfindlichen Verbrauchern am selben Netzversorgungsstrang
- Optimierung der EMV in einer komplexen Anlage

4.7.3 Ausgangsfilter (Sinusfilter)



00793AXX

Bild 69: Ausgangsspannung mit und ohne Sinusfilter

Bild 69 zeigt die Spannung am Umrichter Ausgang mit und ohne Sinusfilter. Das Sinusfilter erzeugt aus der rechteckförmigen Ausgangsspannung eine im wesentlichen sinusförmige Ausgangsspannung. Dies hat Einfluß bei folgenden Punkten:

Gruppenantrieb:

Bei manchen Anwendungen werden mehrere Motoren gemeinsam an einem Umrichter betrieben (Gruppenantrieb). Wie bereits in Kap. 2.5 erläutert, wird die Ausgangsspannung eines Umrichters aus Rechteckpulsen gebildet. Diese rufen in den Parasitärkapazitäten von Ausgangsleitung und Motorwicklung Ableitstromspitzen hervor. Beim Gruppenantrieb addieren sich diese Ableitstromspitzen. Diese Ableitstromspitzen können für den Umrichter unzulässige Werte erreichen (je nach Anzahl der parallel geschalteten Motoren, Leitungslänge, Art der Leitung am Umrichter Ausgang und Größe der Motoren). Außerdem kann ein wesentlicher Anteil des Stromes auf der Leitung verloren gehen. Dies gilt auch beim Betrieb eines Motors an einer langen, geschirmten Leitung.

Beim Betrieb mit einem Sinusfilter entstehen diese Ableitstromspitzen nicht, da dort die Ausgangsspannung sinusförmig ist. Es geht ein geringer Teil des Motorstromes im Sinusfilter verloren, dieser ist aber von externen Faktoren (Motorenanzahl, Leitungsart und -länge) unabhängig.

Geräuschfilterung:

Die rechteckförmigen Pulse der Umrichter Ausgangsspannung rufen Geräusche im Motor hervor. Diese Geräusche im Bereich der Umrichtertaktfrequenz können als unangenehm empfunden werden.

Mit einem Sinusfilter werden diese Geräusche im Motor stark gedämpft, jedoch erzeugt das Filter selbst Geräusche bei der Umrichtertaktfrequenz.

Funkentstörung (Verringerung der Störaussendung):

Bei geeigneter Auslegung des Sinusfilters durch den Hersteller ist eine Funkentstörung der Ausgangsleitung möglich. Damit ist auch bei Anwendungen, in denen Grenzwerte einzuhalten sind, ein Betrieb ohne geschirmte Ausgangsleitungen möglich. Die Hinweise des Herstellers zur Installation sind dabei zu beachten. Auch bei funkentstörter Ausführung sind noch Störungen auf der Ausgangsleitung vorhanden, sie sind jedoch im Vergleich zu der ungefilterten Ausgangsspannung stark gedämpft.

Auslegung:

Wie Netzdrossel und Netzfilter sind Sinusfilter für den Nennstrom und die Nennspannung auszuwählen. Ist der Nennstrom des Motors kleiner als der des verwendeten Umrichters, so kann das Filter nach dem Motorstrom gewählt werden (bei Parallelbetrieb mehrerer Motoren nach der Summe der Motorströme).

Bei der Auslegung ist zu beachten:

- es tritt ein Spannungsfall am Filter auf, um den sich die am Motor zur Verfügung stehende Spannung verringert
- ein Teil des Ausgangsstromes geht im Filter verloren.

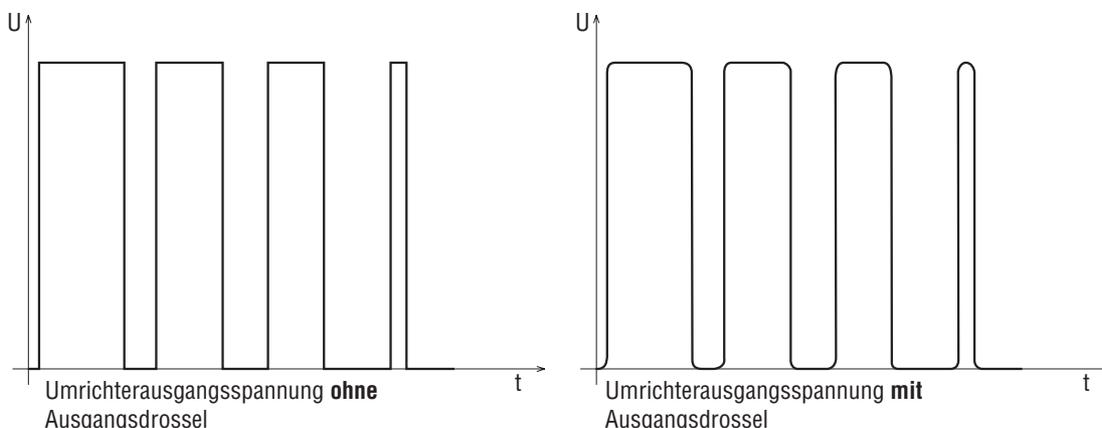
Einsatz:

