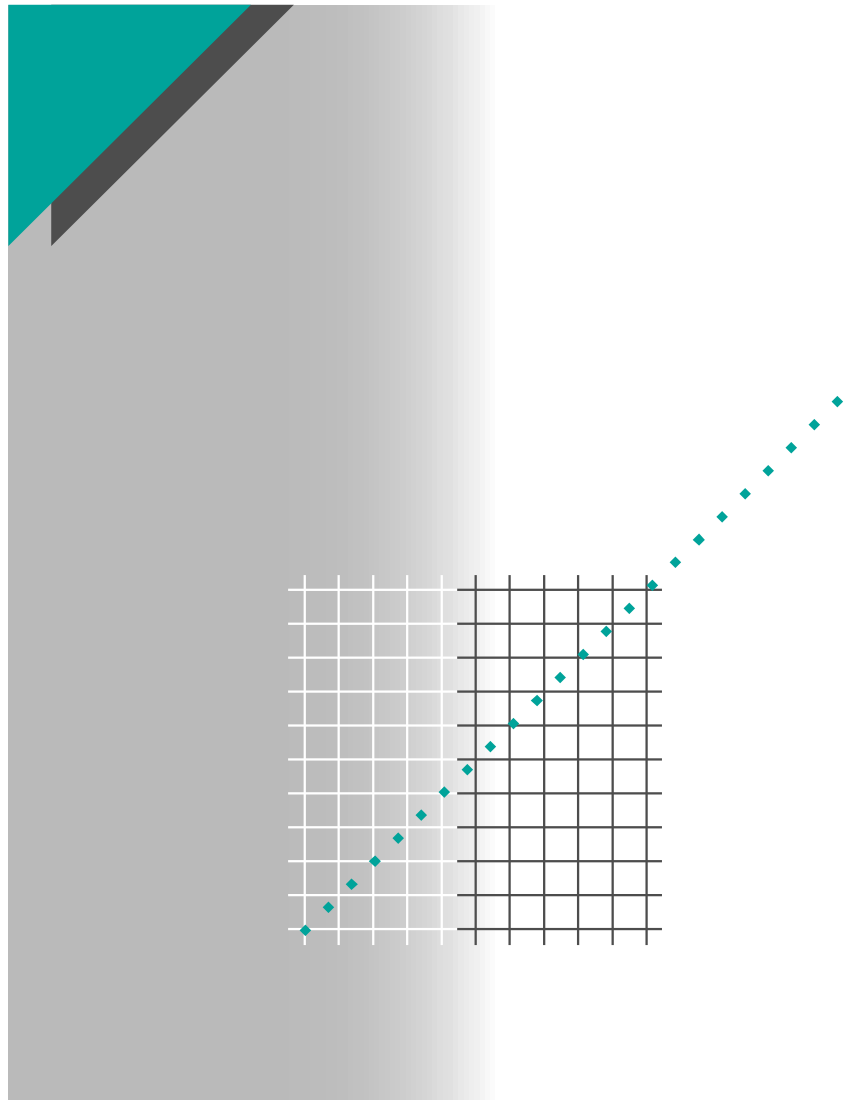


Technisches Heft Nr. 187

Koexistenz von Starkstrom und Schwachstrom



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Die Technischen Hefte sind eine Sammlung von Dokumenten, die für jene bestimmt sind, die weitergehende Informationen suchen, als sie in den Leitfäden, Katalogen und Datenblättern enthalten sind.

Für Spezialisten und Techniker sowie für Lehrer und Studenten bilden diese Hefte ein Hilfsmittel für die Schulung in den neuen Techniken und Technologien auf den Gebieten der Elektrotechnik und Elektronik.

Hier finden Sie insbesondere die Grundlagen, welche zum besseren Verständnis für die in den Anlagen, Systemen, Komponenten und Einrichtungen für den Transport, die Verteilung und/oder die Bewirtschaftung der elektrischen Energie auftretenden Erscheinungen beitragen.

Eine Liste der verfügbaren Technischen Hefte erhalten Sie auf Verlangen.

Nr. 187

Koexistenz von Starkstrom und Schwachstrom

Autor: Roland Calvas

Als Ingenieur ENSBERG (Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et Radioélectricité, Grenoble), wo er 1964 abschloss, und nachdem er am Institut d'Administration des Entreprises diplomiert hatte, trat er 1966 bei Merlin Gerin ein.

Im Verlauf seiner beruflichen Laufbahn war er Verkaufsleiter und hierauf Marketingleiter im Sektor Personenschutz. Heute ist er für die technische Kommunikation der Schneider-Gruppe verantwortlich.

Autor: Jacques Delaballe

Nachdem er 1980 an der Université de Limoges doktoriert hatte, arbeitete er sieben Jahre bei Thomson, um 1980 seine Tätigkeit bei Merlin Gerin aufzunehmen. Er ist Leiter der EMV-Labors im Prüfzentrum von Schneider Electric. Ferner ist er Mitglied des Komitees 77 (Elektromagnetische Verträglichkeit) der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC).

Kapselung (IEV 195-02-31A):

Abdeckung oder Gehäuse zum Schutz gegen mechanische Gefahren (\neq Abschirmung).

Schleife:

Durch zwei Leiter irgendwelcher Art begrenzte Fläche, die in der Lage ist, einen empfindlichen und/oder kommunizierenden Verbraucher durch elektromagnetische Induktion zu stören.

Massenschleife:

Eine Schleife, die aus zwei Leitern besteht, wovon einer ein aktiver Leiter (Phasen- oder Neutraleiter) oder eine Schwachstromverbindung ist, und der andere ein Leiter einer Schleife zwischen Massen.

Schleife zwischen Massen:

Eine Schleife, die aus zwei Leitern besteht, die den Schutzleiter PE, ein Begleitleiter, eine Abschirmung, eine zusätzliche Potentialausgleichsverbindung oder ein fremdes leitfähiges Teil sein können.

Bus:

Bezeichnet eine Schwachstromverbindung, die digitale Signale überträgt.

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV):

Befähigung eines Gerätes oder Systems, in seiner elektromagnetischen Umgebung richtig zu funktionieren, ohne selbst elektromagnetische Störfelder zu erzeugen, die für alles, was sich in dieser Umgebung befindet, unverträglich sind.

Begleitleiter:

Leiter, der einer Schwachstromverbindung entlanggeführt ist, um die Fläche der durch die Schwachstromverbindung und den Massenkreis gebildeten Schleife auf ein Minimum zu reduzieren. Diese kann ein Leiter, ein Kabelrost oder eine Abschirmung sein. Der Begleitleiter dient auch als Betriebs-Potentialausgleichsverbindung.

Schutzleiter PE :

Ein Leiter, der für einige Schutzmassnahmen gegen gefährliche Körperströme erforderlich ist, um die elektrische Verbindung zu einem der folgenden Teile herzustellen: Masse der elektrischen Betriebsmittel, fremde leitfähige Teile, Haupterdungsklemme, Erder, geerdeter Punkt der Stromquelle oder künstlicher Sternpunkt.

Schwachstrom:

Die Bus-Systeme und die Sprach-, Daten- und Bildsignale gehören beispielsweise zur Schwachstromtechnik. Ganz allgemein alle elektrischen Signale zur Übertragung von Informationen und nicht von Leistung.

Starkstrom:

Ströme und Verbindungen, die Leistung übertragen können. Insbesondere die Verbindungen zur Einspeisung von elektrischer Energie von einem Versorgungsnetz aus, einschliesslich des Schutzleiters sind Einrichtungen der Starkstromtechnik.

Abschirmung (IEV 195-02-32):

Einrichtung zur Reduktion des Eindringens eines elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldes in einen bestimmten Bereich oder zur Umhüllung oder Trennung von elektrischen Stromkreisen.

Fremde leitfähige Teile:

Metallteile von Gebäuden, Wasser-, Gas- und Heizungsleitungen sowie leitfähige Fussböden und Wände. Es handelt sich um leitfähige Teile, die nicht zu elektrischen Anlage gehören.

Masse:

Für den Elektrotechniker, IEV 195-06-07: Ein berührbares, leitfähiges Teil eines elektrischen Betriebsmittels, das normalerweise nicht unter Spannung steht, das jedoch im Isolationsfehlerfall unter Spannung stehen kann.

Masse/Betriebserdung:

Punkt eines Netzes oder Gerätes, der aus anderen Gründen als des Personenschutzes mit dem Körper verbunden bzw. geerdet werden muss.

PBM (Pulsbreitenmodulation):

Ermöglicht insbesondere die Kontrolle des Mittelwertes eines Ausgangssignals durch Umsetzung des Eingangssignals in Impulse mit veränderlicher Breite.

Störer:

Quelle von elektromagnetischen Störungen. Siehe Opfer.

Spiralanschluss:

Anschluss mit einem zapfenzieherförmig aufgewickelten Draht. Für den Anschluss einer Kapselung an die Masse wegen der hohen HF-Impedanz zu verbieten.

Opfer:

Gegen elektromagnetische Störungen empfindlicher Verbraucher. Siehe Störer.

Koexistenz von Starkstrom und Schwachstrom

Die Entwicklung digitaler Systeme, die Schwachstromverbindungen (Bus-Systeme) verwenden, wirft heute in zunehmendem Masse das Problem der Koexistenz von Starkstrom und Schwachstrom auf.

Alles in allem handelt es sich darum, die elektrische Sicherheit mit der elektromagnetischen Verträglichkeit in Einklang zu bringen. Hierzu müssen unter anderem die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie soll das Problem der Körper bzw. Massen behandelt werden?
- Welches Erdungsschema soll gewählt werden?
- Welche Abschirmungen, Reduktionsebenen und Faradaykäfige sollen wozu eingesetzt werden?
- Wie sollen die Stark- und die Schwachstromkreise geführt werden?
- usw.

Das vorliegende Technische Heft ist vor allem für Elektriker bestimmt, dürfte jedoch auch für Schwachstromspezialisten von Nutzen sein, da es vor allem niederfrequente Störungen ≤ 1 MHz behandelt.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1.1 Die EMV, ein multidisziplinäres Problem	S. 4
	1.2 Grundlagen der Störungen und Kopplungen	S. 4
	1.3 Unterscheidung zwischen Starkstrom und Schwachstrom	S. 7
2. Erder und Körper bzw. Massen	2.1 Erder	S. 8
	2.2 Massen	S.10
	2.3 Verschmaschung der Netze der elektrischen Masse und der übrigen Massen	S.12
3. EMV nichtkommunizierender elektronischer Geräte	3.1 Die Eigenstörung	S.13
	3.2 Auswirkungen von Strahlungsfeldern	S.14
	3.3 Durch Leitung übertragene Störungen	S.15
4. EMV kommunizierender elektronischer Geräte	4.1 Beispiel von Störungen über eine gemeinsame Impedanz	S.16
	4.2 Beispiel von Störungen durch Strahlung	S.18
5. Schlussfolgerung		S.20
Literaturverzeichnis		S.22

1. Einleitung

1.1 Die EMV, ein multidisziplinäres Problem

Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) ist ein Fachgebiet, das mit der Entwicklung der Funktechnik begonnen hat und zunehmend an Bedeutung gewinnt. So mussten von einem halben Jahrhundert die Kerzen der Verbrennungsmotoren «entstört» werden, damit sie die Radioempfänger nicht störten.

