

## Koexistenz von Starkstrom und Schwachstrom - Teil 2: Erder und Körper bzw. Massen

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.

### 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.

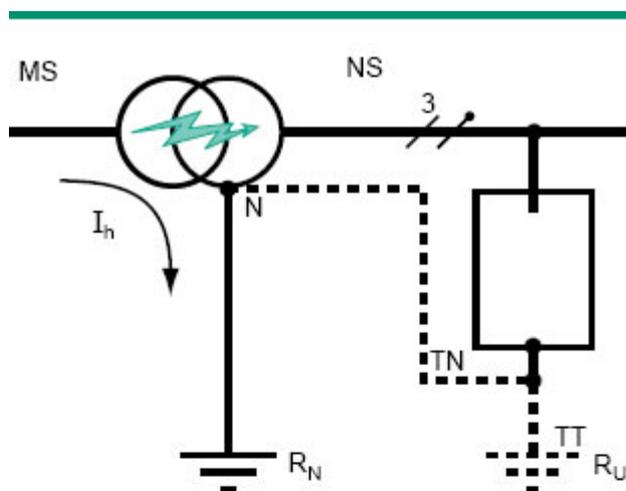


Abb. 8: MS/NS-Durchschlag. Das Potential des Netzes gegenüber Erde steigt an.  $U = R_N \cdot I_h$  woraus beim Schema TT für die elektrischen Betriebsmittel und beim Schema TN für Personen eine Gefahr entsteht, wenn das Gebäude nicht einen totalen Potentialausgleich hat.

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).

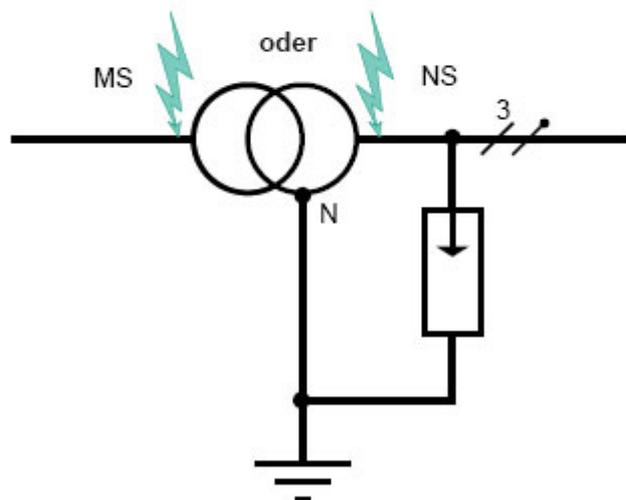


Abb. 9: Blitzüberspannung. Das Netz erfährt eine impulsförmige Überspannung an allen aktiven Leitern, woraus eine grosse Gefahr für die EMV entsteht. Deshalb müssen unabhängig vom Erdungsschema Überspannungsableiter eingesetzt werden.

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 Volleiter aus Kupfer oder nichtrostendem Stahl sein, damit die Oxidation begrenzt wird. Der spezifische Widerstand des Bodens ( $r$ ) ist ein wichtiger Parameter. Er variiert in Funktion der Feuchtigkeit und der Beschaffenheit des Bodens in einem sehr weiten 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.