In folgenden Fällen wird der Einsatz von Sinusfiltern empfohlen:

- Gruppenantrieb an einem Umrichter
- als Geräuschfilter
- zum funkentstörten Betrieb mit ungeschirmten Motorleitungen (z. B. Schlepp- oder Girlanden-Leitungen)
- zur Verminderung des Stromverlustes auf langen Leitungen

4.7.4 Ausgangsdrossel

Ausgangsdrosseln bilden zusammen mit den Parasitärkapazitäten (Leitungskapazität, Kapazität der Motorwicklung, Schirmkapazität etc.) am Umrichteranschluss ein Tiefpaßfilter. Bild 70 zeigt die Form der Umrichteranschlussspannung ohne und mit Ausgangsdrossel.



00794ADE

Bild 70: Wirkung der Ausgangsdrossel

Die Rechteckpulse der Ausgangsspannung werden verrundet, ihre Form bleibt jedoch im wesentlichen erhalten. Der Störpegel der Ausgangsleitung wird verringert, aber nicht gänzlich eliminiert. Die Ausgangsspannung hinter der Ausgangsdrossel ist nicht sinusförmig. Als Ausgangsdrossel wird meist ein Ferrit-Ringkern eingesetzt, um den die Ausgangsleitungen gewickelt werden. Der Ferrit-Ringkern wirkt als stromkompensierte Drossel (siehe Bild 64). Ein Ferrit-Ringkern hat den Vorteil, daß kein zusätzlicher Spannungsfall am Umrichterenausgang auftritt. Üblicherweise genügen 3 – 5 Windungen um einen Kern. Es existieren auch Ausgangsdrosseln in Längsausführung, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Eine Ausgangsdrossel kann für folgende Fälle nicht eingesetzt werden:

- Verminderung der Motorgeräusche
- Gruppenantrieb an einem Umrichter
- Verminderung des Stromverlustes auf langen Leitungen

Eine Ausgangsdrossel dient lediglich zur Entstörung des Umrichterenausgangs. Bei geeigneter Dimensionierung können die Abstrahlungsgrenzwerte für die Funkentstörung eingehalten werden.

Auslegung:

Ausgangsdrosseln in Ferritkernausführung können unabhängig von der Geräteleistung eingesetzt werden. Ist es aufgrund des Leitungsquerschnitts nicht möglich, die erforderliche Windungszahl auf einen Kern zu wickeln, so können mehrere Kerne hintereinander verwendet werden. Die Induktivität der Ausgangsdrossel ist proportional dem Quadrat der Windungszahl:

$$L_{\text{ges}} = n^2 \cdot L_1 \quad [\text{F9}]$$

- L_{ges} = Gesamtinduktivität der Ausgangsdrossel
 n = Windungszahl
 L_1 = Induktivität der Ausgangsdrossel mit einer Windung

Beispiel:

- 1) Ausgangsdrossel mit 4 Windungen
 $L_{\text{ges}} = 4 \cdot 4 \cdot L_1 = 16 \cdot L_1$
- 2) 2 Ausgangsdrosseln mit je 3 Windungen
 $L_{\text{ges}} = 3 \cdot 3 \cdot L_1 \cdot 2 = 18 \cdot L_1$
- 3) 4 Ausgangsdrosseln mit je 2 Windungen
 $L_{\text{ges}} = 2 \cdot 2 \cdot L_1 \cdot 4 = 16 \cdot L_1$

In jedem dieser drei Fälle wird etwa die selbe Entstörwirkung erreicht. Es sollten nicht mehr als 5 Windungen auf einen Kern gewickelt werden, da sonst die Entstörwirkung durch Sättigungseffekte sinken kann.