Heute bildet die EMV den Gegenstand zahlreicher Arbeiten von Fachleuten, vorwiegend Elektronikern und Telekommunikations-Spezialisten. Zahlreiche Normen und sogar eine EG-Richtlinie haben es sich zum Ziel gesetzt, die Koexistenz von Störern und Gestörten sicherzustellen, indem sie Emissionsgrenzwerte für elektromagnetische Störungen sowie Immunitätspegel festlegen.

Trotzdem bleibt ein komplexes Gebiet bestehen, über das sich die Fachleute noch nicht einig sind: die **Koexistenz von Stark- und Schwachstromnetzen**.

Dies betrifft die nichtkommunizierenden elektronischen Geräte, da sie vom Stromnetz gespeist werden und gegenüber NF- und HF-Feldern sowie durch Leitung übertragene Störungen empfindlich sind, noch mehr jedoch die Geräte, die in kommunizierenden Systemen mit verteilter Intelligenz eingesetzt werden.

Es handelt sich somit um die Betriebssicherheit der Informatik-Systeme, des Technischen Gebäude-Managements (TGM), des Technischen Elektrizitätsverteilungs-Managements

(TEM), der Prozessautomatiken usw. Alle diese Systeme, deren Zahl ständig zunimmt, wenden im wesentlichen digitale Verbindungen – sogenannte Schwachstromverbindungen – an.

Der Informatiker, der Elektriker, der Automatiker und der Elektroniker haben Schwierigkeiten, sich zu verstehen und ihre Aufgaben untereinander zu koordinieren. Es muss eine gemeinsame Kultur gefunden werden, um von der Auslegung bis zur Installation Störungen oder sogar die Zerstörung von Betriebsmitteln zu verhindern. Die Hersteller müssen einen Beitrag an diese gemeinsame Kultur leisten. Dies ist umso wichtiger, als sich die Technik ständig weiterentwickelt.

■ Die elektrischen Netze werden immer leistungsfähiger, übertragen in zunehmendem Mass Oberwellenströme oder haben ein Erdungsschema, das ungünstig sein kann.

■ Die digitalen Netze nehmen ständig zu, haben immer niedrigere elektrische Pegel (wenige Volt) und immer höhere Datenübertragungsraten (Megabits pro Sekunde).

Die Elektriker und die Elektroniker müssen zusammenarbeiten, um die EMV in den elektrischen Anlagen von Gebäuden zu optimieren, um die Koexistenz von Starkstrom und Schwachstrom zu verbessern.

Das vorliegende Dokument legt das Schwergewicht auf die NF-Erscheinungen und nicht auf die HF-Erscheinungen, wobei die Grenze zwischen NF und HF bei 1 MHz liegt.

1.2 Grundlagen der Störungen und Kopplungen

Störungen

Elektromagnetische Störungen können sehr verschiedener Art sein, wobei für ihre Definition zahlreiche Kriterien gelten.

Sie sind dauernd oder vorübergehend, wellen- oder impulsförmig und nieder- oder hochfrequent (oberhalb von 1 MHz). Sie können durch Leitung oder Strahlung übertragen werden, vom äusseren oder inneren Modus sein und von innerhalb oder ausserhalb des Gebäudes stammen.

Die für die EMV in Betracht gezogenen Störungerscheinungen sind vielfältig. Wir interessieren uns hier vor allem für

- Oberwellenströme und hohe Fehlerströme,
- Schaltüberspannungen,
- Blitzspannungen und -ströme.

Hohe Spannungen und Ströme erzeugen elektromagnetische Felder.

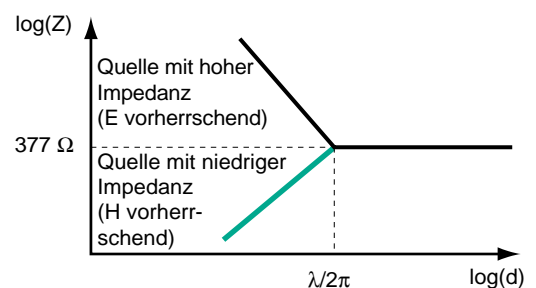


Abb. 1: Wellenimpedanz $Z = F(d)$.

Bekanntlich besteht jedes elektromagnetische Feld aus einem magnetischen Feld H und einem elektrischen Feld E.

Sender	Frequenz (f)	Wellenlänge (λ)	Feldstärke
Stromvers.-netz (1 kA, 1 ph.)	50 Hz	6000 km	20 A/m bei 10 m
Blitz	30 kHz bis 3 MHz	10 km	10 A/m bei 500 m
Trockenofen	27 MHz	11 m	1,5 V/m bei 10 m
Schaltvorgang bei 20 kV	75 MHz	4 m	5 kV/m bei 1 m
UKW	100 MHz	3 m	1 V/m bei 500 m
LW	200 kHz	1500 m	30 V/m bei 500 m
Kleinfunkgerät	450 MHz	66 cm	10 V/m bei 1 m
UHF-TV	600 MHz	50 cm	0,5 V/m bei 500 m
Mobiltelefon	900 MHz	33 cm	20 V/m bei 1 m
Radar	1 GHz	30 cm	40 V/m bei 500 m
Mikrowellenofen	2,45 GHz	12 cm	1,5 V/m bei 1 m

Abb. 2: Einige Sender von elektromagnetischen Störungen.

In der Nähe eines NF-Stroms ist das magnetische Feld bis zu einer Entfernung von etwa $\lambda/2\pi$, d.h. 1000 km für ein 50-Hz-Feld, vorherrschend. In der Nähe einer Quelle mit hoher Impedanz und hoher Frequenz ist das elektrische Feld vorherrschend. Dies ist oft bei Schaltüberspannungen in elektrischen Netzen der Fall. In einer grösseren Entfernung als $\lambda/2\pi$ ist (für Quellen mit gegenüber der Wellenlänge λ kleinen Abmessungen) das Verhältnis zwischen E und H konstant. Dieses ist der Wellenwiderstand

$$Z_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega$$

in Luft (siehe Abb. 1).

Die Tabelle der Abbildung 2 enthält Beispiele von Störern zusammen mit ihrer Frequenz (Mittelwert)

und den Feldern, die sie unter Berücksichtigung ihrer Leistung abstrahlen können.

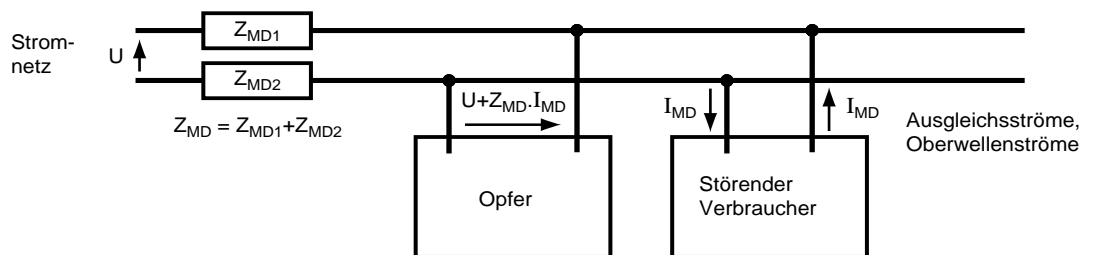
Kopplungen

Schliesslich kann bekanntlich je nach der Art der Störung die Kopplung zwischen der Störungserscheinung und dem Opfer von der folgenden Art sein:

- Gemeinsame Impedanz (durch Leitung übertragene Störung)
- Elektrisch (Streukapazität und Strahlung)
- Magnetisch (Gegeninduktivität und Strahlung)

■ Kopplung über eine gemeinsame Impedanz
Diese ergibt sich aus dem Vorhandensein eines mehreren Geräten gemeinsamen Stromkreises. Dieser kann das Versorgungsnetz, das Massennetz, das Potentialausgleichsnetz usw. sein. Die Abbildung 3 zeigt diese Kopplungsart.

a – Kopplung im inneren Modus (MD)



b – Kopplung im äusseren Modus (MC)

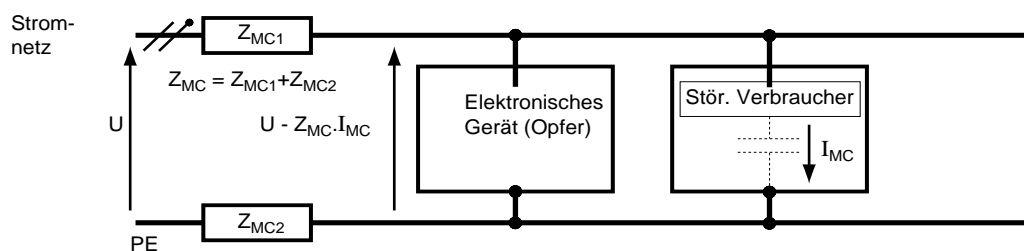


Abb. 3: Kopplung über eine gemeinsame Impedanz. Die von einem störenden Verbraucher erzeugten Störungen wirken sich wegen der fehlenden Entkopplung der Speisungen (a) oder dem Massennetz (PE) (b) auf einen empfindlichen Verbraucher aus.

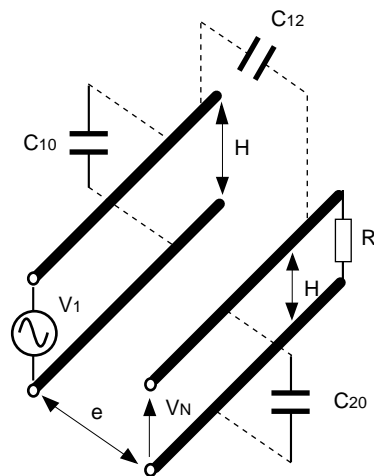


Abb. 4: Eine plötzliche Änderung der Spannung V_1 zwischen zwei Drähten erzeugt ein Feld, das auf kurze Distanz als vorwiegend elektrisch erachtet werden kann und in der Lage ist, in einem parallelen Drahtpaar eine Spannung V_N zu induzieren. Diese Kopplungsart wird kapazitives Nebensprechen genannt.

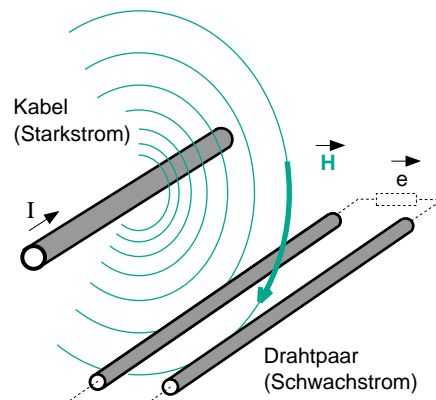


Abb. 5: Eine Änderung des Stroms in einem Kabel erzeugt ein Feld, das auf kurze Distanz als rein magnetisch erachtet werden kann und somit in einer Drahtschleife eine Störspannung induziert. Diese Kopplungsart wird induktives Nebensprechen genannt.

■ Elektrische Kopplung

Diese ergibt sich aus dem Vorhandensein eines äusseren elektrischen Feldes oder einer Streukapazität zwischen zwei Stromkreisen oder leitenden Teilen (siehe Abb. 4).

■ Magnetische Kopplung

Diese ergibt sich aus dem Vorhandensein eines äusseren magnetischen Feldes oder einer Gegeninduktivität zwischen einem Leiter und einer Schleife, wie in der Abbildung 5 gezeigt. In vielen Fällen können mehrere dieser Kopplungsarten gleichzeitig auftreten. Insbesondere in der Elektrizitätsverteilung kommen folgende Fälle vor:

- Kurzschlussströme (oder bei einem Isolationsfehler im Erdungsschema TN auftretende Fehlerströme) erzeugen sehr starke magnetische Felder. Nach dem Ampèreschen Durchflutungsgesetz gilt:

$$H = \frac{I}{2\pi d},$$

wobei d der Abstand zwischen dem Leiter und dem Opfer ist.

