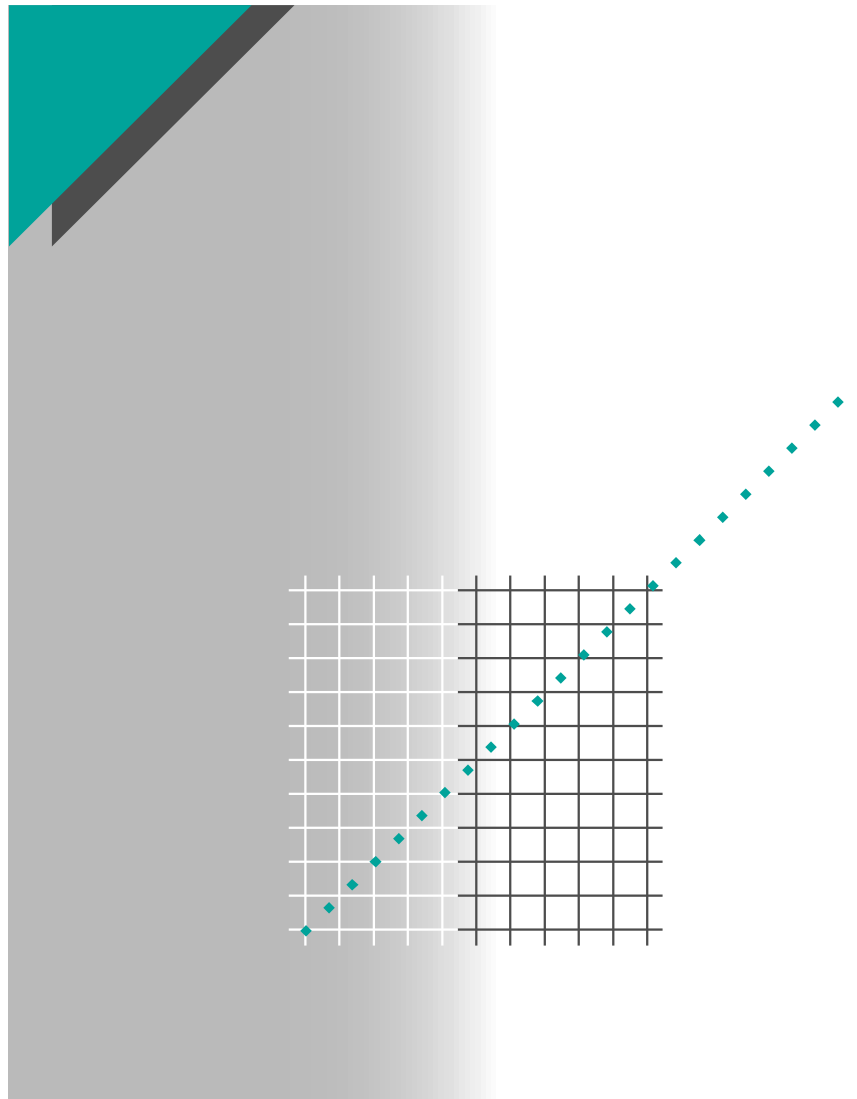


Technisches Heft Nr. 177

Störungen elektronischer Systeme – die richtige Erdung



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. 177

Störungen elektronischer Systeme – die richtige Erdung

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.

Lexikon

NS	Niederspannung
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
CPI	Contrôleur Permanent d'Isolement (Isolationsüberwachungseinrichtung)
DDR/HS	Dispositif Différentiel Résiduel Haute Sensibilité (Fehlerstrom-Schutzeinrichtung hoher Empfindlichkeit) ≤ 30 mA
DDR/MS	Dispositif Différentiel Résiduel Moyenne Sensibilité (Fehlerstrom-Schutzeinrichtung mittlerer Empfindlichkeit)
DDR/BS	Dispositif Différentiel Résiduel Basse Sensibilité (Fehlerstrom-Schutzeinrichtung niedriger Empfindlichkeit)
DLD	Détecteur de Localisation de Défaut (Fehlerortungsgerät)
DPCC	Dispositif de Protection contre les Courts-Circuits (Kurzschlusschutzeinrichtung).
Elektrisierung	Auftreten einer elektrischen Spannung zwischen zwei Teilen des menschlichen Körpers, auch elektrischer Schlag genannt
Elektrokution	Tödliche elektrischer Schlag
IDn	Nennauslösestrom einer DDR
MS	Mittelspannung (1 bis 35 kV gemäss CENELEC), in Frankreich HTA (HSA) (1 bis 50 kV)
ES	Erdungsschema = Sternpunktbehandlung (siehe auch Anhang)

Störungen elektronischer Systeme – die richtige Erdung

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung		S. 4
2. Störungen, deren Ursprung ausserhalb des NS-Netzes liegt	Tellurische Ströme	S. 5
	Vagabundierende 50-Hz-Erdströme	S. 5
	Überschlagströme in MS/NS-Transformatoren	S. 5
	Schaltüberspannungen im MS-Netz	S. 5
	Oberwellenspannungen	S. 5
	Blitzspannungen und -ströme	S. 6
	HF-Störungen	S. 6
3. Störungen, deren Ursprung innerhalb des NS-Netzes liegt	Oberwellenströme und -spannungen	S. 7
	Schaltüberspannungen im NS-Netz	S. 8
	Hohe Fehlerströme	S. 8
4. Koexistenz von Starkstrom und Schwachstrom	Minimierung der emittierten Störungen	S. 9
	Einflussnahme auf die Kopplungen	S. 10
	Körper bzw. Massen und Erdungen	S. 12
	Ideales Erdungs- und Massensystem	S. 12
5. Erdungsschemas und kommunizierende elektronische Systeme (KES)	Erdungsschemas, kommunizierende Systeme und Niederfrequenz-(NF-)Störungen	S. 14
	Erdungsschemas, kommunizierende Systeme und Hochfrequenz-(HF-)Störungen	S. 15
6. Schlussfolgerung		S. 19
Anhang 1: Die Erdungsschemas gemäss IEC 364		S. 20
Anhang 2: Beispiel der Realisierung eines Raumes ohne elektromagnetische Störungen		S. 22
Literaturverzeichnis		S. 23

Heute sind die Leistungselektronik und die (analoge und digitale) Signalverarbeitung in allen Gebäuden jeglicher Art allgegenwärtig.

Die Informatik, die Automatik und die hierarchischen Leitsysteme bilden ein Gewebe um die sie speisenden elektrischen Netze.

Da nichtlineare Verbraucher (Gleichrichter, Drehzahlregelungen, Regler, Schalter, Stromrichter usw.) Störspannungen emittieren, stehen elektronische Schwachstromsysteme unter dem Einfluss von elektrischen und magnetischen Störungen aller Art.

Die Wahl des Erdungsschemas (ES) ist in bezug auf die elektronischen Systeme nicht gleichgültig, insbesondere wenn diese zum Kommunizieren digitale (Bus-)Verbindungen benutzen.

Das vorliegende Technische Heft beleuchtet nach einer Betrachtung der in NS-Anlagen vorkommenden Störungen die Vor- und Nachteile der Erdungsschemas in bezug auf die Koexistenz von Starkstrom und Schwachstrom.

1. Einleitung

Eine elektrische Welle wird durch ihre

- Frequenz,
 - Spannung,
 - Stromstärke
- gekennzeichnet.

In den Verbundnetzen der Industrieländer ist die Frequenz absolut stabil. Sie kann beim Inselbetrieb einer privaten Anlage mit Ersatzstromquellen variieren; diese Abweichungen sind jedoch ohne merkliche Auswirkungen auf die Sternpunkt-behandlung und die erforderlichen Schutzeinrichtungen. Ob die Frequenz 50 oder 60 Hz beträgt, ist nicht ausschlaggebend, denn es gibt Netze, welche die Energie

mit 400 Hz verteilen, in welchem Fall der Einfluss der Streukapazitäten gegen Erde bei der Wahl des Erdungsschemas eventuell berücksichtigt werden muss.

Die im Normalbetrieb und im Fall eines Isolationsfehlers in den elektrischen Anlagen auftretenden Ströme und Spannungen sind im wesentlichen in bezug auf deren Wert und Wellenform variabel, wobei letztere stark von der Sinuskurve abweichen kann. Dies gilt insbesondere für Ströme, die infolge eines Isolationsfehlers hinter einem Stromrichter auftreten (Siehe Technisches Heft Nr. 114).

Die Erscheinungen, welche die Sinuswellenform des Netzes deformieren oder stören, haben verschiedene Ursachen und können je nach dem Erdungsschema verschiedene Störungen in die NS-Verteilung sowie in kommunizierende Systeme hineinbringen.

Es gibt drei Erdungsschemas, die in der Publikation IEC 364 festgelegt sind. Diese werden in den Technischen Heften Nr. 172 und Nr. 173 vorgestellt. Eine Zusammenfassung befindet sich im Anhang 1.

2. Störungen, deren Ursprung ausserhalb des NS-Netzes liegt

Tellurische Ströme

Es handelt sich um Ströme mit einer Frequenz unter 50 Hz, die eine Folge von Sonnenmagnetstürmen sind. Sie fliessen in der tiefen Erde. Sie können die Schutzeinrichtungen der Übertragungsleitungen stören, wirken sich jedoch auf Stufe der nicht sehr weitreichenden NS-Netze nicht aus, insbesondere wenn diese nur einen Erder haben.

Vagabundierende 50-Hz-Erdströme

Solche Ströme treten bei Isolationsfehlern in mit über eine Impedanz geerdetem Sternpunkt betriebenen MS- oder HS-Netzen auf, jedoch auch bei gewissen elektrischen Traktionsanlagen, wo der Rückstrom durch die Erde fliesst. Somit ist bei NS-Anlagen in der Nähe von solchen Anlagen Vorsicht geboten. Sie können geographisch verteilte Schwachstromsysteme über die gemeinsame Impedanz stören, wenn sie keine einheitliche Potentialreferenz (mehrere Erder) haben. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die vagabundierenden Ströme eine Ursache dafür waren, die fehlerspannungsempfindlichen Erdungsschutzrelais aufzugeben.

Überschlagströme in MS/NS-Transformatoren

Deren Stärke hängt vom Erdungsschema des MS-Netzes ab. Ihre Wirkung (Überspannung) hängt von der Zusammenschaltung der Körper der NS-Verbraucher mit dem Erder des Sternpunktes ab (siehe Abb. 1). Deshalb muss im Schema TT, um einen Durchschlag der NS-Betriebsmittel zu verhindern, der Widerstand R_b kleiner sein als

$$R_b = \frac{2U + 1000}{I_{h_{MT}}}$$

Zu bemerken ist, dass in der Publikation IEC 364 $2U + 1000$ V für TT und TN durch $U + 1200$ V ersetzt ist, und für IT

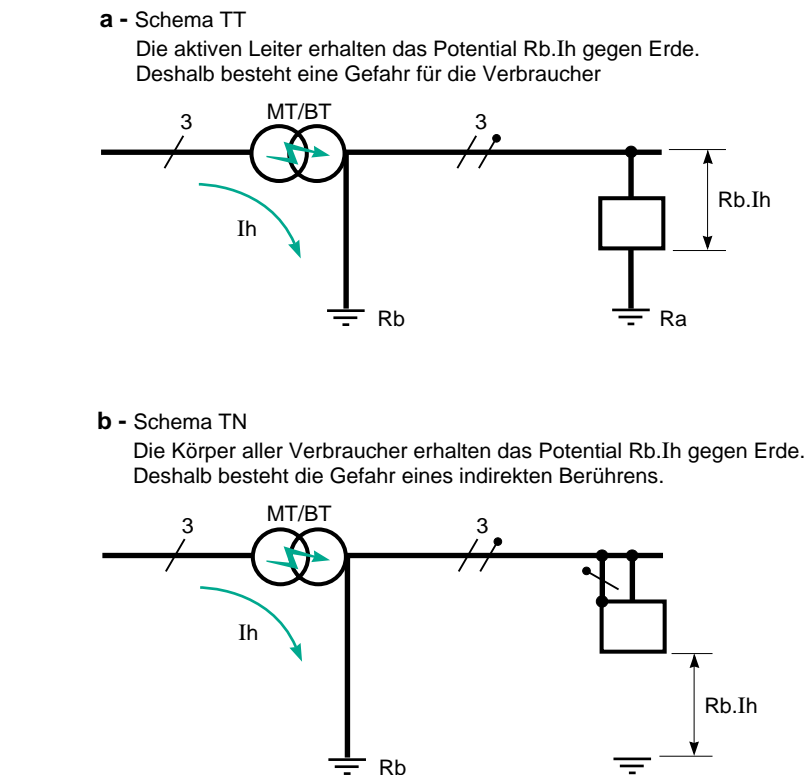


Abb. 1: Mit MS-NS-Überschlägen im Transformator verbundene Gefahren.

durch $U \cdot \sqrt{3} + 1200$ V. Ferner bestimmt sie, dass diese Überspannung nicht länger als 5 Sekunden dauern darf. Im Schema TN muss, um die Gefahr eines "indirekten Berührens" zu vermeiden, im Gebäude ein totaler Potentialausgleich bestehen. Dasselbe gilt für IT, wenn der Überspannungsableiter anspricht (Kurzschluss), wenn R_b und R_a miteinander verbunden sind.