Generell kann die Ausgangsdrossel auf 2 Arten bewickelt werden:

Bewicklung mit 3 Ausgangsleitungen plus PE:

Vorteil: – geringere Erwärmung
– höhere Sättigungsfestigkeit

Nachteil: – schlechtere Entstörfunktion
– weniger Windungen möglich

Bewicklung mit 3 Ausgangsleitungen ohne PE:

Vorteil: – höhere Entstörfunktion
– höhere Windungszahl möglich

Nachteil: – höhere Erwärmung
– geringere Sättigungsfestigkeit

Einsatz:

Der Einsatz von Ausgangsdrosseln wird für folgende Fälle empfohlen:

- zur Funkentstörung des Umrichterenausgangs (eventuell mit ungeschirmten Leitungen)
- zur nachträglichen Behandlung von EMV-Problemen
- zur Entstörung, wenn weder Spannungsfall noch Stromverlust zulässig sind

4.7.5 EMV-Modul

Das EMV-Modul ist ein Unterbaufilter für Umrichter zur Entstörung von Umrichterein- und -ausgang. Es beinhaltet ein Netzfilter für den Umrichtereingang sowie eine Ausgangsdrossel für den Umrichterenausgang. Vorteile sind der platzsparende Einbau und der durch die Bauform automatisch gegebene HF-gerechte Kontakt zwischen Umrichter und Filter.

Ein EMV-Modul kann für folgende Fälle *nicht* eingesetzt werden:

- Verminderung der Motorgeräusche
- Gruppenantrieb an einem Umrichter
- Verminderung des Stromverlustes auf langen Leitungen

Auslegung:

Nach Angabe des Umrichterherstellers passend zum Umrichter.

Einsatz:

Der Einsatz von EMV-Modulen wird für folgende Fälle empfohlen:

- zur Funkentstörung des Umrichters mit ungeschirmten Leitungen
- zur nachträglichen Behandlung von EMV-Problemen

4.7.6 Schirmung

Durch sachgerechte Schirmung wird die Abstrahlung deutlich vermindert. Der Schirm muß dazu beidseitig aufgelegt werden. Die Schirmwirkung wird bei großen Leitungslängen verbessert, wenn der Schirm mehrmals mit einer Schelle (wichtig: Rundumkontaktierung!) auf einer durchgehenden metallischen Konstruktion aufgelegt wird. Auch die Verlegung mit einer Stahlarmierung, in einem metallischen Rohr oder in einem Kabelkanal dämpfen die Abstrahlung, wenn auch nicht so effektiv wie ein Kupferschirm.

Die Parasitärkapazität einer Leitung wird durch Schirmung deutlich erhöht (typisch Faktor 2–3). Auf einer geschirmten Leitung geht daher mit zunehmender Länge ein immer größerer Anteil des Motorstromes in Form von Ableitstrom verloren. Es kann in ungünstigen Fällen durch Schirmung der Ausgangsleitungen zu Störungen kommen, da durch eine Erhöhung der Parasitärkapazität die Ableitströme zunehmen und einen größeren Hochfrequenzanteil bekommen. Dann müssen Ausgangsfilter oder Ferritkerne anstatt geschirmter Leitungen zur Entstörung verwendet werden.

Wichtigstes Entstörmittel gegen die Auswirkungen von hochfrequenten Ableitströmen stellt ein hochfrequenzgerechtes Erdungskonzept in Schaltschrank und Anlage dar.

5 Normen und Gesetze

Die Normung und Gesetzgebung auf dem Gebiet der EMV hat sich in den letzten Jahren nachhaltig gewandelt. Folgende Ursachen führten hierzu:

- Es bestand Handlungsbedarf, Normen auf EMV-Grenzwerte gemäß den heutigen technischen Bedürfnissen anzupassen. Grundsätzlicher Trend dieses Anpassungsvorganges war die schrittweise Anhebung der EMV-Verträglichkeitspegel auf Werte, die für heutige technische Ausrüstungen genügend Sicherheit bieten, „in der elektromagnetischen Umwelt zufriedenstellend zu arbeiten, ohne dabei selbst elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für andere in dieser Umwelt vorhandene Geräte unannehmbar wären“ (Zitat aus dem EMV-Gesetz).

Dieser Grundsatz ist Leitgedanke des EMV-Gesetzes und der heutigen EMV-Normen.