- Das «Schalten» von Geräten, wie Lasttrennschaltern, Schützen, Leistungsschaltern, Sicherungen usw. erzeugt vielfältige und starke durch Strahlung und Leitung übertragene Störungen, die von den Herstellern von in elektrische Verteiler eingebauten elektronischen Geräten beherrscht werden müssen. Diese «Wellen» sind von den Normierungsstellen gekennzeichnet worden (siehe Abb. 6).

- Der Blitz, der in ein Haus oder in der Nähe davon oder in eine elektrische Leitung einschlägt, ist ein stark störende, impulsförmige Erscheinung. Er kann ein magnetisches Feld, ein elektrisches Feld, eine Stosswelle oder eine Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten der Anlage bewirken.

IEC 1000-4-2	Elektrostatische Entladungen
IEC 1000-4-3	Durch Strahlung übertragene Störungen
IEC 1000-4-4	Schnelle, impulsförmige Ausgleichsvorgänge
IEC 1000-4-5	Stosswellen (vom Blitz-Typ)
IEC 1000-4-6	Durch Leitung übertragene Störungen $f > 9$ kHz
IEC 1000-4-8	Magnetische Felder mit Netzfrequenz
IEC 1000-4-9	Impulsförmige Magnetfelder
IEC 1000-4-10	Gedämpfte magnetische Schwingungsfelder
IEC 1000-4-12	Gedämpfte Schwingungswellen
IEC 1000-4-13	Oberwellen

Abb. 6: Einige Prüfnormen für Störungen.

1.3 Unterscheidung zwischen Starkstrom und Schwachstrom

Die Bezeichnung «Starkstrom» wird für normale Erscheinungen verwendet, wie zum Beispiel das Fließen eines elektrischen 50-Hz-Stroms, oder abnormale Erscheinungen, wie zum Beispiel ein Blitzstrom. Die Abbildung 7 enthält eine Einteilung der verschiedenen elektrischer Verbindungen in 4 Gruppen.

- Die Gruppe 1 umfasst die Starkstromverbindungen.
- Die Gruppe 2 umfasst die wenig empfindlichen und wenig störenden Verbindungen, die in der Regel kurz sind.
- Die Gruppe 3 umfasst die digitalen Verbindungen (Bus-Systeme) und findet sowohl im

Büro- als auch im Industriesektor rasch eine immer grössere Verbreitung. Die zahlreichen Verbindungen zwischen kommunizierenden Geräten zwingen sie zur Koexistenz mit den Starkstromverbindungen.

- Die Gruppe 4 umfasst die analogen Verbindungen mit hoher Impedanz, die wegen ihrer Empfindlichkeit kaum mit anderen Gruppen koexistiert. Diese Verbindungen sind selten und kurz.

Eine Verbindung, die zu einer der «Schwachstrom»-Gruppen 2 oder 3 gehört, kann eine empfindlichere Verbindung stören.

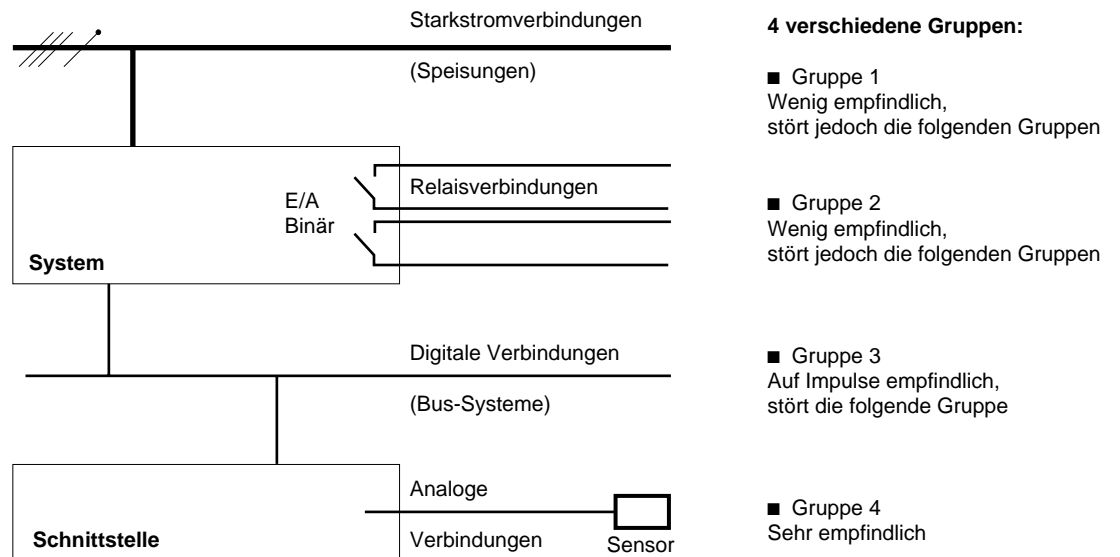


Abb. 7: Einteilung der verschiedenen Arten von elektrischer Verbindungen nach zunehmender Empfindlichkeit.

2. Erder und Körper bzw. Massen

2.1 Erder

Der erste Zweck eines Erders ist der Personenschutz

Wir befinden uns auf der Erde. Deshalb ist es wichtig, dass die berührbaren Metallteile eines elektrischen Betriebsmittels mit Erde verbunden sind, um einen elektrischen Schlag durch indirektes Berühren bei einem Isolationsfehler zu verhindern.

Je nach dem Erdungsschema ist der Fehlerstrom mehr oder weniger gross und werden Massnahmen ergriffen, damit die Berührungsspannung die vereinbarte Grenze der Berührungsspannung U_L (50 V für Wechselstrom) nicht während unzulässig langer Zeit übersteigt (siehe Technische Hefte Nr. 172 und Nr. 173).

Die berührbaren Metallteile elektrischer Betriebsmittel sind mit den Schutzleitern (PE) verbunden, und diese mit dem Erder, der die Erdung besorgt.

Der zweite Zweck eines Erders ist die Minimierung der unsymmetrischen Störungen von ausserhalb der NS-Anlage (äusserer Modus)

Dabei handelt es sich zum Beispiel um 50-Hz-Überspannungen bei einem Durchschlag des MS/NS-Transformators (siehe Abb.8) oder um Blitzüberspannungen (siehe Abb. 9). In diesem Zusammenhang schreibt die Norm Grenzwerte für den Erdungswiderstand vor. Blitzströme, MS/NS-Fehler und der Personenschutz verlangen eine Erdung niedriger Impedanz (I_{hMS} kann 1000 A erreichen und die Isolationsspannung sensibler Betriebsmittel beträgt 1500 V!). Dieses Problem muss insbesondere beim Erdungsschema TT beherrscht werden.

Natürlich müssen mehrere Erder vermieden werden, ausser wenn sie miteinander verbunden sind.

Ein Erder kann aus einem oder mehreren in die Erde eingeschlagenen Stangen oder aus einer Schleife am Grund der Baugrube oder aus beidem zusammen bestehen.

Für einen Stangenerder gilt $R_p = \frac{\rho}{L}$

Für eine Schleife am Grund der Baugrube gilt

$$R_{FF} = 2 \frac{\rho}{L}$$

wobei L die Länge der Stange oder der Umfang der Schleife ist. Der Erder muss ein Vollleiter aus Kupfer oder nichtrostendem Stahl sein, damit die Oxidation begrenzt wird. Der spezifische Widerstand des Bodens (ρ) ist ein wichtiger Parameter. Er variiert in Funktion der Feuchtigkeit und der Beschaffenheit des Bodens in einem sehr weiten

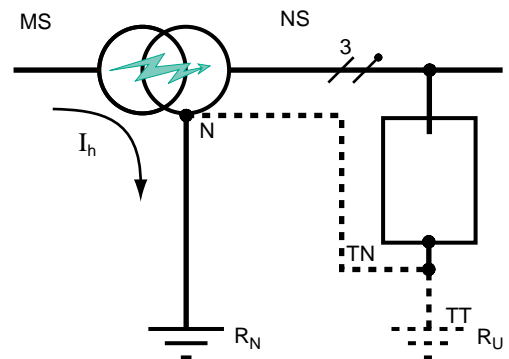


Abb. 8: MS/NS-Durchschlag. Das Potential des Netzes gegenüber Erde steigt an. $U = R_N \cdot I_h$ woraus beim Schema TT für die elektrischen Betriebsmittel und beim Schema TN für Personen eine Gefahr entsteht, wenn das Gebäude nicht einen totalen Potentialausgleich hat.

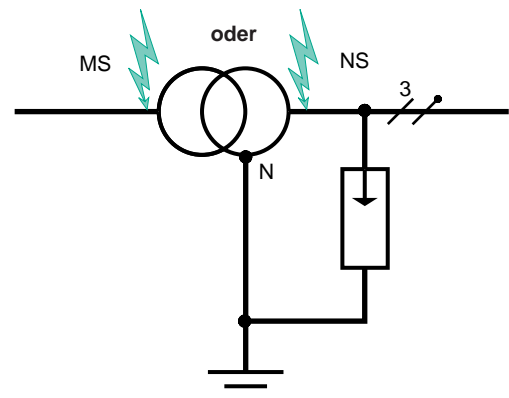


Abb. 9: Blitzüberspannung. Das Netz erfährt eine impulsförmige Überspannung an allen aktiven Leitern, woraus eine grosse Gefahr für die EMV entsteht. Deshalb müssen unabhängig vom Erdungsschema Überspannungsableiter eingesetzt werden.

Bereich von 1 bis 5000 $\Omega \cdot m$. Wichtig ist, am Grund der Baugrube «gute» Erde um den Schleifenleiter herum anzuschütten (siehe Abb. 10). Die Impedanz eines Erders variiert zwischen 50 Hz und 500 kHz nur wenig.

Wenn ein Gebäude mit einem Blitzableiter ausgerüstet ist, müssen dessen Erdungsleiter gabelförmig ausgelegt sein. Alle Leiter, für die damit gerechnet werden muss, dass sie Blitzströme

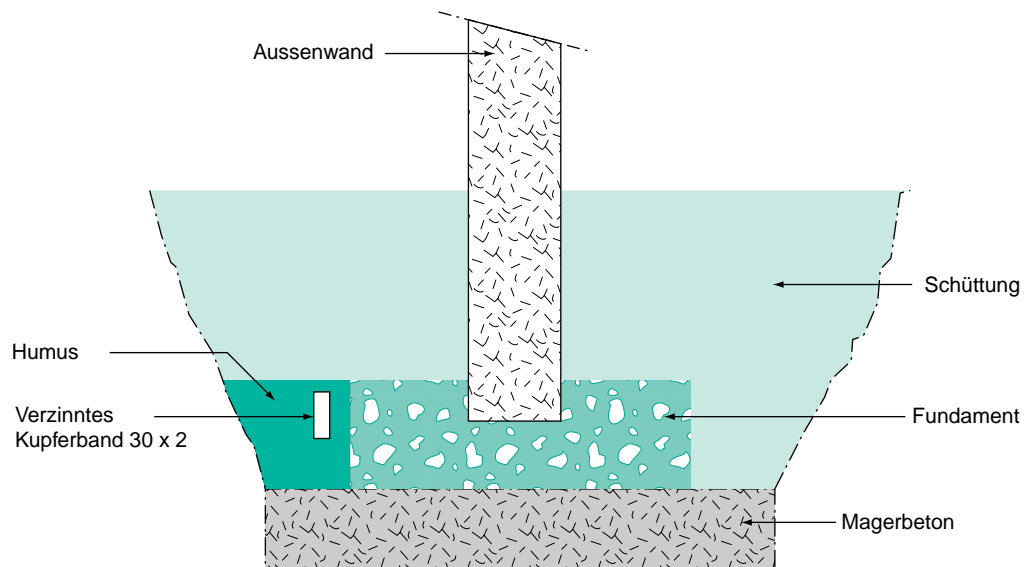


Abb. 10: Erder. Ausführung einer Schleife am Grund der Baugrube.