Schaltüberspannungen im MS-Netz

Vom MS-Netz herrührende Überspannungen werden infolge des schmalen Durchlassbereichs (für innere

Überspannungen) des MS/NS-Transformators stark abgeschwächt. Ihre eventuellen Auswirkungen sind unabhängig vom Erdungsschema der NS-Anlage.

Oberwellenspannungen

Das MS-Netz wird durch Oberwellenerzeuger bei den diversen Abonnenten gestört. Daraus ergibt sich eine Deformation der Wellenform der Spannung auf der MS- und damit auch der NS-Seite.

Die NS-Verbraucher eines nicht störenden Abonnenten nehmen somit Oberwellenströme auf, wobei auch die

Ströme deformiert sind, die das Resultat eines Isolationsfehlers sind. Die Elektrizitätsversorgungsunternehmen sind heute über die Verschlechterung der Wellenform der MS stark besorgt, und dies, obschon Stern-Dreieck-Transformatoren (Dy11) keine Oberwellen 3. Ordnung und höher von der NS auf die MS übertragen ... Die Tabelle der Abbildung 2 zeigt die von der Electricité de France maximal zugelassenen Oberwellenstörpegel. Die Norm EN 50 160 nennt ausser für H3 und ihre Mehrfache dieselben Werte.

Es sei daran erinnert, dass:

$$\tau_n(\%) = \frac{Y_n}{Y_1} \cdot 100$$

In privaten NS-Netzen kann häufig ein wesentlich höherer Gehalt an Oberwellenspannungen und -strömen beobachtet werden.

Blitzspannungen und -ströme

Bei einem direkten oder indirekten Blitzschlag in die Freileitung, die eine MS/NS-Station speist, begrenzen die an der MS-Einspeisung des Station angeordneten Überspannungsableiter die Spannungswelle und leiten den Blitzstrom ab (siehe Technisches Heft Nr. 168).

Die äussere Spannungswelle gelangt über die Streukapazitäten zwischen den MS- und NS-Wicklungen in die NS-Wicklungen des Transformators. Diese Welle, deren Höchstwert nur selten 6 kV übersteigt, erscheint gleichzeitig an allen aktiven Leitern. Die Erdung des Sternpunktes (direkt im Schema TT und TN oder über einen Überspannungsableiter im Schema IT) kann nur die am Sternpunkt auftretende Spannung abschwächen und bewirkt eine innere Überspannung (zwischen Sternpunkt und Phasenleitern). Wenn eine Überspannungsgefahr besteht, wird deshalb dringend empfohlen, unabhängig vom Erdungsschema zwischen allen aktiven Leitern und Erde Überspannungsableiter anzuordnen (siehe Technisches Heft Nr. 179).

Die Verbindungen müssen möglichst kurz sein: $\Delta U = L\omega\hat{I}$, wobei

$$L = 1\mu\text{H/m}; \omega = \frac{2}{tm},$$

Ungerade Oberwellen, die kein Mehrfaches von 3 sind		Ungerade Oberwellen, die Mehrfach von 3 sind		Gerade Oberwellen	
Ordnung	Oberwellenspannung % NS/MS	Ordnung	Oberwellenspannung % NS/MS	Ordnung	Oberwellenspannung % NS/MS
5	6	3	1,5	2	2
7	5	9	0,3	4	1
11	3,5	15	0,2	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	> 21		10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			> 12	0,2
25	1,5				
> 25	0,2+0,5*25/h				

Diese Grenzwerte, die relativ streng scheinen mögen, sind von der EDF aufgrund von in Netzen durchgeführten Messungen festgelegt worden und entsprechen Oberwellenpegeln, bei denen gestörte und störende Geräte in den Netzen in annehmbarer Weise koexistieren können.

Abb. 2: Für MS- und NS-Netze zulässige Oberwellenstörpegel der Spannung.

und t_m die Anstiegszeit des Stroms ist. Die Ableitung des Blitzstroms gegen Erde erzeugt im NS-Netz ähnlich wie beim Transformatorüberschlag (siehe Abb. 1) Überspannungen, wobei jedoch infolge der Streukapazitäten innerhalb des Netzes nach und nach eine Abschwächung erfolgt.

Es sei daran erinnert, dass für elektrische Betriebsmittel die folgenden vier Bemessungsschlagspannungsfestigkeiten definiert sind (Prüfung mit der Wellenform 1,2/50 ms): 1,5 – 2,5 – 4 und 6 kV.

HF-Störungen

Ausser den Blitzschlägen erzeugen Radio- und Fernsehsender, Handys und andere Funkgeräte dauernd oder vorübergehend elektromagnetische Felder. Normale oder Kurzschluss-Schaltvorgänge von Schaltgeräten erzeugen elektromagnetische Impuls-Felder. So sind beispielsweise in einem Abstand von 1 m von einer MS-Zelle entfernt Feldstärken von 40 kV/m gemessen worden.

Dauernde, vorübergehende oder Impuls-Felder wirken sich aufgrund des Antennen- oder Schleifeneffektes als Störspannungen aus, die unabhängige elektronische Geräte (wenn deren Unempfindlichkeit ungenügend ist) sowie miteinander verbundene elektronische Systeme, wenn die Schwachstromverbindungen schlecht erstellt sind, stören oder sogar beschädigen können.

3. Störungen, deren Ursprung innerhalb des NS-Netzes liegt

Oberwellenströme und -spannungen

Mehr und mehr erzeugen die Verbraucher im Industriesektor (Stromrichter usw.), im Dienstleistungssektor (Fluoreszenzbeleuchtung, Computer-Hardware usw.) und sogar im Haushalt (Mikrowellenöfen, Fernsehgeräte usw.) Oberwellenströme (siehe Abb. 3).

■ **Fluoreszenzbeleuchtung**

Die Norm IEC 346 legt den maximalen emittierten Oberwellengehalt wie folgt fest:

- H3: 25 %
- H5: 7 %
- H7: ... %

Die Norm EN 55 015 gibt den Pegel der gestrahlten Störungen an, der nicht überschritten werden darf.

Die Norm IEC 146 legt den maximal zulässigen Ableitstrom (über den Schutzleiter PE) auf 1 mA fest.

■ **Gleichrichterbrücken in Graetz-Schaltung**

Obschon die Norm IEC 146-4 die von den Gleichrichtern erzeugten Oberwellen behandelt, gibt es noch keine Norm, die Pegel festlegt, die nicht überschritten werden dürfen (siehe Technische Hefte Nr. 152 und Nr. 160).

■ **Pulsgesteuerte Umrichter (PBM)**

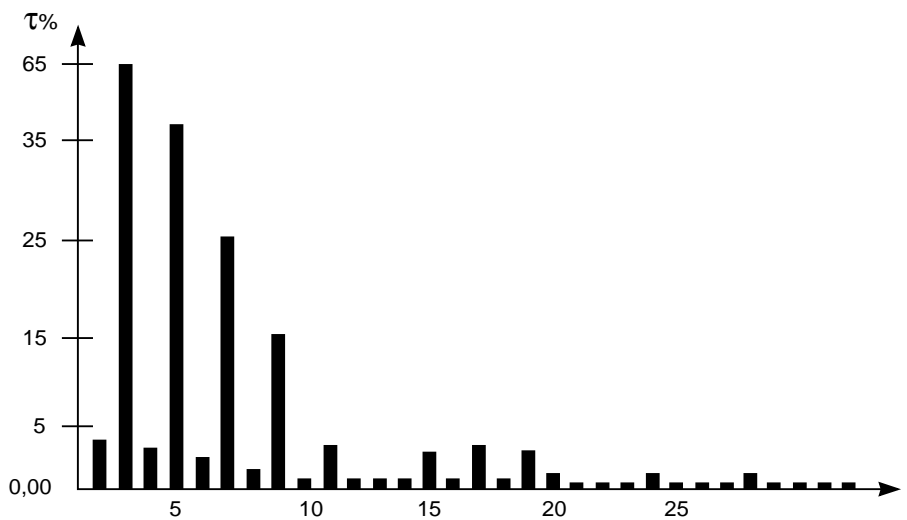
Diese Umrichter erzeugen wegen der Impulsfrequenz von 10 bis 30 kHz Oberwellenströme sehr hoher Frequenz, die abgeschwächt werden müssen (HF-Filter).

Die Auswirkungen von Oberwellen sind verschieden und lästig.

■ Wenn ein oder mehrere Verbraucher Oberwellenströme der 3. Ordnung und Mehrfachen davon (3 k) erzeugen, addieren sich diese beim Auftreten eines Fehlers und fließen in den Neutralleiter. Wenn der Neutralleiter mit dem Schutzleiter PE zusammengelegt ist (Schema TN-C), bewirkt dieser Strom eine Störung des Potentials der Körper, das für empfindliche Verbraucher schädlich sein kann (äussere Störspannungen gegen Erde).

■ Bei einem Isolationsfehler in einem Oberwellenströme erzeugenden

a - Pulsgesteuerter Umrichter



b - Drehstromantrieb

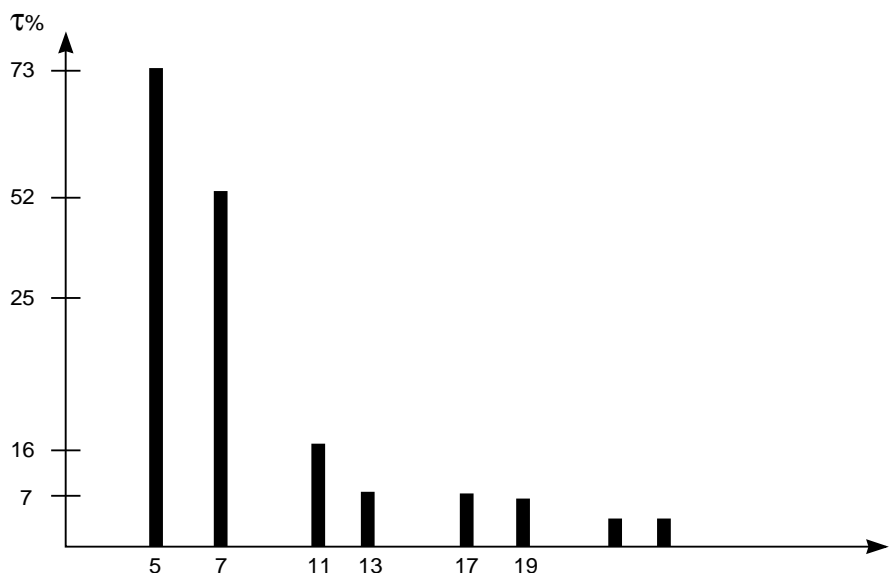


Abb. 3: Beispiele von Oberwellenspektren von Verbrauchern.

Verbraucher (Umrichter) hat der Fehlerstrom eine sehr variable Form, die vom Erdungsschema und von der Fehlerstelle abhängt.

■ Mit Oberwellen behaftete Isolationsfehlerströme können die Ursache von Funktionsstörungen von Schutz- einrichtungen sein, wobei die folgenden Lösungen bestehen:

- Im Schema TN und IT müssen die Leistungsschalter mit einem Thermo- auslöser versehen sein, der auf den Effektivwert des Stroms eingestellt ist.
- Im Schema TT müssen die Fehlerstrom-Schutz- einrichtungen von der Klasse A sein (d.h. in der Lage sein, unter Impuls- oder deformierten Strömen zu funktionieren).

Schaltüberspannungen im NS-Netz

Diese rühren im wesentlichen vom Unterbrechen von normalen oder Fehlerströmen her.

Dazu sind zu nennen:

■ Öffnen der Steuerkreise von Schützen und Relais, wenn diese nicht mit einem RC-Filter ausgerüstet sind.

