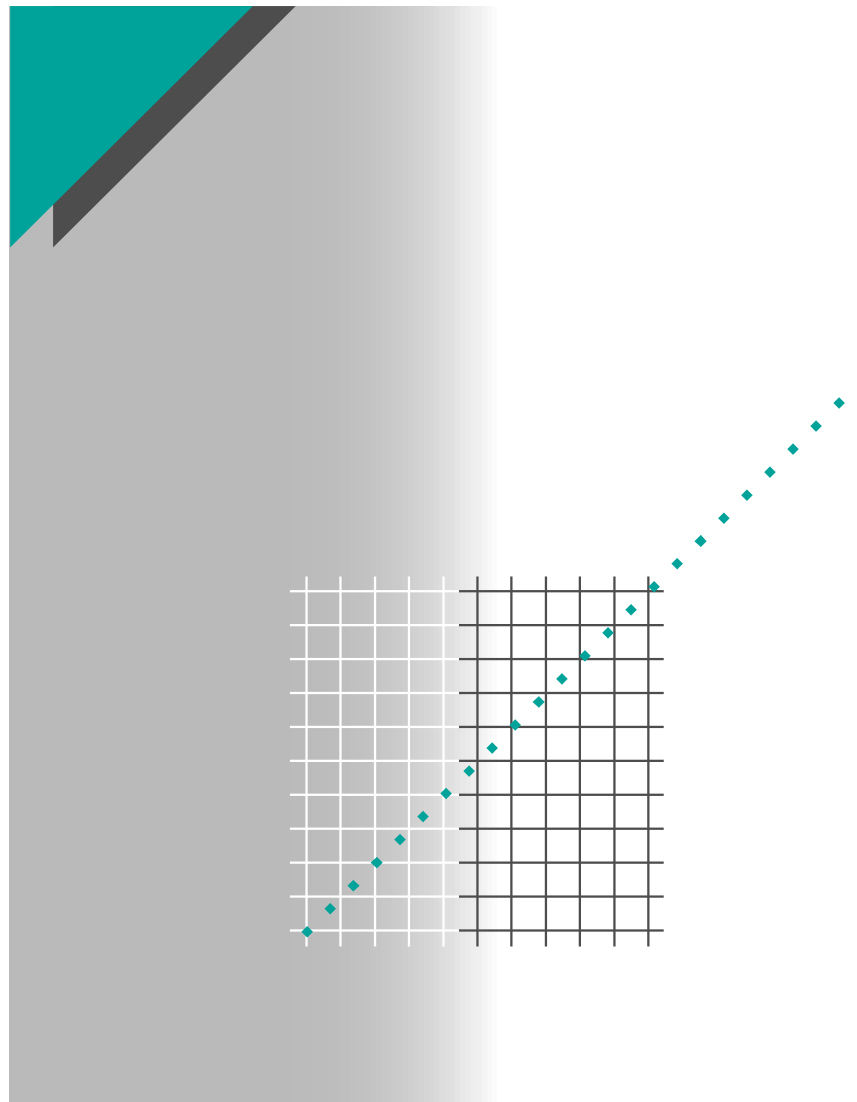


# Technisches Heft Nr. 172

## Erdungsschemas in der Nieder- spannung (Sternpunktbehandlung)



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. 172

## Erdungsschemas in der Niederspannung (Sternpunkt- behandlung)

**Autor: Bernard Lacroix**

Nachdem er 1974 das Diplom eines Ingenieur ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielle, Paris) erworben hatte, arbeitete er 5 Jahre bei Jeumont Schneider, wo er unter anderem an der Entwicklung des Traktionsstromrichters für den TGV beteiligt war.

Nach seinem Eintritt 1981 bei Merlin Gerin war er nacheinander Verkaufsingenieur für USV-Anlagen und Verkaufsleiter im Sektor Personenschutz. Seit 1991 ist er für die Vorschriften auf dem Gebiet der NS-Starkstromverteilung verantwortlich.

**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 Marketingleiter im Sektor Personenschutz. Heute ist er für die technische Kommunikation der Schneider-Gruppe verantwortlich.

## Lexikon

---

<b>CEM (EMV)</b>	Elektromagnetische Verträglichkeit
<b>CPI</b>	Contrôleur Permanent d'Isolément (Isolationsüberwachungseinrichtung)
<b>CR</b>	Kurzverzögerungs-Schutz (Schutz gegen Kurzschlussüberströme durch Schnellauslöser)
<b>DDR</b>	Dispositif Différentiel Résiduel (Fehlerstrom-Schutzeinrichtung)
<b>DLD</b>	Détecteur de Localisation de Défaut (Fehlerortungsgerät)
<b>DPCC</b>	Dispositif de Protection contre les Courts-Circuits (Kurzschlusschutzeinrichtung: Leistungsschalter oder Sicherung).
<b>Elektrisierung</b>	Auftreten einer elektrischen Spannung zwischen zwei Teilen des menschlichen Körpers, auch elektrischer Schlag genannt
<b>Elektrokution</b>	Tödlicher elektrischer Schlag
<b>GTB</b>	Gestion Technique des Bâtiments (Technisches Gebäude-Management)
<b>GTE</b>	Gestion Technique de la distribution d'Energie électrique (Technisches Elektrizitätsverteilungs-Management)
<b><math>I_{\Delta n}</math></b>	Nennauslösestrom einer DDR
<b><math>U_L</math></b>	Vereinbarte Grenze der Berührungsspannung (maximal zulässige Berührungsspannung), auch Sicherheitsspannung genannt
<b>MS/HSA</b>	Mittelspannung: 1 bis 35 kV gemäss CENELEC (Rundschreiben vom 27.02.92) Hochspannung der Klasse A: 1 bis 50 kV gemäss französischem Dekret vom 14.11.88