■ Der Gleichstromwiderstand eines Leiters beträgt $R_c = \rho \ell / s$, d.h. $R_c = 1,7 \text{ m}\Omega$ für einen zylindrischen Kupferleiter mit einem Querschnitt von 100 mm^2 und einer Länge von 10 m . Mit zunehmender Frequenz erhöht die Stromverdrängung diesen Widerstand. HF-Ströme fließen am Umfang der Leiters bis zu einer Tiefe von $\delta = (\pi f \mu \sigma)^{-1/2}$, die mit zunehmender Frequenz abnimmt. δ wird Eindringtiefe genannt.

Für Kupfer gilt:

$$\begin{aligned} \delta(50 \text{ Hz}) &= 9,3 \text{ mm} \\ \delta(1 \text{ MHz}) &= 65,8 \text{ }\mu\text{m} \\ \delta(10 \text{ MHz}) &= 21 \text{ }\mu\text{m} \end{aligned}$$

Demzufolge nimmt der wirksame Querschnitt des Leiters ab. Das Verhältnis zwischen R_{HF} und R_c beträgt für einen zylindrischen Leiter mit dem Radius r :

$$\frac{R_{\text{HF}}}{R_c} = \frac{1}{4} + \left[\left(\frac{r}{2\delta} \right)^6 + 0,178 \right]^{1/6} \approx 0,25 + \frac{r}{2\delta}$$

Diese Formel gilt nur, wenn der Radius r des Leiters grösser ist als die Eindringtiefe δ .

Für unseren Kupferleiter gilt:

- bei 50 Hz: $R_{\text{HF}} = R_c = 1,7 \text{ m}\Omega$
- bei 1 MHz: $R_{\text{HF}} = 43,1 \text{ m}\Omega$, $R_c = 73 \text{ m}\Omega$
- bei 10 MHz: $R_{\text{HF}} = 135 \text{ m}\Omega$, $R_c = 230 \text{ m}\Omega$

■ Die Selbstinduktivität L (μH) eines Leiters von der Länge ℓ beträgt:

- für einen zylindrischen Leiter:

$$0,2\ell \left[2,303 \log_{10} \frac{4\ell}{d} - 1 + 100\mu_r \cdot \delta \right]$$

- für einen rechteckigen Leiter:

$$0,2\ell \left[2,303 \log_{10} \frac{2\ell}{w+e} + 0,5 + 0,2235 \frac{w+e}{\ell} \right]$$

wobei ℓ , d (Durchmesser), δ , w (Breite) und e (Dicke) in Meter ausgedrückt sind.

Abmessungen				Induktivität Impedanz Z		
d (mm)	w (mm)	e (mm)	L(μH)	bei 50 Hz (Ω)	bei 1 MHz (Ω)	bei 10 MHz (Ω)
11,28			16,2*	0,0068	90	900
	10	10	14,8	0,00635	93	930
	50	2	12,9	0,00575	81	810
	100	1	11,6	0,00535	73	730
	500	0,2	8,4	0,00435	53	530

Selbstinduktivität und Impedanz eines Kupferleiters mit der Länge 10 m und dem Querschnitt 100 mm^2 in Abhängigkeit von seiner Form.

(*) In dieser Tabelle wird die Selbstinduktivität des zylindrischen Leiters für 50 Hz angegeben. Bei HF wird der Ausdruck $100 \mu_r \cdot \delta$ vernachlässigbar und $L \approx 14,35 \text{ }\mu\text{H}$ wie für den rechteckigen Leiter unabhängig von der Frequenz. Schliesslich ist zu bemerken, dass bei HF die Impedanz $Z = 2\pi \cdot f \cdot L$ gegenüber dem Widerstand R_{HF} vorherrschend wird.

Abb. 11: Impedanz eines Leiters in Abhängigkeit von seiner Form und von der Frequenz.

ableiten müssen, sollten Flachleiter sein, was den Selbstinduktionskoeffizienten und die Stromverdrängung und damit den Spannungsabfall pro Längeneinheit stark reduziert (siehe Abb. 11). Wichtig ist, dass diese Leiter möglichst kurz sind. Nehmen wir als Beispiel den Fall eines NS-Überspannungsableiters, der dafür vorgesehen ist, die äussere Überspannung auf 1,5 kV zu begrenzen. Wenn er mit einem 1 m langen Leiter mit rundem Querschnitt zwischen der geschützten Phase und der Erdungsklemme angeordnet ist, erzeugt ein Strom von 5 kA mit einer Vorderflanke von 8 ms eine Spannung von:

$$\dot{U} \approx L \frac{di}{dt} = 1.10^{-6} \cdot \frac{5 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^{-6}} = 625 \text{ V}$$

was eine Gesamt-Überspannung von 2,1 kV ergibt, die gefährlich ist, da zahlreiche Betriebsmittel eine Stossspannungsfestigkeit von 1,5 kV haben. Die Lösung besteht darin, die Anwendung direkt an die Klemmen des Überspannungsableiters anzuschliessen (siehe Abb. 12).

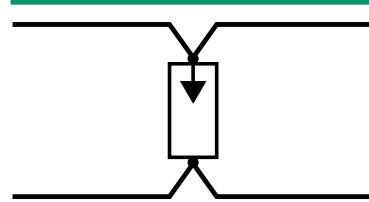


Abb. 12: Opti.Anschluss an einen Überspannungsableiter.

2.2 Massen

Arten von Massen

In einem Gebäude kommen verschiedene Arten von metallischen Massen vor:

- Metallgehäuse der elektrischen Verbraucher und elektronischen Geräte
- Metallische Tragkonstruktionen des Gebäudes
- Wasser- und Gasleitungen und -apparate
- Massen der elektronischen Betriebsmittel, die an der Signalübermittlung beteiligt sind (0 Volt)
- Massen vom Abschirmungs- und Faradaykäfig-Typ, die dazu dienen, das Eindringen von elektromagnetischen Felder zu verhindern. Wie bei den Erden haben die Massenkreise zwei Aufgaben:

Erste Aufgabe: Personenschutz

Zwischen den Metallgehäusen, Gas- oder Wasserleitungen und metallischen Tragkonstruktionen des Gebäudes können gefährliche Potentiale vorhanden sein. Somit müssen aus Gründen des Personenschutzes alle gleichzeitig berührbaren Massen miteinander verbunden sein. Dies

ist der Grund, weshalb die Installationsnormen vorschreiben, dass alle obengenannten Massen unabhängig vom Erdungsschema an die Potentialausgleichsschiene angeschlossen werden müssen (siehe Abb. 13).

Die Erdung der Massen der Verbraucher bildet ein sternförmiges Potentialausgleichsnetz mit baumförmiger Verteilung der Schutzleiter (PE), da sie diese in denselben Kabeln befinden wie die aktiven Leiter.

Zweite Aufgabe: Betriebssicherheit der elektronischen Systeme

Elektronische Systeme sind empfindlicher gegen Potentialunterschiede und elektromagnetische Felder als der Mensch. Sie benötigen zusätzlich zu den Einrichtungen zum Sperren von durch Leitung übertragenen Störungen Massen-Ebenen, Abschirmungen und Faradaykäfige zum Schutz gegen elektromagnetische Felder sowie miteinander verbundene Potentialausgleichsmassen, insbesondere, wenn es sich um Geräte handelt, die über einen Datenübertragungsbuss miteinander kommunizieren. In diesem Fall muss

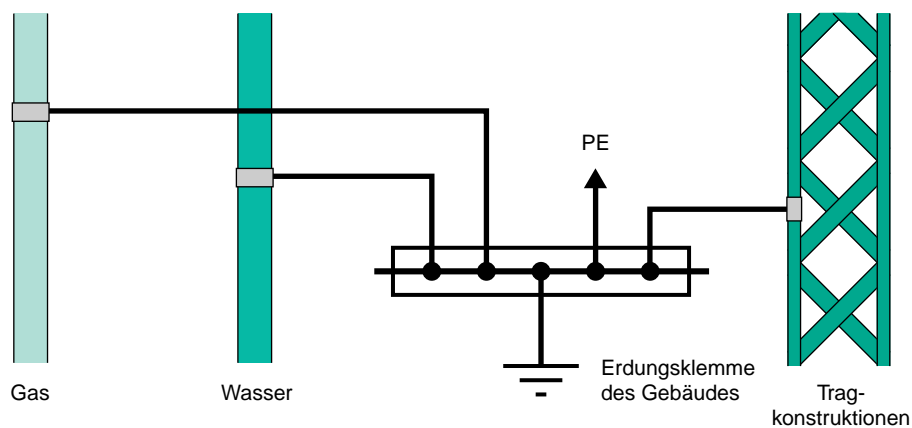


Abb. 13: Anschluss aller Massen an die Potentialausgleichsschiene.

der Potentialausgleich der Massen im Gebäude möglichst gut sein, da sich kommunizierende Geräte unabhängig davon, ob sie Aufgaben auf dem Gebiet der Leittechnik oder der Informatik erfüllen, örtlich voneinander getrennt auf demselben Stockwerk oder sogar auf verschiedenen Stockwerken befinden können.

Lösung

Die Lösung ist aus verschiedenen Gründen ein vermaschtes Massennetz.

■ Bekämpfung elektromagnetischer Blitzfelder. Der Blitz kann direkt in das Gebäude einschlagen. In diesem Fall hat der Blitzstrom, wenn nur ein einziger Erdungsleiter des Blitzableiters vorhanden ist, die folgenden Wirkungen:

- Auftreten eines sehr starken Magnetfeldes im Haus
- Impulsförmiges elektrisches Feld infolge der sehr hohen Spannung, die im Erdungsleiter auftritt

$$(v = \ell L \frac{di}{dt}).$$

Die Lösung besteht in der vertikalen Vermaschung: Zum Beispiel alle 10 m ein Erdungsleiter.

Der Vorteil ist die Aufteilung der Ströme und somit der Magnetfelder und die Selbstdämpfung derselben im Innern des Gebäudes, da sie sich gegenseitig aufheben.

Der Blitz kann in der Nähe des Gebäudes einschlagen. In diesem Fall muss, um die Anlagen im Innern des Gebäudes zu schützen, ein Faradaykäfig gebildet und somit zur vertikalen Vermaschung eine horizontale Vermaschung hinzugefügt werden (siehe Abb. 14).

