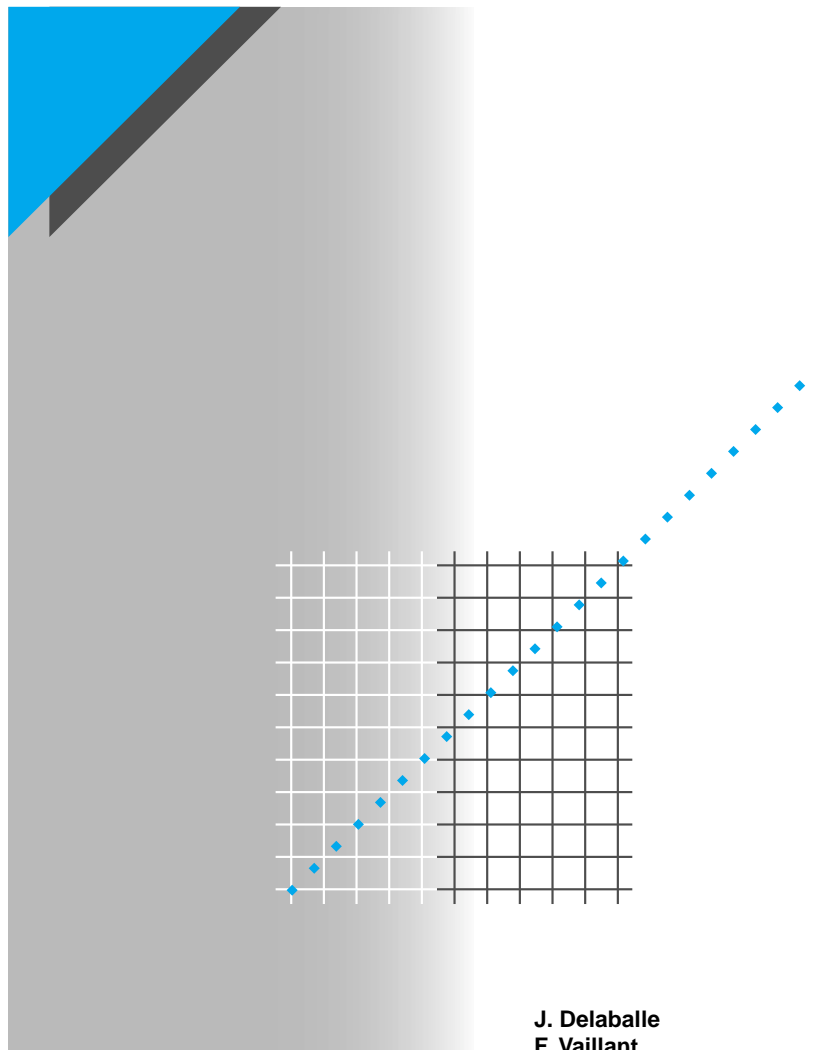


Technisches Heft Nr. 149

EMV: Elektromagnetische Verträglichkeit



J. Delaballe
F. Vaillant

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Die Technischen Hefte umfassen eine Sammlung von rund hundert Titeln, die für die Ingenieure und Techniker bestimmt sind, die weitergehende Informationen suchen, als sie in den Leitfäden, Katalogen und Datenblättern enthalten sind.

Die Technischen Hefte vermitteln Kenntnisse über die neuen elektrotechnischen und elektronischen Methoden und Verfahren. Sie ermöglichen ferner ein besseres Verständnis der in den Anlagen, Systemen und Betriebsmitteln auftretenden Erscheinungen.

Jedes Technische Heft behandelt eingehend ein bestimmtes Thema auf den Gebieten Stromversorgungsnetze, Schutzrichtungen, Leittechnik und Prozesssteuerung.

Die zuletzt erschienenen Publikationen können von der Internet-Site von Schneider heruntergeladen werden.

Adresse: **<http://www.schneider-electric.ch>**

Rubrik: **Dokumentation / Technisches Heft**

Um ein Technisches Heft oder eine Liste der verfügbaren Titel zu erhalten, wenden Sie sich bitte an die nächste Schneider-Vertretung.

Die Sammlung der Technischen Hefte ist Bestandteil der «Technischen Reihe» der Schneider-Gruppe.

Anmerkung

Der Autor lehnt jede Haftung für eine falsche Anwendung der in der vorliegenden Publikationen enthaltenen Angaben und Schemas ab, und haftet in keiner Weise für allfällige Fehler oder Auslassungen oder Folgen, die sich aus der Anwendung der in der vorliegenden Publikation enthaltenen Angaben oder Schemas ergeben können.

Die vollumfängliche oder teilweise Reproduktion eines Technischen Heftes ist nur mit Bewilligung der Direction Scientifique et Technique und nur mit dem folgenden Hinweis gestattet:

«Auszug aus dem Technischen Heft Schneider Nr. ... (anzugeben)».



EMV: Elektromagnetische Verträglichkeit



Frédéric VAILLANT

Dr. Vaillant hat 1984 an der Ecole Polytechnique diplomiert (X81) und 1987 den Titel eines Doktors der Mikroelektronik erworben (Dissertation unter CIFRE-Vertrag mit der Firma Saint Gobain). Eintritt bei Merlin Gerin im Jahr 1987. Von 1988 bis 1991 war er für die EMV-Aktivitäten des Elektronik-Kompetenzzentrums der Technischen Direktion verantwortlich.



Jacques DELABALLE

Jacques Delaballe hat als Initiator des EMV-Kompetenznetzes der Schneider-Gruppe und Leiter der EMV-Versuchslabors an der Aktualisierung dieses Technischen Heftes im August 1996 und Juli 1998 teilgenommen.

Lexikon

Elektromagnetische Verträglichkeit, EMV (Abkürzung) (IEV 161-01-07)

Befähigung eines Gerätes oder Systems, in seiner elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren, ohne selbst unzulässige elektromagnetische Störungen irgendwelcher Geräte und Systeme in dieser Umgebung zu erzeugen.

(Elektromagnetische) Störung (IEV 161-01-05)

Elektromagnetische Erscheinung, die Funktionsstörungen einer Einrichtung, eines Gerätes oder eines Systems bewirken oder lebende oder tote Materie nachteilig beeinflussen kann.

Anmerkung: Eine elektromagnetische Störung kann ein Rauschen, ein unerwünschtes Signal oder eine Änderung des Verbreitungsmilieus selbst sein.

(Elektromagnetischer) Verträglichkeitspegel (IEV 161-03-10)

Maximaler Störungspegel, dem eine Einrichtung, ein Gerät oder ein System unterworfen werden kann, das unter bestimmten Bedingungen funktioniert.

Anmerkung: In der Praxis ist der elektromagnetische Verträglichkeitspegel unbedingt der absolut maximale Pegel, denn er kann mit einer niedrigen Wahrscheinlichkeit überschritten werden.

Störpegel (in IEV 161 nicht definiert)

Unter bestimmten Bedingungen gemessener Wert einer elektromagnetischen Störung von einer bestimmten Form.

Störschwelle (IEV 161-03.14)

Maximaler Pegel einer elektromagnetischen Störung von einer bestimmten Form, die auf eine bestimmte Einrichtung, ein bestimmtes Gerät oder ein bestimmtes System einwirken kann, ohne dass diese Einrichtung, dieses Gerät oder dieses System nicht mehr mit der gewünschten Qualität funktioniert.

(Elektromagnetische)

Störungsempfindlichkeit (IEV 161-01-21)

Unfähigkeit einer Einrichtung, eines Gerätes oder eines Systems, bei Vorhandensein einer elektromagnetischen Störung ohne Qualitätseinbusse zu funktionieren.

Die **Abbildung 1** zeigt die Positionierung der verschiedenen obigen Begriffe als Pegel.

Dezibel

Einheit für den Schallpegel, die auch verwendet wird, um Amplitudenverhältnisse aufgrund der folgenden Beziehung auszudrücken:

$$X/X_0 \text{ (dB @)} = 20 \cdot \log_{10} X/X_0, \text{ wobei}$$

X = Gemessene Amplitude

X₀ = Bezugsamplitude

@ = Masseinheit für X und X₀.

Einige Beispiele sind in der untenstehenden Tabelle enthalten (siehe **Abb. 2**).

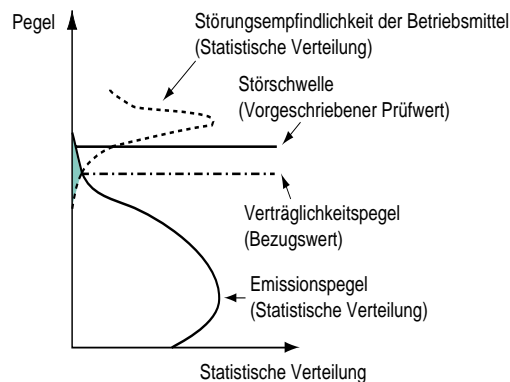


Abb. 1: Positionierung der Pegel in Bezug auf die elektromagnetische Verträglichkeit.

Amplitudenverhältnisse X/X ₀	dB
1	0
1,12	1
1,25	2
1,41	3
2	6
3,2	10
4	12
5	14
10	20
100	40
1000	60

Abb. 2: In dB ausgedrückte Amplitudenverhältnisse.

EMV: Elektromagnetische Verträglichkeit

Die EMV wird bereits vom Stadium der Fabrikationsstudien für elektrotechnische Betriebsmittel berücksichtigt. Sie muss auch bei deren Herstellung angewendet werden. Deshalb sind vom projektierenden Architekten bis zum Schaltschrankverdrahter und vom Netzstudieningenieur bis zum Installateur alle von diesem dem «Frieden» dienenden Fachgebiet betroffen, welches das Ziel hat, die harmonische Koexistenz von Betriebsmitteln sicherzustellen, die gestört werden und/oder Störungen verursachen können.

Das vorliegende, auf der langjährigen Erfahrung von Schneider Electric beruhende Technische Heft beschreibt die angetroffenen Störungen und einige praktische Lösungen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1.1 Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) ist ein Faktum, jedoch auch ein Fachgebiet	S. 4
	1.2 Die EMV ist heute unbedingt notwendig	S. 4
	1.3 Die Theorie ist kompliziert	S. 5
2. Quellen	2.1 Die Quelle muss gut bekannt sein	S. 6
	2.2 Ein Beispiel von permanenten Quellen von leitungsgeführten Störgrößen	S. 7
	2.3 Ein Beispiel von Quellen von gestrahlten Störgrößen	S. 8
3. Kopplung	3.1 Verschiedene Kopplungsarten	S. 10
	3.2 Kopplung Feld-Kabel im äusseren oder inneren Modus	S. 10
	3.3 Kopplung durch gemeinsame Impedanz	S. 12
	3.4 Kopplung Kabel-Kabel im inneren Modus oder durch Nebensprechen	S. 12
4. Opfer	4.1 Funktionsstörungen	S. 14
	4.2 Lösungen	S. 14
5. Installation	5.1 Die Installation ist ein wichtiger Faktor innerhalb der Gesamt-EMV eines Systems	S. 17
	5.2 Auslegung	S. 17
	5.3 Ausführung	S. 18
	5.4 Praktische Beispiele	S. 18
6. Normen, Prüfeinrichtungen und Prüfungen	6.1 Normen	S. 20
	6.2 Prüfeinrichtungen	S. 20
	6.3 Prüfungen	S. 21
7. Schlussfolgerung		S. 27
Anhang 1: Impedanz eines Leiters bei hoher Frequenz		S. 28
Anhang 2: Die einzelnen Teile eines Kabels		S. 29
Anhang 3: In den EMV-Labors der Schneider-Gruppe durchgeführte Prüfungen		S. 30
Anhang 4: Literaturverzeichnis		S. 32

1. Einleitung

1.1 Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) ist ein Faktum, jedoch auch ein Fachgebiet

Sie ist für Betriebsmittel oder System die Eigenschaft, ihre gegenseitigen elektromagnetischen Wirkungen auszuhalten.

Aufgrund des Internationalen Elektrotechnischen Wörterbuchs IEC 161-01-07 ist die EMV die Befähigung einer Einrichtung, eines Betriebsmittels oder eines Systems, in ihrer oder seiner elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren, ohne selbst unzulässige Störungen irgendwelcher Art in dieser Umgebung zu erzeugen.

Die EMV ist heute ein Fachgebiet, das dazu dient, die Koexistenz von Betriebsmitteln sicherzustellen, die gestört werden und/oder Störungen verursachen können.

1.2 Die EMV ist heute unbedingt notwendig

Tatsächlich ist jedes Gerät seit jeher diversen elektromagnetischen Störungen unterworfen, und erzeugt jedes elektrische Gerät mehr oder weniger davon.

Diese Störungen werden auf vielfältige Art erzeugt. Die Grundursachen sind vor allem bruske Änderungen der elektrischen Grössen Spannung oder Strom.

Die häufigsten elektrischen Störungen (siehe **Abb. 3**) auf dem Niederspannungssektor werden im Technischen Heft Nr. 141 beschrieben. Das Technische Heft Nr. 143 behandelt zudem die Störungen infolge der Schaltvorgänge von Mittelspannungs-(MS-)Geräten.

Diese Störungen können sich durch Leitung den Drähten und Kabeln entlang ausbreiten, oder durch Strahlung als elektromagnetische Wellen. Sie erzeugen unerwünschte Erscheinungen. Die Störung von Radiowellen und Interferenzen der Hochfrequenz-Emissionen in Steuerungs- und

Überwachungssystemen sind zwei Beispiele. In den letzten Jahren haben verschiedene Faktoren zusammen bewirkt, dass die Bedeutung der EMV zugenommen hat:

- Die Störungen werden immer grösser, da U und I zunehmen.
 - Die elektronischen Schaltungen werden immer empfindlicher.
 - Die Abstände zwischen empfindlichen (elektronischen) Schaltungen und störenden (Starkstrom-)Schaltungen werden immer kleiner.
- Merlin Gerin hat für die Entwicklung neuer Produkte dieses Fachgebiet eingehend studieren und zur Anwendung bringen müssen. In modernen elektrischen Betriebsmitteln befinden sich Stark- und Schwachstrom, Leistungs- und Steuerungselektronik, Schutzelektronik und elektrische Geräte hoher Leistung nahe beieinander.

Klasse	Art	Ursprung
Netzfrequenz	Spannungseinbrüche	<ul style="list-style-type: none">■ Speisungsumschaltung■ Kurzschluss■ Anlaufen von Motoren hoher Leistung
Mittelfrequenz	Oberwellen	<ul style="list-style-type: none">■ Leistungshalbleitersysteme■ Lichtbogenöfen
Hochfrequenz	Überspannungen	<ul style="list-style-type: none">■ Direkte oder indirekte Blitzschläge■ Betätigung von Steuergeräten■ Unterbrechung von Kurzschlussströmen durch Schutzgeräte
	Elektrostatische Entladungen	Entladung der von einer Person angesammelten statischen Elektrizität

Abb. 3: Häufigste elektrische Störungen.

Die EMV ist somit ein grundlegender Faktor, den es in allen Entwicklungs- und Fertigungsphasen der Produkte zu berücksichtigen gilt (siehe **Abb. 4**), jedoch auch in der Installations- und Verkabelungsphase.

Die EMV wird übrigens jetzt in den Normen berücksichtigt und gesetzlich vorgeschrieben werden.

Die Erfahrung und die Leistungen der Schneider-Gruppe beschränken sich nicht auf die Beherrschung des richtigen Funktionieren jedes elektrischen und/oder elektronischen Systems in einer normalen elektromagnetischen Umgebung. So studiert und realisiert zum Beispiel Merlin Gerin auch Ausrüstungen, die befähigt sind, den strengsten elektromagnetischen Umgebungsbedingungen - dem HEMP (Nuklearen Elektromagnetischen Impuls bei Explosionen in grosser Höhe) - zu widerstehen.