---

# Erdungsschemas in der Niederspannung (Sternpunktbehandlung)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	Entwicklung der Bedürfnisse	S. 4
	Ursachen von Isolationsfehlern	S. 4
	Mit einem Isolationsfehler verbundene Gefahren	S. 4
<b>2. Die Erdungsschemas und der Personenschutz</b>	Nullung, Schema TN	S. 8
	Schutzerdung, Schema TT	S. 8
	Nicht oder über eine Impedanz geerdeter Sternpunkt, Schema IT	S. 9
<b>3. Die Erdungsschemas und die Gefahr eines Brandes oder der Nichtverfügbarkeit der elektrischen Energie</b>	Gefahr eines Brandes	S. 12
	Gefahr der Nichtverfügbarkeit der elektrischen Energie	S. 12
<b>4. Einflüsse der MS auf die NS in Funktion des Erdungsschemas</b>	Blitzschlag	S. 14
	Schaltüberspannungen	S. 14
	Transformatorinterner Überschlag zwischen MS und Transformator-Körper	S. 14
	Transformatorinterner Überschlag zwischen MS und NS	S. 15
<b>5. Mit der Wahl des Erdungsschemas verbundene Geräte</b>	Erdungsschema TN, "Nullung"	S. 17
	Erdungsschema TT, "Schutzerdung"	S. 17
	Erdungsschema IT, "Isolierter Sternpunkt"	S. 18
	Schutz des Neutalleiters in Funktion des Erdungsschemas	S. 19
<b>6. Wahl des Erdungsschemas und Schlussfolgerung</b>	Methodik für die Wahl des Erdungsschemas	S. 21
	Schlussfolgerung	S. 21
<b>7. Literaturverzeichnis</b>		S. 22

Das vorliegende Technische Heft ruft die mit einem Isolationsfehler verbundenen Gefahren für den Personen- und Geräteschutz in Erinnerung. Es legt das Schwergewicht auf den Einfluss des Erdungsschemas auf die Verfügbarkeit der elektrischen Energie.

Es stellt die drei Erdungsschemas vor, die in der Norm IEC 364 festgelegt sind und in den einzelnen Ländern unterschiedlich angewendet werden. Jedes Erdungsschema, auch "Sternpunktbehandlung" genannt, wird in bezug auf die **Sicherheit** (Schutz, Wartbarkeit, Verfügbarkeit) betrachtet. Es gibt keine schlechten Erdungsschemas, denn alle gewährleisten den Personenschutz. Alle haben Vor- und Nachteile und müssen abgesehen von normativen oder gesetzlichen Vorschriften oder Verboten aufgrund der Bedürfnisse ausgewählt werden. Dem Leser, der sich für die Anwendung in den einzelnen Ländern und die Entwicklung der Erdungsschemas interessiert, wird das Technische Heft Nr. 173 empfohlen.

# 1. Einleitung

## Entwicklung der Bedürfnisse

Die drei heute in IEC 346 festgelegten Erdungsschemas, seit langem auch Sternpunktbehandlung genannt, sind:

- Nullung, TN
- Schutzerdung, TT
- Nicht (oder über eine Impedanz) geerdeter Sternpunkt, IT

Diese drei Schemas haben denselben Zweck in bezug auf den Personen- und Geräteschutz: die Beherrschung der Auswirkung von Isolationsfehlern. Sie werden hinsichtlich des Personenschutzes beim indirekten Berühren als gleichwertig erachtet.

Dies gilt nicht unbedingt für die Sicherheit der elektrischen NS-Anlage in bezug auf:

- die Verfügbarkeit der Energie,
- die Wartung der Anlage.

Diese bezifferbaren Grössen bilden den Gegenstand von ständig zunehmenden Anforderungen in den Fabrikations- und Dienstleistungsgebäuden. Ausserdem spielen die Gebäudeleitsysteme (GTB) und die Energieverteilungs-Management-Systeme (GTE) auf der Ebene des Managements und der Sicherheit eine immer wichtigere Rolle. Diese Entwicklung des Sicherheitsbedürfnisses ist somit nicht ohne Auswirkungen auf die Wahl des Erdungsschemas.