Wenn man in Betracht zieht, dass das Frequenzspektrum der Blitzspannung (siehe Abb. 15) vom energetischen Gesichtspunkt im wesentlichen unterhalb von 1 MHz liegt und dass der Käfig für

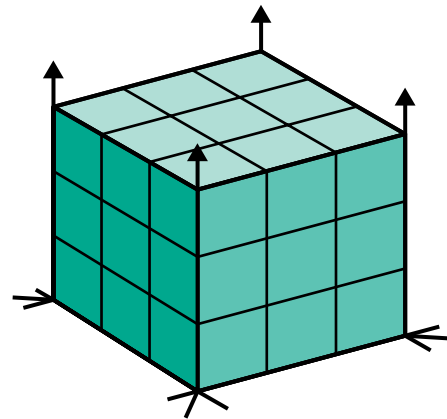
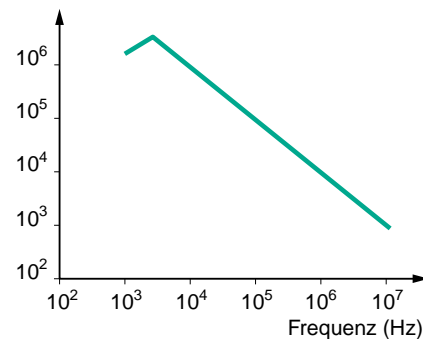


Abb. 14: Horizontale und vertikale Vermaschung des Gebäudes. Diese Vermaschung stellt einen Faradaykäfig dar.

a – Mittlere Spektraldichte der Amplitude von elektromagnetischen Blitzfeldern (Pierce-Kurve)

Spitzenamplitude des Feldes (µV/m) im Abstand von 10 km vom Blitz



b – Frequenzspektrum der normierten Blitzwelle (1,2/50 µs)

Relative Amplitude

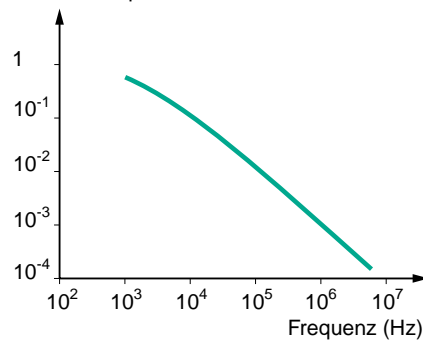


Abb. 15: Frequenzspektrum der elektromagnetischen Erscheinung «Blitz».

Die Hauptentladung ist mit einer senkrechten Antenne mit einer Höhe von mehreren Kilometern vergleichbar, die von einem Spitzenstrom von mehreren zehn Kiloampere durchflossen wird. Diese Antenne strahlt eine elektrisches und ein magnetisches Feld ab, die von der Distanz

$$d = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c}{2\pi f}$$

$$d = 50 \text{ m} \text{ à } 1 \text{ MHz.}$$

an umgekehrt proportional zur Distanz abnehmen.

Die Hauptentladung ist ein Impulsstrom mit sehr reichem und von Blitzschlag zu Blitzschlag sehr variablem Frequenzgehalt (breites Frequenzspektrum). Die Abbildung 15a zeigt die Form des charakteristischen mittleren Spektrums der Blitze, das aus zahlreichen Messungen an verschiedenen Stellen der Erde erhalten worden ist. Die IEC hat für in elektrischen Netzen induzierte Spannungen eine Wellenform normiert, die 1,2/50 µs genannt wird und deren Spektrum aus der Abbildung 15b ersichtlich ist. Sie entspricht sehr gut der Pierce-Kurve.

eine Teilung von $\lambda/30$ wirksam ist, muss die

$$\text{Maschenweite} \frac{c}{30f} = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^7} = 10 \text{ m.}$$

betragen.

■ Örtliche Reduktion elektromagnetischer Felder durch den Massen-Ebenen-Effekt. Wenn ein empfindliches Betriebsmittel oder ein Kommunikationsbus auf einer leitenden Oberfläche angeordnet wird, sind sie elektromagnetischen Feldern weniger stark ausgesetzt, da die leitende Oberfläche ein Feld erzeugt, das dem Störfeld entgegenwirkt.

Aus diesem Grund haben die Informatikräume einen Boden mit einem Maschennetz und werden Schwachstromkabel auf metallische Kabelroste gelegt.

■ Minimierung der Impedanz der Massenkreise zwischen zwei beliebigen Punkten. Die Impedanz einer Kupferleiters erhöht sich mit zunehmender Frequenz des durch ihn fließenden Stroms (Induktivität und Stromverdrängung). Bei 1 MHz beträgt die Impedanz grössenordnungsmässig 10 Ω pro Meter. Wenn ein Fehlerstrom mehrere Wege einschlagen kann, wird der Potentialausgleich wesentlich verbessert.

2.3 Vermaschung der Netze der elektrischen Massen und der übrigen Massen

Wir haben gesehen, dass die dem Personenschutz dienenden Erdungskreise sternförmig (für den Schutzleiter baumförmig) sind, und dass es für die Betriebssicherheit der elektronischen Systeme nötig ist, dass nur ein einziges vermaschtes Massennetz vorhanden ist. Theoretisch können diese Kreise im Gebäude getrennt sein, auch wenn sie an den gleichen Erder angeschlossen sind.

Auch wenn die Normen verschiedene Arten von Potential-Bezugspunkten kennen (siehe Abb. 16), machen in der Praxis nur wenige Schalt- und Steuergeräte und elektrische oder elektronische Systeme diese Unterscheidung. So ist zum Beispiel der Begriff «Rauschfreie Erde» sehr umstritten und angesichts der Ausbreitung der kommunizierenden Systeme und der zahlreichen Verbindungen am Verschwinden.

In der Hochfrequenz lassen die Streukapazitäten diese Unterscheidungen noch illusorischer werden. Deshalb müssen in Neubauten das Schutz-Potentialausgleichsnetz (der elektrischen Körper) und das Betriebs-Potentialausgleichsnetz (der übrigen Massen) miteinander verbunden werden, um auf diese Weise ein einziges Potentialausgleichsnetz zu schaffen. Dieses

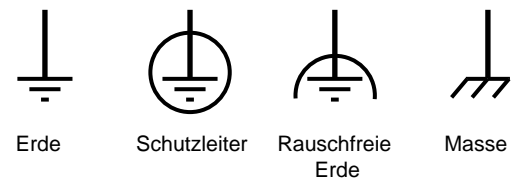


Abb. 16: Beispiele von Symbolen für Erde und Masse.

Netz muss die Integrität der Schutzleiter (PE) sicherstellen, denn der Personenschutz ist oberstes Gebot.

Es erübrigt sich, zwischen den Starkstrom-Sternnetzen und den für den Schwachstrom notwendigen vermaschten Netzen zu unterscheiden.

In bestehenden Gebäuden ist es angebracht, die Massen der empfindlichen Geräte (falls sie kommunizieren) miteinander zu verbinden, die elektrische Durchschaltung der Kabelroste zu verbessern und wenn nötig vermaschte Massenebenen zu schaffen.

3. EMV nichtkommunizierender elektronischer Geräte

Der Begriff «nicht kommunizierend» bedeutet, dass das Gerät keine Schwachstrom- Ein- oder Ausgänge hat. Die Bezeichnung «isoliert» darf nicht verwendet werden, da dieses Gerät vom Netz gespeist wird, über Streukapazitäten mit seiner elektrischen Umgebung verbunden ist und von elektromagnetischen Feldern beeinflusst wird. Es handelt sich zum Beispiel um einen Mikrocomputer (ohne Drucker). Dieser Fall ist auf den ersten Blick einfach, da die Hersteller die Normen einhalten müssen,

welche die Emissions-Grenzwerte und die Unempfindlichkeitspegel festlegen. Auf jeden Fall kann es notwendig sein, besondere Massnahmen zu ergreifen, wenn die elektromagnetische Umgebung sehr hart ist oder wenn sich in der Nähe sehr empfindliche Verbraucher befinden. Diese Massnahmen sind gegenüber der Gefahr von Eigenstörungen, der Anwesenheit von Strahlungsfeldern und von durch Leitung übertragenen Störungen infolge von Starkströmen unerlässlich.

3.1 Die Eigenstörung

Zahlreiche Einrichtungen setzen heute die Leistungselektronik ein. In diesem Zusammenhang können zum Beispiel die pulsgesteuerten Umrichter genannt werden, die im Haushalt, im Büro und in der Industrie zunehmend Anwendung finden. Die Abbildung 17 zeigt das Schema eines pulsgesteuerten Umrichters und die von ihm erzeugten Störungen. Diese Einrichtungen verwenden Leistungstransistoren, die mit Frequenzen von mehreren zehn kHz – oder mehr für kleine Leistungen – mit eindrücklichen di/dt und dv/dt (von zum Beispiel einigen hundert Ampere pro Mikrosekunde) schalten.

Damit diese Einrichtungen richtig funktionieren, ist eine innere EMV erforderlich. Dafür wird in der Regel bereits im Entwicklungsstadium gesorgt: Auslegung der Karten (siehe Abb. 18), Begrenzung der Streukapazitäten, Abschirmungen, netzseitige HF-Filter, Abstand zwischen störenden Kabeln usw., die auch geprüft werden. Trotzdem besteht die Gefahr von Störungen, insbesondere aufgrund der Ausführung der Geräte, die sehr oft von derjenigen bei den normativen Prüfungen abweicht: zum Beispiel ungenügende Massenverbindungen, die zu lang sind und Kopplungen über eine gemeinsame Impedanz bewirken können, usw.

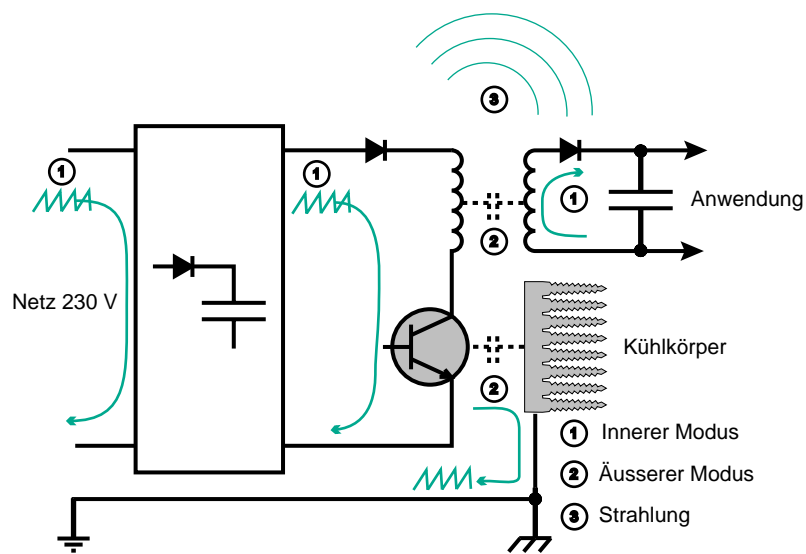


Abb. 17: Verschiedene, von einem pulsgesteuerten Umrichter erzeugte Störungen.

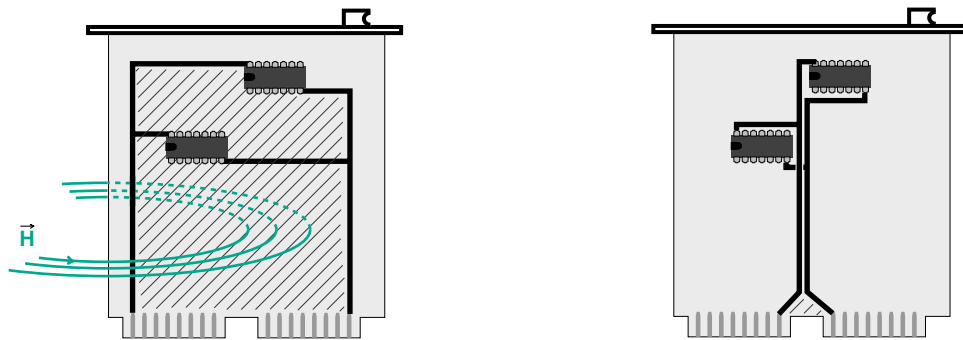


Abb. 18: Induktive Kopplungen infolge der Anwesenheit von Schleifen. Bei der Anordnung der Leiterbahnen links weist die Speisung der beiden Schaltungen zwei grosse Schleifen auf. Die Anordnung rechts ist besser.