■ Unterbrechung von Kurzschlussströmen durch Kurzschluss- schutz- einrichtungen mit sehr hoher Lichtbogen- spannung (bestimmte Sicherungen), wobei zu bemerken ist, dass die Unterbre- chung des Isolationsfehlerstroms im Schema TN eine äussere Überspan- nung bewirken kann.

Diese Überspannungen können das Funktionieren von gewissen empfindli- chen Apparaten usw. stören, ein- schliesslich von Schutz- einrichtungen mit Hilfsstromquelle, die von der Konstruktion her immun gemacht sein müssen.

Hohe Fehlerströme

Dabei handelt es sich vor allem um Kurzschlussströme zwischen aktiven Leitern (oder über den Schutzleiter PE im Schema TN und IT beim zweiten Fehler).

Wenn die einzelnen Leiter einadrig und nicht zusammengefasst sind, kann das Magnetfeld, das in diesem Fall von den aktiven Leitern (und im Schema TN und IT vom Schutzleiter PE) abgestrahlt wird, unbeabsichtigte Betriebszustände von elektronischen Geräten bewirken, die sich in der Nähe der elektrischen Leitungskanäle befinden oder über Schwachstromleitungen angeschlossen sind.

Die Tabelle der Abbildung 4 zeigt eine Übersicht über die Störungen und ihre Auswirkungen in Funktion des Erdungsschemas.

Störung	Auswirkungen	
Vagabundierende Erdströme	Erzeugung einer NS-Potentialdifferenz zwischen zwei weit voneinander liegenden Erden	TN: Keine Gefahr für Personen und Elektronik TT: Keine Gefahr, wenn nur 1 Erder für die Anwendungen IT: Wie TT
MS/NS-Überschlag	Äussere Spannung für das NS-Netz ($R_B \cdot I_{hMT}$)	TN: Gefahr für Personen, wenn der Potentialausgleich des Gebäudes nicht total durchgeführt wird im Transformator TT: Gefahr für die Betriebsmittel IT: Wie TN, wenn sich der Überspannungsableiter kurzschliesst
Blitzschlag auf der MS-Seite	Kapazitive Übertragung auf die NS-Seite	TN: Innere Gefahr für die Betriebsmittel TT: Wie TN IT: Wie TN, der Überspannungsableiter wirkt nur auf einen aktiven Leiter
Oberwellenströme im NS-Netz	Oberwellenströme der 3. Ordnung und Mehrfache davon im Neutralleiter	TN: Kein Potentialausgleich im PEN-Leiter im Schema TN-C TT: Keine Probleme IT: Keine Probleme
Isolationsfehlerströme	Magnetfeld	TN: Gefahr für empfindliche und/oder kommunizierende Geräte TT: Keine Probleme IT: Wie TN, wenn Doppelfehler

Abb. 4: Wichtigste Störungen und ihre Auswirkungen je nach Erdungsschema.

4. Koexistenz von Starkstrom und Schwachstrom

Die Elektronik ist heute allgegenwärtig: in den Sensoren, den Aktoren und in den Leitsystemen für Prozesse, für Gebäude und für die Stromverteilung. Diese Ausrüstungen werden vom NS-Netz gespeist und dürfen nicht empfindlich gegen die weiter oben genannten Störungen sein.

"Seriöse" Hersteller wissen sehr gut, wie sie die Geräte unempfindlich machen können, d.h wie ihre Empfindlichkeit gegen elektromagnetische Erscheinungen beherrscht werden kann. Hierzu nehmen sie die Normen über die elektromagnetische Verträglichkeit zu Hilfe, zum Beispiel IEC 1000 (siehe Technisches Heft Nr. 149). Parallel dazu zielt die Normung darauf ab, die von den Störern emittierten Störungen auf ein Minimum zu reduzieren. Hierzu sei zum Beispiel die ab 1996 gültige EG-Richtlinie (89/336/EWG) zur EMV genannt.

Die normierte Koexistenz zwischen Störern und Gestörten ist jedoch insofern nicht geregelt, als auf dem elektrischen Gebiet noch einige Fragen offenstehen:

- Wie verhält sich eine elektrische Anlage als Störer?

Die Art der Realisierung der Anlagen und die Sternpunktbehandlung gehören zu den ausschlaggebenden Punkten.

- Wie können in diesem Rahmen die Störungen und ihre Auswirkungen auf empfindliche (elektronische) Einrichtungen abgeschwächt werden.

Dies ist alles das Problem der friedlichen Koexistenz zwischen Elektrotechnik und der Elektronik, mit anderen Worten zwischen Starkstrom und Schwachstrom.

Damit diese friedlich ist, müssen die Störungen an der Quelle auf ein Minimum reduziert und Kopplungen zwischen der Quelle und dem potentiellen Opfer vermieden werden.

Minimierung der emittierten Störungen

Wie wir in den vorhergehenden Kapiteln gesehen haben, sind die Störungen mannigfaltig. Sie können vom inneren oder äusseren Modus und nieder- oder hochfrequent sein und durch Leitung oder Strahlung übertragen werden (siehe Tabelle der Abbildung 5). Um sie zu begrenzen, sind verschiedene Lösungen möglich:

In der MS:

- Verwendung von Zinkoxid-Überspannungsableiter und diese mit möglichst kurzen Verbindungen an einen Erder anschliessen, der vom Erder des NS-Sternpunktes getrennt ist, um die Blitzüberspannungen zu begrenzen.

- Begrenzung der MS-Erdschlussstroms und Minimierung des Widerstandes des Erders des NS-Sternpunktes, um Durchschläge zu vermeiden, wenn mehrere Erder vorhanden sind.

- Verwendung von MS/NS-Transformatoren, deren Schaltung bestimmte Oberwellenströme sperrt, um die Oberwellenstörungen zu begrenzen.

An der Einspeisestelle des NS-Netzes:

- Den Erder des Sternpunktes möglichst nicht mit demjenigen des Transformators und der Überspannungsableiter verbinden (diese Trennung der Erder wird in Frankreich für die "Stangen"-Stationen der ländlichen Stromversorgung über Freileitungen angewendet).
- Anordnung von Überspannungsableitern an der Einspeisestelle des NS-Netzes, die mit möglichst kurzen Verbindungen an den Erder des Sternpunktes angeschlossen sind, um die Blitzüberspannungen zu begrenzen, die durch den Transformator übertragen werden.
- Das Erdungsschema TN-C nicht verwenden, da der PEN-Leiter Oberwellenströme der 3. Ordnung und Mehrfache davon weiterleitet und so die Potentialreferenz stört, die der Schutzleiter PE für die elektronischen Ausrüstungen sein sollte.

Im NS-Netz:

- Um die abgestrahlten Magnetfelder auf ein Minimum zu reduzieren:
- Soweit wie möglich keine Einleiterkabel verwenden, die im Kurzschlussfall ein starkes Magnetfeld erzeugen.
- Den Schutzleiter PE der aktiven Leiter nicht separat führen, sondern

	Äusserer Modus	Innerer Modus
NF-Störungen	<ul style="list-style-type: none"> ■ Potentialanstieg des NS-Netzes (MS/NS-Überschlag) ■ Hoher Fehlerstrom im Schutzleiter PE ■ Oberwellen der Ordnung 3k im PEN-Leiter ■ Erdungswiderstand Ra im Schema TT zu hoch 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Oberwellenströme und -spannungen ■ Kurzschlussstrom
HF-Störungen	<ul style="list-style-type: none"> ■ Blitzüberspannung und -strom ■ MS-Schaltüberspannung 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Blitzüberspannung und -strom ■ Unterbrechung eines Icc mit einer Kurzschluss-schutzeinrichtung mit hoher Lichtbogen-spannung

Abb. 5: Die verschiedenen Arten von Störungen nach Modus und Frequenz.

besser Mehrleiterkabel mit integriertem Schutzleiter PE verwenden.

- Den Schutzleiter PE möglichst nicht an verschiedenen Stellen an die Metallteile des Gebäudes anschliessen, speziell nicht im Schema TN, da der (eventuell mit Oberwellen beladene) hohe Isolationsfehlerstrom störende Wege einschlagen kann (ein Feld von 0,7 A/m stört Bildschirme!).

- Den Einschaltstrom von Kondensatorbatterien möglichst niedrig halten (Widerstände oder Drosseln).

- Im Schema IT, wenn das Netz keine grosse Ausdehnung hat, eine Impedanz zwischen Sternpunkt und Erde schalten, um das Potential des Sternpunktes an das Erdpotential zu "heften".

- Die Starkstromkabel in metallischen Kabelkanälen führen und auf die Durchschaltung dieser "durchgehenden Masse" und seine Verbindung mit dem Hauptpotentialausgleichsleiter achten (horizontale und vertikale Kabelführungen). Dadurch wird die elektromagnetische Strahlung äusserst minimal gehalten.

- Überspannungen abfangen:

- Durch Anordnung von RC-Schaltungen an den Spulen der Schütze, Relais usw.

- Durch einen Schutz empfindlicher Geräte durch "Überspannungsableiter". Für Verbraucher gilt:

Alle elektrischen Betriebsmittel bilden den Gegenstand von Normen zur Begrenzung ihrer HF-Störemissionen. Für NF-Störemissionen gelten nur für Geräte mit einem Nennstrom ≤ 16 A entsprechende Grenzwerte (siehe die Norm IEC 555-2 / 1000-3.2).

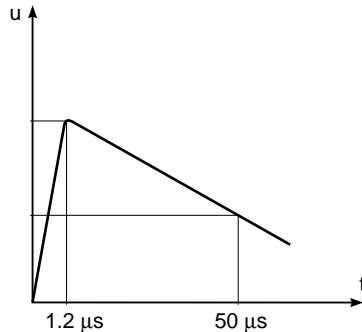
Es gibt zahlreiche Lösungen, um die Oberwellenströme minimal zu halten: passive oder aktive Filter, Stromrichter mit sinusförmiger Entnahme usw.

Einflussnahme auf die Kopplungen

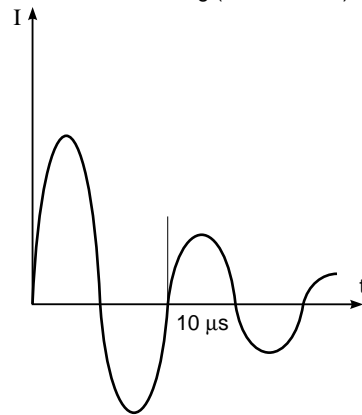
Nicht alle Störungen können an der Quelle abgeschwächt werden. Um Funktionsstörungen elektronischer Geräte zu verhindern, muss die Übertragung zwischen dem Sender und dem Empfänger minimiert werden.

Es gibt verschiedene Kopplungsarten. Um sie zu erklären, nehmen wir das Beispiel des Blitzstroms (siehe Abb. 6). Wenn der Blitz in eine MS- oder NS-Freileitung einschlägt, kann der

a - Blitzspannungswelle ($f_0 = \frac{1}{\pi \tau m}$)



b - Blitzstromwelle ohne Überschlag ($f = 100$ kHz)



c - Blitzstromwelle mit Isolationsdurchschlag oder Ansprechen eines Überspannungsableiters

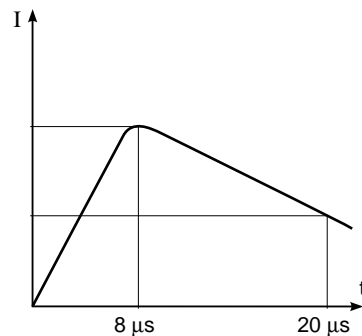
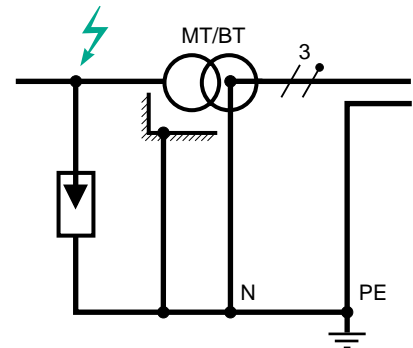


Abb. 6: Einige normierte Blitzwellen.

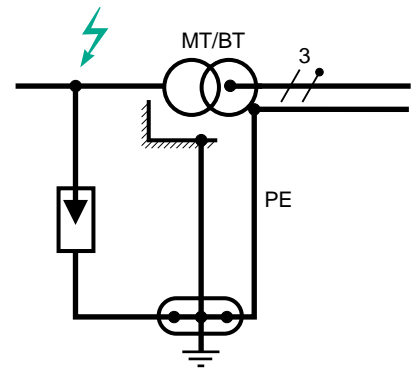
Spitzenwert an der Einspeisestelle am Ende der Leitung mehrere zehn kA erreichen.