Es muss daran erinnert werden, dass Überlegungen der Kontinuität der Versorgung (Erhaltung des öffentlichen Verteilnetzes in betriebstüchtigem Zustand durch Abschaltung der Abonnenten, die einen Isolationsfehler haben) bei der Entwicklung der Erdungsschemas eine Rolle gespielt haben.

## Ursachen von Isolationsfehlern

Um den Personenschutz und die Kontinuität der Versorgung sicherzustellen, werden die Leiter sowie die unter Spannung stehenden Teile gegenüber den mit der Erde verbundenen Körpern elektrischen Betriebsmitteln "isoliert".

Die Isolation wird bewerkstelligt durch:

- die Verwendung von Isolierstoffen,
- die Einhaltung von Abständen in der Form von Luft- und/oder Kriechstrecken. Eine Isolation wird durch spezifische Spannungen gekennzeichnet, die in Übereinstimmung mit den Normen auf die Produkte und neuen Betriebsmittel angewendet werden:

- Isolationsspannung (höchste Spannung im Netz)

- Stehblitzspannung (Wellenform 1,2/50 ms)

- Stehwechselfspannung ( $2U + 1000$  V/1 min)

Beispiel für einen NS-Verteiler vom Typ PRISMA:

- Isolationsspannung: 1000 V

- Stossspannungsfestigkeit: 12 kV

Bei der Inbetriebnahme einer fachmännisch mit den Normen entsprechenden Betriebsmitteln erstellten neuen Anlage ist die Gefahr eines Isolationsfehlers sehr gering. Mit dem Alter der Anlage nimmt diese Gefahr zu.

Die Anlage kann verschiedenen Faktoren ausgesetzt sein, die zu Isolationsfehlern führen, die zum Beispiel:

- Während der Installation:

- Mechanische Beschädigung der Isolation eines Kabels

- Im Betrieb:

- Ablagerungen von mehr oder weniger leitendem Staub
- Thermische Alterung der Isolierstoffe aus den folgenden Gründen:

- Klima,
- zu viele Kabel im gleichen Kanal,
- schlecht belüfteter Schrank,
- Oberwellen,
- Überströme.

- Von einem Kurzschluss bewirkte elektrodynamische Kräfte, die ein Kabel beschädigen oder eine Luftstrecke verkleinern können

- Schaltüberspannungen, Blitzüberspannungen

- 50-Hz-Überspannungen infolge eines Isolationsfehlers auf der MS-Seite.

Normalerweise führt eine Kombination dieser primären Ursachen zu einem Isolationsfehler. Dieser kann von der folgenden Art sein:

- intern (zwischen den aktiven Leitern), der zum Kurzschluss wird.

- extern (zwischen aktiven Leitern und dem Körper elektrischer Betriebsmittel oder der Erde). In diesem Fall fliesst ein – äusserer oder "Nullstrom" (MS) genannter – Fehlerstrom im Schutzleiter (PE) und/oder in der Erde.

Die Erdungsschemas in der NS spielen vorwiegend bei äusseren Fehlern eine Rolle, die meistens an Verbrauchern oder Kabeln auftreten.

## Mit einem Isolationsfehler verbundene Gefahren

Ein Isolationsfehler stellt unabhängig von der Ursache eine Gefahr für

- das Leben von Personen
- die Unversehrtheit von Gütern
- die Verfügbarkeit der elektrischen Energie dar, alles was mit der Sicherheit zu tun hat.

### Gefahr der Elektrisierung von Personen

Eine mit einer elektrischen Spannung in Berührung kommende Person (oder ein Tier) wird elektrisiert. Je nach dem Ausmass der Elektrisierung kann diese Person

- ein unangenehmes Gefühl,
- Muskelkontraktionen,
- Verbrennungen
- einen Herzstillstand (siehe Abb. 1) erleiden.

Der Schutz des Menschen vor gefährlichen Auswirkungen des elektrischen Stroms hat Vorrang, weshalb die Elektrisierungsgefahr die erste zu berücksichtigende Gefahr ist.

Es ist der Strom  $I$  (Stärke und Dauer), der durch den menschlichen Körper (insbesondere das Herz) fliesst, der gefährlich ist. In der NS ändert sich die Impedanz des Körpers (von welcher der Hautwiderstand eine wichtige Komponente ist) praktisch nur in Funktion der Umgebung (trockene oder feuchte Räume, nasse Räume). Für jeden Fall wurde eine Sicherheitsspannung (maximal zulässige Berührungsspannung während mindestens 5 s) festgelegt. In IEC 479 wird diese Vereinbarte Grenze der Berührungsspannung  $U_L$  genannt.

IEC 364, Abschnitt 413.1.1.1, legt fest, dass, wenn die Gefahr besteht, die Berührungsspannung ( $U_c$ ) die Spannung  $U_L$  übersteigt, die Dauer des Anstehens der Fehler Spannung mit Hilfe von Schutz einrichtungen begrenzt werden muss (siehe Abb. 2).