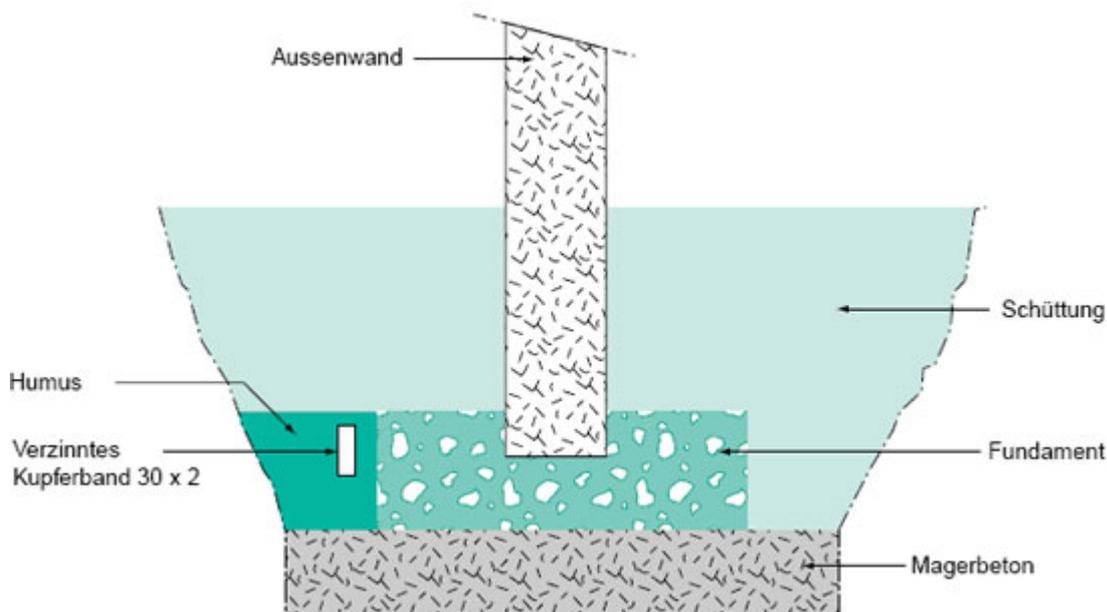


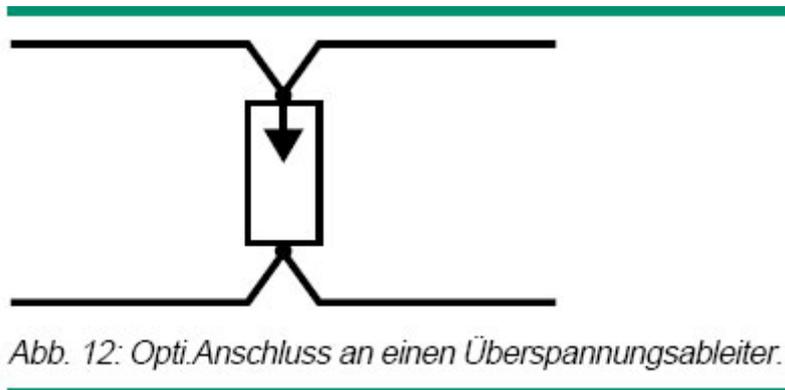
Abb. 10: Erder. Ausführung einer Schleife am Grund der Baugrube.

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 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 NSÜberspannungsableiters, 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:

$$\hat{U} \approx L \frac{di}{dt} = 1.10^{-6} \cdot \frac{5.10^3}{8.10^{-6}} = 625 \text{ V}$$

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).



■ 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  $100 \text{ mm}^2$  und einer Länge von  $10 \text{ m}$ . 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.  $\delta$  wird Eindringtiefe genannt.

Für Kupfer gilt:

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

Demzufolge nimmt der wirksame Querschnitt des Leiters ab. Das Verhältnis zwischen  $R_{\text{HF}}$  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  $\delta$ .

Für unseren Kupferleiter gilt:

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

■ Die Selbstinduktivität  $L$  ( $\mu\text{H}$ ) eines Leiters von der Länge  $\ell$  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  $\ell$ ,  $d$  (Durchmesser),  $\delta$ ,  $w$  (Breite) und  $e$  (Dicke) in Meter ausgedrückt sind.

Abmessungen			Induktivität $L$ ( $\mu\text{H}$ )	Impedanz $Z$		
$d$ (mm)	$w$ (mm)	$e$ (mm)		bei 50 Hz ( $\Omega$ )	bei 1 MHz ( $\Omega$ )	bei 10 MHz ( $\Omega$ )
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  $10 \text{ m}$  und dem Querschnitt  $100 \text{ mm}^2$  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  $R_{\text{HF}}$  vorherrschend wird.

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

## 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

### 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 oben genannten 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.

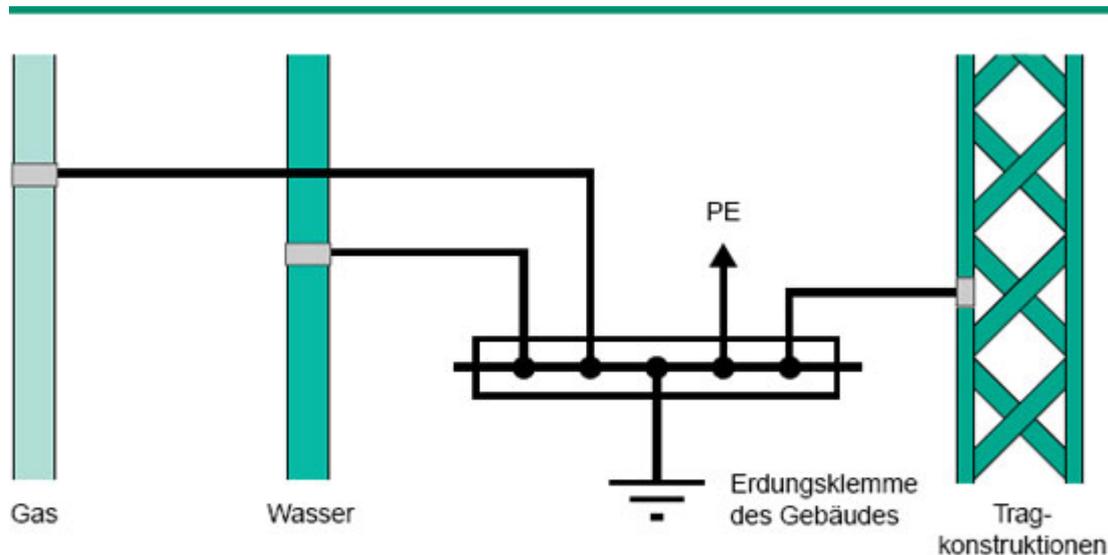


Abb. 13: Anschluss aller Massen an die Potentialausgleichsschiene.