- Ein weiteres Bestreben der Normung ist, alle produktbezogenen EMV-Anforderungen in einer gemeinsamen sogenannten EMV-Produktnorm zusammenzufassen. Dies hat den Vorteil, daß alle EMV-Aspekte (Störfestigkeit und Störaussendung, Erläuterungen, Meßmethoden usw.) darin enthalten sind. In Vorbereitung ist sie z. B. für elektrische Antriebe (DIN IEC 22G/21/CDV). Wenn eine Produktnorm existiert, so muß diese anstatt der Fachgrundnorm angewandt werden. Der Anwender muß zur Beurteilung der EMV-Situation eines Gerätes lediglich prüfen, ob der Hersteller die Erfüllung der Fachgrundnormen oder einer Produktnorm zusichert. Diese beinhalten lediglich eine Aufzählung von EMV-Normen, die der Hersteller zu beachten hat (→ Kap. 5.2).
- Der Gesetzgeber war im Zuge der Entstehung des EG-Binnenmarktes aufgefordert, bisherige nationale gesetzliche Regelungen (in Deutschland z. B. das Funkschutzgesetz) durch ein EG-harmonisiertes nationales Gesetz abzulösen. Der Rat der EG hat 1989 zu diesem Zweck die EMV-Richtlinie 89/336/EWG erlassen, in der für die EG-Mitgliedsstaaten u. a. eine Harmonisierungs-Übergangsfrist bis 31.12.1995 festgelegt wurde. Die Bundesrepublik Deutschland hat die EMV-Richtlinie im Nov. 1992 in das deutsche EMV-Gesetz (EMVG) umgesetzt. Dieses gibt es mittlerweile in der Überarbeitung vom Juni 1995.

Erläuterung der wichtigsten Begriffe im EMV-Gesetz:

Hersteller „Im Sinne dieses Gesetzes ist Hersteller derjenige, der für den Entwurf und die Fertigung eines der EMV-Richtlinie unterliegenden Produktes verantwortlich ist oder aus bereits gefertigten Endprodukten ein neues Produkt erstellt oder ein Produkt verändert, umbaut oder anpaßt.“

Was heißt das für den Maschinen-/Anlagenhersteller? Er kauft Antriebsgeräte, die er in seine Maschine / Anlage einbaut und mit weiteren Komponenten verknüpft.

- Damit trägt er die Verantwortung zur Sicherstellung des EMV-gerechten Einsatzes der gekauften Antriebskomponenten.
- Der Antriebskomponenten-Lieferant hilft, indem er für den Maschinen-/ Anlagenhersteller technische Anleitungen bereithält, die Lösungswege und Maßnahmen zur Sicherstellung der EMV beschreiben.

Elektromagnetische Störung „Im Sinne dieses Gesetzes ist elektromagnetische Störung jede elektromagnetische Erscheinung, die die Funktion eines Gerätes beeinträchtigen könnte. Eine elektromagnetische Störung kann elektromagnetisches Rauschen, ein unerwünschtes Signal oder eine Veränderung des Ausbreitungsmediums sein.“

Was heißt das? Elektromagnetische Störungen sind alle Arten von Störungen, z. B.:

- ESD = Entladung statischer Elektrizität
- Surge = Stoßspannung (Gewitterauswirkungen / Netz-Schalthandlungen)
- HF-Einstrahlung (über Luft)
- Leitungsgebundene HF-Einkopplung
- Burst = Schnelle transiente Störungen (öffnende Kontakte induktiver Stromkreise)

Störfestigkeit „Im Sinne dieses Gesetzes ist Störfestigkeit die Fähigkeit eines Gerätes, während einer elektromagnetischen Störung ohne Funktionsbeeinträchtigung zu arbeiten.“

Was heißt das? Mit Störfestigkeit wird der Grad der Unempfindlichkeit gegen von außen einwirkende EMV-Einflüsse beschrieben. Hierfür gibt es auch die Begriffe:

- EMB = Elektromagnetische Beeinflußbarkeit
- Passivverhalten
- Immissionsverhalten

Zuordnung von Umrichtern und anderen leistungselektronischen Geräten zum Begriff Hersteller

Hersteller im Sinne des EMV-Gesetzes ist derjenige, der das leistungselektronische Gerät in eine Maschine einplant, indem er verschiedene Komponenten (Schaltschrank, SPS, Schütze, Sicherungen, Frequenzumrichter, Zusatzgeräte, Sensoren, Geber, Motoren, Mechanik, Hydraulik usw.) zu einer funktionsfähigen Maschine zusammenbaut und sie in den Verkehr bringt.

Er muß die EMV-Konformität der Maschine sicherstellen, indem er seine Planungen mit EMV-Sachverständigen durchführt. Dazu muß er wissen, welche Maßnahmen für die Komponenten unter Berücksichtigung des Betriebsstandortes zu treffen sind. Diese Aufgabe kann er nur mit Hilfe des Komponenten-Zulieferanten lösen. Dieser muß Hilfestellung bezüglich der Installation seiner Komponenten leisten.

Wenn der Maschinenhersteller die EMV-Planung bei der Konstruktion und dem Bau der Maschine konsequent durchführt, bestehen alle Voraussetzungen, daß er seine Maschine mit dem CE-Zeichen versehen kann. Dieses bestätigt die Konformität zu allen relevanten EG-Richtlinien (hier im besonderen die EMV-Richtlinie).