### Gefahr eines Brandes

Diese Gefahr kann, wenn sie Wirklichkeit wird, dramatische Auswirkungen auf Personen und Güter haben. Zahlreiche Brände haben als Ursache eine starke örtliche Überhitzung oder einen elektrischen Lichtbogen infolge eines Isolationsfehlers. Die Gefahr ist umso grösser, je höher der Fehlerstrom ist. Sie hängt ferner vom Grad der Brand- oder Explosionsgefährdung des betreffenden Raumes ab.

### Gefahr der Nichtverfügbarkeit der elektrischen Energie

Die Beherrschung dieser Gefahr wird immer wichtiger. Wenn zum Beseitigen des Fehlers der fehlerhafte Teil automatisch abgeschaltet wird, ergibt sich

- eine Gefahr für Personen, zum Beispiel:

- plötzlicher Ausfall der Beleuchtung,
- Abschaltung von Betriebsmitteln, die für die Sicherheit erforderlich sind,

- eine wirtschaftliche Gefahr infolge eines Produktionsausfalls. Diese Gefahr muss insbesondere in der Prozessindustrie beherrscht werden, für die ein Wiederanfahren langwierig und kostspielig sein kann.

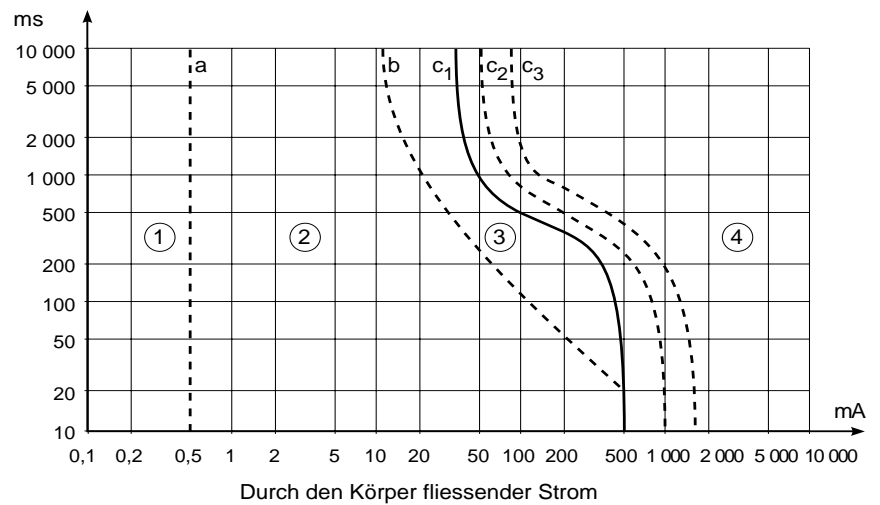
Wenn zudem der Fehlerstrom hoch ist

- können die Zerstörungen in der Anlage oder in den Verbrauchern gross sein und die Kosten erhöhen sowie die Reparaturzeiten verlängern,

- kann ferner das Fliessen von hohen Fehlerströmen bei einem äusseren Isolationsfehler (zwischen Netz und Erde) empfindliche Geräte stören, insbesondere, wenn diese zu einem geographisch verteilten Schwachstromsystem mit galvanischen Verbindungen gehören.

Schliesslich können bei der Abschaltung Überspannungen und/oder elektromagnetische Abstrahlungserscheinungen Funktionsstörungen oder sogar Beschädigungen empfindlicher Geräte bewirken.

Dauer des Stromdurchganges



Bereich 1: Bemerkbarkeit  
 Bereich 2: Starke Unbehaglichkeit  
 Bereich 3: Muskelkontraktionen  
 Bereich 4: Gefahr des Herzkammerflimmerns (Herzstillstand)  
 $c_1$ : Wahrscheinlichkeit 5%  
 $c_2$ : Wahrscheinlichkeit > 50%

Abb. 1: Zeit/Strom-Bereiche der Auswirkungen von Wechselstrom (15 Hz bis 100 Hz) auf Personen gemäss IEC 479-1.

■ Trockene oder feuchte Räume oder Standorte:  $U_L \leq 50$  V

Zu erwartende Berührungsspannung (V)	Maximale Abschaltzeit (s) der Schutz einrichtung	
	Wechselstrom	Gleichstrom
< 50	5	5
50	5	5
75	0,60	5
90	0,45	5
120	0,34	5
150	0,27	1
220	0,17	0,40
280	0,12	0,30
350	0,08	0,20
500	0,04	0,10

■ Nasse Räume oder Standorte:  $U_L \leq 25$  V

Zu erwartende Berührungsspannung (V)	Maximale Abschaltzeit (s) der Schutz einrichtung	
	Wechselstrom (a)	Gleichstrom (b)
25	5	5
50	0,48	5
75	0,30	2
90	0,25	0,80
110	0,18	0,50
150	0,10	0,25
220	0,05	0,06
280	0,02	0,02

Abb. 2: Maximale Dauer der Aufrechterhaltung der Berührungsspannung gemäss IEC 364.

## Direktes und indirektes Berühren

Bevor wir mit der Behandlung der Erdungsschemas beginnen, ist es sinnvoll, die Besonderheiten der Elektrisierung durch direktes und indirektes Berühren in Erinnerung zu rufen.