Um dies zu erreichen, erfordert die Erhöhung der Störfestigkeit bzw. Verbesserung des Verhaltens der Systeme, die Nuklearen Elektromagnetischen Impulsen ausgesetzt werden, den Einsatz der leistungsfähigsten Techniken der EMV.



Abb. 4: Ein Beispiel für die Anwendung der EMV: Eine MS-Zelle «SM6» enthält einen Leistungsschalter, der Hunderte von Ampere unter mehreren zehn Kilovolt unterbrechen kann, sowie eine programmierbare Schutz- und Steuereinheit SEPAM. Das Ganze muss jederzeit absolut betriebsbereit sein.

1.3 Die Theorie ist kompliziert

Jede Behandlung der EMV führt zum Studium eines aus drei Komponenten bestehenden Systems:

- der Quelle, dem Erzeuger der Störung,
- der Ausbreitung oder Kopplung,
- dem Opfer, das die Störung erleidet.

Obschon diese drei Komponenten nicht absolut unabhängig voneinander sind, werden sie in der Praxis als solche angenommen.

Dabei ist zu bemerken, dass die im Kapitel 5 behandelte Installation eine ausschlaggebende Rolle für die Ausbreitung von Störungen spielt.

Diese theoretische Studie ist schwierig, da man nicht darum herumkommt, die Theorie der

Ausbreitung elektromagnetischer Wellen zu studieren, die auf einer Reihe von komplizierten Differentialgleichungen - den Maxwellschen Gleichungen - beruht. Deren Auflösung ist in realen physischen Strukturen in der Regel nicht genau möglich, selbst mit sehr leistungsfähigen Computern. Auch eine angenäherte numerische Auflösung ist ebenfalls sehr schwierig.

In der Praxis müssen deshalb die Probleme der elektromagnetischen Verträglichkeit unter der Annahme einer Reihe von vereinfachenden Hypothesen, unter Verwendung von Modellen und vor allem unter ständigem Rückgriff auf Versuche und Messungen behandelt werden.

2. Quellen

2.1 Die Quelle muss gut bekannt sein

Die Kenntnis - oder besser gesagt die Ortung und Messung - der Quellen ist unerlässlich, denn sie gestattet die Festlegung der Lösungen, die anzuwenden sind, um:

- die Störung zu begrenzen (zum Beispiel durch Anordnung einer RC-Störungsschutzschaltung parallel zur WS-Spule oder einer Diode parallel zur GS-Spule eines Schützes),
- Kopplungen zu verhindern (zum Beispiel dadurch, dass zwei nicht kompatible Teile in einem Abstand voneinander angeordnet werden),
- potentielle Opfer unempfindlich zu machen (zum Beispiel durch Anordnung von Abschirmungen).

Hauptsächliche Ursachen

Jedes Gerät und jede physikalisch-elektrische Erscheinung, die eine elektromagnetische Störung durch Leitung oder Strahlung emittiert, wird als Quelle bezeichnet. Zu den hauptsächlichsten Ursachen von Störungen gehören die Verteilung elektrischer Energie, die Hertzischen Wellen, die elektrostatischen Entladungen und der Blitz.

- Bei der Verteilung elektrischer Energie entsteht ein grosser Teil der Störungen beim Öffnen und Schliessen von Stromkreisen:
 - In der Niederspannung erzeugt das Öffnen von induktiven Stromkreisen wie zum Beispiel der Spulen von Schützen, Motoren, Magnetventilen usw. an den Klemmen dieser Spulen sehr hohe Überspannungen mit einem sehr hohen Gehalt an hohen Frequenzen (einige kV und mehrere zehn oder hundert MHz),
 - In der Mittel- und Hochspannung bewirkt das Öffnen und Schliessen von Trennschaltern das Auftreten von Wellen mit sehr steiler Front (von wenigen Nanosekunden). Diese Wellen stören insbesondere Systeme, die einen Mikroprozessor aufweisen.
 - Die von Fernüberwachungs-, Fernsteuerungs-, Funk-, Fernseh- und Mobiltelefonesystemen usw. herrührenden Hertzischen Wellen sind für bestimmte elektronische Ausrüstungen Störungsquellen in der Grössenordnung von einigen Volt pro Meter. Sie werden heute immer mehr verwendet und führen dazu, diese Ausrüstungen störfest zu machen (zu schützen).
 - Schliesslich kann sich der Mensch elektrostatisch aufladen, zum Beispiel beim Gehen über einen Spannteppich.

Bei kaltem und trockenem Wetter kann sich sein Körper auf mehr als 25 kV aufladen! Jede Berüh-

rung einer elektronischen Ausrüstung bewirkt deshalb eine elektrische Entladung, die durch Leitung und Strahlung in das Gerät eindringen kann und deren kurze Anstiegszeit (von wenigen Nanosekunden) eine starke Störung darstellt.

Wichtigste Eigenschaften dieser Störungen

Diese Störungsquellen können beabsichtigt (Radiosender) oder unbeabsichtigt (Schweissmaschine) sein. Ganz allgemein unterscheiden sie sich jedoch durch die Merkmale der von ihnen verursachten Störungen:

- das Spektrum,
- die Wellenform, Anstiegszeit oder spektrale Hüllkurve,
- die Amplitude,
- die Energie.
- Das von den Störungen überdeckte Spektrum oder Frequenzband kann sehr schmal sein, wie bei den Funktelefonen, oder im Gegenteil breit, wie zum Beispiel bei einem Lichtbogenofen.

Impulsartige Störungen haben insbesondere ein sehr breites Spektrum, das bis zu etwa 100 MHz reichen kann (siehe **Abb. 5**). Zu dieser Kategorie gehören vor allem Störungen mit den folgenden Quellen:

- Elektrostatische Entladungen.
- Betätigung von Betriebsmitteln wie Relais, Trennschaltern, Schützen, Lastschaltern und Leistungsschaltern in der NS und MS/HS.
- Schliesslich auf dem eher speziellen Gebiet der Nuklearen Elektromagnetischen Impulse (NEMP).

Da die Kopplungen direkt von der Frequenz abhängen, wird in der EMV normalerweise die Frequenzdarstellung der elektromagnetischen Störungen angewendet.

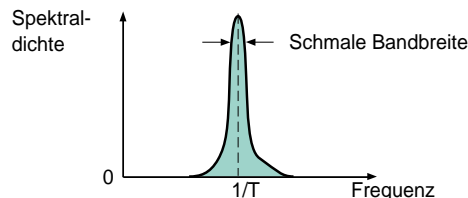
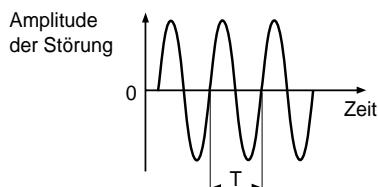
Diese Darstellung ähnelt für ein sich wiederholendes Signal seiner Fourier-Zerlegung (als Summe von Oberwellen).

- Die Wellenform ist für das zeitliche Verhalten der Störung charakteristisch, zum Beispiel sinusförmig gedämpft oder biexponential. Sie kann mit Hilfe der Anstiegszeit t_m , einer dieser Anstiegszeit äquivalenten Frequenz ($0,35/t_m$) oder einfach der Frequenz, wenn die Bandbreite schmal ist, oder schliesslich als eine Wellenlänge λ ausgedrückt werden, die mit Hilfe der Beziehung $\lambda = c/f$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit ($3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) ist, in die Frequenz f umgerechnet werden kann.

■ Die Amplitude ist der Maximalwert, der vom Signal, von der Spannung (Volt), vom elektrischen Feld (V/m) usw. erreicht wird.

■ Die Energie der Störung ist das Integral ihrer Leistung über die gesamte Dauer dieser Störung (Joule).

Fall eines Funksignals



Fall der indirekten Wirkung eines Blitzschlages

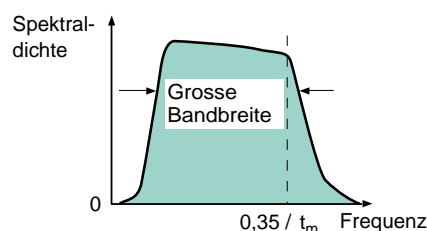
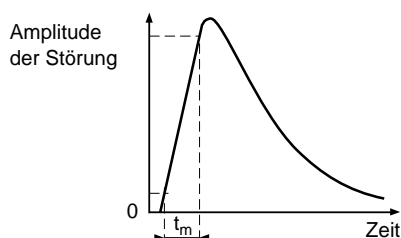


Abb. 5: Beispiele für die spektralen Eigenschaften von Störungen.

2.2 Ein Beispiel von permanenten Quellen von leitungsgeführten Störgrößen

In der Leistungselektronik sind die Störquellen vor allem Spannungstransienten, seltener Stromtransienten. Die Spannung kann sich in wenigen zehn Nanosekunden um mehrere hundert Volt ändern, was einem dU/dt von mehr als 10^9 V/s entspricht. So erfordert zum Beispiel das für die Bildung einer Sinus-

welle aus einer Gleichspannung verwendete Impulsbreitenmodulations-(PBM)-Verfahren (siehe Abb. 6) Spannungsänderungen zwischen 0 und U_{cc} (660-V-Drehstrom gleich-gerichtet) mit sehr kurzen Zeiten von wenigen Nanosekunden bis Mikrosekunden, je nach der Technologie.

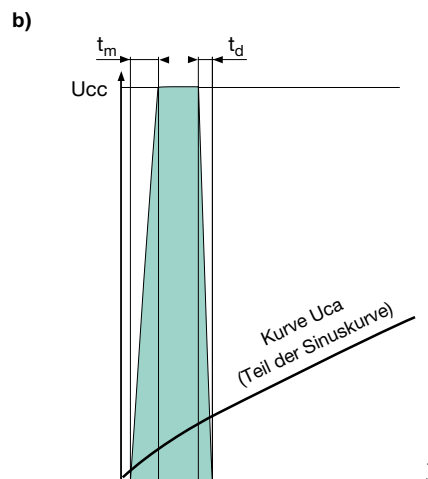
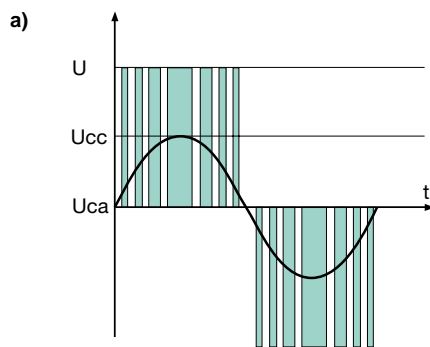


Abb. 6: Eine Störquelle in Leistungselektronik-Ausrüstungen: die Impulsbreitenmodulation.

a) Prinzip,

b) stark vergrößerter Impuls (Massstab von t in die Länge gezogen). Der Teil der Sinuskurve ist disproportioniert, da er sich über 20 ms erstreckt. $t_m \approx 2$ bis $3 t_d$ (10 ns bis 1 μ s).

Diese brüsken Spannungsänderungen verursachen mehrere Störungserscheinungen, wovon aus Erfahrung wahrscheinlich die lästigste der Stromfluss durch sämtliche Streukapazitäten ist. Wenn man nur die Streukapazität C_p berücksichtigt, beträgt der Strom $I_{MC} = C_p \cdot dV/dT$.

Es genügt somit bei den obengenannten Frontsteilheiten eine Streukapazität von 100 pF, um Ströme von mehreren hundert mA zu erzeugen. Dieser Störstrom fließt im Spannungsbezugsleiter der Elektronik (0-Volt-Kreis) und kann die Anweisungen (Daten oder Befehle) ändern, sich empfindlichen Messwerten überlagern oder sogar andere Anwender stören, indem er in das öffentliche Stromversorgungsnetz eingespeist wird.

Die Berücksichtigung von Erscheinungen dieser Art und damit die Beherrschung der EMV könnte darin bestehen, den Spannungsanstieg zu verlangsamen. Eine solche Lösung würde eine merkliche Erhöhung der Schaltverlustleistung in den Transistoren bewirken und wäre deshalb vom Gesichtspunkt der thermischen Beanspruchung sehr ungünstig. Eine andere wirksame Art und Weise, die Ströme zu reduzieren, besteht darin, die asymmetrische Impedanz (zwischen den metallischen Teilen des Bauwerks und dem Körper bzw. der Masse) zu erhöhen. Deshalb gelangen beispielsweise für die Montage von Leistungselektronik-Komponenten normalerweise zwei Lösungen zur Anwendung:

- Die Kühlkörper der Komponenten bleiben fliegend (ohne elektrische Verbindung), wenn dies die Personenschutzvorschriften zulassen (siehe **Abb. 7**).

- Die Streukapazität zwischen der Komponente und ihrem Kühlkörper wird durch eine Isolation mit niedriger Dielektrizitätskonstante herabgesetzt (siehe **Abb. 8**).

Alles Abhilfemassnahmen, die den Unterschied ausmachen zwischen einem störenden Stromrichter und einem Stromrichter der minimale Störungen in das Netz zurückspeist.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Niederpegel-Elektronik des Stromrichters gegen Störungen geschützt werden muss und wird, die

von seinen eigenen Leistungskreisen erzeugt werden.

Das Verständnis und die Beherrschung der Erscheinung an der Quelle sind für eine wirksame und wirtschaftliche Begrenzung der leitungsgeführten Störgrößen nötig. Es gibt andere Quellen von leitungsgeführten Störgrößen, die selten vorkommen, wie zum Beispiel Blitzschläge oder Schaltüberspannungen, die in der Lage sind, hohe dV/dt und dI/dt zu erzeugen. Diese Störungen erzeugen ebenfalls abgestrahlte Felder.

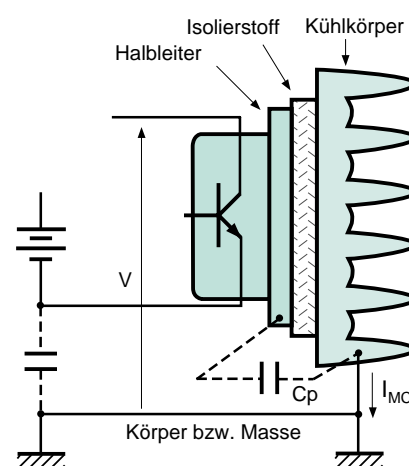


Abb. 7: Die Streukapazität des Kühlkörpers elektronischer Komponenten, ein bei der Auslegung der «Wechselrichterzweige» zu berücksichtigender Faktor.

Isolierscheibe für Gehäuse T03	Dicke (mm)	Streukapazität (pF)
Glimmer	0,1	160
Kunststoff	0,2	95
Aluminiumoxid	2	22

Abb. 8: Typische Streukapazitäten der wichtigsten, für die Montage von elektronischen Komponenten verwendeten Isolierstoffe.

2.3 Ein Beispiel von Quellen von gestrahlten Störgrößen: das Schliessen von Schaltern in Mittel- und Höchstspannungsschaltanlagen

Die Umgebung in Schaltanlagen, insbesondere für Mittel- und Höchstspannungen, kann sehr intensive impulsartige elektromagnetische Felder umfassen.

Bestimmte Schaltmanöver erzeugen in äusserst kurzen Zeiten Spannungsänderungen, welche die Nennspannungen wesentlich übersteigen. Beim Schliessen eines 24-kV-Schalters bewirken die sogenannten Vorzündungs-Überschläge in wenigen Nanosekunden (10^{-9} s) Spannungs-

schwankungen von mehreren zehn kV. Einzelheiten zu diesem Thema finden sich im Technischen Heft Nr. 153 «SF6-Leistungsschalter Fluarc und MS-Motorschutz».