5.1 Einteilung in Anwendungsbereiche und deren grundsätzliche Anforderungen

Die heutigen Normen unterscheiden bezüglich der Umgebung des Anlagen-Standortes zwischen Industriebereich und Wohnbereich. Diese Bereiche werden in den sog. Fachgrundnormen definiert.

Normen-Titel	für den Industriebereich	für den Wohnbereich
Fachgrundnorm für die Störaussendung	EN 50 081-2	EN 50 081-1
Fachgrundnorm für die Störfestigkeit	EN 50 082-2	EN 50 082-1

Tabelle 12: Zuordnung von Fachgrundnormen zur der Umgebung des Anlagen-Standortes

Werden die dem Einsatzgebiet entsprechenden Fachgrundnormen oder Produktnormen angewandt, so sind alle EMV-Anforderungen erfüllt.

Tabelle 13 zeigt eine Aufstellung der EMV-Prüfungen, die durch die Fachgrundnormen abgedeckt sind.

Fachgrundnorm Störaussendung	Fordert Messung nach	Bezeichnung
EN 50081 - 1	EN 55022	Grenzwerte und Meßverfahren für Funkstörungen von Einrichtungen der Informationsverarbeitung
	EN 55014	Grenzwerte und Meßverfahren für Funkstörungen von Geräten mit elektromotorischem Antrieb und Haushaltsgeräten
	EN 61000-3-2 *	Grenzwerte für Oberschwingungsströme
	EN 61000-3-3 *	Grenzwerte für Spannungsschwankungen und Flicker
EN 50081-2	EN 55011	Grenzwerte und Meßverfahren für Funkstörungen von industriellen, wissenschaftlichen und medizinischen Geräten

Fachgrundnorm Störfestigkeit	Fordert Messung nach	Bezeichnung
EN 50082-1	EN 61000-4-2	Störfestigkeit gegen Entladung statischer Elektrizität
	EN 61000-4-3	Störfestigkeit gegen hochfrequente elektromagnetische Felder
	EN 61000-4-4	Störfestigkeit gegen schnelle transiente elektrische Störgrößen / Burst
EN 50082-2	EN 61000-4-2	Störfestigkeit gegen Entladung statischer Elektrizität
	EN 61000-4-3	Störfestigkeit gegen hochfrequente elektromagnetische Felder
	EN 61000-4-4	Störfestigkeit gegen schnelle transiente elektrische Störgrößen / Burst
	EN 61000-4-6	Störfestigkeit gegen leitungsgeführte Störgrößen, induziert durch hochfrequente Felder
	EN 61000-4-8*	Störfestigkeit gegen Magnetfelder mit energietechnischen Frequenzen

* müssen nur für bestimmte Geräte angewendet werden.

Tabelle 13: Fachgrundnormen und genormte Meßverfahren und Grenzwerte

Ein Gerät, das EN 50081-1 erfüllt, hält automatisch auch EN 50081-2 ein.
Ein Gerät, das EN 50082-2 erfüllt, hält automatisch auch EN 50082-1 ein.

Die Einteilung in die zwei Anwendungsbereiche ergibt sich aus folgender Definition (siehe EN 50 081-2 und EN 50 082-2, jeweils Kap. 5). Darin heißt es:

EN 50 081-2: **Industrielle Bereiche** werden durch das Vorhandensein von einer oder mehreren der folgenden Gegebenheiten gekennzeichnet:

- Industrielle, wissenschaftliche und medizinische Geräte (ISM-Geräte) sind vorhanden;
- große induktive oder kapazitive Lasten werden häufig geschaltet;
- die Stromstärken und die damit verbundenen magnetischen Feldstärken sind hoch.

Diese sind bestimmende Elemente für eine industrielle elektromagnetische Umgebung und unterscheiden die industrielle von anderen Umgebungen.

EN 50 082-1: Die von dieser Norm erfaßten Umgebungen sind der **Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereich sowie Kleinbetriebe**, sowohl innerhalb als auch außerhalb der Gebäude. Die folgende – wenn auch nicht vollständige – Aufstellung deutet an, welche Räumlichkeiten eingeschlossen sind:

- Wohngebäude/Wohnflächen wie Häuser, Wohnungen, Zimmer usw.;
- Verkaufsflächen wie Läden, Großmärkte usw.;
- Geschäftsräume wie Ämter und Behörden, Banken usw.;
- Unterhaltungsbetriebe wie Lichtspielhäuser, öffentliche Gaststätten, Tanzlokale usw.;
- im Freien befindliche Stellen wie Tankstellen, Parkplätze, Vergnügungs- und Sportanlagen usw.;
- Räume von Kleinbetrieben wie Werkstätten, Laboratorien, Dienstleistungszentren usw.