### ■ Direktes Berühren und Schutzmassnahmen

Es handelt sich um ein versehentliches Berühren aktiver Leiter (Phase oder Nulleiter) oder eines normalerweise unter Spannung stehenden Teils durch Personen (siehe Abb. 3a). Wenn diese Gefahr sehr gross ist, besteht die naheliegendste Lösung darin, die Elektrizität mit einer ungefährlichen Spannung zu verteilen, d.h. mit höchstens der Sicherheitsspannung. Dies ist die Anwendung der Schutzkleinspannung (SELV). In der NS (230/400 V) bestehen die Schutzmassnahmen darin, diese aktiven Teile ausserhalb der Berührungs-Reichweite anzuordnen oder mit Isolierstoffen, Umhüllungen oder Hindernissen zu versehen. Eine zusätzliche Massnahme gegen direktes Berühren besteht in der Anwendung von sofort auslösenden Fehlerstrom-Schutz-einrichtungen (DDR) mit hoher Empfindlichkeit  $\leq 30$  mA, sog. DDR-HS.

**Anmerkung:** Diese Massnahme ist immer erforderlich, wenn die Einhaltung des Erdungsschemas auf der Verbraucherseite nicht gewährleistet werden kann.

Der Schutz gegen indirektes Berühren hat überhaupt nichts mit dem Erdungsschema zu tun.

### ■ Indirektes Berühren, Schutz- und Verhinderungsmassnahmen

Das Berühren von Körpern elektrischer Betriebsmittel, die infolge eines Isolationsfehlers unter Spannung stehen, durch eine Person, wird indirektes Berühren genannt (siehe Abb. 3b). Dabei fliesst ein Fehlerstrom, der eine Erhöhung des Potentials zwischen der Masse vom Verbraucher und der Erde bewirkt. Somit tritt eine Fehlerspannung auf, die gefährlich ist, wenn sie höher als die Spannung  $U_L$  ist. In bezug auf diese Gefahr haben die Installationsnormen IEC 364 auf internationaler Ebene drei Erdungsschemas sowie die

entsprechenden Installations- und Schutzregeln festgelegt.

Die Schutzmassnahmen bei indirektem Berühren beruhen auf den folgenden drei Grundprinzipien:

■ **Erdung der Masse der Verbraucher und Betriebsmittel**, um zu verhindern, dass ein Isolationsfehler zu einer gleichen Situation wie ein direktes Berühren führt.

### ■ Potentialausgleich zwischen den gleichzeitig zugänglichen Massen

Die Zusammenschaltung dieser Massen trägt wirksam zur Reduktion der Berührungsspannung bei. Sie erfolgt mit Hilfe des Schutzleiters (PE), der die Masse der elektrischen Betriebsmittel in einem Gebäude, eventuell ergänzt durch zusätzliche Potentialausgleichsverbindungen, miteinander verbindet (siehe Abb. 4).

**Zur Erinnerung:** Der Potentialausgleich kann nicht an allen Orten vollständig sein (insbesondere in Lokalitäten mit einem einzigen Niveau). Ferner wird für die Untersuchung der Erdungsschemas und des damit verbundenen Schutzes die von der Normierungsstelle getroffene Annahme  $U_c = U_d$  übernommen, da  $U_c$  mindestens gleich  $U_d$  ist.

□  $U_d$  = sogenannte Fehlerspannung der Masse eines elektrischen Betriebsmittels, das einen Isolationsfehler gegen Erde aufweist.

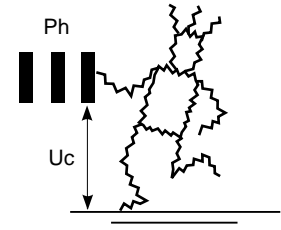
□  $U_c$  = Berührungsspannung, die vom Potential  $U_d$  und vom Bezugspotential der der Gefahr ausgesetzten Person, gewöhnlich dem Potential des Bodens, abhängt.

### ■ Beherrschung der elektrischen Gefahr:

□ Diese Beherrschung wird durch die **Vorbeugung** optimiert. Zum Beispiel durch Messung der Isolation eines Betriebsmittels vor der Einschaltung oder durch Vorhersage des Fehlers aufgrund der Überwachung der Alterung der Isolation einer von Erde getrennten Anlage (Schema IT) unter Spannung.

□ Wenn der Isolationsfehler auftritt und eine gefährliche Fehlerspannung bewirkt, muss sie durch automatische Abschaltung der Anlage, in welcher der Fehler aufgetreten ist, beseitigt werden. Die Art der Beseitigung der Gefahr hängt somit vom Erdungsschema ab.

a) Direktes Berühren



b) Indirektes Berühren

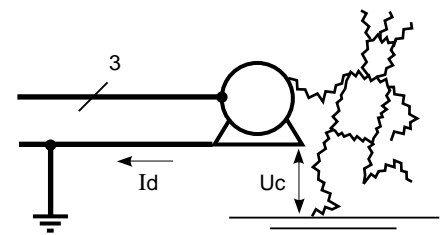


Abb. 3: Direktes und indirektes Berühren.