In den Laboratorien von Schneider durchgeführte Messungen haben ergeben, dass im Abstand von 1 m von einer schaltenden 24-kV-Mittelspannungszelle die gedämpften impulsförmigen Sinusfelder einen Spitzenwert von 7,7 kV/m und eine Frequenz von 80 MHz erreichen. Diese

Feldstärkenwerte sind extrem hoch. Zum Vergleich erzeugt ein tragbares Funkgerät (vom Typ Walkie-Talkie) von 1 W in 1 m Abstand von seiner Antenne Felder in der Größenordnung von 3 bis 5 V/m. Diese Schwankungen breiten sich den Leitern, Sammelschienen, Kabeln und Freileitungen entlang aus. Angesichts der auftretenden Frequenzen, mit anderen Worten der Schnelligkeit der Erscheinung, sind leitende Metallkonstruktionen (wie z.B. die Sammelschienen) wahre Antennen, die Felder abstrahlen. Und die von ihnen erzeugten elektromagnetischen Felder haben Eigenschaften, die stark von der physischen Umgebung, insbesondere von den metallischen Umhüllungen (Trennwänden, Zellen) abhängen.

In gekapselten Höchstspannungsschaltanlagen sind die elektromagnetischen Felder besonders stark. SF6-isolierte Schaltanlagen sind koaxial aufgebaut und weisen deshalb einen konstanten

Wellenwiderstand auf. Bei brusken Spannungsänderungen entstehen somit im Innern der rohrförmigen Gehäuse stehende Wellen. Diese sind die Folge von Reflexionen an Impedanzsprüngen, wie sie zum Beispiel die Kapselungsdurchführungskonen darstellen. Dadurch wird die Amplitude und Dauer dieser Erscheinung erhöht.

Die elektromagnetische Umgebung der Mittel- bis zur Höchstspannung verlangt somit für die Entwicklung und Installation von Relais- und Steuer- und Überwachungseinrichtungen eingehende Untersuchungen der elektromagnetischen Verträglichkeit. Dies um so mehr, als Schaltanlagen nicht nur gestrahlte Störgrößen erzeugen, sondern auch Quellen von leitungsgeführten Spannungstransienten sind, auf die am Anfang dieses Abschnitts hingewiesen worden ist (siehe **Abb. 9**).



Abb. 9: SEPAM und Masterpact-Steereinheit, von Schneider entwickelte und aufgrund von EMV-Studien gebaute MS- und NS-Schutz-, Steuer- und Überwachungsgeräte mit digitaler Elektronik.

3. Kopplung

3.1 Verschiedene Kopplungsarten

Unter Kopplung muss man Verbindung, Durchgang oder Übertragung von elektromagnetischen Störungen von der Quelle zum Opfer verstehen.

Die Kopplung wird durch den sog. Kopplungsfaktor k_f gekennzeichnet, der in dB (zum Beispiel -75 dB) ausgedrückt wird und als Wirkungsgrad der Übertragung einer Störung von der Quelle zum potentiellen Opfer definiert werden kann ($k_f = 20 \log A_{\text{empfangen}}/A_{\text{gesendet}}$, wobei A die Amplitude der Störung ist).

Die Definition dieses Faktors ist für die Kenntnis der EMV wichtig, denn je niedriger er ist (d.h. je

größer sein Absolutwert in Dezibel ist), desto schwächer ist die vom Opfer effektiv empfangene Störung und desto besser ist somit die EMV. Normalerweise werden die folgenden drei Kopplungsarten unterschieden:

- Kopplung Feld-Kabel im äusseren und inneren Modus.
- Kopplung durch gemeinsame Impedanz.
- Kopplung Kabel-Kabel im inneren Modus oder durch Nebensprechen

3.2 Kopplung Feld-Kabel im äusseren und inneren Modus

Ein elektromagnetisches Feld kann durch Kopplung auf jede drahtförmige Struktur und somit auf jedes Kabel übertragen werden und dort im äusseren Modus (d.h. zwischen den Leitern und dem Körper) oder im inneren Modus (d.h. zwischen den Leitern) Spannungen erzeugen. Diese Kopplungen werden Feld-Kabel-Kopplungen genannt, wobei es sich um die Antennenwirkung der drahtförmigen Strukturen bzw. der Leiterbahnen gedruckter Schaltungen usw. handelt.

■ Kopplungen im äusseren Modus sind somit solche, die Störungen vom Spannungs- oder Stromtyp im äusseren Modus bewirken.

Eine im äusseren Modus durch Leitung übertragene Spannung (U_{MC}) ist eine Spannung, die an alle aktiven Leiter angelegt wird. Sie wird auf den Körper oder die Erde (in der Elektrotechnik der Normalfall) angegeben. Deshalb erfolgen die Isolationsfestigkeitsprüfungen im äusseren Modus der Niederspannungs-Leistungsschalter zwischen

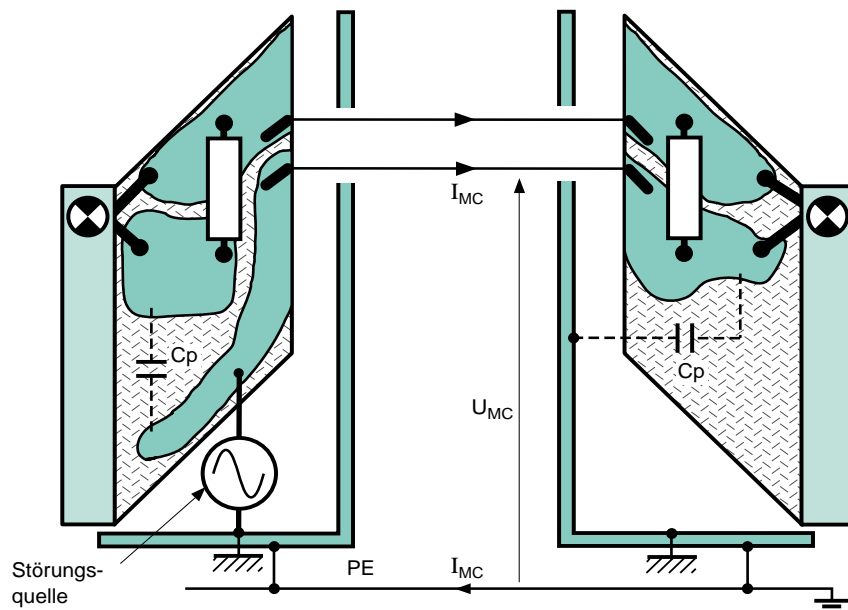


Abb. 10: Spannung und Strom im äusseren Modus zwischen zwei Relais eines Niederspannungsgeräte-Abteils einer Mittelspannungszelle.

den miteinander verbundenen Phasen und Erde. Ein im äusseren Modus fließender Strom (I_{MC}) ist ein Strom, der alle aktiven Leiter in der gleichen Richtung durchfließt (siehe **Abb. 10**). Der von einem Blitzschlag in eine NS-Leitung erzeugte Strom ist ein im äusseren Modus fließender Strom.

■ Kopplungen im inneren Modus betreffen Spannungen und Ströme im klassischen Sinn, zum Beispiel zwischen zwei Phasen eines Leistungsschalters oder zwischen zwei Drähten, die ein Messsignal zur Elektronik leiten.

Die Gleichungen, welche die Kopplung zwischen einem elektromagnetischen Feld mit beliebiger Wellenimpedanz und einer drahtförmigen Struktur – die ebenfalls beliebig sein kann – bestimmen, sind sehr kompliziert.

In den meisten Fällen können sie weder analytisch noch numerisch gelöst werden.

Eine dieser Kopplungen, die einfach ist und zu den am häufigsten vorkommenden gehört, kann jedoch analytisch ausgedrückt werden. Es handelt sich um die Kopplung zwischen der magnetischen Komponente eines elektromagnetischen Feldes und einer aus Leitern gebildeten Schleife mit der Fläche S (siehe **Abb. 11**).

Die magnetische Komponente H des Feldes induziert in Serie in der Schleife eine Spannung von $e = \mu_0 S \, dH/dt$, wobei μ_0 die magnetische Feldkonstante ($4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$) ist.

So tritt zum Beispiel in einer Mittelspannungsschaltanlage in einer Schleife (eines Drahtes oder Kabels) mit einer Fläche von 100 cm^2 im Abstand

von 1 m von einer Zelle (siehe **Abb. 12**), die einem Impuls-Feld von $5,5 \text{ kVeff/m}$ (im Labor gemessener Wert) ausgesetzt wird, transitorisch eine in Serie induzierte Spannung von 15 V auf.

Diese Gesetzmässigkeit wird als gültig erachtet, solange die grösste Abmessung der Schleife nicht grösser ist als ein Zehntel der Wellenlänge der Störung.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass eine solche Schleife (siehe **Abb. 12**) im «Relais-Abteil» mit den gelb/grünen Drähten sehr schnell erreicht wird, wenn diese sternförmig mit dem Körper verbunden sind.

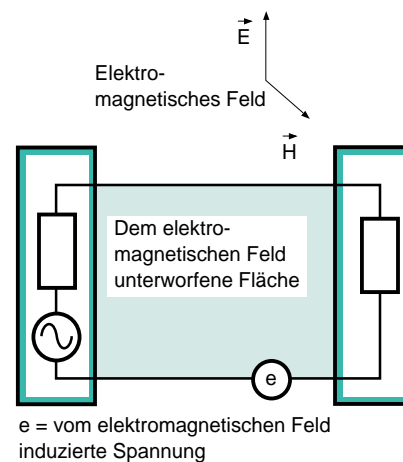


Abb. 11: Beispiel einer Kopplung Feld-Kabel im inneren Modus.

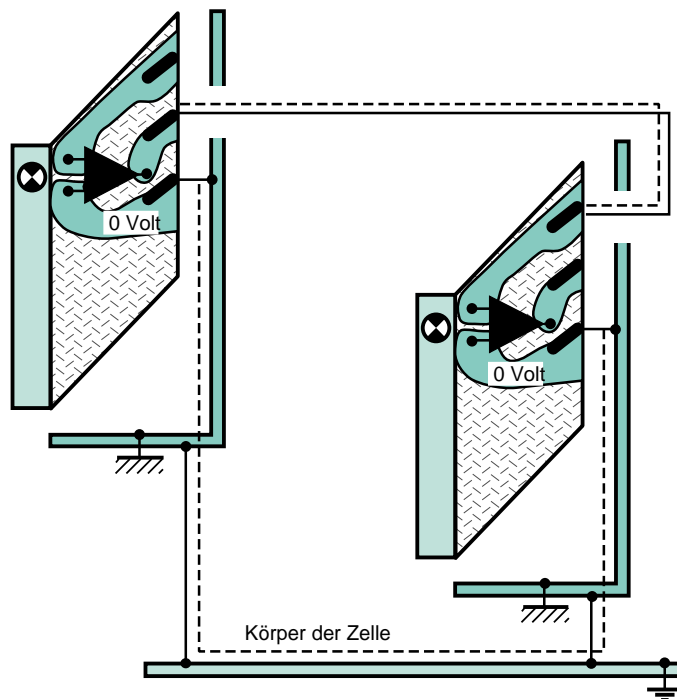


Abb. 12: Beispiel einer Körperschleife in einem Niederspannungsgeräte-Abteil einer Mittelspannungszelle.

3.3 Kopplung durch gemeinsame Impedanz

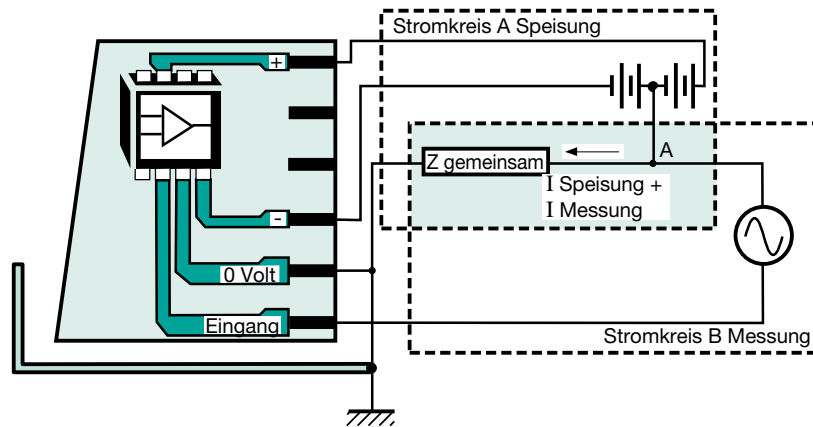


Abb. 13: Die vom Operationsverstärker durchgeführten Messungen sind mit einem Fehler behaftet, weil ein Störstrom im (Speisungs-) Stromkreis A genügt, um im (Mess-) Stromkreis B Störspannungen zu erzeugen.

Wie der Name besagt, ist die Kopplung durch gemeinsame Impedanz das Ergebnis des Vorhandenseins einer gemeinsamen Impedanz von zwei oder mehr Stromkreisen. Diese gemeinsame Impedanz kann die Körperverbindung, das Erdungsnetz, das Stromverteilungsnetz oder der Rückleiter von mehreren Signalen in derselben Schwachstromverbindung usw. sein.

Das Beispiel der **Abb. 13** soll dazu dienen, die Bedeutung dieser Kopplungsart zu verstehen. Ein Störstrom im Stromkreis A in der Größenordnung von einigen zehn mA genügt, um im Stromkreis B Störspannungen von mehreren Volt zu erzeugen. Der Messkreis sollte als Bezugspunkt den Punkt M haben und nicht den Punkt A. Dies kann bei einer Elektronik mit integrierten Schaltungen, die mit Spannungen derselben Größenordnung arbeiten, sicher störend sein.

In diesem Beispiel kann die gemeinsame Impedanz die wenigen Meter eines der beiden Stromkreise A und B gemeinsamen Kabels sein. Die Störspannung hat dabei den Wert $U_c = I_a Z_c$, wobei:

- I_a : Störstrom
 - Z_c : Gemeinsame Impedanz (siehe **Abb. 14**)
- Der Wert der gemeinsamen Impedanz ist in der Niederfrequenz in der Regel sehr niedrig. Für ein

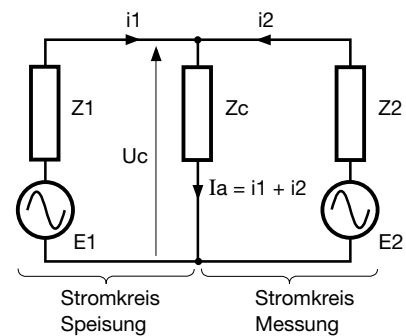


Fig. 14: Allgemeines Impedanz-Schema.

Erdungsnetz erfordert zum Beispiel die Sicherheit einen Mindestquerschnitt der Schutzleiter je nach Sternpunktbehandlung. Somit ist der Wert der Impedanz bei 50 Hz zwischen zwei Punkten des Körpernetzes immer niedriger als 1Ω .

Es muss jedoch hier auf den Wert derselben Impedanz bei den charakteristischen Frequenzen der weiter oben beschriebenen Störungsercheinungen hingewiesen werden. In diesem Fall nimmt diese Impedanz wesentlich höhere Werte von mehreren $k\Omega$ oder noch mehr an (siehe Anhang 1).

3.4 Kopplung Kabel-Kabel im inneren Modus oder durch Nebensprechen

Das Nebensprechen ist eine Kopplungsart, die der Kopplung Feld-Kabel gleicht. Und je nachdem, ob sie eine Spannungs- oder eine Stromänderung zur Ursache hat, wird sie kapazitives Nebensprechen oder induktives Nebensprechen genannt.

Eine brüske Spannungsänderung zwischen einem Draht und einem Körper oder zwischen zwei Drähten (siehe **Abb. 15**) erzeugt ein Feld, das auf kurze Distanz mit bestimmten Vereinfachungen als ein im wesentlichen elektrisches Feld betrachtet werden kann. Dieses Feld kann

durch Kopplung auf eine andere drahtförmige Struktur übertragen werden, die parallel dazu ist. Das ist kapazitives Nebensprechen.