Alle Einsatzorte, die dadurch gekennzeichnet sind, daß sie direkt an die öffentliche Niederspannungs-Stromversorgung angeschlossen sind, werden als zum Wohnbereich bzw. zu Geschäfts- und Gewerbebereichen sowie Kleinbetrieben gehörig betrachtet.

5.2 Normen- und Gesetzesübersicht

Die folgende Übersicht zeigt die geläufigsten EMV-Normen und -Gesetze zum Zeitpunkt 31.12.1996.

EMV-Normen / Gesetze	
89/336/EWG (= 1989)	EMV-Richtlinie
EMVG vom 30.8.1995	EMV-Gesetz (EMV-Richtlinie in dt. Gesetz umgesetzt)
DIN IEC 22G/21/CDV (Entwurf: Nov. 1995)	EMV-Produktnorm einschließlich Prüfverfahren für elektrische Antriebe Störfestigkeitsanforderungen: Kap. 5 Störaussendungsanforderungen: Kap. 6
a) Störaussendung (Quelle)	
EN 50081-1 = VDE 0839T81-1	Fachgrundnorm (Defin./Meßbed.): Wohnbereich
EN 50081-2 = VDE 0839 T 81-2	Fachgrundnorm (Defin./Meßbed.): Industriebereich
EN 55 011 = VDE 0875 T11	Grenzwerte: Industrielle Geräte (= ISM-Geräte → Kap. 12)
EN 55 014 = VDE 0875 T14	Grenzwerte: Geräte für Hausgebrauch
EN 61000-3-2 = VDE 0838 T 2	EMV: Grenzwerte für Oberschwingungsströme ($I_N \leq 16A$)
b) Störfestigkeit (Senke)	
EN 50082-1 = VDE 0839 T 82-1	Fachgrundnorm: Wohnbereich
EN 50082-2 = VDE 0839 T 82-2	Fachgrundnorm: Industriebereich
EN 61000-4-2 = DIN VDE 0843 T2 = IEC 801-2 = IEC 1000-4-2	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Entladung statischer Elektrizität (= ESD)
ENV 50 140 = DIN VDE 0847 T3 = EC 801-3 = IEC 1000-4-3	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) HF-Einstrahlung
EN 61000-4-4 = DIN VDE 0847 T4-4 = IEC 801-4 = IEC 1000-4-4	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Schnelle transiente Störungen (= Burst)
EN 61000-4-5 = DIN VDE 0843 T5 = IEC 801-5 = IEC 1000-4-5	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Stoßspannung (= Surge)
ENV 50 141 = DIN VDE 0843 T6 = IEC 801-6 = IEC 1000-4-6	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Leitungsgebundene HF-Einkopplung

Tabelle 15: Normen- und Gesetzesübersicht

Für elektrische Antriebe (PDS = Power Drive Systems) gibt es eine EMV-Produktnorm im Entwurfsstatus, die alle EMV-Anforderungen abdeckt. Sie gilt sowohl für Industrie- als auch für Wohngebiete (Wohngebiete = "Erste Umgebung"; Industriegebiet = "Zweite Umgebung"). Die Norm enthält:

- Begriffe und Festlegungen (1. und 2. Umgebung/allg. und eingeschr. Erhältlichkeit/...) in Kap. 3
- Allgemeine Anforderungen (Prüfungen/Prüfbericht/Unterlagen für den Benutzer) in Kap. 4
- Störfestigkeitsanforderungen in Kap. 5
- Störaussendungsanforderungen in Kap. 6
- Mindestanforderungen zur Erfüllung von Sicherheitsmerkmalen in Kap. 7
- EMV-Methoden + Niederfrequente Phänomene Anh. A + B

Diese EMV-Produktnorm hat nach Verabschiedung Vorrang vor allen Anforderungen der Fachgrundnormen! Damit wird klar, daß die derzeit relevanten Normen in naher Zukunft für das Gebiet der elektrischen Antriebe durch diese Norm abgelöst werden.

Ableitstrom

Strom, der von Leitungen oder Geräten über Parasitärkapazitäten gegen Erde fließt.

Anwendungsbereiche

Unterteilung des Anlagen-Standorts in Industriebereich und Wohnbereich.

Ausgangsdrossel

Zur Verringerung des Störpegels der Ausgangsleitung. Die Drossel bildet mit Parasitärkapazitäten einen Tiefpaß, der die Rechteckpulse der Ausgangsspannung verrundet.