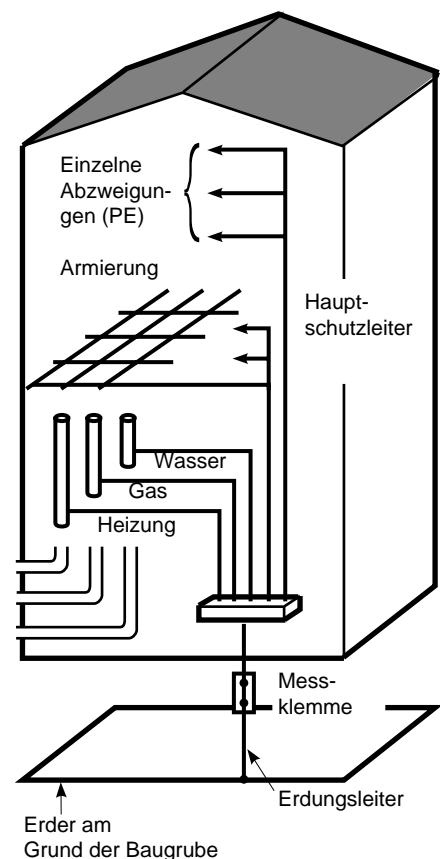


Abb. 4: Potentialausgleich in einem Gebäude.

## 2. Die Erdungsschemas und der Personenschutz

In diesem Kapitel werden die Gefahren einer Elektrisierung oder sogar einer Elektrokution für die einzelnen Erdungsschemas behandelt, die von der Internationalen Elektrotechnischen Kommission in der Norm IEC 364 festgelegt worden sind.

Das Erdungsschema in der NS charakterisiert die Art der Verbindung der Sekundärseite des MS/NS-Transformators mit der Erde und die Art der Erdung der Körper der elektrischen Anlage.

Die einzelnen Erdungsschemas werden wie folgt durch zwei Buchstaben gekennzeichnet:

■ Der erste für den Anschluss des Sternpunktes (bzw. Nullpunktes N) des Transformators (2 Möglichkeiten):

- T für direkte Erdung
- I für Isolierung von Erde

■ Der zweite für die Art des Anschlusses der Körper der Anlage (2 Möglichkeiten):

- T für direkte Erdung
- N für Anschluss an den Sternpunkt an der Einspeisestelle der Anlage, der geerdet ist (siehe Abb. 5).

Die Kombination dieser beiden Buchstaben ergibt drei mögliche Konfigurationen:

<b>Sternpunkt des Transformators</b>	<b>Körper der Anlage</b>
--------------------------------------	--------------------------

- |          |          |
|----------|----------|
| ■ wenn T | T oder N |
| ■ wenn I | T        |

d.h. TT, TN oder IT.

### Anmerkung 1:

Das Schema TN gemäss IEC 364 umfasst mehrere Unterschemas:

- TN-C: Neutralleiter (N) und Schutzleiter (PE) in einem Leiter kombiniert (PEN)
- TN-S: Neutralleiter (N) und Schutzleiter (PE) separat
- TN-C-S: Anwendung von TN-S hinter TN-C (die umgekehrte Reihenfolge ist verboten).

Es ist zu bemerken, dass das Schema TN-S für Netz mit Leitern mit Kupferquerschnitten  $\leq 10 \text{ mm}^2$  obligatorisch ist.

### Anmerkung 2:

Jedes Erdungsschema kann für die Gesamtheit einer NS-Anlage angewendet werden, es können jedoch auch mehrere Erdungsschemas in derselben Anlage gleichzeitig vorhanden sein. Siehe als Beispiel die Abb. 6.

det werden, es können jedoch auch mehrere Erdungsschemas in derselben Anlage gleichzeitig vorhanden sein. Siehe als Beispiel die Abb. 6.

### Nullung oder Schema TN

Beim Auftreten eines Isolationsfehlers wird der Fehlerstrom  $I_d$  nur durch die Impedanz der Kabel der Fehlerschleife begrenzt (siehe Abb. 8):

$$I_d = \frac{U_o}{R_{ph_1} + R_d + R_{PE}}$$

Für einen Abgang und sobald  $R_d \approx 0$ :

$$I_d = \frac{0,8 U_o}{R_{ph_1} + R_{PE}}$$

Bei einem Kurzschluss wird angenommen, dass die Impedanzen auf der Speiseseite des betreffenden Abganges einen Abfall der Phasenspannung in der Grössenordnung von 20% bewirken, woraus sich der Faktor 0,8 ergibt.