3.2 Auswirkungen von Strahlungsfeldern

Elektrische Felder

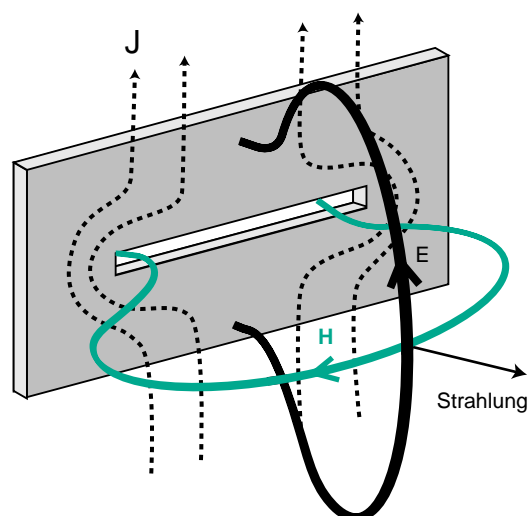
Äussere elektrische Felder wirken über den Antennen-Effekt auf das Opfer-Gerät und die dieses speisenden Stromkreise (50 Hz) ein. Die Gegenmassnahmen sind:

- Minimierung der Antennen-Effekte, zum Beispiel kein freier Leiter (in der Luft) auf einer Seite, Leiter nahe an den Massen.
- Verwendung von HF-Filtern am Speisekabel, um induzierten Störungen den Eintritt zu verwehren.
- Abschottung mit Öffnungen mit reduzierten Abmessungen.

Magnetische Felder

Die von Abschirmungen bewirkte Dämpfung hängt im wesentlichen von der Absorption ab. Sie ist umgekehrt proportional zur Eindringtiefe (δ). Diese beträgt für Stahl 0,07 mm bei 30 kHz und 1,7 bei 50 Hz. Für Kupfer beträgt sie 10 mm bei 50 Hz! (für eine Metalldicke von $e = \delta$ beträgt die Dämpfung 8,7 dB).

Dies zeigt, dass wirksame Abschirmungen für Niederfrequenz sehr schwer realisierbar und kostspielig sind. Zudem ermöglichen gewisse Öffnungen oder Schlitzte ein Eindringen der Induktion über den magnetischen Dipol-Effekt (siehe Abb. 19).



Eine Öffnung von der Länge l in einer Abschirmung verhält sich wie ein Dipol derselben Länge (Babinet'sches Prinzip) und strahlt auf der anderen Seite der Abschirmung einen Teil des Einfallenden Feldes wieder ab. Die Öffnung wird vollständig transparent, wenn $l \geq \lambda/2$. Unterhalb ihrer Resonanzfrequenz, d.h. wenn $l < \lambda/2$, welche Bedingung bei niederfrequenten Erscheinungen erfüllt ist, kann der Schlitz mit einer Induktivität von etwa 1 nH/cm verglichen werden. Ein von einem solchen Schlitz unterbrochener Oberflächenstrom J erzeugt zwischen den Rändern eine Potentialdifferenz und es tritt ein Teil des magnetischen Feldes durch den Schlitz. Deshalb strahlt er senkrecht dazu ein elektrisches Feld E sowie parallel dazu ein magnetisches Feld (das vorherrschend ist) ab.

Abb. 19: Kopplung durch einen Schlitz.

Das Magnetfeld, das in die Umhüllung eindringt und/oder in einem Schrank durch Starkströme erzeugt wird, induziert in den Schleifen äussere und innere Spannungen.

Dazu ist zu bemerken, dass durch Leitung übertragene NF-Störungen magnetischer Herkunft, die über das Speisekabel eintreffen, von herkömmlichen, als HF-Filter bezeichneten Filtern sehr schlecht gedämpft werden.

In einem Gebäude haben durch Strahlung übertragene Magnetfelder verschiedene Ursachen, wovon Blitzschläge, der Streufluss von Transformatoren, ein Versorgungsstromkreis mit Stromrichtern sowie die Schutzleiter im Erdungsschema IN-C genannt werden können. Dieser Fall wird in der Abbildung 20 dargestellt.

Nehmen wir den Fall der Herabführung eines Starkstromkabels in einem Leitungskanal eines Gebäudes. Das Erdungsschema ist die Nullung (TN-C), der Schutzleiter (PE), der zugleich Neutralleiter (N) ist, wird dauernd vom Differenzstrom der Lasten (Neutralleiterstrom) durchflossen, erhöht um die Oberwellenströme der 3. Ordnung und Mehrfachen von 3. Diese Oberwellenströme werden wegen der Anwendung von nichtlinearen Lasten wie Stromrichtern und insbesondere pulsgesteuerten Umrichtern immer wichtiger.

Infolge des in die metallischen Tragkonstruktionen abgeleiteten Stroms ist die Vektorsumme der Ströme im Kabel nicht gleich null.

Dieser Differenzstrom, der mehrere zehn Ampere betragen kann, erzeugt im Abstand d ein magnetisches Störfeld $H = I/2\pi \cdot d$. So erzeugt beispielsweise ein Strom von 63 A im Abstand von 10 m ein Feld von 1 A/m, das genügt, um zum Beispiel Kathodenstrahlröhren, jedoch auch bestimmte magnetische Komponenten, zu stören, da bekanntlich HF-«Abschirmungen» NF-Magnetfelder nicht fernhalten.

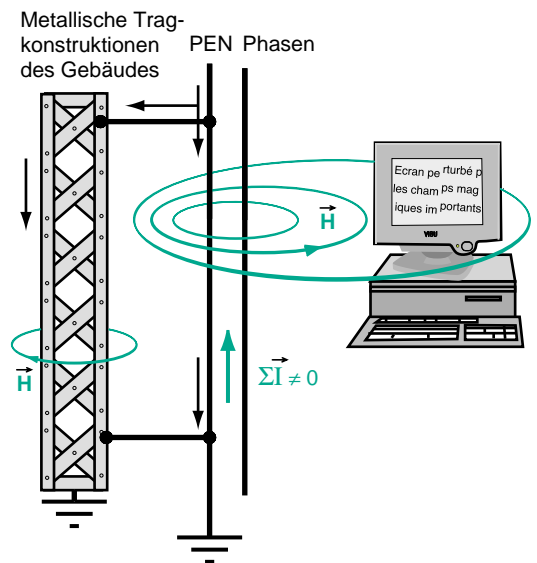


Abb. 20: Magnetisches Strahlungsfeld infolge des Neutralleiter- oder Fehlerstroms im Erdungsschema TN-C.

Zu bemerken ist, dass – immer noch im Schema TN – das bei einem Isolationsfehler erzeugte Magnetfeld sehr hoch ist ($I_d = I_{cc}$).

Die Massnahmen gegen niederfrequente Magnetfelder sind:

- Vergrösserung der Entfernung.
- Starkstromkabel, welche die Phasen, den Neutralleiter und den Schutzleiter enthalten (einpolige Kabel sind wo immer möglich zu vermeiden).
- Richtige Wahl des Erdungsschemas.
- Kabelroste aus Metall (Dämpfungs-Ebene).
- Verwendung von vorzugsweise ferromagnetischen Metallumhüllungen.

3.3 Durch Leitung übertragene Störungen

Oberhalb von 1 MHz begrenzt die Impedanz der Kabel deren Pegel sehr rasch ($L = 1 \mu\text{H/m}$). Die lästigen Störungen sind deshalb vor allem die Oberwellen, die Schaltüberspannungen und die Blitzspannungen und -ströme.

■ Die Oberwellenspannungen sind in der Regel für nichtkommunizierende Geräte wenig störend. Sie können zum Beispiel gesteuerte Gleichrichter stören (indem sie den Nulldurchgang verschieben, der als Phasenreferenz dient).

■ Die Oberwellenströme können durch induktives Nebensprechen durch Leitung übertragene Störungen erzeugen.

■ Schalt- und Blitzüberspannungen können Störungen oder sogar Zerstörungen von Komponenten verursachen. Die Gegenmassnahmen bestehen in der Anordnung von Überspannungsableitern oder sogar Funkenlöschern, die Filter, Überspannungsableiter und einen abgeschirmten Transformator umfassen. Letztere dämpfen die HF-Störungen, sperren jedoch vor allem die äusseren NF-Spannungen.

4. EMV kommunizierender elektronischer Geräte

Kommunizierende Systeme sind störungsempfindlicher als nichtkommunizierende Systeme, da die digitalen Verbindungen einen sehr niedrigen Pegel haben und Störungen über gemeinsame Impedanzen und durch Strahlung mehr ausgesetzt sind. Digitale Signale sind besonders auf Ausgleichsvorgänge empfindlich. Ihre Empfindlichkeit wird durch die zunehmende Länge der Verbindungen und die Vervielfachung der Störungsquellen erhöht.

Was Störungen mit Frequenzen unterhalb von 1 MHz anbetrifft, sind die zu berücksichtigenden Erscheinungen auch hier vor allem solche von der Frequenz 50 Hz und deren Oberwellen, die Schaltüberspannungen und der Blitz. Schaltüberspannungen sind in der Regel innere Überspannungen und müssen vorzugsweise an der Quelle mit Hilfe von Überspannungsbegrenzern (RC-Gliedern, ZnO-Überspannungsableitern usw.) zurückgehalten werden. Dieses Thema wird im vorliegenden Technischen Heft nicht behandelt (siehe Technisches Heft Nr. 179).

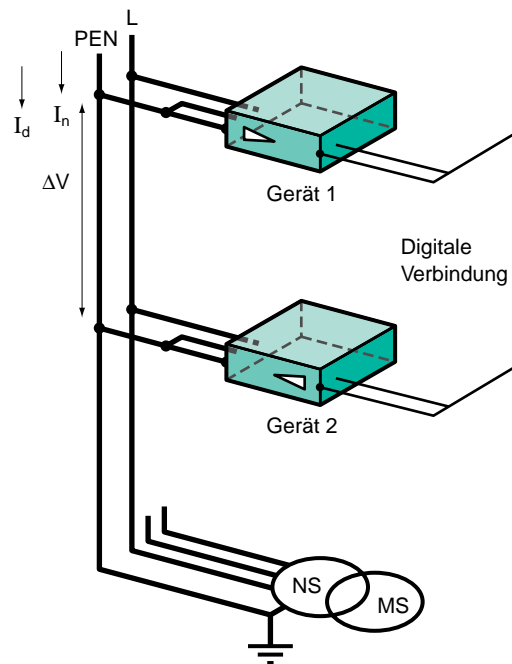


Abb. 21: Schema TN-C. Ein Neutraleiterstrom bewirkt Potentialunterschiede, welche die Spannungsreferenzen der digitalen Verbindungen stören. Ein Isolationsfehlerstrom (mehrere kA) erzeugt ein ΔV , das Zerstörungen bewirken kann.