Auf dieselbe Weise erzeugt eine Stromänderung in einem Draht oder Kabel ein elektromagnetisches Feld, das mit denselben Vereinfachungen als ein rein magnetisches Feld betrachtet werden kann. Dieses Feld kann durch Kopplung auf ein Aderpaar übertragen werden und dort eine Störspannung induzieren. Das ist induktives Nebensprechen (siehe Abb. 16).

Das kapazitive und induktive Nebensprechen erfolgt effektiv, sobald Leiter nahe beieinander parallel verlaufen. Deshalb ist es in allen Kabelträgern oder -kanälen möglich, und dort insbesondere zwischen Leistungskabeln, die im inneren Modus HF-Störungen übertragen, und Aderpaaren eines Netzes, das digitale Signale überträgt. Zudem ist es je wirkungsvoller, desto länger die Strecke ist, über welche die Adern parallel verlaufen, desto näher die Adern oder Aderpaare beieinander liegen und desto höher die Frequenz der Störungserscheinungen ist. Zum Beispiel für das kapazitive Übersprechen und mit den Begriffen der Abbildung 15, kann der Spannungskopplungsfaktor wie folgt ausgedrückt werden:

$$\frac{U_N}{U_1} = \frac{j 2\pi f \left[\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{20}} \right]}{j 2\pi f + \left[\frac{1}{R (C_{12} + C_{20})} \right]}$$

wobei:

- U_1 Quellenspannung.
- U_N durch Kopplung induzierte Störspannung.
- C_{12} Übertragungskapazität zwischen den beiden Drähten, proportional zur Länge der Drähte und zu einem angenäherten Koeffizienten gleich $\log[1+(h/e)^2]$ worin h der Abstand zwischen den beiden Drähten des Paares und e der Abstand zwischen den Paaren ist.
- C_{20} Streukapazität zwischen zwei Drähten des gestörten Paares.
- R Lastimpedanz des gestörten Paares.

In dieser Formel ist der erste Ausdruck im Nenner in der Regel gegenüber dem zweiten Ausdruck vernachlässigbar. Man kann deshalb in erster Näherung schreiben:

$$\begin{aligned} \left| \frac{U_N}{U_1} \right| &\approx 2\pi f \frac{C_{12}}{R (C_{12} + C_{20})} \\ &= 2\pi f R C_{12} \\ &= \omega R C_{12} \end{aligned}$$

Um ein praktisches Beispiel zu rechnen, nehmen wir zwei über 10 m parallel verlaufende Aderpaare mit $h = 1$ cm, $e = 2$ cm und $R = 1$ k Ω . Die Berechnung ergibt für ein 1-MHz-Signal einen Kopplungsfaktor von -22 dB, d.h.:

$$\frac{U_N}{U_1} = \frac{1}{12}$$

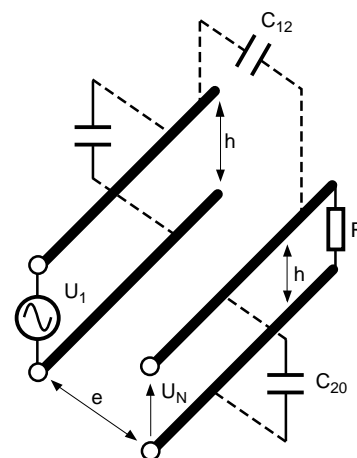


Abb. 15: Eine plötzliche Änderung der Spannung U_1 zwischen zwei Drähten erzeugt ein Feld, das auf kurze Distanz als vorwiegend elektrisch erachtet werden kann und in der Lage ist, in einem parallelen Drahtpaar eine Spannung U_N zu induzieren. Diese Kopplungsart wird kapazitives Nebensprechen genannt.

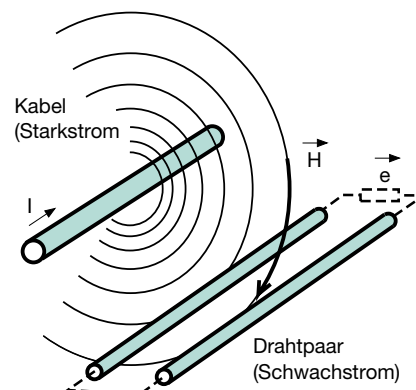


Abb. 16: Eine Änderung des Stroms in einem Kabel erzeugt ein Feld, das auf kurze Distanz als rein magnetisch erachtet werden kann und somit in einer Drahtschleife eine Störspannung induziert. Diese Kopplungsart wird induktives Nebensprechen genannt.

In Wirklichkeit werden kapazitive und induktive Kopplungen dieser Art durch die Verwendung von verdrehten oder sogar abgeschirmten Paaren wesentlich reduziert.

4. Opfer

Das Opfer innerhalb der «Trilogie» Quelle/Kopplung/Opfer stellt alle Betriebsmittel dar, die gestört werden können. Es handelt sich im allgemeinen um Ausrüstungen, die einen elektronischen Teil enthalten, der

wegen des Vorhandenseins von elektromagnetischen Störungen, die in der Regel von ausserhalb der Ausrüstung kommen, nicht richtig funktioniert.

4.1 Funktionsstörungen

Diese zerfallen in vier Klassen:

- Permanent und messbar,
- Zufällig, sich nicht wiederholend und sich beim Auftreten von Störungen ereignend,
- Zufällig, sich nicht wiederholend und nach dem Auftreten der Störung bestehen bleibend,
- Ausfall der Ausrüstung (Zerstörung von Komponenten).

Diese vier Typen sind für die Dauerhaftigkeit eines Fehlers kennzeichnend, charakterisieren jedoch seine Schwere nicht.

Die Schwere eines Fehlers ist ein Kriterium, das

von der Funktionalität und der Kritikalität jeder einzelnen Ausrüstung abhängt.

Bestimmte Fehler können temporär zulässig sein, wie zum Beispiel der vorübergehende Verlust einer Anzeige, andere sind unzulässig, zum Beispiel wenn Sicherheitseinrichtungen ihre Aufgabe nicht mehr erfüllen.

4.2 Lösungen

Diverse konstruktive Massnahmen bieten die Möglichkeit reduzierter Kosten für Betriebsmittel, die ein gutes Verhalten gegenüber elektromagnetischen Störungen zeigen. Diese Massnahmen betreffen:

- die Gestaltung der gedruckten Schaltungen (ihre funktionale Aufteilung, ihre Auslegung, ihre Konnektik),
- die Auswahl der elektronischen Komponenten,
- die Verbindung der Massen,
- die Verkabelung.

Diese Optionen betreffen zahlreiche Beteiligte und müssen deshalb im Stadium des Studiums gewählt werden, um Mehrkosten zu vermeiden, die bei Änderungen nach der Auslegung oder sogar nach der Markteinführung immer sehr hoch sind.

Die Anwendung aller dieser Massnahmen verlangt ein Know-how, das über die Filterung und Abschirmung hinausgeht, die oft zur nachträglichen Erhöhung der Störfestigkeit vorgesehen werden, auch wenn deren Wirksamkeit in keiner Weise in Zweifel gezogen wird.

Gestaltung der gedruckten Schaltungen

Bei der Auslegung der Karten sind einige Regeln zu beachten. Diese Regeln betreffen die funktionelle Aufteilung der Karte und den Verlauf der Leiterbahnen.

Bereits bei der Anordnung ist es möglich, die Kopplungen zwischen den Komponenten infolge ihrer Nähe zu reduzieren. So reduziert zum Beispiel die Gruppierung der Schaltungen nach ihrer Art wie z.B. digital, analog und Starkstrom in Funktion ihrer Störungsempfindlichkeit deren Interferenzen.

Andererseits hat der Verlauf der Leiterbahnen einer gedruckten Schaltung einen grossen Einfluss auf die Störungsempfindlichkeit einer Karte. Ein auf verschiedene Weise verwirklichtes elektrisches Schema hat eine Störungsempfindlichkeit, die um einen Faktor zwischen 1 und bis zu 100 schwanken kann. Ein Verlauf der Leiterbahnen nach englischem Muster (siehe **Abb. 17**) mit minimalem Kupferverbrauch reduziert deren Abstrahlung und Empfindlichkeit.

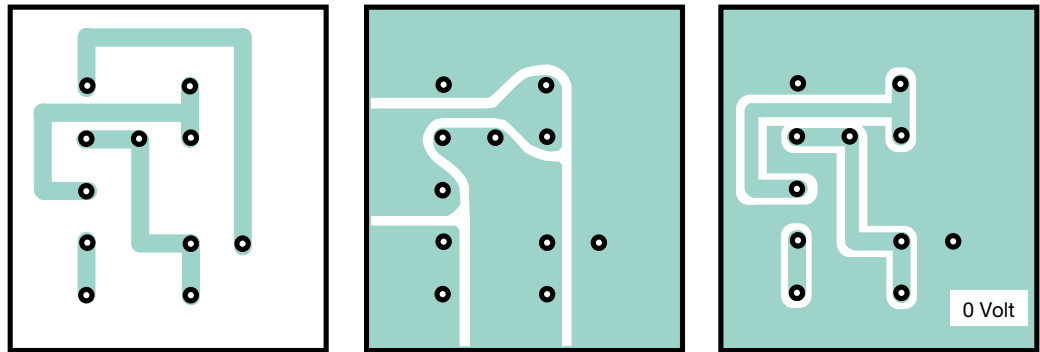
Auswahl der elektronischen Komponenten

Zahlreiche Komponenten ermöglichen einen wirksamen Schutz gegen leitungsgeführte Störgrössen. Die Wahl dieser Komponenten hängt von der Leistung der zu schützenden Stromkreise (Speisung, Steuerung usw.) und von der Art der Störungen ab. Deshalb wird gegen Störungen im äusseren Modus eines Leistungskreises ein Transformator eingesetzt, wenn diese Störungen niederfrequent (<1 kHz) sind, während bei hohen Frequenzen ein Filter vorgezogen wird.

Die Tabelle der **Abbildung 18** enthält eine nicht erschöpfende Liste von Schutzkomponenten. Nicht alle sind gleichwertig. Ein Filter schützt nicht gegen Überspannungen und ein Überspannungsableiter beseitigt keine HF-Störungen.

Realisierung von Umhüllungen

Die Realisierung einer leitenden Umhüllung (Abschirmung) um empfindliche Betriebsmittel herum ist eine Möglichkeit, um sie gegen elektromagnetische Felder zu schützen.



Feiner Verlauf

Verlauf nach englischem Muster

Verlauf mit Masse

Abb. 17: Der Verlauf der Leiterbahnen kann die Störungsempfindlichkeit einer Karte reduzieren, sei es durch Minimierung der Impedanzen (Verlauf nach englischem Muster) oder durch Reduktion der Kopplungen infolge des elektromagnetischen Feldes (Verlauf mit Masse).

Typ	Beispiele	Anwendungen
Überspannungsableiter	Funkenstrecke, Blitzableiter, Überspannungssicherung Varistor, Zener-Diode	Installation, Speisung, Steuerung Elektronische Schaltungen
Filterungs-Komponenten	Transformatoren, Induktivitäten, Kondensatoren, Filter	Speisung, Steuerung (Installationen und elektronische Schaltungen)
Abschirmungs-komponenten	Geflechte, Körper, Masse, abgeschirmte Kabel, Höchstfrequenzverbindungen, Kontaktfinger	Informationsübertragung (Schrank in gestörter Umgebung)

Abb. 18: Liste von Schutzkomponenten.

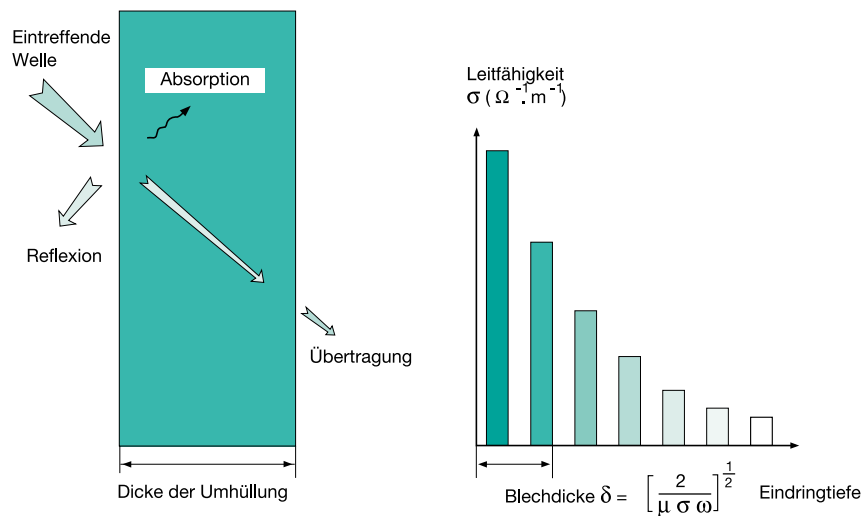


Abb. 19: Abschirmwirkung einer Metallumhüllung

Um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen, muss die Dicke des verwendeten leitenden Materials grösser sein als die Eindringtiefe bei den betreffenden Störfrequenzen (siehe **Abb. 19**). Angesichts einer Störung sehr hoher Frequenz oder eines elektrischen Feldes kann mit Erfolg ein Leitlack verwendet werden. Aber nur eine Umhüllung aus Werkstoffen mit hoher Permeabilität kann in der Niederspannung Magnetfelder zurückhalten.

Verbindung der Körper

Auf diesem Gebiet ist die elektrische Verbindung zwischen den einzelnen Teilen des Gehäuses äusserst wichtig. Diese Verbindung muss sorgfältig durchgeführt werden, zum Beispiel indem die Kontaktbereiche von jeglichem Anstrich freigehalten werden, jedoch auch durch Verwendung von breiten und kurzen Litzen (um deren Impedanz möglichst niedrig zu halten).

Verkabelung

Zudem ist die Abschirmung der Kabel (siehe Kabel-Vokabular) eine Verlängerung der leitenden Umhüllung von empfindlichen Betriebsmitteln. Deshalb wird sie möglichst kurz mit dieser verbunden, und dies wenn möglich über den gesamten Umfang als Schutz gegen hochfrequente Störungen.

Genau wie die Kopplung zwischen einem elektromagnetischen Feld und einer drahtförmigen

Struktur (siehe Abschnitt 3) ist es sehr schwierig, die sehr komplizierte Theorie der Abschirmung von Kabeln im Rahmen des vorliegenden Dokumentes zu behandeln. Im Literaturverzeichnis sind einige diesbezügliche Nachschlagewerke aufgeführt.

Die Berücksichtigung aller dieser Auslegungs- und Ausführungsregeln bietet die Möglichkeit, dass ein Produkt oder System eine unter Berücksichtigung seines Einsatzortes genügende Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Störungen aufweist.

Diese Störfestigkeit kann jedoch nur experimentell durch Messungen nachgewiesen werden, mit deren Hilfe die Wirksamkeit der einzelnen Lösungen quantifiziert werden kann. So werden zum Beispiel bei Merlin Gerin die Prototypen der elektronischen Auslöser für Leistungsschalter einer Reihe von strengen Prüfungen unterworfen, die den maximalen Störungen entsprechen, denen sie unterworfen werden können.

Das Ziel dieser Prüfungen ist die Überprüfung, ob die Auslöser nicht ungewollt auslösen und ob der Leistungsschalter im richtigen Moment sicher öffnet. Die Produkte-Normen umfassen heute diese Anforderungen, wie zum Beispiel die folgenden Normen:

- IEC 947-2 für industrielle Leistungsschalter
- IEC 1131-2 für speicherprogrammierbare Steuerungen.