Das di/dt und das $\int I^2 dt$ sind sehr gross.

a



b



c

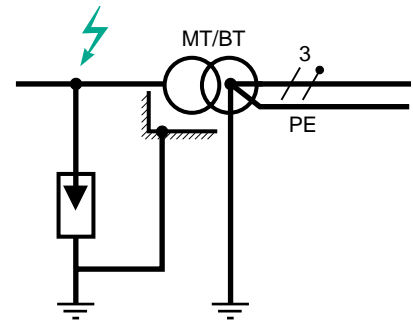


Abb. 7: Vermeidung einer Kopplung durch gemeinsame Impedanz bei von der MS herrührenden Störungen.

Kopplung durch gemeinsame Impedanz

Nehmen wir das Beispiel eines Schemas TN, bei dem alle Körper miteinander verbunden sind (siehe Abb. 7).

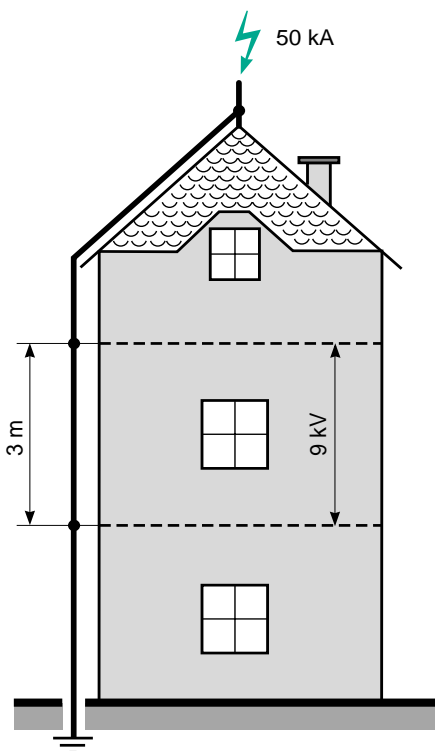


Abb. 8: Von einem Blitzstrom von 50 kA zwischen 2 Stockwerken erzeugte "äußere" Spannung.

Wenn $\hat{I} = 25 \text{ kA}$, $di/dt = 25 \text{ kA}/8 \mu\text{s}$ und die Verbindung N-PE mit einer Induktivität pro Längeneinheit von $1 \mu\text{H}/\text{m}$ 1 m lang ist, beträgt die zwischen N und PE entwickelte Spannung ΔV (siehe Abb. 7 a):

$$\Delta V = L \frac{di}{dt} = 10^{-6} \times \frac{25 \cdot 10^3}{8 \times 10^{-6}} = 3 \text{ kV}$$

Diese Spannung erscheint zwischen dem Sternpunkt und dem Körper der NS-Betriebsmittel!

Die Lösung besteht darin, die Anschlüsse vom Erder aus sternförmig anzuordnen oder noch besser zwei Erder vorzusehen (siehe Abb. 7 b und c).

Generell erzeugt ein von einem abnormalen Strom (Fehlerstrom) durchflossener elektrischer Leiter zwischen seinen Enden eine Potentialdifferenz, die störend sein kann. Dies nennt man Kopplung durch gemeinsame Impedanz.

Betrachten wir ein anderes Beispiel, das mit der Installation eines Blitzablei-

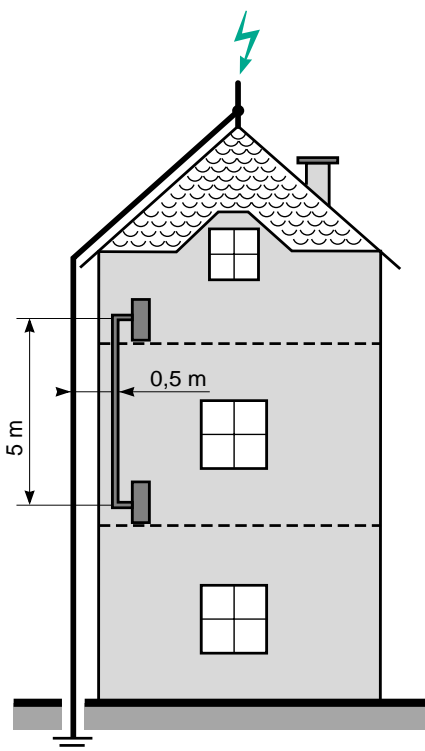


Abb. 9: Induktive Kopplung erzeugt in Schwachstromverbindungen innere Überspannungen.

ters zu tun hat. Nehmen wir an, dass die teilweise metallischen Böden mit dem Erdungsleiter des Blitzableiters verbunden sind (siehe Abb. 8):

Wenn: $L = 0,5 \mu\text{H}/\text{m}$ (Flachleitung)

$\hat{I} = 50 \text{ kA}$

beträgt ΔV zwischen zwei Stockwerken:

$$\Delta V = L \frac{di}{dt} = 1,5 \cdot 10^{-6} \times \frac{50 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^{-6}} = 9,4 \text{ kV}$$

Der Potentialausgleich im Gebäude kann in Frage gestellt sein! Eine der Lösungen besteht darin, mehrere Erdungsleiter anzuordnen und diese von allen elektrischen Stromkreisen fernzuhalten, wodurch eine Art Faradaykäfig erhalten wird.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass zum Abschwächen des Eindringens der von einem in der Nähe erfolgten Blitzeinschlag herrührenden elektromagnetischen Wellen in das Gebäude der Abstand zwischen den Leitern, die den Käfig bilden, kleiner als ein Zehntel der Wellenlänge λ sein muss. Wenn $tm = 1 \mu\text{s}$:

$$f = \frac{1}{\pi tm} = \frac{10^6}{\pi}$$

$$\frac{\lambda}{10} = \frac{1}{10} \frac{300 \times 10^6}{\frac{10^6}{\pi}} \approx 100 \text{ m}$$

Kapazitive Kopplung

Die MS-Betriebsmittel (24 kV) haben eine Blitzspannungsfestigkeit (Wellenform 1,2/50 μs) von 125 kV.

Der kapazitive Übertragungskoeffizient zwischen 20 kV und 400 V beträgt in der Regel 0,04 bis 0,1 (laut IEC 71-2 kann er 0,4 erreichen).

Somit überträgt eine Blitzwelle von 100 kV bei einem Koeffizienten von 0,07 auf die NS-Seite eine entsprechende Welle von 7 kV im äusseren Modus.

Aus diesem Grund

- sind die NS-Betriebsmittel der Station in der Regel mit verstärkter Isolation (10 kV),
 - können die Schaltschränke Stossspannungen von 12 kV aushalten (PRISMA und Zubehör),
 - haben die Leistungsschalter eine Haltespannung von 8 kV im äusseren Modus gemäss der Norm IEC 947-2.
- Die kapazitive Übertragung von Störungen ist umso stärker, je höher die Spannung und die Frequenz sind. Alle Starkstromleiter übertragen kapazitiv eine Störspannung auf die Schwachstromleiter, wenn diese in einem zu kleinen Abstand parallel verlaufen.

Induktive Kopplung

Nehmen wir an, ein Gebäude sei mit einem Blitzableiter versehen und es verlaufe über eine Länge von $L = 5 \text{ m}$ in einem Abstand von 50 cm eine Schwachstromverbindung parallel zum Erdungsleiter des Blitzableiters.

Die Fläche $S = L \times l$ (Abstand der beiden Schwachstromleiter $\approx 5 \text{ mm}$) beträgt:

$$5 \times 0,005 = 0,025 \text{ m}^2.$$

Aufgrund des Ampèreschen Durchflutungsgesetzes erhalten wir:

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot R}; \quad \phi = B \cdot S \quad \text{und} \quad u = \frac{d\phi}{dt} \quad \text{woraus}$$

$$\hat{u} = -\mu_0 \cdot S \frac{dH}{dt} = -\frac{\mu_0 \cdot S}{2\pi \cdot R} \cdot \frac{di}{dt}$$

d.h. mit $di = 50 \text{ kA}$ und $dt = 8 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

$$\hat{u} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,025}{2\pi \cdot 0,5} \cdot \frac{50 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^{-6}} \approx 60 \text{ V}$$

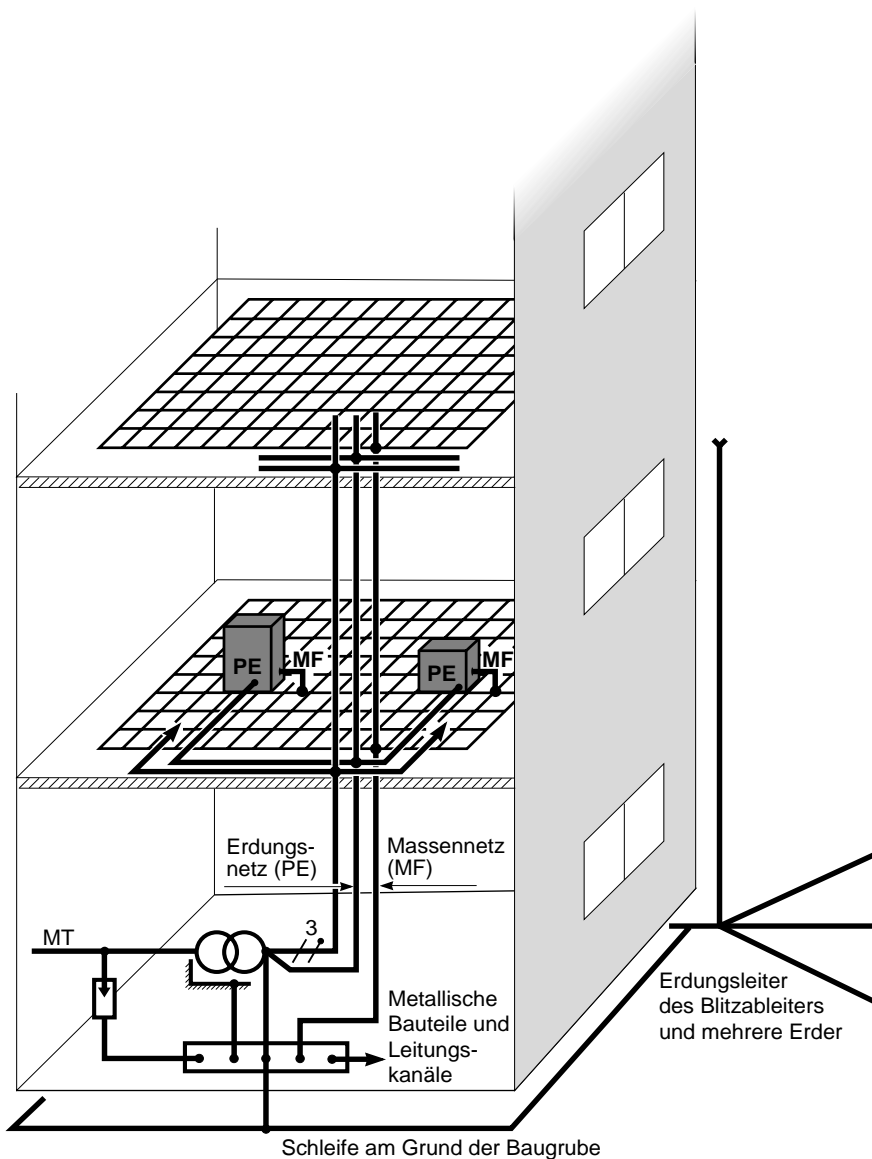


Abb. 10: Beispiel eines Erdungs- und Massensystems.

Diese Impulsspannung überlagert sich der Nutzspannung (einige Volt) und stört die Verbindung oder beschädigt sogar die kommunizierenden elektronischen Geräte.

Die Lösung besteht darin, den parallelen Verlauf von Stromkreisen mit hohem di/dt und von Schwachstromkreisen mit kleinem Abstand zu vermeiden und für die Informations-

übertragung verdrehte Aderpaare zu verwenden.

Die Kopplungen sind in erster Linie eine Folge der Art und Weise, wie die Anlagen errichtet sind.

Im Anhang 2 werden als Beispiel die Massnahmen gezeigt, die in einem Spital getroffen worden sind, um sicher zu sein, Elektroenzephalogramme zu erhalten, die frei von "Störungen" sind.