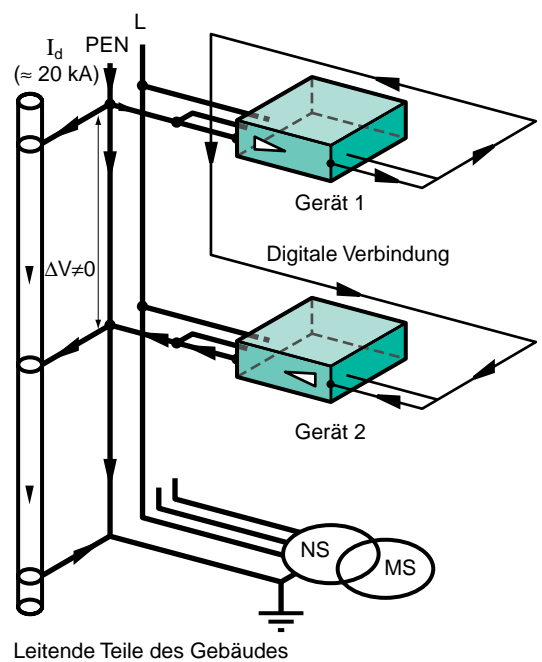


Abb. 22: Schema TN-C mit Vermaschung. Das dauernde (Differenzstrom, Oberwellenströme vom Mehrfachen der 3. Ordnung) und temporäre (Fehler) ΔV wird abgeschwächt. «Vagabundierende Ströme» bringen jedoch – ebenso an den Starkstromkabeln – die Gefahr von Bränden und störenden Magnetfeldern mit sich (siehe Abb. 20).

4.1 Beispiel von Störungen über eine gemeinsame Impedanz

Nehmen wir zwei kommunizierende Geräte, die zu einem System mit «verteilter Intelligenz» gehören und vom gleichen Stromnetz gespeist werden. Nun wollen wir sehen, was bei einem Isolationsfehler passiert (siehe Abb. 21):

Beim Fehlen einer Vermaschung im Schema TN-C bewirkt der Isolationsfehler einen Kurzschlussstrom I_d .

Der Spannungsabfall ΔV im Potentialausgleichsleiter kann die Hälfte der Phasenspannung übersteigen (Querschnitt PE-Leiter < Querschnitt der Phasenleiter). Diese Spannung erscheint zwischen den Massen der beiden Geräte, was die Kommunikation stört oder sogar, wenn kein geeigneter Schutz vorhanden ist, die Sender/Empfänger der digitalen Verbindung zerstört. Wenn das Schwachstromkabel ein Koaxialkabel ist, wirkt das ΔV im inneren Modus. Die Abbildungen 22, 23 und 24 zeigen, was bei einer Vermaschung der Massen bei den einzelnen Erdungsschemata passiert (bei einem zweiten Fehler sind im Schema IT die Gefahren dieselben wie im Schema TN-S).

Zu bemerken ist, dass, wenn die Vermaschung aller Massen sehr stark ist, das Problem des ΔV

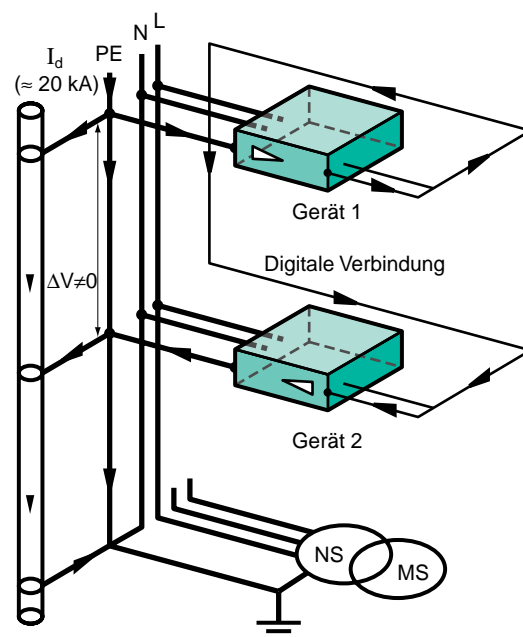
im Schema TN nicht mehr existiert, der Isolationsfehlerstrom jedoch höher ist als der dreiphasige I_{cc} (sehr niedrige Impedanz des Rückstromkreises zum Neutralleiter).

Was muss daraus für bestehende oder neue Bauten geschlossen werden, die keine genügende Vermaschung der Massen aufweisen?

■ Ein Erdungsschema vermeiden, das im Isolationsfehlerfall einen Kurzschluss bewirkt (siehe Abb. 24).

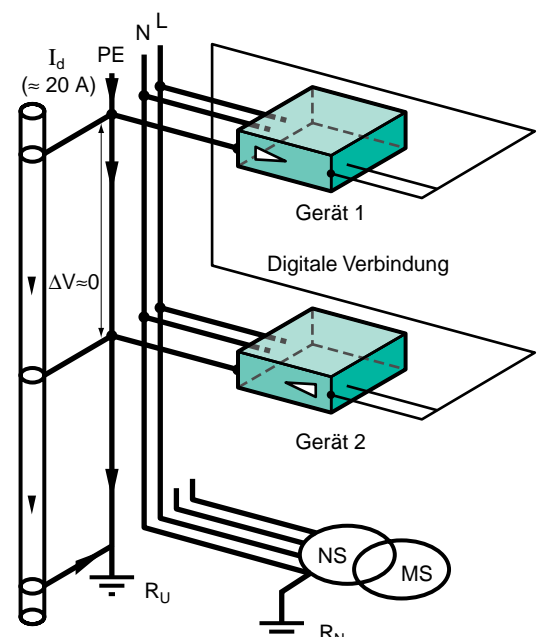
■ Fehlerströme aufteilen, indem die Massen an zahlreichen Stellen mit den metallischen Tragkonstruktionen des Gebäudes verbunden werden. Dadurch wird das ΔV auf ein Minimum reduziert, wobei jedoch die Strahlung der Leistungskabel unter Einschluss des Schutzleiters PE zu beherrschen ist (siehe durch Strahlung übertragene Felder im vorhergehenden Kapitel).

■ Vorzugsweise Verwendung von Verbindungen aus abgeschirmten, verdrehten Aderpaaren, wobei der Strom in der Abschirmung angesichts der niedrigen Übertragungsimpedanz nur eine beschränkte Auswirkung hat.



Leitende Teile des Gebäudes

Abb. 23: Schema TN-S. Temporäres ΔV . Der Fehlerstrom im Schutzkabel zerstört temporär den Potentialausgleich. Da der Schutzleiter PE mit den Tragkonstruktionen verbunden ist, tritt eine Aufteilung der Ströme und der Magnetfelder wie in der Abbildung 20 auf.



Leitende Teile des Gebäudes

Abb. 24: Schema TT. Der niedrige Strom im Schutzleiter PE stört den Potentialausgleich der Potentialreferenzen der kommunizierenden elektronischen Geräte (R_{PE} niedrig gegenüber R_U und R_N , sowie I_d niedrig). Die Magnetfelder und ΔV sind 1000mal niedriger als im Schema TN-C oder TN-S.

4.2 Beispiel von Störungen durch Strahlung

Nehmen wir den Fall von zwei Computern in einem Netzwerk (siehe Abb. 25a) und betrachten wir, was bei einem Blitzschlag passiert. Wir nehmen an, der Blitz schlage in einer Distanz von 200 m vom Gebäude mit einem di/dt von $25 \cdot 10^9 \text{ A/s}$ ein ($\hat{I} = 25 \text{ kA}$; $t_m = 1 \mu\text{s}$). Wenn die vom 50-Hz-Netz und den digitalen Verbindungen gebildete Schleife (siehe Abb. 25a) dem Impulsfeld eine Fläche von 50 m^2 bietet, beträgt die entstehende EMK:

$$e = \frac{d\phi}{dt} = \mu_0 S \frac{dH}{dt} = \frac{\mu_0 S di}{2\pi d dt}$$

$$e = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50}{2\pi \cdot 200} \cdot 25 \cdot 10^9 = 1,25 \text{ kV}$$

Diese ist für die digitalen Sende/Empfangs-Schaltungen gefährlich. Wenn die Schleife geschlossen ist, bewirkt der entstehende Strom Zerstörungen.

Welches sind die Gegenmassnahmen?

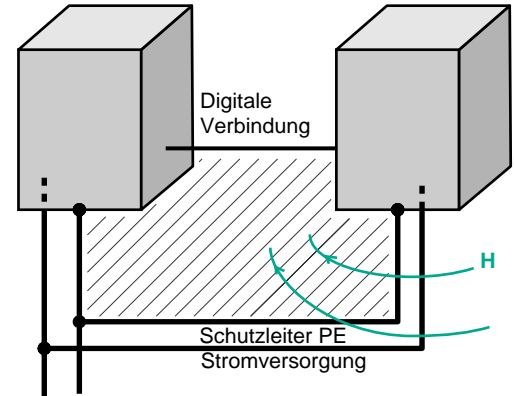
Diese bestehen darin, die Schleifenflächen zwischen den Starkstrom- und den Schwachstromkabeln möglichst klein zu halten. Wenn die Schleife offen ist, entsteht eine für die Elektronik gefährliche Spannung, und wenn sie geschlossen ist, stört der induzierte Strom (Übertragungsimpedanz) das Signal oder zerstört sogar die Sende/Empfangs-Schaltungen. Die Abbildung 25a zeigt, dass die Schleife sehr gross sein kann.

Mit einem Begleitleiter, Kabelrost oder Metallrohr (siehe Abb. 25b) kann die Schleifenfläche minimal gehalten werden.

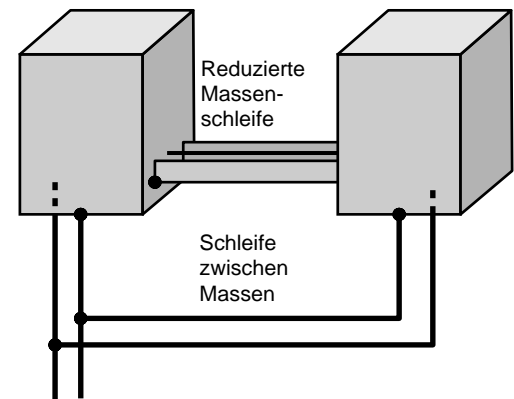
Aber Vorsicht! Auf diese Weise bildet sich eine Schleife zwischen Massen. Die leitende Verbindung zwischen den beiden kommunizierenden Geräten muss somit eine niedrige Impedanz haben, damit zwischen den Massen der kommunizierenden Geräte keine induzierte Spannung entsteht (Spiralanschlüsse vermeiden). Es ist zu bemerken, dass diese Verbindungsimpedanz, wenn sie niedrig ist, im Isolationsfehlerfall einen grossen Teil des Fehlerstroms durchlässt. Die Lösung besteht wiederum in einer möglichst starken Vermaschung der Massen, um die Ströme aufzuteilen und/oder in der Anwendung eines Erdungsschemas mit niedrigem Fehlerstrom.