5. Installation

5.1 Die Installation ist ein wichtiger Faktor innerhalb der Gesamt-EMV eines Systems

Die beiden vorhergehenden Kapitel haben die Bedeutung aufgezeigt, welche die Installation sowohl in bezug auf ihre Auslegung als auch in bezug auf ihre Ausführung für die Erscheinungen der EMV haben kann.

5.2 Auslegung

Bei der Projektierung und Implementierung können insbesondere zwei Faktoren die EMV beeinflussen: die Wahl der Betriebsmittel und deren Anordnung (siehe **Abb. 20**).

Denn der erste Faktor betrifft zugleich die Wahl der Quellen und der Opfer. Ein für eine bestimmte Funktion gewähltes Gerät kann eine mehr oder weniger starke Quelle von Störungen und/oder diesen unterworfen sein.

Wenn zum Beispiel zwei Geräte nahe beieinander in Betrieb stehen müssen, müssen sie:

- entweder eine schwach störende Quelle mit einem «gewöhnlichen» (mittelmässig empfindlichen) Opfer kombinieren,

- oder im Gegenteil eine «gewöhnliche» (mittelmässig störende) Quelle mit einem wenig empfindlichen Opfer kombinieren,

- oder mindestens einen Kompromiss zwischen diesen beiden Extremen bilden.

Und der direkt vom ersten Faktor abhängige zweite Faktor besteht darin, die festgelegten Betriebsmittel je nach ihren entsprechenden Eigenschaften so zu positionieren, dass sie die Bedürfnisse der EMV erfüllen.

Es ist leicht zu verstehen, dass diese Auswahl dann die Kosten der Betriebsmittel sowie ihrer Installation berücksichtigen muss.

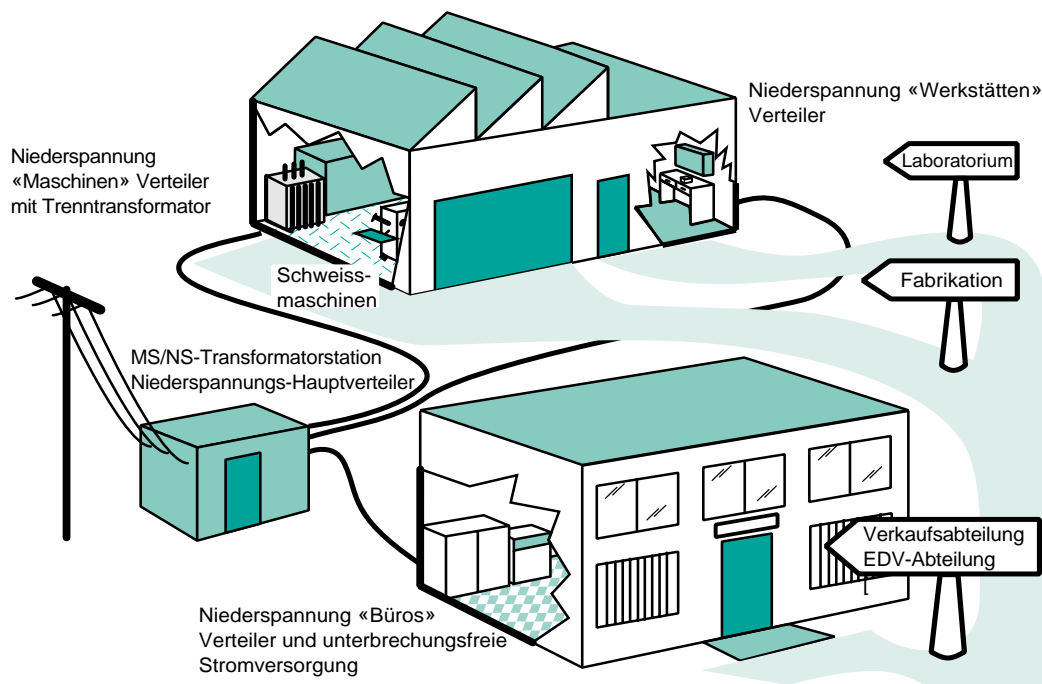


Abb. 20: Beispiel für die Anordnung elektrischer Betriebsmittel unter Berücksichtigung der EMV.

5.3 Ausführung

Die Ausführung der verschiedenen Teile einer elektrischen oder elektronischen Anlage unterliegt den bereits in den vorangehenden Kapiteln genannten Prinzipien. In der Praxis müssen die verschiedenen nebeneinander existierenden Kopplungsarten studiert werden, um sie zu reduzieren, um die Ziele der EMV zu erreichen.

Hierzu müssen verschiedene Lösungen oder Verfahren eingesetzt werden:

- Vermaschung der Körper- und Erdungskreise und Erdungsnetze.
- Elektrische Trennung der Stromkreise.
- Wohldurchdachte Verkabelung.

5.4 Praktische Beispiele

Vermaschung der Körper- und Erdungskreise und Erdungsnetze

Heute reagieren Betriebsmittel empfindlich auf sehr schwache Energien. Sie enthalten eine für hohe Frequenzen empfindliche Elektronik und sind miteinander verbunden. Kopplung durch gemeinsame Impedanz können deshalb sehr häufig auftreten. Um diese zu verhindern, ist ein Erdungsnetz mit möglichst gutem Potentialausgleich, genauer gesagt ein vermaschtes Erdungsnetz, unerlässlich.

Diese Lösung ist eine der ersten Schutzmassnahmen, die gegen Störungen zu ergreifen sind. Somit sind in einem Fabriknetz alle Schutzleiter (PE) untereinander und mit den bestehenden Metallkonstruktionen zu verbinden (siehe **Abb. 21**).

Ebenso sind in einer Ausrüstung alle Körper bzw. Massen und Gehäuse der Geräte mit breiten und kurzen, bei HF eine möglichst niedrige Impedanz aufweisenden Anschlüssen (Drähten oder Litzen) möglichst direkt mit einem vermaschten Körpernetz zu verbinden.

Die Verdrahtung eines elektrischen Schalt-schranks ist ein typisches Beispiel dafür. Alle Körper müssen miteinander verbunden werden. Zu diesem Thema ist eine Änderung zu vermerken: Das Prinzip der sternförmig verbundenen

Körper, das manchmal für gegenüber dem «50-Hz-Summer» empfindliche analoge elektrische Ausrüstungen angewendet worden ist, wurde zugunsten der vermaschten Netze, die gegen Störungen der heutigen digitalen Einrichtungen, Schutzrelais und Steuerungs- und Überwachungssysteme wesentlich wirksamer sind, aufgegeben.

Elektrische Trennung der Stromkreise

Diese Technik besteht darin, die Energiequellen (in der Regel 50 Hz oder 60 Hz) voneinander zu trennen. Das Ziel ist die Verhinderung der Störung einer auf leitungsgeführte Störgrößen empfindliche Ausrüstung durch andere Ausrüstungen, die an dieselbe Stromversorgung angeschlossen sind. Das Prinzip: eine auf Störungen empfindliche und eine störende Ausrüstung haben zwei Stromversorgungen, die durch für die Störfrequenzen hohe Impedanzen voneinander getrennt sind.

Transformatoren (nicht jedoch Autotransformatoren) sind wirksame Trennglieder, insbesondere für niedrige Frequenzen. MS/NS-Transformatoren, Trenntransformatoren und alle Eingangsübertrager elektronischer Schaltungen begrenzen die Ausbreitung von leitungsgeführten Störgrößen.

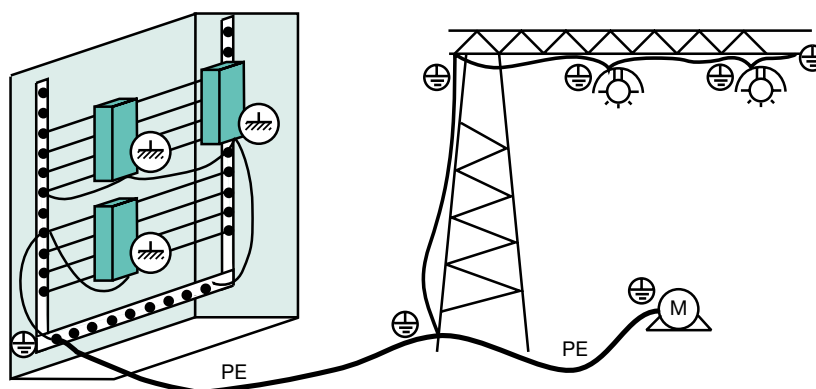


Abb. 21: Die Vermaschung der Körper- und Erdungskreise und Erdungsnetze ist oft vermischt.

Manchmal ist es nötig, ein Trennfilter anzuordnen, um HF-Störungen herauszuseiben. Wenn zudem die empfindliche Ausrüstung eine gesicherte Stromversorgung bei einem Netzausfall benötigt, kann sie durch eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) gespeist werden, insofern diese USV die notwendigen Trenntransformatoren umfasst.

Wohldurchdachte Verkabelung

Schliesslich werden die drei weiter oben genannten Kopplungsmechanismen begrenzt, wenn die Verkabelung nach den folgenden Regeln ausgeführt wird:

- Da natürlich aus wirtschaftlichen Gründen nicht alle Stromkreise voneinander getrennt werden können, müssen die Kabel nach Kategorien zusammengefasst werden. Die Führung der einzelnen Kategorien muss physisch getrennt erfolgen. Vor allem müssen auf der einen Seite die Starkstromkabel zusammengefasst werden, und auf der anderen Seite die Schwachstromkabel (Telefon, Steuerung usw.).

Wenn es die Anzahl Kabelgräben, -roste oder -kanäle zulässt, sollten Starkstromkabel, deren Strom bei 230 V einige Ampere übersteigt, und Schwachstromkabel über zwei getrennte Wege geführt werden. Andernfalls muss zwischen den beiden Kategorien ein Mindestabstand von rund 20 Zentimetern eingehalten werden (siehe **Abb. 22**). Zwischen diesen beiden Kategorien muss jedes gemeinsame Teil sorgfältig vermieden werden.

Stromkreise, die Niederpegel-Informationen zu übertragen haben, müssen soweit wie möglich einen eigenen Rückleiter (0 Volt) haben, um Kopplungen durch gemeinsame Impedanz zu vermeiden. Insbesondere brauchen die meisten Bus-Kommunikationssysteme ein ausschliesslich für den Informationsaustausch reserviertes Aderpaar.

- In jedem Fall muss die Gesamtfläche einer Schleife und damit der Abstand zwischen einem Leiter und seinem Rückleiter möglichst klein gehalten werden. Für die Informationsübertragung ermöglicht die Verdrillung der Leitungen eine weitere Verminderung der Anfälligkeit für Kopplungen im inneren Modus. Deshalb sind verdrehte Paare gegenüber nicht-verdrillten Paaren vorzuziehen.

- Messkabel und Kabel, die Niederpegel-Informationen übertragen, müssen wenn möglich abgeschirmt sein, wobei die Abschirmung, wenn der Lieferant nichts anderes angibt, an möglichst vielen Stellen mit dem Körper verbunden werden muss.

- Kabelkanäle müssen wenn immer möglich aus Metall bestehen. Diese Kabelkanäle sind mit sicherem elektrischem Kontakt, zum Beispiel mittels Schrauben, untereinander und mit dem vermaschten Körpernetz zu verbinden.

- Die empfindlichsten Kabel, wie zum Beispiel Messkabel, sind in einer Ecke anzuordnen. Dadurch erhalten sie einen erhöhten Schutz gegen elektromagnetische Strahlungen. Ihre Abschirmung, falls vorhanden, ist in kurzen Abständen mit dem Kabelkanal zu verbinden.

Die Verwendung von vorgefertigten Stromschiennen und -verteilungen, in denen die Kabel richtig angeordnet und angeschlossen sind, wie zum Beispiel das Produkt Canalis von Telemecanique mit eingebautem Fernsteuerkabel, ist deshalb in jeder Beziehung zu empfehlen.

Alle diese für die Vermeidung von EMV-Problemen sehr wirksamen Massnahmen erfordern im Projektierungsstadium einen kleinen Mehraufwand. Spätere Änderungen einer bereits bestehenden Installation wegen zu starken elektromagnetischen Kopplungen kosten hingegen wesentlich mehr.

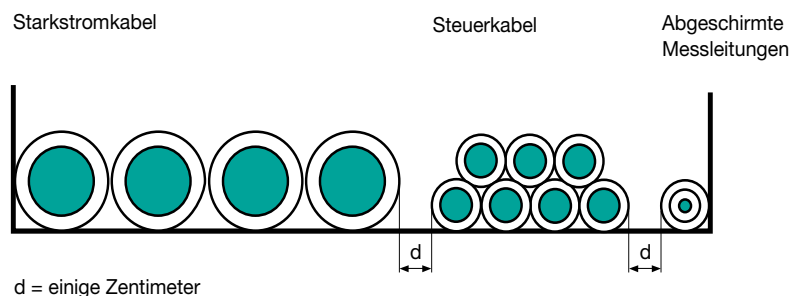


Abb. 22: Beispiel einer Kabelführung.

6. Normen, Prüfeinrichtungen und Prüfungen

6.1 Normen

Schon seit geraumer Zeit regeln normative Texte die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln.

Die ersten Bestimmungen sind vom Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR) herausgegeben worden. Sie begrenzen im wesentlichen das Emissionsvermögen der einzelnen Geräte, um in erster Linie das Senden und den Empfang von Radiowellen zu schützen.

Die nationalen Komitees und die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) haben normative Texte herausgegeben, welche die gesamte EMV, Emission und Störfestigkeit, auf dem zivilen Sektor umfassen.

Normative Texte über die EMV im Militärsektor befinden sich in GAM EG 13, was Frankreich anbetrifft, und in den MIL-STD-Normen für die USA.

Die stürmische Entwicklung der elektromagnetischen Verträglichkeit und der Zusammenschluss Europas haben die zivile normative Landschaft verändert.

Zu diesem Thema hat der Rat der Europäischen Gemeinschaften im Mai 1989 eine Europäische Richtlinie mit der Bezeichnung 89/336/EWG herausgegeben. Sie betrifft die Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten in bezug auf die elektromagnetische Verträglichkeit.

Die Europäische Richtlinie befasst sich nicht nur mit der Begrenzung der Störungen auf der Emissionsseite, sondern auch mit dem Mindestverhalten gegenüber elektromagnetischen Störungen bzw. der Störfestigkeit. Somit bezieht sich diese Richtlinie auf Normen, welche die maximalen Störpegel festlegen.

Das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) hat technische Komitees gebildet. Diese haben die bestehenden Normen gesammelt, die der Anwendung der Richtlinie entsprechen, und jene redigiert, die fehlten.

Die Arbeiten des TC 210 stützten sich auf die

Praktiken in der Industrie.

Zum Thema der Emissionmessungen waren während einiger Zeit die deutschen Normen VDE 871 und VDE 875 massgebend. Heute haben sich die neueren europäischen normativen Texte EN 55011 und EN 55022 durchgesetzt. Für die EMV ist die Norm IEC 61000 (früher IEC 1000) massgebend. Sie umfasst mehrere Teile:

- 61000-1: Anwendung - Definitionen
- 61000-2: Umgebung - Verträglichkeitsstufen
- 61000-3: Störschwelle
- 61000-4: **Prüfung der Störfestigkeit**

Der letztere Teil umfasst mehrere Abschnitte:

- 1 - Allgemeines
- 2 - Entladung statischer Elektrizität
- 3 - Hochfrequente elektromagnetische Felder
- 4 - Schnelle transiente elektrische Störgrößen
- 5 - Blitzstossspannungen
- 6 - Leitungsgeführte Störgrößen > 9 kHz
- 7 - Oberschwingungen und Zwischenharmonische
- 8 - Magnetfelder bei 50 Hz
- 9 - Impulsförmige Magnetfelder
- 10 - Gedämpft schwingende Magnetfelder
- 11 - Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen
- 12 - Gedämpfte Schwingungen
- usw.