Körper bzw. Massen und Erdungen

Zum besseren Verständnis der folgenden Kapitel einige Definitionen:

- Erde (Tieferde): Das leitfähige Erdreich, das die äussere Potentialreferenz der elektrischen Anlagen ist.
- Erder: Leiter, der in direktem Kontakt mit Erde ist.
- Erderwiderstand: Widerstand zwischen den Leitern, die den Erder bilden, und Erde.
- Erdungsnetz: Gesamtheit der mit dem Zweck, bei einem Isolationsfehler das Auftreten einer gefährlichen Spannung (indirektes Berühren) zwischen den elektrischen Körpern und Erde zu verhindern, an einen Erder angeschlossenen Schutzleiter PE.
- Elektrische Masse: Leitfähiger Teil eines elektrischen Betriebsmittels, der bei einem Isolationsfehler unter Spannung stehen kann.
- Masse (Masse Funktionelle, MF): Leitfähiger Teil eines elektronischen Betriebsmittels, der als Abschirmung und oft als Potentialreferenz (null Volt) dient. Ein Betriebsmittel der Klasse II hat keine elektrische Masse, kann jedoch eine funktionelle Masse haben.
- Begleitmasse: Massen oder Leiter, wie Armierungsnetze im Boden, Kabelkanäle oder Abschirmungen, die eine Schwachstromkabel von Anfang bis Ende begleiten und durch Dämpfungswirkung gegen elektromagnetische (HF-)Kopplungen oder Kopplungen durch gemeinsame Impedanz schützen.
- Massennetz: Gesamtheit der Begleitmassenleiter und der leitenden Teile des Gebäudes, die dem Potentialausgleich und der Abschirmung gegen Störungen dienen.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass ein Erdungssystem dem Personenschutz (50 Hz) dient und ein Massensystem für die Informationsübertragung und die Störungsbekämpfung eine funktionelle Rolle spielt.

Ideales Erdungs- und Massensystem

Die Abbildung 10 ist ein Beispiel für die folgenden Erklärungen:

- Externe Störungen (Blitzüberspannungen, Schaltüberspannungen, Überschlüsse HS/Masse) haben wegen

- mehreren Erdungsleitern des Blitzableiters und mehreren gabelförmig ausgelegten Erdern, und da
- mehrere "elektrische" Erdungen sternförmig an einen einzigen Erder angeschlossen sind, einen minimalen Einfluss auf die Ausrüstungen des Gebäudes.
- Der Schutzleiter PE stört (unabhängig vom Erdungsschema) die Elektronik-Massen aus den folgenden Gründen nicht:
 - Keine Kopplungen durch gemeinsame Impedanz (das Erdungsnetz (PE) ist vom Massennetz getrennt). In der Praxis wird dies in der Verteilung (auf den einzelnen Etagen) realisiert, ist jedoch für die Steigleitung nicht obligatorisch.
 - Nur ein schwaches Strahlungsfeld, wenn der Schutzleiter PE im gleichen Kabel wie die aktiven Leiter angeordnet ist und sich das Kabel in einem

metallischen Kabelkanal befindet, der elektrisch durchgeschaltet und an der Einspeisestelle der Anlage mit dem Schutzleiter PE verbunden ist.

- Alle Schwachstromkabel sind auf den Armierungsnetzen im Boden (Reduktionsfaktor) in einem Abstand von mindestens 30 cm von den Starkstromkreisen verlegt, um eine magnetische Kopplung zu verhindern. Ein Begleitmasseleiter kann die Armierungsnetze im Boden ersetzen oder ihre Wirkung ergänzen, um eventuelle HF-Schleifeneffekte auf ein Minimum zu reduzieren. Die Schwachstromverbindungen zwischen den Stockwerken verlaufen in einem metallischen Kanal, der die Massenverbindungen fortsetzt. Das Erdungsnetz (PE) und das Massennetz (MF) können unter zwei wichtigen Bedingungen dasselbe Netz sein:

- Es dürfen keine HF-Störungen, keine hohen dv/dt und keine hohen di/dt vorhanden sein.
- Die Fehlerströme im Schutzleiter PE bzw. im PEN-Leiter müssen niedrig und ohne Oberwellen sein. Gewisse Spezialisten der EMV weisen darauf hin, dass selbst wenn diese Bedingungen nicht alle erfüllt sind, die Massen- und Erdungsnetze eng miteinander verbunden werden können. Dies unter der Bedingung, dass die Kabel **stark** vermascht sind (Streben nach einem totalen Potentialausgleich durch Aufteilung der Ströme und Bildung von möglichst wenigen Schleifen). Diese im Rohbau schwer zu bewerkstellende Lösung (Verbindung aller Armierungseisen und Metallzargen) kann sich für sehr spezialisierte Gebäude wie zum Beispiel Computercentren oder Telefonzentralen eignen.

5. Erdungsschemas und kommunizierende elektronische Systeme (KES)

Im vorhergehenden Abschnitt haben wir die Koexistenz zwischen elektrischen Installationen und elektronischen Geräten behandelt. Die Situation wird mit der Entwicklung der digitalen Verbindungen, welche die elektronischen Geräte zu kommunizierenden Leitsystemen vereinigen, komplizierter. Im vorliegenden Kapitel werden wir die Schwierigkeiten detaillierter betrachten, welche die Erdungsschemas der NS-Netze den kommunizierenden elektronischen Systemen bieten können.

Vor der Entwicklung der Mikroprozessoren

- verwendeten kommunizierende Systeme analoge Signale (0-10 V, 4-20 mA) usw. niedriger Frequenz,

- waren solche Systeme selten und lokal (Verbindungen zwischen Messwertgebern und Messgeräten),
- waren solche Systeme gegen NF-Störungen empfindlich, weshalb der sternförmige Anschluss der Körper, um äussere Kopplungen zu vermeiden. Überdies gab es wenige HF-Störungen und waren die induzierten Spannungen einfach zu filtern.

Heute sind die Verbindungen zwischen den elektronischen Einrichtungen digital (Bus) mit hohen Frequenzen und sehr niedrigem elektrischem Pegel. Sie werden immer zahlreicher und ausgedehnter (Mikrocomputernetze, "intelligente" Messwertgeber, technische Leitsysteme usw.).

Je nach dem angewendeten Erdungsschema, der Art des Anschlusses der Massen und dem Verlauf der Schwachstromverbindungen im Verhältnis zur Starkstromverteilung kann folgendes festgestellt werden:

- Das Vorhandensein von Störungen durch gemeinsame Impedanz infolge von Fehlerströmen im Schutzleiter PE.

- Die Schaffung von weitreichenden Schleifen (mit digitalen Verbindungen), die somit sehr empfänglich für die von den (normale oder parasitäre)

Hochfrequenzsignale emittierenden Geräten ausgesendeten Störungen sind.

Erdungsschemas, kommunizierende Systeme und Niederfrequenz-(NF-)Störungen

Oft werden die funktionellen und elektrischen Massen von elektronischen Geräten, die eine elektrische Speisung erfordern, an das Erdungsnetz (PE) angeschlossen, das der Baumstruktur des elektrischen Netzes folgt. NF-Störungen treten in einem Netz durch Kopplung vom Typ der gemeinsamen Impedanz oder durch Induktion (parallele Strompfade mit kleinem Abstand) auf.

Kopplung durch gemeinsame Impedanz

Betrachten wir ein Beispiel: Wenn ein Isolationsfehler das Fließen eines Stroms im Schutzleiter PE zwischen einem Gerät (1) und seinem Messwertgeber (2) bewirkt, tritt zwischen C und D (siehe Abb. 11) ein Spannungsabfall auf. Diese Spannung (u) erscheint auch zwischen (1) und (2) und kann die Signalübertragung stören.

Wenn zum Beispiel das Kabel ein Koaxialkabel ist, erscheint die dem Aussenleiter aufgeprägte Spannung (U) im inneren Modus in der Verbindung!

Diese Erscheinung ist je nach dem verwendeten Kabeltyp mehr oder weniger stark vorhanden und hängt von seinem "Übertragungswiderstand" im Bereich der betreffenden Frequenz ab.

- Im Schema TN-C bewirken die im Neutralleiter und somit im PEN-Leiter fließenden Ströme eine starke Variation der Potentialreferenz der einzelnen Geräte der KES. Dieses Erdungsschema eignet sich nicht, dies umso weniger, als Oberwellenströme im Neutralleiter fließen, es sei denn das Massensystem werden vollständig vom Erdungssystem getrennt.

- Im Schema TN-S, jedoch auch im Schema TN-C, bewirken Isolationsfehler Kurzschlussströme (mit hohem di/dt) im Schutzleiter PE, welche
 - die Potentialreferenz der KES verändern (siehe vorhergehendes Beispiel),
 - das Fließen von Störströmen in den Metallteilen des Gebäudes bewirken können (weshalb die Metallteile an die Haupterdungsklemme angeschlossen werden sollten, und nicht an verschiedenen Stellen an das Erdungsnetz).

- Im Schema IT sind die Fehlerströme beim ersten Fehler in der Regel niedriger als 1 A und deshalb nicht störend. Bei einem Doppelfehler ist, wenn der erste Fehler nicht gefunden und beseitigt worden ist, die Situation gleich wie beim Schema TN-S.

- Im Schema TT ist klar, dass, wenn die kommunizierenden Systeme an verschiedene Erder angeschlossen sind, die Potentialausgleichsprobleme

sind, die Potentialausgleichsprobleme

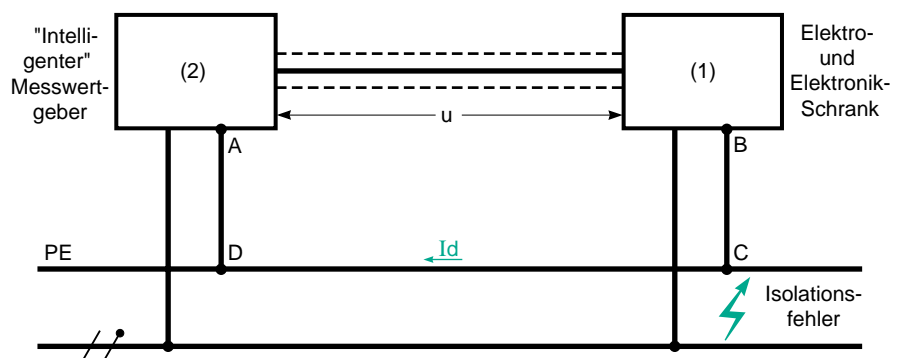


Abb 11: Der Spannungsabfall im Schutzleiter PE infolge eines Fehlerstroms stört die Verbindung zwischen kommunizierenden Geräten (er kann im Schema TN $U_0/2$ übersteigen, wenn $S_{PE} < S_{ph}$).

gleich gross sind wie beim Schema TN. Somit verlangt ein kommunizierendes System einen einzigen Erder der Anwendungen.

In diesem Fall bewirken Isolationsfehler Fehlerströme von rund 20 A im Schutzleiter PE, die (im Vergleich zu den 20 kA im Schema TN) wenig stören.

Die Lösungen, um das Auftreten dieser Störungen zwischen kommunizierenden Geräten zu verhindern, besteht darin:

- Erdungsschemas zu vermeiden, die im Schutzleiter PE einen hohen Strom fließen lassen;

- Die Massen der Elektronik von den elektrischen Massen zu trennen (und somit wenn nötig Trenntransformatoren zu verwenden).

Dabei sei daran erinnert, dass Datenverarbeitungsgeräte mit einem Trenntransformator versehen sein müssen (IEC 950) und dass die Massen von Datenverarbeitungsgeräten direkt an die Haupterdungsklemme (LEP) angeschlossen werden;

- Betriebsmittel der Klasse II zu verwenden, wodurch sich ein Anschluss an den Schutzleiter PE erübrigt;

- Mehrere Erder (in TT und in IT) zu vermeiden, wenn die Gefahr von vagabundierenden Erdströmen besteht.

Kopplung durch Induktion (induktives Nebensprechen)

Es sei daran erinnert, dass aufgrund der Gesetze des Elektromagnetismus jeder in einem Leiter fließende Strom ein Magnetfeld erzeugt. Wenn dieses Feld variabel ist, bewirkt es eine Flussänderung und somit eine Störspannung in einer in der Nähe angeordneten Schleife.