In jedem Fall ist es klug, die Lösung gemäss Abbildung 25c anzuwenden, wo die Starkstrom/Schwachstrom-Schleife sowie die Schleife zwischen Massen beseitigt sind. Drei Leiter sind parallel: die beiden Kabelroste und der Schutzleiter (PE). Die Kabelroste müssen wenn möglich verschieden sein, gleich verlaufen und nahe beieinander liegen. Zum Beispiel im Fall einer Steigleitung. In den einzelnen Stockwerken (niedrigere Ströme in den Starkstromkabeln)

a – Durch das Netz und die digitale Verbindung gebildete Schleife



b – Der an die Massen der beiden Geräte angeschlossene Kabelrost setzt die Wirkung des mit der numerischen Verbindung induzierten Stroms auf ein Minimum herab



c – Verwendung von parallelen Kabelrosten für die Stromversorgung und die digitale Verbindung: Verkleinerte Schleifen, Dämpfungsebenen und Reduktion der Auswirkungen durch Vermaschung

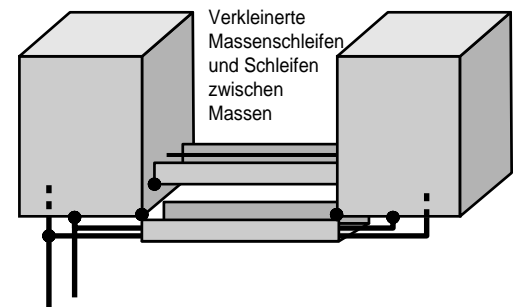


Abb. 25: Störung einer digitalen Verbindung durch eine induktive Schleife, und Abhilfemassnahmen.

können sich die Starkstrom- und Signalkabel auf dem gleichen metallischen Kabelrost befinden (siehe Abb. 26).

Der Abstand zwischen den Starkstrom- und Signalkabeln auf einem metallischen Kabelrost hängt von mehreren Faktoren ab:

- Unempfindlichkeit der kommunizierenden Geräte
- Befähigung der Kommunikationsprotokolle, gestörte Meldungen zu bewältigen
- Länge der gemeinsamen Verlaufs
- Stromstärke in den Kabeln
- Den Schutzleiter PE enthaltende Mehrleiterkabel oder Einleiterkabel
- Elektrische Eigenschaften der Signale (Pegel, Frequenz, Impedanz usw.)

Die Hersteller von kommunizierenden Betriebsmitteln empfehlen einen Mindestabstand, der normalerweise 30 cm beträgt; jedoch nur ein Fachmann kann eine auf einen bestimmten Fall zugeschnittene Empfehlung abgeben.

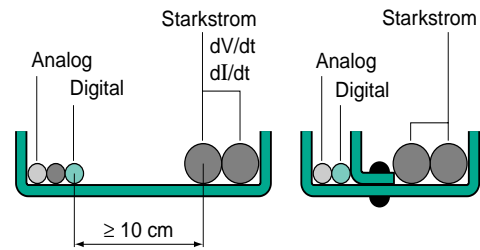


Abb. 26: Trennung der unterschiedlichen Leiter auf dem gleichen Kabelrost

5. Schlussfolgerung

Das vorliegende Technische Heft hat gezeigt, dass von der Koexistenz von Starkstrom und Schwachstrom verschiedene Fachgebiete betroffen sind. Wir haben uns nicht mit der Kommunikations-Software befasst, deren Entwickler die möglichen Störungen voraussehen und versuchen müssen, diese zu bewältigen. Die Elektroniker, Elektriker, Automaten und Informatiker müssen bei der Projektierung und Ausführung von Anlagen zusammenarbeiten. In Frankreich arbeitet das Unterkomitee 15D der UTE an einem diesbezüglichen Leitfadens. Die Elektroniker wissen, dass abgeschirmte, verdrehte Kabel vorzuziehen sind, dass nie ein Leiter in der Luft belassen werden soll, dass die Kabel an einer das Potential ausgleichenden Metallfläche befestigt werden sollen, dass Spiralanschlüsse zu vermeiden sind und dass die Kabelstopfbüchsen sorgfältig ausgewählt und angewendet werden müssen. Sie wissen nicht immer, dass es sehr empfehlenswert ist, die Schwachstromkabel parallel zu den Starkstromkabeln zu führen, dass Kupferverbindungen zwischen zwei Gebäuden gefährlich sind, selbst wenn die Erder mit einem Leiter von 35 mm^2 ($L = 1 \text{ } \mu\text{H/m}$) miteinander verbunden sind, dass die Vermaschung der Massen, wenn sie notwendig ist, Schwierigkeiten verursachen kann (zum Beispiel Brandgefahr im Schema TN-C). Die Elektriker haben Schwierigkeiten mit der Unterscheidung zwischen Schutzkreisen und Massenkreisen. Sie sind sich nicht immer über

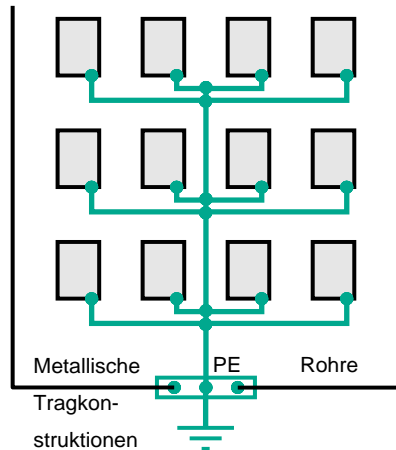
die Bedeutung der vollständigen Vermaschung im klaren und sehen nicht immer ein, warum die Verbindungen zwischen Massen und die Durchschaltung der Kabelroste mit so grosser Sorgfalt sichergestellt werden müssen.

Es wurde gezeigt, dass die nichtkommunizierenden Geräte, obwohl sie nach dem Stand der Technik ausgeführt sein und die Emissions- und Unempfindlichkeitsnormen einhalten müssen, nicht weniger von den Störungen und Kopplungen betroffen sind, die in den elektrischen Anlagen vorkommen, und über die man sich zum Teil manchmal nicht im klaren ist.

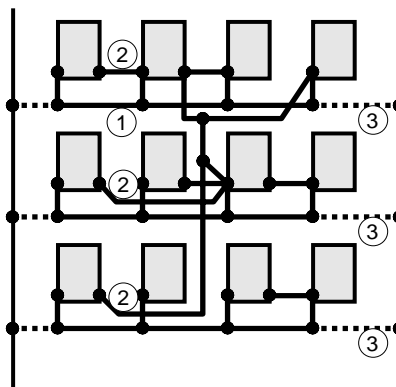
Die eine immer grössere Verbreitung findenden kommunizierenden Systeme bieten effektiv Schwierigkeiten in bezug auf die Koexistenz von Starkstrom und Schwachstrom in den Gebäuden. Induktive Schleifen müssen vermieden oder durch Begleitmassen unschädlich gemacht werden. In der NF wie in der HF der Potentialausgleich zwischen den Massen gesucht werden, und dies nicht nur pro Stockwerk, sondern auch zwischen den Stockwerken. Die macht Dämpfungsebenen und die Vermaschung der Massen obligatorisch. In allen Fällen ist eine einwandfreie Ausführung der metallischen Kabelroste, Kabelkanäle und Sockelleisten von grundlegender Bedeutung.

Die Abbildung 27 zeigt die Vision des Elektrikers und jene des EMV-Spezialisten sowie eine kostengünstige Minimallösung für bestehende Gebäude.

Elektrische Sicherheit

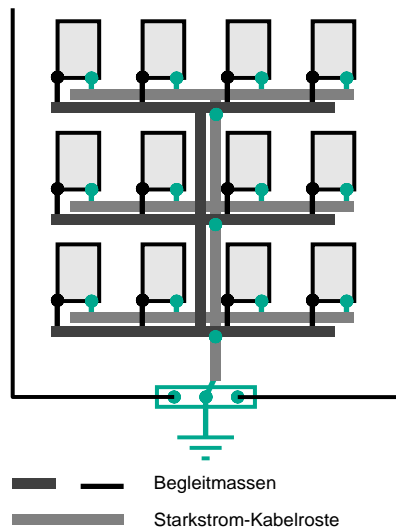


EMV-Potentialausgleich



- (1) Potentialausgleichsleiter im Stockwerkskanal
- (2) Abschirmung des Begleitleiters, metall. Kabelrost
- (3) Zusätzlicher Potentialausgleichsleiter

Sicherheit und EMV



- — — Begleitmassen
- — — Starkstrom-Kabelroste

a – Schutz-Potentialausgleichsnetz mit Bus-Topologie (zwischen den Stockwerken) und Stern-Topologie (auf den Stockwerken). Dasselbe gilt für die Elektrizitätsverteilung

- Ziel: Personenschutz / Indirektes Berühren
- Merkmale:
 - Keine Schleifen zwischen Massen
 - Berechnung des Fehlerstroms möglich
 - Kontrollierte Führung des Fehlerstroms
 - Niedrige Impedanz bei 50 Hz, jedoch hohe Impedanz bei HF
 - Keine Kopplung über eine gemeinsame Impedanz (ausser im Schema TN im Bereich der Steigleitung)

b – Vermaschtes Massennetz

- Ziele:
 - Potentialausgleich bezüglich HF
 - Niedrige Impedanz bei NF und HF
 - Merkmale:
 - Unregelmässige und mehrfache Führung der 50-Hz-Fehlerströme und des Neutralleiters (TN-C), da die Masse mit dem Schutzleiter PE verbunden sind.
 - Reduzierte Massenschleifen (HF)
 - Kopplung über eine gemeinsame Impedanz
 - Erhöhung des Fehlerstroms im Schema TN
- Anmerkung:** Die Vermaschung muss, um wirksam zu sein, insbesondere bei HF, sehr stark sein. Verbindungen vom Typ (3) bewirken Schleifen zwischen Massen, die Geräte betreffen, die sich auf verschiedenen Stockwerken befinden. Wenn also solche Verbindungen hergestellt werden, müssen die Potentialausgleichsverbindungen zwischen den Stockwerken vermehrt werden, um die Fläche der Schleifen zwischen Massen minimal zu halten.

c – Minimales Schutz-Potentialausgleichs- und Massennetz. Optimale Anwendung von Kabelrosten

- Ziele: Jene der Abbildungen 22a und 22b
 - Merkmale:
 - Vermeidet Starkstrom/Schwachstrom-Schleifen, Massenschleifen und Schleifen zwischen Massen
 - HF-Potentialausgleich
 - NF-Potentialausgleich (wenn I_d niedrig)
 - Keine vagabundierenden Ströme
 - Dämpfungsebenen-Effekt / EM-Felder
- Anmerkungen:**
- Kann durch örtliche, vermaschte Massen-Ebenen ergänzt werden.
 - Verbietet direkte Verbindungen (mit Begleitleiter) zwischen zwei nahe beieinanderliegenden Verbrauchern nicht.
 - Auf den Stockwerken kann ein einziger Kabelkanal genügen.
 - Die Steigleitung im Zentrum begrenzt äussere Einflüsse.
 - Auf den oberen Stockwerken sind Verbindungen vom Typ (3) vorzusehen, wenn sich die elektrischen Betriebsmittel mehr als 1 Meter von den äusseren metallischen Tragkonstruktionen des Gebäudes entfernt befinden.

Abb. 27: Wege zum Potentialausgleich bei NF und HF.

Literaturverzeichnis

Normen

- IEC 1000-4: Abschnitte 2 bis 13
- EG-Richtlinie Elektromagnetische Verträglichkeit 89/3367EWG

Technische Hefte Schneider

- Elektrische Störungen in der NS, Technisches Heft Nr. 141, April 1991 – R. Calvas
- EMV: Elektromagnetische Verträglichkeit, Technisches Heft Nr. 149, August 1996 – F. Vaillant
- Störungen elektronischer Systeme – die richtige Erdung. Technisches Heft Nr. 177, September 1995 – R. Calvas

Diverse Veröffentlichungen

- Die elektromagnetische Verträglichkeit, Editions Schneider 07/96 MD1CEM1F
- EMV-Lehrbuch, Editions Schneider 01/96 ART 62920
- REE, April 96 (Revue de l'Electricité et de l'Electronique)
- REE, November 95

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

Hauptverwaltung Schweiz:

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