Diese entsprechen genau den in der elektrotechnischen Welt von heute auftretenden typischen Störungen. Die entsprechenden Prüfungen sind auf der ganzen Welt anerkannt und werden von Schneider für ihre Produkte angewendet. Der folgende Abschnitt beschreibt die den normativen Texten entsprechenden Prüfungen etwas eingehender.

6.2 Prüfeinrichtungen

Wie bereits erklärt, verlangt die Einhaltung der Vorschriften Messungen und Prüfungen, die ihrerseits in den Normen festgelegt sind.

Die elektromagnetische Verträglichkeit ist in der Schneider-Gruppe schon vom Fachgebiet her seit langem ein wichtiges Thema. Seit den 70er Jahren stehen spezielle Einrichtungen wie zum Beispiel ein Faradaykäfig im Einsatz. Das Versuchszentrum von Schneider verfügt seit vielen Jahren über zwei EMV-Laboratorien.

Diese Laboratorien sind die unerlässlichen

Instrumente für die praktische Umsetzung und Verbreitung der Kompetenz auf diesem Gebiet. Sie bieten auch Kunden ausserhalb des Unternehmens ihre Dienstleistungen an.

Dabei führen sie Prüfungen auf allen Gebieten der EMV durch:

- Elektrostatische Entladungen
- Unempfindlichkeit gegen leitungsgeführte oder gestrahlte Störgrößen
- Emission von leitungsgeführten oder gestrahlten Störgrößen

Wie jede Messung müssen die Messungen der elektromagnetischen Verträglichkeit sowohl zeitlich als auch räumlich reproduzierbar sein, was bedeutet, dass zwei in zwei verschiedenen Labors durchgeführte Messungen dieselben Resultate ergeben müssen.

Auf diesem Fachgebiet bedeutet dies sehr ausgedehnte Einrichtungen und somit hohe Investitionen, und ein strenges Qualitätsmanagement. Das Qualitätsmanagement der EMV-Laboratorien von Schneider beruht auf Qualitätsmanagement-Handbüchern und auf einer Reihe von Verfahrensanweisungen. Diese Verfahrensan-

weisungen betreffen sowohl die Kalibrierung und den Anschluss an die Normale als auch die einzelnen Messungsarten. Die Liste der normativen Prüfungen, welche die Laboratorien durchführen können, befindet sich im Anhang 3.

Zur Konkretisierung dieses Qualitätsmanagements:

- Das Laboratorium von Grenoble ist vom COFRAC (COmité FRançais d'ACcreditation) akkreditiert.
- Das Laboratorium von Nanterre ist von der ASFEA (Association des Stations d'Essais Français d'Appareils électriques) akkreditiert.

6.3 Prüfungen

Elektrostatische Entladungen

Diese Prüfungen sind dazu bestimmt, die Störfestigkeit von Karten, Geräten und Systemen gegenüber elektrostatischen Entladungen zu testen.

Die Ursache von elektrostatische Entladungen ist eine Ansammlungen von elektrischen Ladungen durch eine Person, zum Beispiel wenn sie über einen isolierenden Bodenbelag geht. Wenn diese Person einen Leiter berührt, der über eine Impedanz mit einem elektrischen Körper verbunden ist, entlädt sie sich innert Sekundenbruchteilen über diese Impedanz. Mehrere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Wellenform dieser Entladung von den Eigenschaften der Quelle und den Entladstromkreisen abhängt, jedoch auch von anderen Parametern, wie zum Beispiel der relativen Luftfeuchtigkeit (siehe **Abb. 23**) und der Annäherungsgeschwindigkeit des geladenen Körperteils, hier die Hand der Person, usw.

Diese Untersuchungen haben zu typischen Entladungsprüfungen geführt. Sie werden mit Hilfe einer Quelle (Pistole), die den Menschen simuliert, in verschiedenen Konfigurationen durchgeführt (siehe **Abb. 24**). Die Entladungen erfolgen

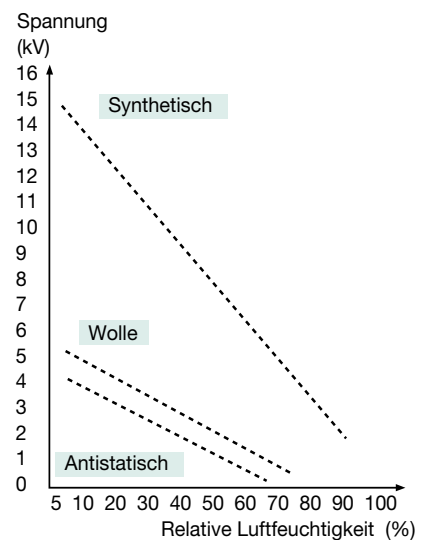


Abb. 23: Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf die elektrostatische Entladungsspannung in Funktion des Bodenbelages.

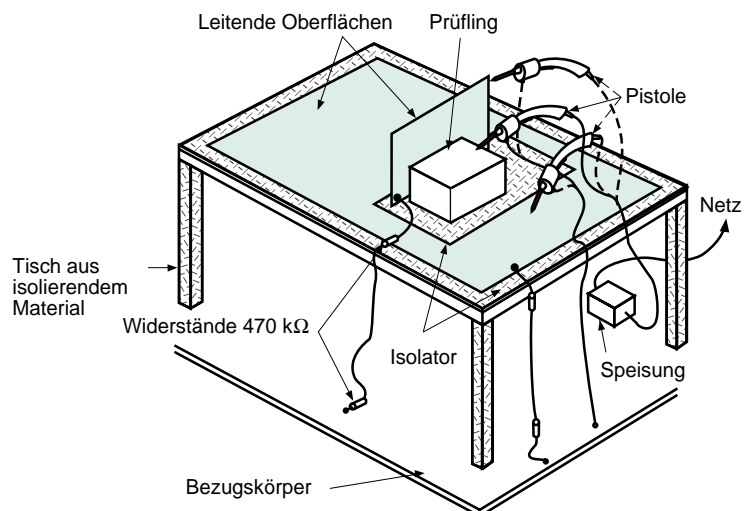


Abb. 24: Messbank für elektrostatische Entladungsmessungen gemäss Festlegung in der Norm IEC 61000-4-2.

gegen alle zugänglichen Teilen des zu prüfenden Gerätes und gegen seine unmittelbare Umgebung und werden genügend oft wiederholt, um ein statistisches Verhalten zu sicherzustellen. Diese Messungen erfordern somit eine spezielle Messbank.

Alle diese Prüfungen werden in der Norm IEC 61000-4-2 für die Stärkegrade der Tabelle der **Abbildung 25** eingehend beschrieben.

Unempfindlichkeit gegen leitungsgeführte Störgrößen

Diese Prüfungen bieten die Möglichkeit, das Verhalten eines Gerätes gegenüber Störungen zu bestimmen, die über die externe Verdrahtung dieses Gerätes (Eingänge, Ausgänge und Speisung) zugeführt werden. Wie bereits erklärt, sind diese Störungen je nach der Art und Verlegung der Kabel verschieden.

Die in diesen Prüfungen verwendeten elektromagnetischen oder transitorischen Signale haben typische Werte (Amplitude, Wellenform, Frequenz usw.).

An verschiedenen Orten durchgeführte Störungsmessungen haben im wesentlichen zu drei typischen Prüfungen geführt:

■ Die erste Prüfung, nach IEC 61000-4-4, ist für Störungen charakteristisch, die von der Betätigung von Steuergeräten erzeugt werden.

Sie berücksichtigt die schnellen elektrischen Transienten. Diese Impulse wiederholen sich mit einer Frequenz von 3 Hz. Jeder Impuls besteht aus rund hundert Transienten im Abstand von etwa 100 ms. Jede Transiente hat eine sehr steile Front von 5 ns und eine Amplitude von mehreren kV, die vom verlangten Stärkegrad abhängt (siehe **Abb. 26 und 27**).

Alle Kabel können schnellen Transienten unterworfen werden. Störungen dieser Art lassen sich effektiv sehr leicht koppeln, zum Beispiel durch Nebensprechen (siehe Kapitel «Kopplung»), weshalb es genügt, dass ein Kabel diese Störung erzeugt, damit alle Kabel, die parallel verlaufen, dieser unterworfen sind.

Die Prüfung erfolgt somit an allen Kabeln. Im äusseren Modus an den Kabeln, bei denen die

Störung sowieso induziert wird (d.h. den anderen Kabeln als die Speisekabel), im äusseren und im inneren Modus an den Kabeln, die an das Netz angeschlossen sind. Die Störungen werden entweder durch direkte kapazitive Kopplung in die geprüften Kabel eingespeist, wenn es

Stärkegrad gemäss Norm	Prüfspannung in kV ± 10 %	
	Entladung in Luft	Entladung durch Berührung
1	2	2
2	4	4
3	8	6
4	15	8

Abb. 25: Elektrostatische Entladungsspannungen, die von den Betriebsmitteln gemäss IEC 61000-4-2 ausgehalten werden müssen.

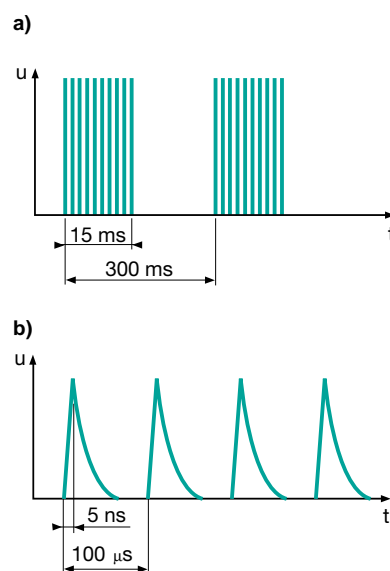


Abb. 26: Verlauf der Impulse (a) und der schnellen Transienten, aus denen sie bestehen (b).

Stärkegrad gemäss Norm	Angewendete Prüfspannung (± 10%) in kV ohne Funktionsstörung (Ausgang mit offenem Stromkreis).	
	Speisung	Ein- und Ausgangsleitungen (Signal-, Daten- und Steuerleitungen)
1	0,5	0,25
2	1	0,5
3	2	1
4	4	2
x	Spezial	Spezial

Der Stärkegrad x wird zwischen dem Hersteller und Kunden vertraglich vereinbart.

Abb. 27: Tabelle der in IEC 61000-4-4 festgelegten Stärkegrade.

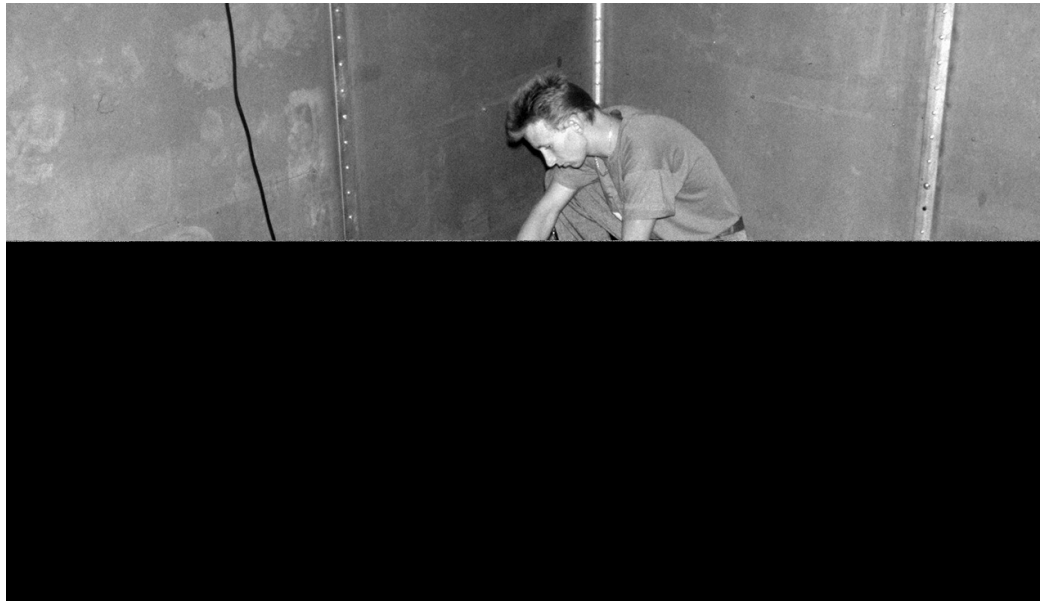


Fig. 28 : Messung der Unempfindlichkeit einer Isis-Zentrale gegen schnelle Transienten (Test IEC 61000-4-4) in einem Faradaykäfig. Im Bild sichtbar sind: der vom Laboranten bediente Störungsgenerator, der Holzkoffer mit der Kopplungszange und die an das Batibus-Netz angeschlossene Isis-Zentrale (links).

sich um Speisekabel handelt, oder mit Hilfe einer Kopplungszange, wobei zwei Metallplatten die Sekundärkabel umschliessen (siehe Abb. 28). Das geprüfte Gerät darf während einer bestimmten Zeit (1 min) keine Funktionsstörungen aufweisen.

Diese Prüfung ist die aussagekräftigste Prüfung der Störfestigkeit eines Betriebsmittels, da schnelle Transienten am häufigsten auftreten.

■ Die zweite durchgeführte Prüfung ist für die sekundären Auswirkungen eines Blitzschlages charakteristisch. Sie stellt die nach einem Blitzschlag in eine Leitung im NS-Netz fließenden leitungsgeführten Störgrößen dar (Norm IEC 61000-4-5).

Für diese Störungen ist eine Energie charakteristisch, und sie äussern sich zudem als

□ Spannungswelle 1,2/50 μ s, wenn die vom geprüften Gerät dargestellte Impedanz hoch ist, wobei die Amplitude mehrere kV erreichen kann. Siehe **Abbildung 29** für die von der Norm vorgesehenen Prüfspannungen.

□ Stromwelle 8/20 μ s, wenn diese Impedanz niedrig ist, wobei die Amplitude mehrere kA erreicht.

Die Anstiegszeit dieser Störungen ist tausendmal länger als diejenige der schnellen transienten Störgrößen (siehe **Abb. 26**) und von der Grössenordnung einer Mikrosekunde. Die Prüfkopplung erfolgt kapazitiv im inneren und äusseren Modus mit den entsprechenden Stärken. Das Vorgehen ist ähnlich wie bei der Prüfung der schnellen Transienten.

Stärkegrad gemäss Norm	Prüfspannung (kV) mit Ausgang mit offenem Stromkreis
1	0,5
2	1
3	2
4	4
x	Spezial

Der Stärkegrad x wird zwischen dem Hersteller und Kunden vertraglich vereinbart.

Abb. 29: Pegel in Funktion des in der Norm IEC 61000-4-5 festgelegten Stärkegrades (Impedanz der Quelle = 2 Ω).

Das Gerät darf keine Funktionsstörungen aufweisen.

■ Die dritte, nach der Norm IEC 61000-4-6 durchgeführte Prüfung bezieht sich auf die Vorschriften in bezug auf die Unempfindlichkeit der Betriebsmittel gegen HF-Störungen in Kabeln im Bereich von 150 kHz bis 80 MHz (oder sogar 230 MHz).

Die Störungsquellen sind elektromagnetische Felder, welche die gesamte Länge der an diese Betriebsmittel angeschlossenen Kabel beeinflussen und dort Spannungen und Ströme induzieren können.

Bei der Prüfung werden die Störungen über Kopplungs-Entkopplungs-Schaltungen, deren Impedanz im äusseren Modus gleich 150 Ω ist und somit dem Wellenwiderstand der meisten Kabel ent-

spricht, auf die Kabel gekoppelt. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass bei der Prüfung die Störungen nur auf ein Kabel auf einmal angewendet werden, während in Wirklichkeit das elektromagnetische Feld alle angeschlossenen Kabel erfasst. Dies ist ein wesentlicher Unterschied, der nicht zu vermeiden ist. Denn es würde die Prüfung sehr kompliziert und äusserst teuer machen, wenn man alle HF-Signale gleichzeitig auf alle Kabel zu koppeln wollte.