Um das Auftreten eines Magnetfeldes zu verhindern:

- Müssen sich die aktiven Leiter und der Schutzleiter PE im gleichen Kabel befinden (die von den einzelnen Leitern erzeugten Felder heben sich gegenseitig auf). Dabei darf nicht vergessen werden, dass im Schema TN die typischen Werte der Isolationsfehlerströme $D_i \gg 50 \text{ kA}$ und $D_t \gg 5 \text{ ms}$ betragen;

- Wird davon abgeraten, den Metallteilen zu gestatten, sich am Rückstromkreis zu beteiligen, denn andernfalls ist die Vektorsumme der Ströme im Kabel nicht gleich null. Und um die Kopplungen zu begrenzen:

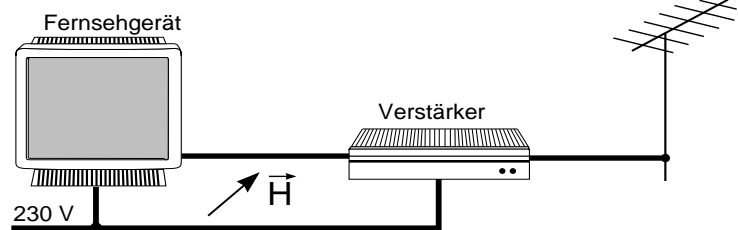
- Müssen parallele Führungen in kleinem Abstand von Starkstromleitern mit hohem di/dt (Erdungsleiter eines Blitzableiters, Schutzleiter) und Schwachstromverbindungen vermieden werden;

- Müssen für Schwachstrom Verbindungen aus verdrehten Aderpaaren verwendet werden (die in aufeinanderfolgenden Schleifen induzierten Spannungen heben sich gegenseitig auf).

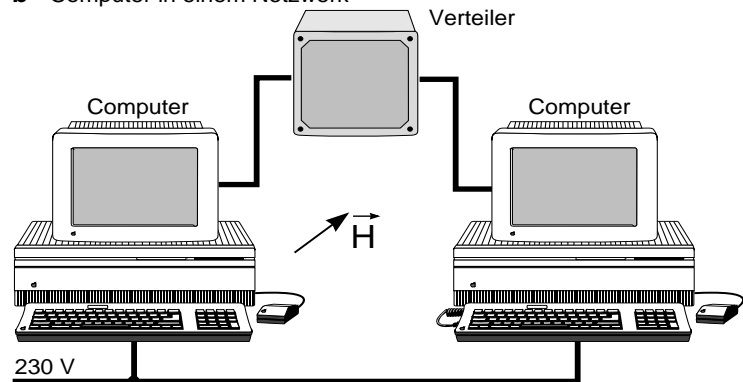
Erdungsschemas, kommunizierende Systeme und Hochfrequenz-(HF-)Störungen

Die in einem Gebäude verteilten digitalen Systeme sind sehr empfindlich für dauernde oder vorübergehende, durch Strahlung oder Leitung übertragene HF-Störungen.

a - Fernsehgerät mit Verstärker



b - Computer in einem Netzwerk



c - Computer und Drucker

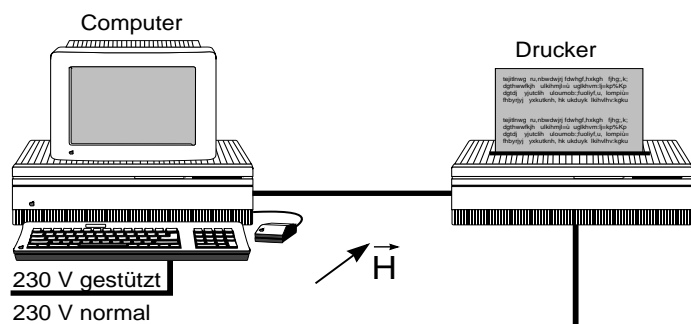


Abb. 12: Beispiele von induktiven Schleifen, die Durchschläge von kommunizierenden elektronischen Systemen verursachen.

Durch Strahlung übertragene HF-Störungen

Diese Störungen sind die Folge von Signalen, deren Frequenz in der Regel höher als 1 MHz liegt. Diese Signale stammen von Schweißmaschinen, Lichtbogenöfen, Handys und anderen Sendern wie zum Beispiel gewissen HS-Schaltgeräten oder elektronischen Vorschaltgeräten.

Tatsächlich gibt es Normen, welche die HF-Emissionen begrenzen (EN 55011), diese betreffen jedoch nicht alle Geräte.

Wenn auch die Lästigkeit dieser Störungen für die KES unabhängig vom Erdungsschema ist, müssen unbedingt Schleifen vermieden werden, wie sie Schwachstromnetze zusammen mit elektrischen Stromkreisen bilden können (siehe Abb. 12).

Denn ein abgestrahltes elektromagnetisches Feld induziert in der Schleife einen Strom, der in der Schwachstromübertragungen Störspannungen erzeugt. Je grösser diese Schleife ist, desto stärker ist das Störsignal.

Die Naturerscheinung Blitz ist ein sehr starker Störer. Ein Blitzschlag von 50 kA in 100 m Entfernung kann in einer offenen Schleife von 1 m² eine Spannung von 100 V erzeugen, und einen Strom von über 20 A, wenn die Schleife geschlossen ist.

Im Schema der Abb. 13 wird beim Fehlen eines Begleitleiters (funktionelle Masse) zwischen den beiden Enden der Schwachstromverbindung eine Spannung aufgebaut, welche die übertragenen Signale stört.

Der Begleitleiter bildet zusammen mit der Schwachstromverbindung eine induktive Schleife mit sehr kleiner Fläche (S2), die sehr viel kleiner ist als die ursprüngliche Fläche (S1 + S2) ist, weshalb sich eine sehr starke Reduktion der Störung ergibt.

Je nach den installierten Betriebsmitteln können mehrere Lösungen in Betracht gezogen werden:

- 1 - Verwendung eines Trenntransformators und Vermeidung von Streukapazitäten zwischen der Elektronik und dem elektrischen Körper.

- 2 - Minimierung der Fläche der Schleife:

- entweder durch Parallelführung des Schwachstromkreises und der Speisung, jedoch im Abstand von etwa 30 cm (siehe vorhergehendes Kapitel),

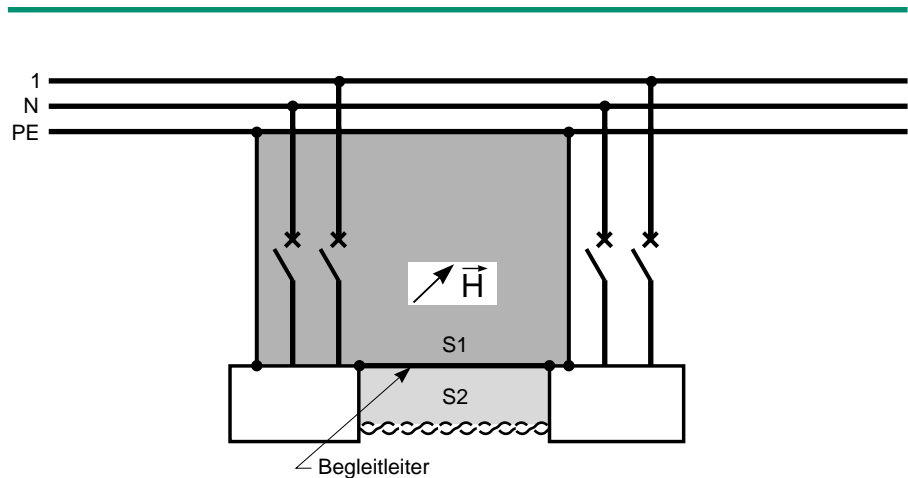


Abb. 13: Reduktion der Schleifenfläche durch eine Begleitmasse oder einen Begleitleiter (in diesem Beispiel sind die Massen und der Schutzleiter PE miteinander verbunden, was im Schema TT keine Probleme stellt).

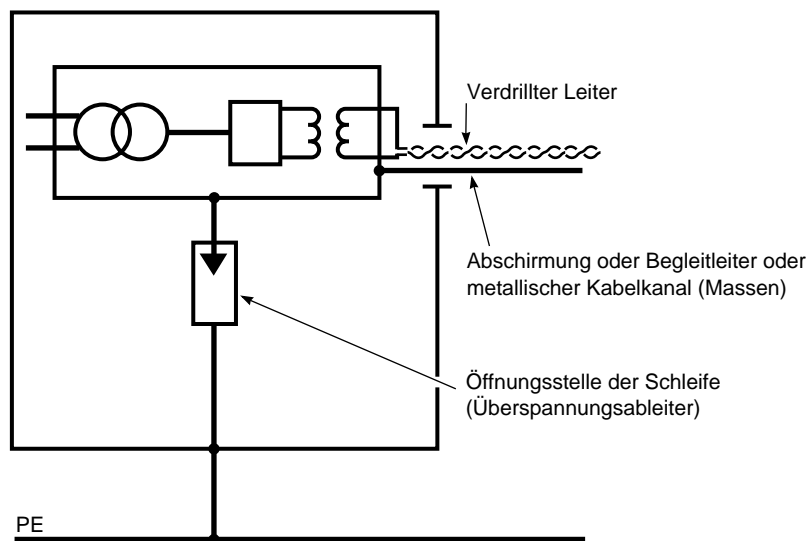


Abb. 14: Beispiel für die getroffenen Massnahmen, um HF-Störungen durch den Schleifen-Effekt zu verhindern.

– oder durch Hinzufügung eines Begleitleiters, wenn die Schwachstromverbindung nicht abgeschirmt ist.

Es ist zu beachten, dass Begleitmassen (metallische Kabelkanäle, feine Armierungsnetze im Boden) dieselbe Rolle spielen wie ein Begleitleiter.

- 3 - Für digitale Verbindungen, Verwendung von verdrehten Leitern (Reduktion der Übertragungsimpedanz), die in einem metallischen Kabelkanal verlegt sind, der als Begleitleiter dient.

- 4 - In schwierigen Situationen eine Entkopplung an den beiden Enden (Eingang und Ausgang) der digitalen Verbindung mit Hilfe von Optokopplern oder Impulsübertragern vorsehen und die Abschirmung der digitalen Verbindung mit der Elektronik-Masse verbinden (siehe Abb. 14).

Es darf nicht vergessen werden, dass vermieden werden muss, das Massennetz mit dem Schutzleiter PE zu verbinden, wenn die Isolationsfehlerströme sehr hoch sind (siehe Abb. 10) (Kopplung durch gemeinsame Impedanz bei 50 Hz).

- 5 - In sehr stark gestörten Umgebungen besteht schliesslich die Lösung in der Übertragung über Glasfasern ...

Durch Leitung übertragene HF-Störungen

Diese Störungen sind die Folge von Signalen mit Frequenzen, die typisch zwischen 10 kHz und 30 MHz liegen. Sie rühren von Blitzschlägen, Schaltüberspannungen und bestimmten pulsgesteuerten Umrichtern her.

■ Blitz

In diesem Fall ist das Problem unabhängig vom Erdungsschema dasselbe: die an der Einspeisestelle der NS-Anlage erscheinende Blitzüberspannung ist im wesentlichen eine äussere Überspannung (sie betrifft alle aktiven Leiter). Sie wird von den Streukapazitäten zunehmend abgeschwächt, je mehr sie in das Netz eindringt.

Wenn ferner zwei kommunizierende Geräte in einem Abstand voneinander installiert sind, das eine in der Nähe des Einspeisungspunktes und das andere weiter entfernt, erscheint zwischen den Speisungen dieser beiden Geräte eine HF-Potentialdifferenz. Dadurch können die digitalen Kommunikationen gestört werden. Die Minimallösung für dieses Problem besteht darin, an der Einspeisestelle der NS-Anlage (in der Nähe des MS/NS-Transformators) zwischen allen aktiven Leitern und Erde Überspannungsableiter anzuordnen, ausser:

- am Sternpunkt im Schema TN und TT, da der Sternpunkt direkt geerdet ist (die Überspannung fliesst direkt zur Erde ab), es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Verbindung zwischen der Erdung des Sternpunktes und dem Schutzleiter PE möglichst kurz ist (siehe vorhergehendes Kapitel),
- am Leiter, an dem im Schema IT der Überspannungsableiter angeschlossen ist (im allgemeinen am Neutralleiter), da dieser Ableiter diese Überspannungen beseitigt.

Anmerkung: In TN-S, IT und TT kann es notwendig sein, in der NS-Anlage infolge der kapazitiven Kopplung

zwischen den aktiven Leitern Überspannungsableiter niedrigerer Spannung anzuordnen, und dies auch am Neutralleiter.

Für die Durchführung siehe Technisches Heft Nr. 179.

■ Schaltüberspannungen (Unterbrechung von induktiven Strömen) Diese sind im wesentlichen vom inneren Modus.

Alle Erdungsschemas sind auf dieselbe Weise betroffen.