$I_d$  bewirkt nun eine Fehlerspannung gegen Erde:

$U_d = R_{PE} \cdot I_d$  somit:

$$U_d = 0,8 U_o \frac{R_{PE}}{R_{ph_1} + R_{PE}}$$

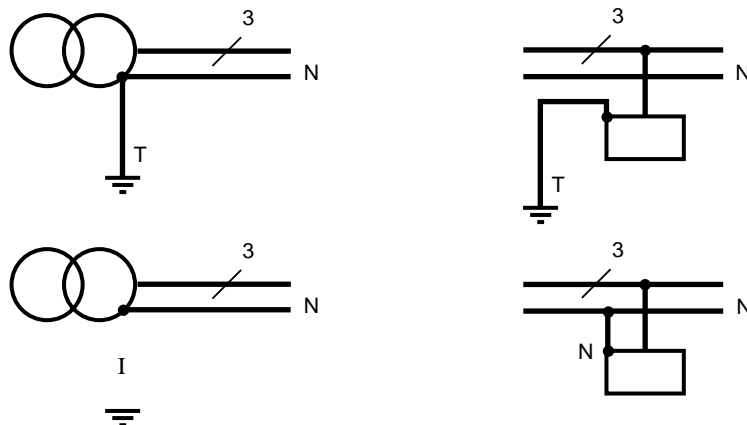


Abb. 5: Art des Anschlusses des Transformatornullpunktes und der Körper der elektrischen Verbraucher (an Erde).

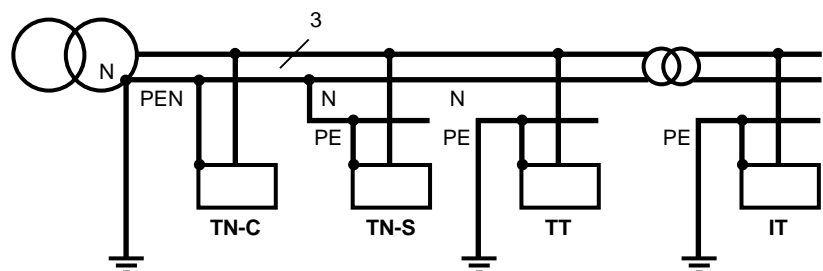


Abb. 6: Gleichzeitige Anwendung verschiedener Erdungsschemas.

Für 230/400-V-Netze ist diese Spannung von der Grössenordnung  $U_0/2$  (wenn  $R_{PE} = R_{ph}$ ) gefährlich, da sie selbst in trockener Umgebung höher ist als die maximal zulässige Berührungsspannung ( $U_L = 50\text{ V}$ ). Deshalb muss eine sofortige automatische Abschaltung der Anlage oder des Anlageteils sichergestellt werden (siehe Abb. 9). Da der Isolationsfehler einem Kurzschluss zwischen Phase und Neutralleiter gleicht, erfolgt die Abschaltung durch die Kurzschlusschutzeinrichtung DPCC mit einer vorgeschriebenen maximalen Abschaltzeit, die von  $U_L$  abhängt.

#### Durchführung:

Um sicher zu sein, dass der Schutz unabhängig von der Fehlerstelle wirksam ist, muss der Strom  $I_d$  grösser sein als der Auslösestrom  $I_a$  der Schutzeinrichtung ( $I_d > I_a$ ). Diese Bedingung muss bei der Projektierung der Anlage durch Berechnung der Fehlerströme aller Kreise der Verteilung überprüft werden.

Der gleiche Verlauf des Schutzleiters PE und der aktiven Leiter erleichtert die Berechnung.

Eine andere Vorgehensweise, um diese Bedingung zu erfüllen, besteht darin, einen maximalen Wert der Impedanz in der Fehlerschleife in Funktion vom Typ und Einstellstrom der gewählten Kurzschlusschutzeinrichtung vorzuschreiben (siehe die britische Norm BS 7671). Ein solches Vorgehen kann dazu führen, den Querschnitt der aktiven und/oder der Schutzleiter zu erhöhen.

Eine weitere Art und Weise, um sich zu vergewissern, ob die Kurzschlusschutzeinrichtung den Personenschutz sicherstellt, besteht darin, die Maximale Länge zu berechnen, die jeder Abgang für einen bestimmten Auslösestrom  $I_a$  der Schutzeinrichtung nicht überschreiten darf (siehe Technisches Heft Nr. 158:

- Impedanzenmethode
- Zusammensetzungsmethode
- Konventionelle Methode

Die letztere Methode gibt die Gleichung:

$$I_d = \frac{0,8 U_0}{Z} = \frac{0,8 U_0}{R_{ph} + R_{PE}}$$

$$= \frac{0,8 U_0 \cdot S_{ph}}{\rho \cdot (1 + m) \cdot L}$$

Damit die Schutzeinrichtung ihre Funktion wirklich erfüllt, muss  $I_a < I_d$

sein, woraus sich die von der Schutz-einrichtung mit dem Auslösestrom  $I_a$  maximal zulässige Länge  $L_{max}$  ergibt:

$$L_{max} = \frac{0,8 U_0 \cdot S_{ph}}{\rho \cdot (1 + m) \cdot I_a}$$

- $L_{max}$  = maximal zulässige Länge in m
- $U_0$  = Phasenspannung 230 V für ein 400-V-Drehstromnetz
- $\rho$  = spezifischer elektrischer Widerstand bei normaler Betriebstemperatur
- $I_a$  = automatischer Abschaltstrom
- Für einen Leistungsschalter  $I_a = I_m$  ( $I_m$  = Auslösestrom des magnetischen oder Kurzverzögerungs-Auslösers)
- Für eine Sicherung, deren totale Abschaltzeit (Vorlichtbogenzeit + Lichtbogenzeit) der Norm entspricht (siehe Abb. 9).