Wenn sich Kopplungs-Entkopplungs-Schaltungen nicht eignen, zum Beispiel wenn die Stromstärke zu hoch ist, werden Kopplungsanzgen verwendet.

Die von der Norm IEC 61000-4-6 vorgesehenen HF-Störungen haben Pegel von 1, 3 oder 10 Volt. Sie sind mit einem Modulationsgrad von 80% mit einer Sinuswelle von 1 kHz amplitudenmoduliert.

Vor der Prüfung wird das einzuspeisende Signal, um den gewünschten Störpegel zu erhalten, kalibriert und gespeichert, und hierauf auf die normal an die geprüfte Einrichtung angeschlossenen Kabel angewendet.

Unempfindlichkeit gegen gestrahlte Störgrössen

Die Prüfungen der Unempfindlichkeit gegen gestrahlte Störgrössen dienen dazu, Gewähr für das richtige Funktionieren der Geräte zu bieten, wenn sie elektromagnetischen Feldern ausgesetzt werden.

Da diese Prüfungen besonders umgebungsempfindlich sind, sind die für zuverlässige und reproduzierbare Messwerte erforderlichen Einrichtungen und Fachkenntnisse sehr umfangreich.

Die Umgebung muss genügend «sauber» sein, damit keine Beeinflussungen durch Wellen aller Art auftreten, denn (wie im Kapitel «Quelle» gezeigt worden ist) sind elektromagnetische Felder von mehreren V/m, wie sie zum Beispiel von tragbaren Funkgeräten erzeugt werden, häufig vorhanden, oder impulsförmige Felder von noch grösserer Amplitude in industrieller Umgebung. Deshalb werden diese Prüfungen in einem Faradaykäfig durchgeführt, dessen Wände mit Hyperfrequenzdämpfern bedeckt sind. Solche Räume werden als reflexfrei bezeichnet, wenn sämtliche Wände unter Einschluss des Bodens bedeckt sind, und halb-reflexfrei, wenn der Boden nicht bedeckt ist.

In diesen Käfigen werden die Felder je nach der Art des Feldes, den Frequenzbereichen und der Polarisation durch verschiedene Antennen erzeugt (siehe **Abb. 30**). Diese Antennen werden von einem Wobbelgenerator gespeist, dessen Signal über einen Breitband-Leistungsverstärker läuft.

Die erzeugten Felder werden mit isotropen Breitband-Sensoren kalibriert. Die schematische Darstellung der **Abbildung 31** zeigt eine typische Prüfanordnung.

Die Normen geben die Störschwellen an, wobei die Norm IEC 61000-4-3 Prüfungen im Fre-

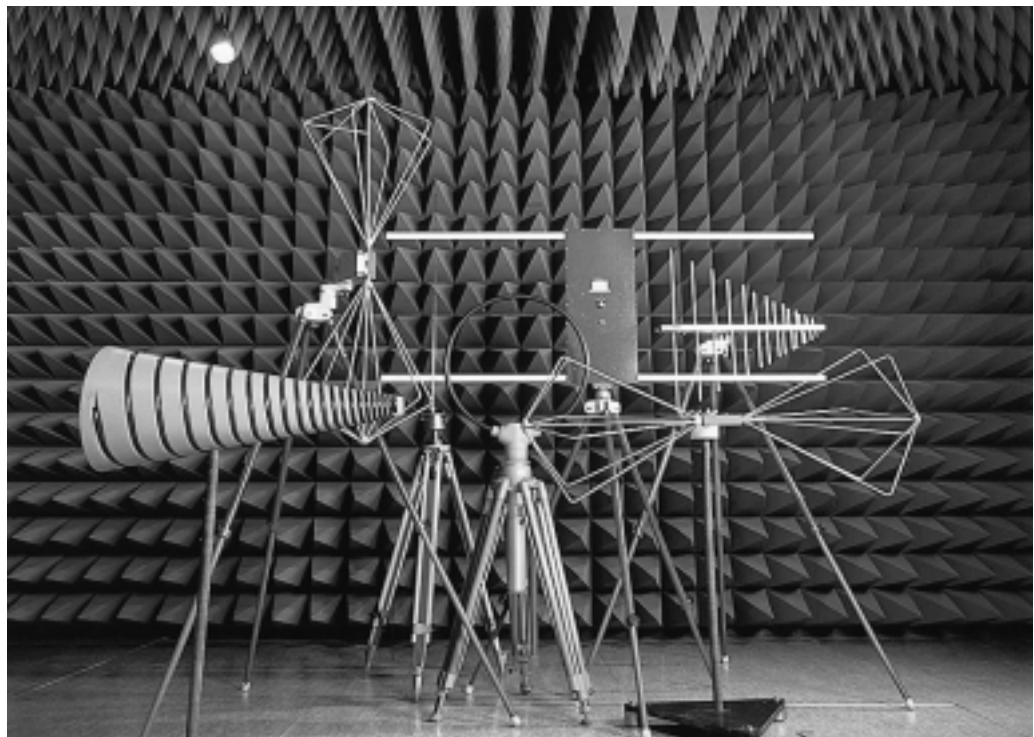


Abb. 30: Halb-reflexfreier Faradaykäfig und einige Antennen eines EMV-Laboratoriums von Schneider.

quenzband 80 MHz - 1000 MHz und drei Stärkegrade (1, 3 und 10 V/m) vorsieht.

Zur allgemeinen Information muss darauf hingewiesen werden, dass die in den Laboratorien von Schneider möglichen Prüfbedingungen wesentlich strenger sind. Der überdeckte Frequenzbereich geht von 10 kHz bis 2 GHz. Zudem können zwischen 27 MHz und 2 GHz Geräte mit Feldern von bis zu 30 V/m mit einem Modulationsgrad von 80% geprüft werden. Was die Störfestigkeit in impulsförmigen elektromagnetischen Feldern anbetrifft, wie sie in der Nähe von Hochspannungsanlagen auftreten können, gibt es noch keine normierte Messverfahren. Entsprechende Prüfungen an Ausrüstungen von Schneider erfolgen deshalb nach internen Verfahrensanweisungen.

Emission von leitungsgeführten Störgrößen

Die Messungen der Emission von leitungsgeführten Störgrößen quantifizieren den Pegel der

vom geprüften Gerät in die angeschlossenen Kabel gespeisten Störungen. Der Pegel dieser Störungen hängt eng mit der an die Kabel angeschlossenen Hochfrequenzlast zusammen, wobei das geprüfte Gerät als Quelle betrachtet wird (siehe **Abb. 32**).

Um reproduzierbare Messungen durchzuführen und vor allem Probleme im Zusammenhang mit dem Wellenwiderstand des Netzes zu vermeiden, erfolgen die Messungen der Emission von leitungsgeführten Störgrößen mit Hilfe einer Leitungsimpedanz-Stabilisierungsschaltung. Ein Messgerät, effektiv ein Hochfrequenzempfänger, wird an diese Leitungsimpedanz-Stabilisierungsschaltung angeschlossen und dient zur Quantifizierung des Pegels für jede Frequenz. Der Pegel der eingespeisten Störungen darf die in den Normen festgelegten Grenzwerte, die vom und von der Umgebung abhängen, nicht übersteigen. Die Aufnahme der **Abbildung 33** zeigt das an einem Niederspannungs-Hauptverteiler erhalte-

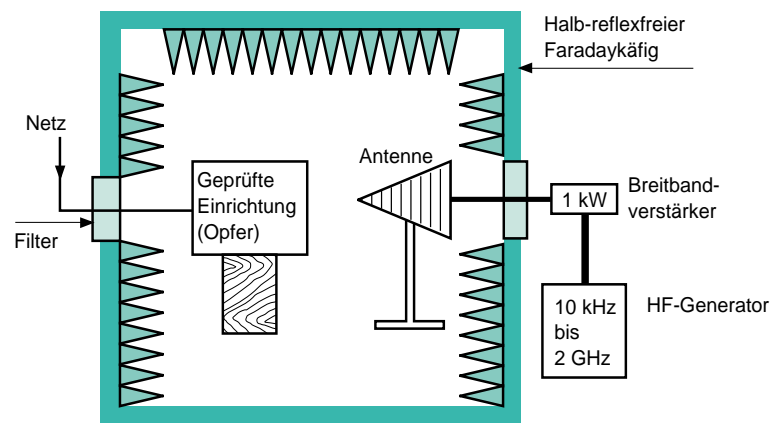


Abb. 31: Typische Versuchsanordnung in einem Faradaykäfig. Die Messungen erfolgen in zwei Stufen:
1 - Kalibrierung des Feldes für einen bestimmten Frequenzbereich und ohne Prüfling,
2 - Prüfung der Störfestigkeit des Prüflings.

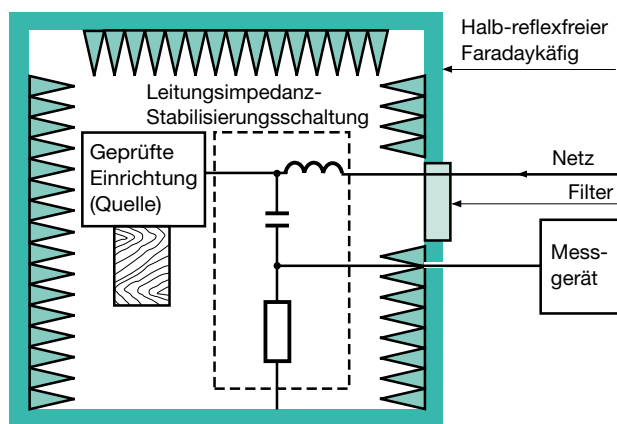


Abb. 32: Anordnung für die Messung der Emission von leitungsgeführten Störgrößen. Der Prüfling wird als Quelle erachtet und die Leitungsimpedanz-Stabilisierungsschaltung als eine Last.

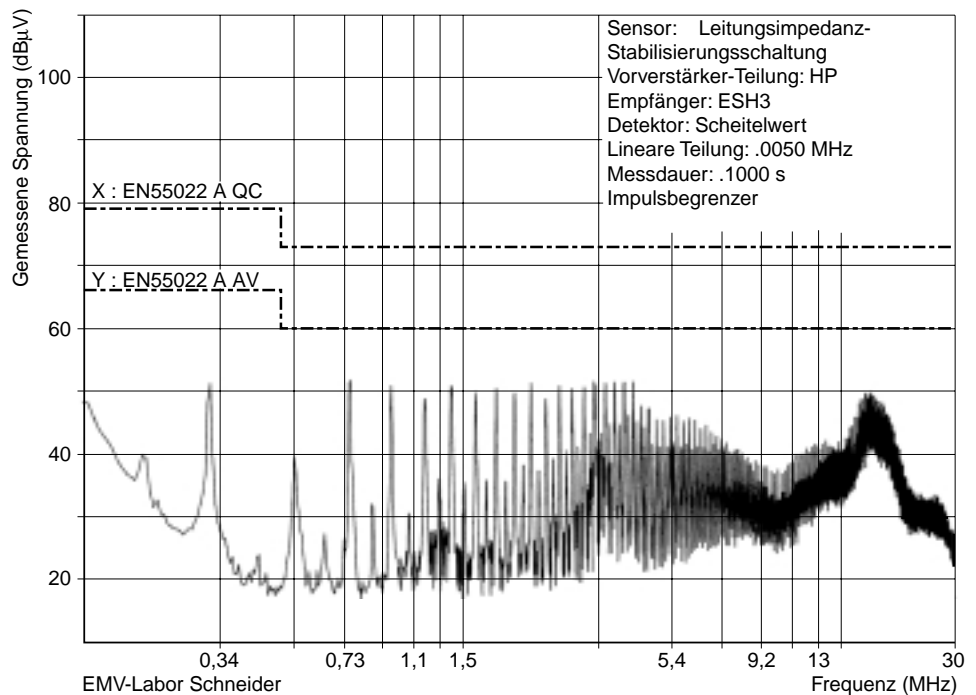


Abb. 34: Messwerte der Hochfrequenzemissionen einer Informationsverarbeitungszentrale eines Niederspannungs-Hauptverteilers.

ne Resultat und dessen Vergleich mit der Norm EN 55 022.

Emission von gestrahlten Störgrößen

Die Messungen der Emission von gestrahlten Störgrößen quantifizieren den Pegel der von einem Gerät als elektromagnetische Wellen emittierten Störungen. Wie bei der Prüfung der Unempfindlichkeit gegen gestrahlte Störgrößen dürfen die Messwerte der Emission von gestrahlten Störgrößen nicht durch bereits bestehende Wellen (Mobilfunk, Radio usw.) verfälscht werden. Ebenso dürfen diese Messwerte nicht durch Reflexion der Wellen an Hindernissen in der Umgebung verändert werden. Diese beiden Bedingungen widersprechen sich, weshalb zwei Messmethoden angewendet werden.

Die erste Methode besteht darin, sich in ein Freifeld zu begeben, das heisst in ein Feld ohne irgendwelches Hindernis innerhalb eines bestimmtem Umkreises. Das Umfeld ist also so, wie es ist.

Die zweite Methode besteht darin, sich in einen Faradaykäfig zu begeben. Die Reflexionen an den Wänden des Käfigs werden absichtlich durch Hyperfrequenzdämpfer reduziert (siehe **Abb. 30**).

Das Umfeld wird also absolut beherrscht.

Die Laboratorien von Schneider wenden die zweite Methode an. Sie hat den grossen Vorteil, eine Automatisierung der Messung zu ermöglichen und die Anzahl der Verschiebungen eines Gerätes zu reduzieren, denn die Emissions- und Störfestigkeitsmessungen können im gleichen

Raum mit wenigen Umstellungen durchgeführt werden. Wie bei der Emission von leitungsgeführten Störgrößen müssen auch hier die Pegel niedriger sein als die in einem Pflichtenheft oder in den Normen festgelegten Grenzwerte.

Messung von impulsförmigen Feldern

Die normativen Prüfungen gestatten das Messen der Emission und Prüfen der Störfestigkeit von Geräten und Systemen in bezug auf die wichtigsten in industrieller Umgebung vorkommenden elektromagnetischen Störungen. Die Betriebsumgebungen der von der Schneider-Gruppe entwickelten Betriebsmittel können jedoch gewisse Merkmale aufweisen, die in den normativen Texten noch nicht richtig berücksichtigt werden.

So gibt es zum Beispiel noch keine EMV-Prüfvorschriften speziell für Betriebsmittel, die in Mittelspannungsschaltanlagen zum Einsatz gelangen. Deshalb hat Schneider Messreihen durchgeführt, um die für die Umgebung dieser Betriebseinrichtungen typischen Störungen, vor allem in der Nähe von Nieder-, Mittel- und Höchstspannungsgeräten, besser kennenzulernen.

In einer zweiten Phase sind interne Prüfungen mit spezifischen Prüfmitteln entwickelt worden. Diese gestatten das Testen der elektromagnetischen Verträglichkeit von Betriebsmitteln, ohne Prüfungen im Massstab 1:1 durchführen zu müssen. Diese Prüfungen sind besser reproduzierbar und kosten weniger. Sie werden deshalb möglichst früh in der Entwicklungsphase durchgeführt, was eine Optimierung des EMV-Schutzes zu niedrigeren Kosten gestattet.

7. Schlussfolgerung

Die Einführung der Elektronik in eine grosse Anzahl von Anwendungen, insbesondere auf dem Gebiet der elektrischen Betriebsmittel, zwingt dazu, einen neuen Faktor zu berücksichtigen, die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Die Gewährleistung eines einwandfreien Funktionierens in gestörter Umgebung ohne selber Störquelle zu sein, das sind die Qualitätsanforderungen an diese Produkte.