Die einzige Lösung besteht darin, diese Überspannungen an ihrem Entstehungsort abzuschwächen.

■ Störungen durch pulsgesteuerte Umrichter

Gewisse Betriebsmittel wie zum Beispiel elektronische Vorschaltgeräte für bestimmte Leuchtstofflampen und -röhren, Fernsehgeräte, Mikrocomputer usw. verwenden pulsgesteuerte Umrichter (welche die PBM, Pulsbreitenmodulation, anwenden). Diese erzeugen HF-Oberwellen, die empfindliche Geräte stören können. Wenn dies der Fall ist, gibt es drei Lösungen:

- Dazwischenschaltung eines Trenntransformators mit Abschirmung. So sind zum Beispiel kürzlich Importfernsehgeräte ohne Transformator auf die schwarze Liste gesetzt worden (dies jedoch aus Gründen der Personensicherheit!).
- Verwendung von Ferrit-Ringkernen Diese dämpfen wegen des Joule-Effektes in magnetischen Werkstoffen die Störungen bis zu wenigen zehn MHz (siehe Abb. 15).
- Verwendung von Filtern wie zum Beispiel das Filter der Abbildung 16.

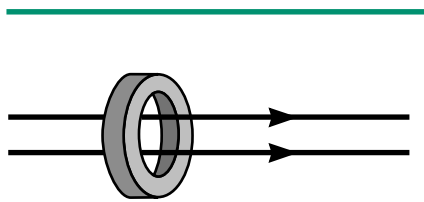


Abb. 15: Ein Ferrit-Ringkern dämpft äussere HF-Störungen.

Anmerkung:

Der Einsatz von Filtern ist eine Elektroniker-Lösung, die von Herstellern von empfindlichen Geräten oft angewendet wird. Diese Lösung muss die Produktnormen einhalten, welche die 50-Hz-Streuströme begrenzen. Diese variieren in der Praxis bei an eine Steckdose angeschlossenen Geräten zwischen 0,2 und 1 mA, können jedoch für fest installierte Hochleistungsgeräte wesentlich höher sein. Es gibt zum Beispiel Filter mit einem Streustrom von 2,85 mA für $I_n = 50 \text{ A}$ bei 50 Hz.

Zu bemerken ist, dass Informatikgeräte der Norm IEC 950 entsprechen, die für gewisse Einrichtungen (Grosscomputer, Rechner mit der Aufschrift "erhöhter Streustrom") Streuströme von bis zu 5% von I_n zulässt, was erklärt, warum eine separate Stromversorgung, normalerweise mit dem Erdungsschema TN, erforderlich ist.

Nicht vergessen werden darf, dass für diese Einrichtungen die französische Norm einen direkten Anschluss an den Hauptpotentialausgleichsleiter verlangt. Die Spannungsfestigkeit der Kondensatoren – C_y – der Standardfilter ist eine weitere wichtige Eigenschaft. Sie ist oft wesentlich niedriger als jene elektrischer Betriebsmittel. Die Filter sind deshalb empfindlich gegen äussere Überspannungen und können einen

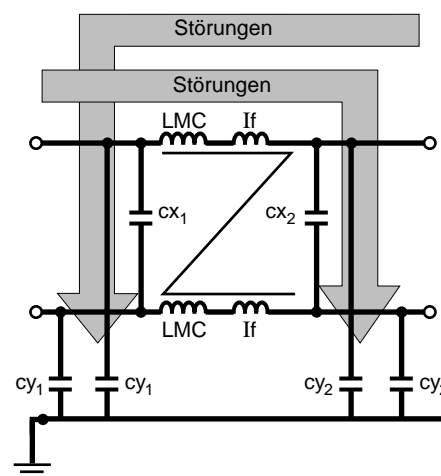


Abb. 16: Hochfrequenzfilter.

unmittelbaren Überspannungsschutz (mit Hilfe von Varistoren) erfordern.

Dies stellt ganz allgemein das Problem der Isolationskoordination in der NS. Betrachten wir den Einfluss dieser Kondensatoren – C_y – auf die einzelnen Erdungsschemas:

■ Im Schema TN stören sie die Leistungsschalter und Sicherungen nicht, die den Personenschutz bewerkstelligen.

■ Im Schema IT stören sie die Kurzschlusschutzeinrichtungen nicht in höherem Masse. Wenn jedoch die mit solchen Filtern ausgerüsteten elektronischen Geräte sehr zahlreich

sind, können Sie die Isolationsüberwachungseinrichtungen (CPI) mit NF-Stromeinspeisung stören, weshalb an deren Stelle Geräte mit Gleichstromspeisung vorzuziehen sind.

■ Im Schema TT können die von den Filtern verursachten Streuströme, wenn die elektronischen Geräte zahlreich sind, unbeabsichtigte Auslösungen der Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen hoher Empfindlichkeit (30 mA) bewirken.

Aus diesem Grund schützt heute der Fachmann nicht mehr als drei Steckdosen mit einer einzigen 30-mA-Fehlerstrom-Schutzeinrichtung. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die

Schutzgeräte weiterentwickelt worden sind, um sie besser gegen elektromagnetische Störungen zu schützen.

So zu Beispiel die Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen

□ Sie sind gegen Störungen mit steiler Front und Ausgleichsströme unempfindlich gemacht.

□ Sie sind gegen in einer Richtung fließende Impulsströme immun gemacht.

□ Sie lassen Blitzüberspannungen über den Überspannungsableiter gegen Erde fließen, ohne auszulösen (Fehlerstromschutz mit leichter Ansprechverzögerung).

6. Schlussfolgerungen

Die einzelnen Erdungsschemata sind in bezug auf den Personenschutz gleichwertig. Mit der Entwicklung kommunizierender digitaler Systeme und der Ausbreitung der Störer verlangt die Auslegung der elektrischen Installationen, die Koexistenz von Starkstrom und Schwachstrom zu beherrschen und somit die Installationsweisen sowie die Wahl des Erdungsschemas (Sternpunktbehandlung) neu zu überdenken.

Auf der Ebene der Anlagen

Auf dieser Ebene müssen zugleich die Störungsquellen (Leistung und Abstrahlung) und die Empfindlichkeit der Betriebsmittel und insbesondere der Schwachstromverbindungen reduziert werden.

Zu diesem Zweck sollte folgendes beachtet werden:

- Erdungsleiter von Blitzableitern und MS-Massen nicht an den Erder des Sternpunktes anschliessen (Vermeidung von äusseren Überspannungen infolge der Kopplung durch gemeinsame Impedanz).
- Schutzleiter PE den aktiven Leitern entlang führen (Reduktion der Kopplung durch Induktion) und in der Verteilung nur an die Masse der elektrischen Verbraucher anschliessen, vor allem im Schema TN.
- Metallische Kabelkanäle verwenden, die das gleiche Potential haben wie der Hauptpotentialausgleichsleiter (Reduktion der Abstrahlung der Starkstromkabel und Begleitleiter- und -massenwirkung für empfindliche Stromkreise).

Die Schwachstromverbindungen müssen klar von den Starkstromkabeln getrennt werden, wenn sie auf dem gleichen Träger verlaufen, oder besser in verschiedenen, nahe beieinander liegenden Kabelkanälen geführt werden. In Wirklichkeit haben die Starkstrom- und Schwachstromleitungen oft einen anderen Verlauf. Deshalb muss für die Schwachstromkreise ein Begleitleiter (oder ähnlich) verwendet und damit ein Massennetz geschaffen werden.

Auf der Ebene der Erdungsschemata

Das bereits in brand- und explosionsgefährdeten Räumen verbotene Schema TN-C ist zu vermeiden, da die im PEN-Leiter fließenden Sternpunktströme den Potentialausgleich stören. Zudem werden, wenn ein Teil des Sternpunktstroms und des Fehlerstroms in die Metallteile des Gebäudes fließen, diese vagabundierenden Ströme sowie das Kabel Ph + PEN zu Erzeugern von störenden Magnetfeldern.

Beim Schema TN-S wird angesichts der starken störenden Fehlerströme empfohlen, ein vom Erdungsnetz (PE) getrenntes und dadurch wirklich einen Potentialausgleich aufweisendes Massennetz (MF) zu schaffen (siehe Abb. 10), das zusammen mit den leitenden Böden und den Metallteilen eine dämpfende Begleitmasse und einen Faradaykäfig bildet.

Das Schema IT gestattet die beste Kontinuität der Versorgung. Der Störungspegel ist sehr niedrig. Wenn jedoch das Eintreten eines Doppelfehlers in Betracht gezogen wird, ist das Rezept dasselbe wie beim Schema TN-S.

Das Schema TT erzeugt bei einem Isolationsfehler die kleinsten Störungen. Es gestattet weiterhin, Massen und funktionelle Massen eng zu vermischen und die Vernetzung und den Potentialausgleich am weitesten zu treiben.

Schliesslich stellt sich angesichts des neuen Problems der kommunizierenden Systeme mit digitalen Verbindungen das ganze Problem des Potentialausgleichs in der NF und der HF und aller Körper und Massen in der ganzen Anlage.

Die Lösung in bezug auf die Anwendung der Erdungsschemata lautet:

- Für alle Erdungsschemata: Schaffung von dämpfenden Begleitmassen (Böden, metallische Kabelkanäle), diese miteinander verbinden und Starkstromleiter-Schwachstromleiter-Schleifen vermeiden.
- Für die Erdungsschemata TN-S und IT (2. Fehler) das Erdungsnetz (PE)

vom Massennetz trennen oder alle Massen sehr eng vernetzen, um die 50-Hz-Fehlerströme und HF-Störströme aufzuteilen.

Alles was metallisch ist, eng miteinander zu verbinden, ist eine im allgemeinen von den Angelsachsen verbotene Lösung. Sie ist praktisch nur in Gebäuden mit vertikaler Ausrichtung und mit grossem "Metallanteil" anwendbar, deren Bau kontrolliert ist.

■ Das Schema TT löst das mit der Ausbreitung von digitalen Verbindungen in Gebäuden gestellte Problem am besten. Dies unter der Bedingung, dass die Erder der Verbraucher über den Schutzleiter PE miteinander verbunden sind.

Anhang 1: Die Erdungsschemas gemäss IEC 364

Die drei international genormten Erdungsschemas sind heute von zahlreichen nationalen Normen übernommen worden. Diese drei Erdungsschemas werden im Technischen Heft Nr. 172 im Detail behandelt, wobei für jedes die Gefahren und die entsprechenden Schutzgeräte dargestellt werden. Ihr Schutzprinzip soll jedoch nachstehend kurz in Erinnerung gerufen werden.

Schema TN (siehe Abb. 17)

- Der Sternpunkt des Transformators ist geerdet.
- Die Massen der elektrischen Verbraucher sind mit dem Sternpunkt verbunden.

Ein Isolationsfehler verwandelt sich in einen Kurzschluss, worauf der fehlerhafte Teil durch die Kurzschluss-Schutz-einrichtung abgeschaltet wird. Die Fehlerspannung (Massen/Erde), "Berührungsspannung bei indirektem Berühren" genannt, beträgt ungefähr $U_0/2$, wenn die Impedanz des Hinleitungskreises gleich derjenigen des Rückleitungskreises ist. Wenn sie höher ist als die Vereinbarte Grenze der Berührungsspannung U_L , die normalerweise 50 V beträgt, erfordert sie eine Abschaltung, die umso schneller sein muss, je grösser U_d gegenüber U_L ist.

Schema TT (siehe Abb. 18)

- Der Sternpunkt des Transformators ist geerdet.
 - Die Massen der elektrischen Verbraucher sind ebenfalls an einen Erder angeschlossen.
- Ein Isolationsfehlerstrom wird durch die Impedanz der Erder begrenzt und der fehlerhafte Teil wird durch eine Fehlerstrom-Schutz-einrichtung abgeschaltet.