### 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 Datenübertragungsbus miteinander kommunizieren. In diesem Fall muss 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 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).

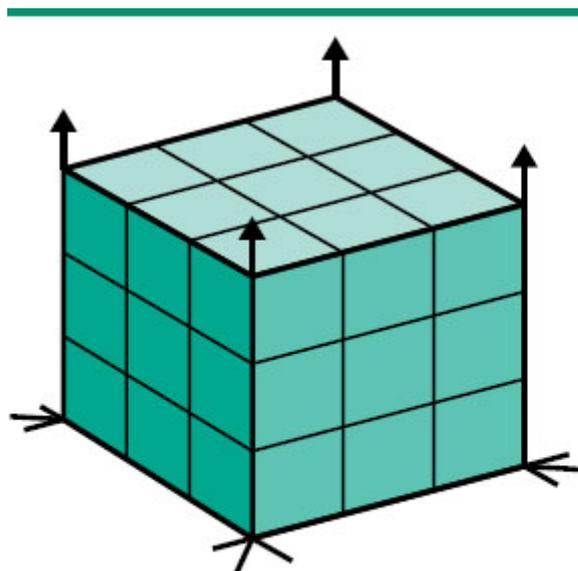


Abb. 14: Horizontale und vertikale Vermaschung des Gebäudes. Diese Vermaschung stellt einen Faradaykäfig dar.

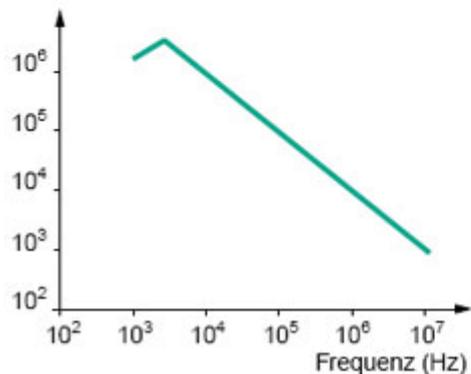
Wenn man in Betracht zieht, dass das Frequenzspektrum der Blitzspannung (siehe Abb. 15) vom energetischen Gesichtspunkt im Wesentlichen unterhalb von 1 MHz liegt und dass der Käfig für eine Teilung von  $\lambda/30$  wirksam ist, muss die Maschenweite

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

betragen.

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

Spitzenamplitude des Feldes ( $\mu\text{V}/\text{m}$ )  
im Abstand von 10 km vom Blitz



### b – Frequenzspektrum der normierten Blitzwelle (1,2/50 $\mu\text{s}$ )

Relative Amplitude

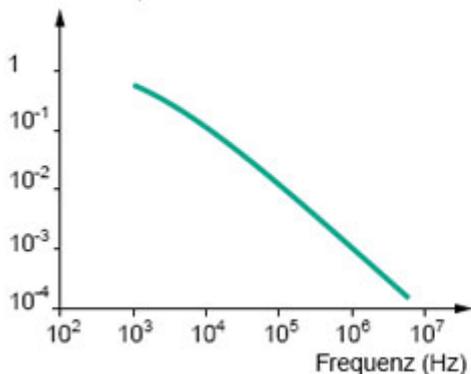


Abb. 15: Frequenzspektrum der elektromagnetischen Erscheinung «Blitz».

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 ein 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  $\mu\text{s}$  genannt wird und deren Spektrum aus der Abbildung 15b ersichtlich ist. Sie entspricht sehr gut der Pierce-Kurve.

*Klicken Sie auf das Bild für eine größere Ansicht*

### 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.

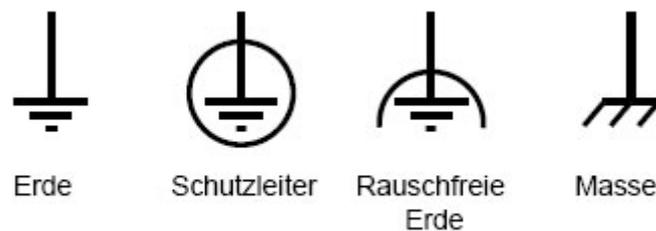
Die Impedanz einer Kupferleiters erhöht sich mit zunehmender Frequenz des durch ihn fließenden Stroms (Induktivität und Stromverdrängung). Bei 1 MHz beträgt die Impedanz grössenordnungsmäßig 10  $\Omega$  pro Meter. Wenn ein Fehlerstrom mehrere Wege einschlagen kann, wird der Potentialausgleich wesentlich verbessert.

### 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.



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

---

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 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 Massen- Ebenen zu schaffen.