Ausgangsfiler

Siehe Sinusfilter.

Burst

Eine Folge schneller transienter Störgrößen mit steilen Flanken.

Dipol

Elektrischer Dipol: Ein Leiter bildet die Sende- und Empfangsantenne für elektrische Felder.

Magnetischer Dipol: Eine Leiterschleife bildet die Sende- und Empfangsantenne für magnetische Felder.

Elektrostatische Entladung (ESD)

Störung mit geringem Energiegehalt und hohem Frequenzgehalt, die durch Reibung unterschiedlicher Materialien aneinander entsteht.

EMV

Elektromagnetische Verträglichkeit. Anforderungen an die Geräte:

- Die Erzeugung elektromagnetischer Störungen muß so weit begrenzt werden, daß ein bestimmungsgemäßer Betrieb von Funk- und Telekommunikationsgeräten sowie sonstigen Geräten möglich ist.
- Die Geräte müssen eine angemessene Festigkeit gegen elektromagnetische Störungen aufweisen, so daß ein bestimmungsgemäßer Betrieb möglich ist (Zitat aus dem EMV-Gesetz).

EMV-Modul

Unterbaufilter mit Netzfilter und Ausgangsdrossel.

ESD

Electrostatic discharge → Elektrostatische Entladung.

Ferritkern

Zur Unterdrückung von hochfrequenten Gleichtaktstörungen.

Funkentstörung

Maßnahme zur Verringerung von Funkstörungen unter gesetzliche Grenzwerte.

Gegentaktstörung

Symmetrische Störung. Sie dominiert bei niedrigen Frequenzen, der Störstromkreis wird durch vorhandene Leitungen geschlossen.

Gleichtaktstörung

Unsymmetrische Störung. Sie wirkt sich bei hohen Frequenzen aus, der Störstromkreis wird durch Parasitärkapazitäten geschlossen.

Harmonische

Oberwellen der Grundwelle, die durch Verzerrung der sinusförmigen Grundwelle entstehen.

Hybridimpuls

→ Surge

Impedanz

Frequenzabhängiger Widerstand.

Industriebereich

Anlagen-Standort mit hohen Anforderungen an die Störfestigkeit und relativ niedrigen Anforderungen an die Störaussendung.

Kommutierungseinbrüche

Netzspannungseinbrüche beim Wechsel des Stromflusses von einer Gleichrichterdiode im Netzeingang zur nächsten.

Kopplung

- Galvanische Kopplung: Sie entsteht, wenn mehrere Geräte die gleichen Spannungsquellen, Leitungen o. ä. benutzen.
- Induktive Kopplung: Sie entsteht, wenn das Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters in einer Leiterschleife eine Störspannung induziert.
- Kapazitive Kopplung: Sie entsteht, wenn über die Parasitärkapazität benachbarter Leiter Störsignale übertragen werden.

Massebezugsfläche

Gemeinsamer Massebezug für alle Geräte einer Installation.

Netzdrossel

Zur Verminderung von Kommutierungseinbrüchen und Netzharmonischen und zur Verminderung des Einschaltstromes im Netz und zur Verbesserung der Überspannungsfestigkeit des Umrichters.

Netzfilter

Um Störspannungen vom und zum Netz fernzuhalten.

Oberschwingungen

Oberschwingungen der Grundwelle werden durch Verzerrung der Sinusform der Grundwelle erzeugt.

Parasitärkapazität

Kapazität, die z. B. zwischen zwei benachbarten Leitungen vorhanden ist. Die Leitungen bilden dabei die beiden Flächen eines Kondensators.

Schirmdämpfung

Die Schirmdämpfung gibt an, in welchem Maß Störungen durch Verwendung eines Schirms verringert werden.

Sinusfilter

Zur Funkentstörung, Geräuschfilterung und zur Reduzierung von Ableitstromspitzen bei Gruppenantrieben. Das Sinusfilter erzeugt aus den Rechteckpulsen der Ausgangsspannung eine im wesentlichen sinusförmige Spannung.

Störabstand

Dies ist der Abstand zwischen Störaussendung und Störfestigkeit.

Surge

Energiereicher Überspannungsimpuls im NF- und HF-Bereich, wie er z. B. durch Blitzschlag verursacht werden kann.

Umgebung

Anlagen-Standort, siehe Anwendungsbereich.

Wohnbereich

Anlagen-Standort mit relativ geringen Anforderungen an die Störfestigkeit und hohen Anforderungen an die Störaussendung.