Die Fehlerspannung beträgt:

$$U_c = U_0 \frac{R_A}{R_B + R_A},$$

Wenn diese höher ist als die Spannung U_L , tritt die Fehlerstrom-Schutz-einrichtung in Aktion, sobald $I_d \geq \frac{U_L}{R_A}$

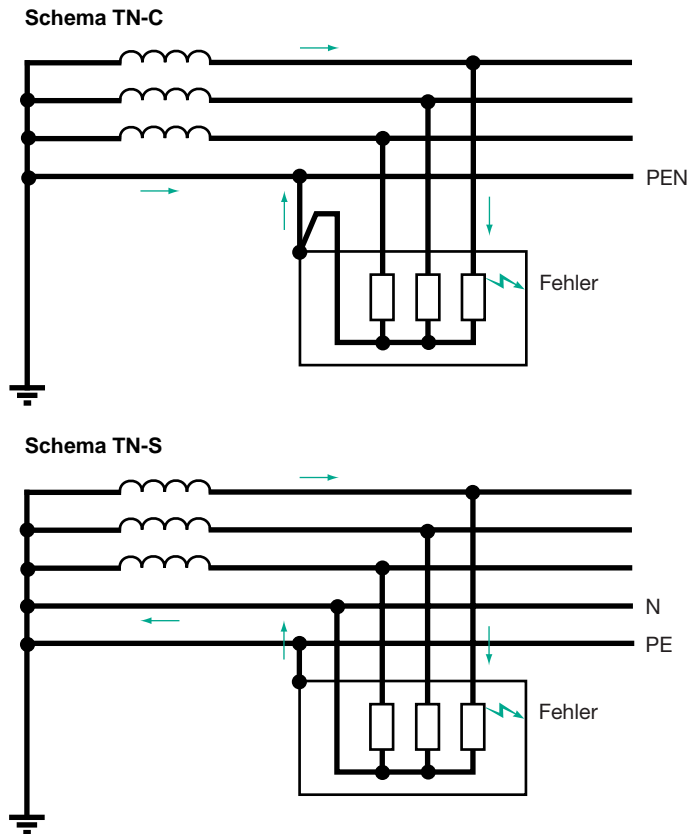


Abb. 17: Schemas TN-C und TN-S.

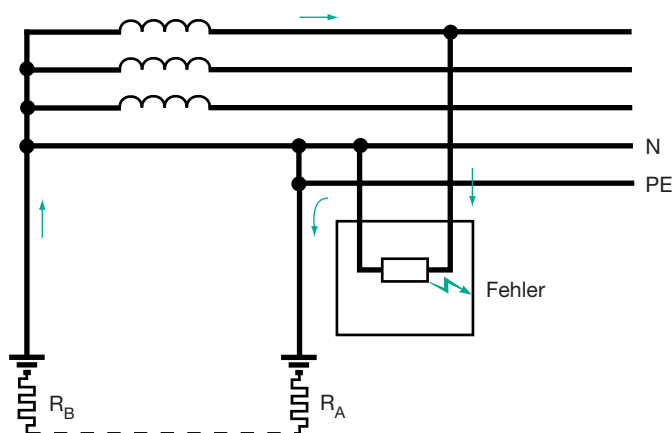


Abb. 18: Schema TT.

Schema IT

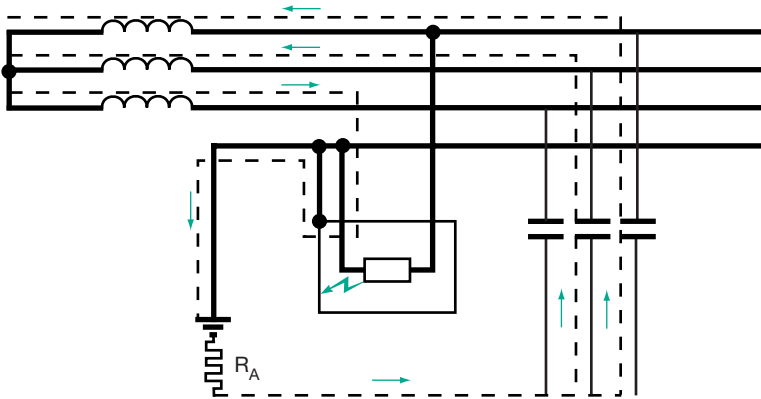
■ Der Sternpunkt des Transformators ist nicht geerdet. Er ist theoretisch isoliert. In Tat und Wahrheit ist er über die Streukapazitäten des Netzes und/oder über eine hohe Impedanz $> 1500 \Omega$ geerdet (über eine Impedanz geerdeter Sternpunkt).

■ Die Massen der elektrischen Verbraucher sind geerdet. Wenn sich ein Isolationsfehler ereignet, entwickelt sich wegen der Streukapazitäten des Netzes ein kleiner Strom (siehe 1. Schema der Abb. 19).

Die im Erder der Massen auftretende Spannung (von höchstens einigen Volt) stellt keine Gefahr dar.

Wenn ein zweiter Fehler auftritt (siehe 2. Schema der Abb. 19), bevor der erste Fehler beseitigt ist, entsteht ein Kurzschluss, wobei die Kurzschlusschutzeinrichtungen den notwendigen Schutz gewährleisten. Die Massen der betroffenen Verbraucher werden auf das vom Fehlerstrom in ihrem Schutzleiter PE erzeugte Potential angehoben.

1. Fehler



Doppelfehler

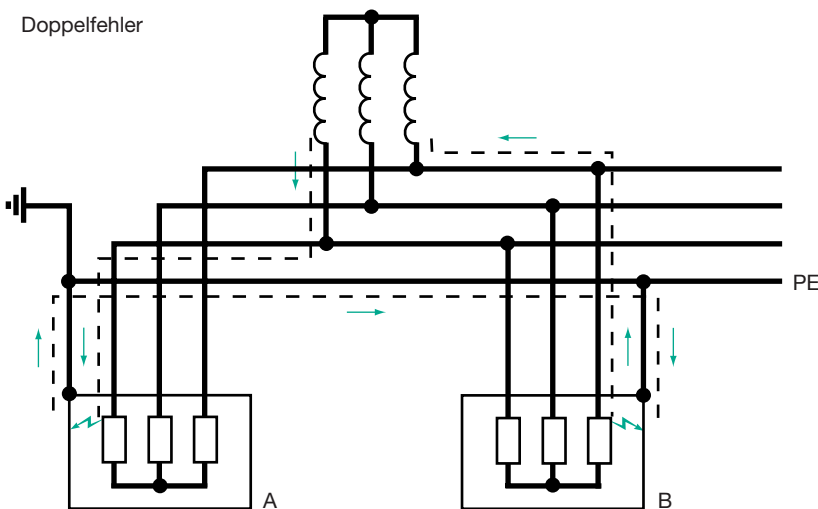


Abb. 19: Schema IT.

Anhang 2: Beispiel der Realisierung eines Raumes ohne elektromagnetische Störungen

Es handelt sich um einen Raum, in dem Elektroenzephalogramme hergestellt werden.

Diese sind kaum lesbar (die gemessenen Spannungen haben einen sehr niedrigen Pegel).

Einige Feststellungen

- Spannungen zwischen dem "Bett" des Patienten und dem elektrischen Körper des Monitors.
- Spannungen zwischen den einzelnen Körpern der Bestandteile des Messsystems und zwischen diesen und den metallischen Körpern in der Umgebung des Patienten.
- Messungen des Feldes in verschiedenen Teilen des Raumes zeigen, dass elektrische Felder von einigen mV/m bis 150 mV/m sowie Magnetfelder von einigen mA bis 10 mA bestehen (die Verbindungen Monitor-Geber bilden Schleifen und Antennen, während sich in der Nähe ein Scanner und in einiger Distanz ein Radiosender befindet). Die magnetischen NF-Felder sind bedeutend.

Bekämpfung der elektrischen Felder

- Umwandlung der Wände, des Bodens und der Decke mit einem Gitternetz in einen Faradaykäfig (+ antistatische textile Bodenbeläge).
- Ersatz der Leuchtstoffröhren durch Glühlampen.
- Ersatz des Triac-Reglerschalters durch einen variablen Autotransformator.
- Entstörung der Schalter.

Bekämpfung der Magnetfelder

- Verlegung eines Starkstrom-Leitungskanals im Schema TN-C, der durch den Raum führte.
- Realisierung einer Abschirmung des Leitungskanals zwischen den Stockwerken, der die Starkstromleitungen enthält (Summe der Ströme im Kabel nicht null, da der Sternpunktstrom teil-

weise über die Metallteile des Gebäudes zum Sternpunkt zurückfließt).

Bekämpfung der Potentialänderungen der Körper und des Schutzleiters PE des Raumes

- Zentralheizung mit an den Faradaykäfig angeschlossen und vom Rest der Anlage durch Isoliermuffen getrennte Radiatoren.
- Führung der Medizingasleitungen ausserhalb des Raumes.
- Entkopplung des elektrischen Steckdosennetzes durch HF-Filter und NS/NS-Transformator mit Abschirmung (vorher waren die Steckdosen von verschiedenen Stromkreisen gespeist, so dass die Gefahr der Schleifenbildung bestand).

- Entkopplung aller Körper und des Schutzleiters PE des Raumes durch Drossel (es wäre zu kostspielig gewesen, den Schutzleiter PE direkt zum Erder des Gebäudes zu führen, um einen "fremdspannungsarmen Raum" zu schaffen).

Das elektrische Netz dieses Spezialraums ist somit vom Schema TN-C in das Schema TT mit Erdung über eine Impedanz mit Null-Gefahr eines indirekten Berührens (Z_L ersetzt RB) geändert worden. In diesem (in der Abb. 20 dargestellten) Beispiel, das einem praktischen Fall entspricht, hat es das Vorgehen eines informierten Spezialisten ermöglicht, die meisten Lösungen anzuwenden, die dazu dienen, jede Störung der empfindlichen elektronischen Geräte zu verhindern, was auch gelungen ist.

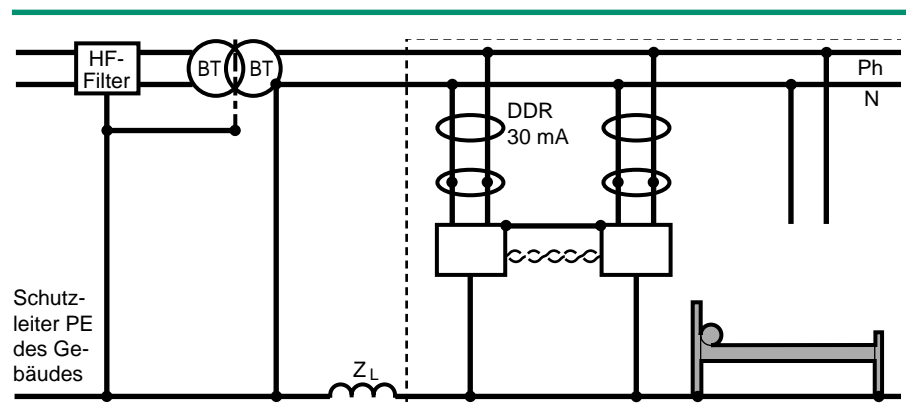


Abb. 20: Stromversorgung eines Raumes ohne elektromagnetische Störungen.

Literaturverzeichnis

Normen und Dekrete

- IEC 71-2: Isolationskoordination – 2. Teil: Anwendungsrichtlinie.
- IEC 146-4: Umrichter – 4. Teil: Methode für die Spezifikation der Leistungsdaten und Prüfprozeduren für unterbrechungsfreie Stromversorgungen.
- IEC 364: Elektrische Installationen in Gebäuden.
- IEC 555-2: Durch Haushaltgeräte und ähnliche Einrichtungen in Versorgungsnetzen erzeugte Störungen – 2. Teil: Oberwellen.
- IEC 947-2: Niederspannungsschaltgeräte – 2. Teil: Leistungsschalter.
- IEC 950: Schutz von Datenverarbeitungseinrichtungen einschliesslich von elektrischen Büromaschinen.
- IEC 1000: Elektromagnetische Verträglichkeit.
- CISPR 11: Grenzwerte und Messmethoden für die Eigenschaften elektronischer Störungen von industriellen, wissenschaftlichen und medizinischen Hochfrequenzgeräten.

Technische Hefte Merlin Gerin

- Elektromagnetische Verträglichkeit, Technisches Heft Nr. 149 – F. Vaillant
- Oberwellenstörungen in industriellen Netzen und deren Behandlung, Technisches Heft Nr. 152 – R. Roccia und N. Quillon
- Oberwellen auf der Einspeisungsseite der Gleichrichter der ASI, Technisches Heft Nr. 160 – JN. Fiorina
- Blitz und elektrische Hochspannungsanlagen, Technisches Heft Nr. 168 – B. De Metz Noblat
- Erdungsschemas in der Niederspannung (Sternpunktbehandlung), Technisches Heft Nr. 172 – B. Lacroix, R. Calvas
- Die Erdungsschemas auf der ganzen Welt und deren Entwicklung, Technisches Heft Nr. 173 – B. Lacroix, R. Calvas
- Überspannungen und Überspannungsableiter in der Niederspannung – Isolationskoordination in der Niederspannung, Technisches Heft Nr. 179 – Ch. Seraudie

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