Um diese beiden Anforderungen erfüllen zu können, wird das Verständnis von komplizierten Erscheinungen auf der Ebene der Störungsquelle, der Kopplungen und des Störungsofners verlangt. Ferner müssen bei der Entwicklung, Konstruktion und Fabrikation bestimmte Regeln eingehalten werden. Der Standort und die Anord-

nung spielen für die EMV ebenfalls eine grosse Rolle. Deshalb ist es erforderlich, bereits bei den ersten Studien an die Anordnung der Starkstromkomponenten, an den Verlauf der Kabel und an die Abschirmungen usw. zu denken. Zudem kann man mit Betriebsmitteln, die eine hohe EMV aufweisen, Anlagen mit hoher Verträglichkeit bauen.

Nur Massnahmen, die auf besonderen Fachkenntnissen beruhen, und spezielle Einrichtungen gestatten eine Quantifizierung der EMV verschiedener Betriebsmittel.

Die Einhaltung der Normen gestattet somit die Sicherstellung des einwandfreien Funktionierens eines Gerätes in seiner elektromagnetischen Umgebung.

Anhang 1: Impedanz eines Leiters bei hoher Frequenz

Der EMV-Pegel eines Betriebsmittels hängt von den Kopplungen zwischen den Stromkreisen ab, wobei diese Kopplungen ihrerseits insbesondere bei hohen Frequenzen direkt von den Impedanzen zwischen diesen Stromkreisen abhängen. Um die EMV zu verbessern, müssen deshalb diese Impedanzen bekannt sein und hierauf reduziert werden.

Es gibt eine Reihe von Näherungsformeln, mit denen die Hochfrequenz-Impedanz der wichtigsten verwendeten Leiter bestimmt werden kann. Diese Formeln sind kompliziert und zudem ungenau, wenn die genaue Position jedes einzelnen Teils nicht genau bekannt ist. Denn wer kennt schon die genaue Position eines Leiters gegenüber einem anderen in einem Kabelkanal? Die Antwort liegt in der Erfahrung mit diesen Erscheinungen, verbunden mit der Kenntnis der theoretischen Grundlagen der Elektrotechnik.

Zuerst darf nicht vergessen werden, dass die Impedanz eines Leiters in erster Linie eine Funktion ihres induktiven Anteils ist, der bei einem Standardkabel von einem kHz an vorliegt. Somit ändert sich für ein fiktives, unendlich langes Kabel in Luft die Selbstinduktivität pro Längeneinheit logarithmisch mit dem Durchmesser, und deshalb nur sehr wenig. Für Kabel, deren Länge ein Viertel der Wellenlänge der entsprechenden Störung nicht übersteigt, kann unabhängig vom

Durchmesser ein Wert von einem mH pro Meter angenommen werden (siehe **Abb. 34**).

Wenn das Kabel flach auf eine leitende Platte gelegt wird, vermindert sich dieser Wert stark. Er hängt nun vom Abstand zwischen dem Kabel und der Platte ab. Auf diese Weise lassen sich ohne weiteres Gewinne von 10 dB gegenüber dem Wert der Selbstinduktivität erreichen. Bei den höchsten Frequenzen muss das Kabel als Übertragungsleitung betrachtet werden, wobei sein Wellenwiderstand die wichtigste Grösse ist (und grössenordnungsmässig 100 Ohm beträgt). Aufgrund dieser Überlegungen kann zum Beispiel mit wenigen Metern von gelb/grünem Draht ohne weiteres eine gemeinsame Selbstinduktivität von mehreren μH erreicht werden. Das sind bei 1 MHz mehrere Ohm und bei 100 MHz mehrere hundert Ohm.

Schlussfolgerung: Die leitende Metallplatte bietet die Möglichkeit, zwei Punkte mit möglichst kleiner Impedanz miteinander zu verbinden. Und dies unabhängig von ihrer Dicke, sofern diese grösser ist als die Eindringtiefe ($415 \mu\text{m}$ für Kupfer bei 10 kHz).

Somit bietet eine Kupferplatte eine Selbstinduktivität von $0,6 \text{ nH}$ bei 10 kHz, d.h. eine Impedanz von $37 \mu\Omega$ pro Quadrat (die Impedanz ist unabhängig vom der Fläche des betrachteten Quadrates konstant).

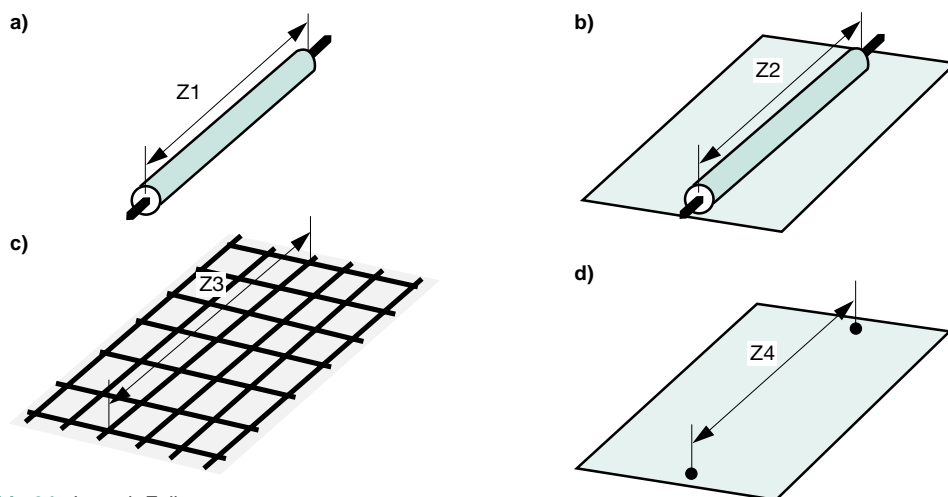


Abb. 34: Je nach Fall:

a: Kabel in Luft ($L \approx 1 \mu\text{H}/\text{m}$),

b: Kabel flach auf Metallplatte,

c: Metallgitter mit Kontakt an jedem Knoten (zum Beispiel geschweisstes Betoneisen),

d: Metallplatte

und für dieselbe Länge betragen die Impedanzen pro Längeneinheit $Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4$.

Anhang 2: Die einzelnen Teile eines Kabels

Die Bedeutung der zur Unterscheidung der einzelnen Teile eines Kabels verwendeten Begriffe ändert sich je nach Verwendungszweck des Kabels (Starkstromkabel, Telefonkabel oder Steuerkabel) ein wenig (siehe **Abb. 35**).

Die kursiven Definitionen entsprechen denjenigen der IEC.

Armierung

Diese dient im wesentlichen zum mechanischen Schutz des Kabels und besteht deshalb in der Regel aus zwei schraubenförmig aufgewickelten Weichstahlbändern.

Bei Kabeln, die zur Informationsübertragung dienen, kann sie auch eine elektrische Funktion haben und als elektrostatische Abschirmung und mehr noch als elektromagnetische Abschirmung dienen.

Schirm, gleichbedeutend mit Abschirmung; Einrichtung, die dazu bestimmt ist, die in einen Bereich eindringende Strahlungsintensität zu reduzieren.

Die Armierung oder der Schirm eines Kabels können unabhängig davon, ob dieses für die Energie- oder Informationsübertragung bestimmt ist, als Abschirmung dienen.

Abschirmung; Einrichtung, die dazu dient, das Eindringen eines Feldes in einen bestimmten Bereich zu reduzieren.

Dieser Teil hat mehrere Funktionen:

- Bildung einer Äquipotentialfläche um die Isolation,
- Verhinderung der Auswirkungen innerer und äußerer elektrischer Felder,
- Sicherstellung des Abflusses kapazitiver Ströme sowie eines Erdschlussstroms (unsymmetrischer Kurzschluss),
- Sicherstellung des Schutzes von Personen und Sachwerten bei einem Durchschlag. Deshalb ist sie in der Regel metallisch und kontinuierlich (Bleirohr, Drahtumwicklung oder -geflecht oder schraubenförmig aufgewickelte Bänder).

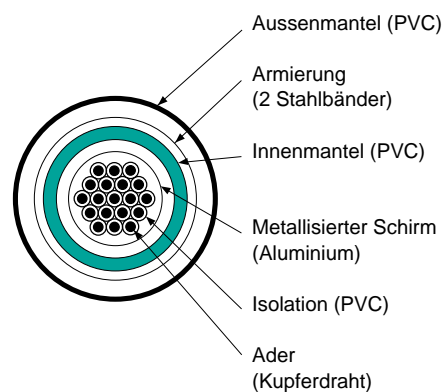
Für Informationsübertragungskabel besteht die Abschirmung aus Bändern oder Drähten aus Kupfer oder Aluminium zum Schutz gegen elektrische und magnetische Einflüsse.

Die Abschirmung kann gemeinsam für alle Leiter des Kabels sein, wenn die Störeinflüsse extern sind.

Sie kann einzeln für eine bestimmte Anzahl Kabelleiter sein, um diese gegen Beeinflussungen durch andere Leiter desselben Kabels zu schützen.

Mantel, eine Schutzhülle, welche die Aufgabe hat, die Dichtigkeit des Kabels sicherzustellen.

Beispiel eines Telefonkabels



Beispiel eines Mittelspannungs-Energiekabels

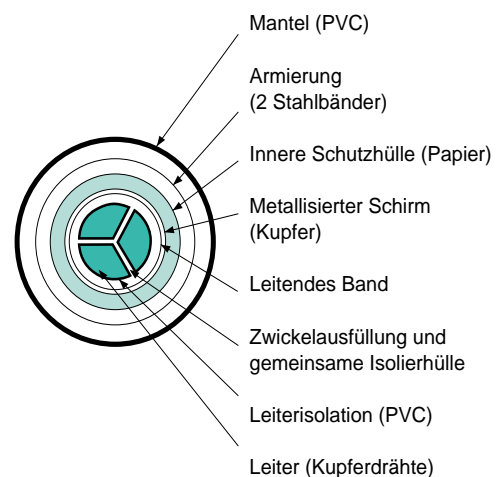


Abb. 35

Anhang 3: In den EMV-Labors der Schneider Gruppe durchgeführte Prüfungen

Die EMV-Labors der Schneider-Gruppe verfügen über die Fachkenntnisse und Einrichtungen, um Prüfungen in Übereinstimmung mit zahlreichen Normen und besonderen Spezifikationen durchzuführen.

Der unternehmensinterne oder externe Kunde wird bei der Suche nach den für seine Betriebsmittel anwendbaren Normen und Stärkegraden

nach Wunsch von Spezialisten der Laboratorien unterstützt. Er legt ferner die funktionalen Annahmekriterien fest, sei es in bezug auf die für sein Produkt geltenden Normen oder andernfalls aufgrund von Normen in Abhängigkeit vom Verwendungszweck des Produktes (Sicherheit, Kontinuität der Versorgung, Komfort usw.).

Normative Prüfungen

Es ginge zu weit, alle zu nennen. Dies um so mehr, als die sich die normative Landschaft in bezug auf die Produktnormen in ständigem Umbruch befindet. Nachstehend werden die wichtigsten Bezugstexte für die Durchführung der Prüfungen aufgeführt.

Störfestigkeit

- IEC 61000-4-2
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
Teil 4: Prüf- und Messverfahren
Abschnitt 2: Prüfung der Störfestigkeit gegen die **Entladung statischer Elektrizität**
- IEC 61000-4-3
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
Teil 4: Prüf- und Messverfahren
Abschnitt 3: Prüfung der Störfestigkeit gegen **hochfrequente elektromagnetische Felder**
- IEC 61000-4-4
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
Teil 4: Prüf- und Messverfahren
Abschnitt 4: Prüfung der Störfestigkeit gegen **schnelle transiente elektrische Störgrößen/Burst**
- IEC 61000-4-5
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
Teil 4: Prüf- und Messverfahren
Abschnitt 5: Prüfung der Störfestigkeit gegen **Stossspannungen**
- IEC 61000-4-6
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
Teil 4: Prüf- und Messverfahren
Abschnitt 6: Prüfung der Störfestigkeit gegen **leitungsgeführte Störgrößen, induziert durch hochfrequente Felder**

- IEC 61000-4-8
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
Teil 4: Prüf- und Messverfahren
Abschnitt 8: Prüfung der Störfestigkeit gegen **Magnetfelder mit energietechnischen Frequenzen**
- IEC 61000-4-11
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
Teil 4: Prüf- und Messverfahren
Abschnitt 11: Prüfung der Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen
- IEC 61000-6-3
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
Teil 6: Fachgrundnormen
Abschnitt 3: Für die Emission im Wohn-, Geschäfts- und Leichtindustriebereich
- IEC 61000-6-4
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
Teil 6: Fachgrundnormen
Abschnitt 4: Für die Emission im Industriebereich
- EN 500082-1
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
Fachgrundnorm Störfestigkeit
Teil 1: Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereich sowie Kleinbetriebe
- EN 500082-2
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
Fachgrundnorm Störfestigkeit
Teil 2: Industriebereich

Emission

- CISPR 11
EN 55011

Grenzwerte und Messverfahren für Funkstörungen von industriellen, wissenschaftlichen und medizinischen Hochfrequenzgeräten (ISM-Geräten)

- CISPR 14
EN 55014

Grenzwerte und Messverfahren für Funkstörungen von Geräten mit elektromotorischem Antrieb und Elektrowärmegegeräten für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke, Elektrowerkzeugen und ähnlichen Elektrogeräten (Teil Störaussendung)

- CISPR 22
EN 55022

Grenzwerte und Messverfahren für Funkstörungen von Einrichtungen der Informationstechnik

- EN 50081-1

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Fachgrundnorm Störaussendung

Teil 1: Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereich sowie Kleinbetriebe

- EN 50081-2

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Fachgrundnorm Störaussendung

Teil 2: Industriebereich

Prüfungen ausserhalb der Normen

Die Labors können im Rahmen ihrer materiellen und fachlichen Möglichkeiten auch Prüfungen nach anderen Vorschriften durchführen.

Anhang 4: Literaturverzeichnis

Normen

- IEC 61000-2-1
- IEC 61000-2-2
- IEC 61000-4
- IEC 61000-6
- EN 55011, CISPR 11
- EN 55022, CISPR 22

Technische Hefte Merlin Gerin

- Elektrische Störungen in der NS
Technisches Heft Nr. 141
R. Calvas
- SF6-Leistungsschalter Fluarc und MS-Motor-
schutz,
Technisches Heft Nr. 143
J. Hennebert und D. Gibbs

Diverse Veröffentlichungen

- Elektromagnetische Verträglichkeit - Hoch-
frequenz-Rauschen und -Störungen
P. Degauque und J. Hamelin
Dunod, Herausgeber
- Elektromagnetische Verträglichkeit
M. Ianovici und J.-J. Morf
Presses Polytechniques Romandes
- Die elektromagnetische Verträglichkeit
A. Kouyoumdjan, mit R. Calvas und J. Delaballe
Institut Schneider Formation
- RGE Nr. 10, Sondernummer Elektromagneti-
sche Verträglichkeit
November 1986

Schneider Electric

Hauptverwaltung Deutschland:

Schneider Electric GmbH
Gothaer Strasse 29 • D-40880 Ratingen
Postfach 10 12 61 • D-40832 Ratingen
Telefon (0 21 02) 4 04-0
Telefax (0 21 02) 4 04 92 56
www.schneiderelectric.de

Hauptverwaltung Schweiz:

Schneider Electric (Schweiz) AG
Schermenwaldstrasse 11
Postfach • CH-3063 Ittigen
Telefon (031) 917 33 33
Telefax (031) 917 33 55
www.schneider-electric.ch