A

Ableitstrom	34
Abstrahlung	33, 52
Anlagen-Standort	37
Anforderungen	37
Anwendungsbereiche	73
Ausgangsdrossel	67
Auslegung	68
Einsatz	69
Ausgangsfiler	34, 66
Auslegung	67
Einsatz	67
Funkentstörung	67
Geräuschfilterung	66
Gruppenantrieb	66

B

Beeinflussung	5
Blitz	15
Normimpuls	16
Burst	16, 72
Auswirkung	19
Beschaltung gegen	18
Normimpuls	18

C

CE-Kennzeichnung	36
------------------	----

D

Dipol	
elektrischer	31
magnetischer	31

E

Einschaltstrom	63
Empfangsantenne	31
EMV	6, 36, 71
EMV-Gesetz	71
Störung, elektromagnetische	72
EMV-Modul	69
Auslegung	69
Einsatz	69
EMV-Norm	71
EMV-Produktnorm	71
Entladung, elektrostatische	19
Auswirkung	20
Normimpuls	20
Entstörkomponenten	61
Entstörung	
kapazitiv	60
Erdung	43
nicht benutzte Leiter	49
Erdverbindung	44
ESD	19, 20, 72

F

Ferritkern	34, 60
Filterauswahl	59
Filtereinsatz	57
Einbauort	57
Erdung	58
Leitungsführung	58
Frequenzbereich	11
Frequenzschwankungen	38
Funkentstörung	67

G

Gegentaktstörung	22
Geräuschfilterung	66
Gewerbebereich	37, 74
Gleichtaktstörung	23
Gruppenantrieb	66

H

Harmonische	10
Hersteller	
nach EMV-Gesetz	72
HF-Bereich	6, 7, 9
HF-Gehalt	10
Hybridimpuls	16

I

Impedanz	6, 8, 44
Industriebereich	37, 73

K

Kabelkanal	
Verbindung	46
Kleinsignalspannungen	54
Kommutierungseinbrüche	61
Kompensationsanlagen	13, 35
Komponentenplanung	42
Konformitäts-Erklärung	36
Kontaktierung	45
Koppelmechanismen	22
Kopplung	5
galvanische	24
induktive	25
kapazitive	28

L

Leitungs-Kategorien	42
Leitungsauswahl	46
Leitungsgruppen	46, 47
Abstand	48
Kreuzen von	49
Verlegung	48
Leitungskopplung	24
Leitungstypen	47
Verhalten	47

- Leitungsverhalten
 HF-Bereich 7, 9
 NF-Bereich 7, 9
- M**
- Massebezugsfläche 49
- N**
- Netzdrossel 61
 Auswahl 64
 Einsatz 64
- Netzeinbrüche 14
- Netzfilter 64
 Auslegung 65
 Verwendung 65
- Netzharmonische 12, 62
 Auswirkung 14
 Erzeuger von 14
- Netzqualität 38
- Netzschwankungen 14
- Netzspannung 53
- Netzstörung
 Ursachen 15
- Netzstromharmonische 35
- Netzunterbrechung 14
- NF-Bereich 6, 7, 9
- O**
- Oberschwingungen 13
- Oberschwingungsanteil 38
- Oberwellen 12
- Oberwellengehalt 13
- P**
- Parasitärkapazität 8, 34
- S**
- Schaltschrank
 Geräteanordnung 40
 Signalübertragung 42
- Schaltschrank-Planung 39
- Schaltschrankaufbau 55
 Geräteanordnung 55
- Schirmanschluß 52
 Kunststoffgehäuse 52
- Schirmdämpfung 51
- Schirmung 27, 29, 31, 33, 50, 70
- Schirmwirkung 56
- Sendeantenne 31
- Signalübertragung 54
 Arten 54
- Sinusfilter 34, 66
 Auslegung 67
 Einsatz 67
 Funkentstörung 67
 Geräuschfilterung 66
 Gruppenantrieb 66
- Spannungseinbrüche 38
- Spannungsschwankungen 38
- Spannungsversorgung 53
- Störabstand 6
- Störaussendung 6, 37, 73
- Störfestigkeit 6, 37, 73
- Störmechanismen 5
 Umrichter 32
- Störpegel 5
- Störquelle 5
 Auswirkung 11
 Frequenzbereich 11
- Störsenke 5
- Störung
 asymmetrische 23
 eingestrahlte 11
 leitungsgebundene 11
 symmetrische 22
- Strahlung 21, 30
 Auswirkung 22
 mögliche Störsender 22
- Surge 16, 72
- U**
- Überspannungen 14
 transiente 38
- Überspannungsfestigkeit 62
- Umgebung 37
- V**
- Verdrillung 26
- Verkabelung 46, 53
- W**
- Welle
 elektromagnetische 30
- Wohnbereich 37, 73