- $m = \frac{S_{ph}}{S_{PE}}$ .

Wenn die Leitung länger als  $L_{max}$  ist, muss  $I_a$  reduziert oder  $S_{PE}$  erhöht oder eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtung eingesetzt werden.

## Schutzerdung oder Schema TT

Beim Auftreten eines Isolationsfehlers wird der Fehlerstrom  $I_d$  (siehe Abb. 10) im wesentlichen durch die Erdungswiderstände begrenzt (wenn der Erder der Körper der Verbraucher und der

Erder des Sternpunktes nicht miteinander verbunden sind).

Immer unter der Annahme, dass  $R_d = 0$ , beträgt der Fehlerstrom:

$$I_d \approx \frac{U_0}{R_a + R_b}$$

Dieser Fehlerstrom bewirkt im Erdungswiderstand  $R_A$  eine Fehler-spannung:

$$U_d = R_a \cdot I_d, \text{ oder } U_d = \frac{U_0 \cdot R_a}{R_a + R_b}$$

Da die Erdungswiderstände in der Regel niedrig und von der gleichen Grössenordnung sind ( $\leq 10\ \Omega$ ), ist diese Spannung von der Grössenordnung  $U_0/2$  gefährlich. Es muss deshalb unbedingt eine automatische Abschaltung des vom Fehler betroffenen Teils der Anlage vorgesehen werden (siehe Abb. 11).

#### Durchführung

Da der Fehlerstrom ( $I_{d0} = \frac{U_L}{R_a}$ ),

über dem eine Gefahr besteht, wesentlich niedriger ist als die Einstellungen der Maximalstrom-Schutz-einrichtungen, muss an der Einspeisestelle der Anlage mindestens eine Fehlerstrom-Schutz-einrichtung vorgesehen werden. Zur Erhöhung der Verfügbarkeit der elektrischen Energie gestattet der Einsatz von mehreren Fehlerstrom-Schutz-einrichtungen die

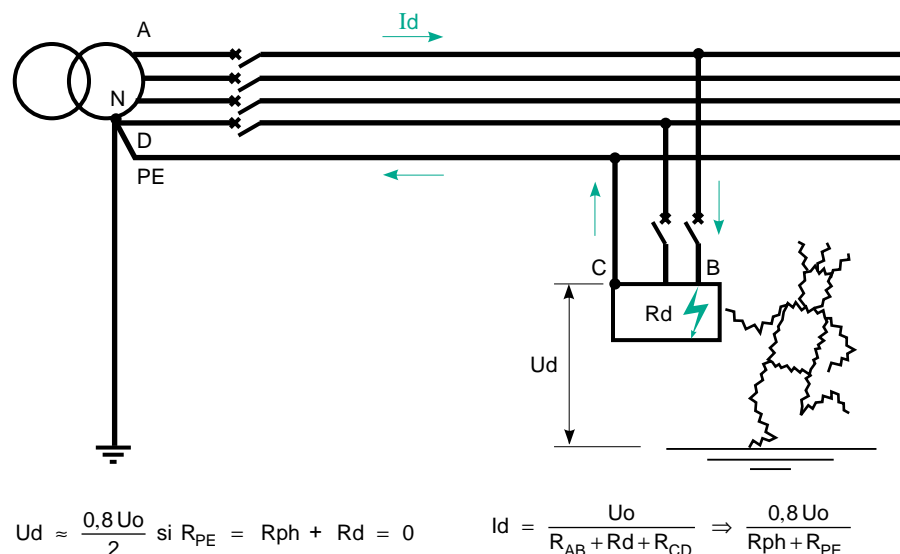


Abb. 8: Fehlerstrom und Fehlerspannung im Schema TN.

Einführung einer Strom- und Zeitselektivität der Abschaltung. Alle diese Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen müssen einen Nennauslösestrom  $I_{\Delta n}$  kleiner als  $I_{d0}$  haben.

Die Abschaltung mit Hilfe von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen muss in Übereinstimmung mit der Norm in weniger als 1 s erfolgen (diese Zeit kann 5 s erreichen, wenn  $R_A$  und  $R_B$  miteinander verbunden sind).

Es ist zu bemerken, dass der Schutz mit Hilfe von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen

■ unabhängig von der Länge der Kabel ist,

■ mehrere separate Erder  $R_A$  gestattet (diese Anordnung ist nicht empfehlenswert, da dann der Schutzleiter PE nicht mehr eine Potentialreferenz für die gesamte Anlage ist).

Das Technische Heft Nr. 114 behandelt im Detail die Technik und den Einsatz von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen.

## Nicht oder über eine Impedanz geerdeter Sternpunkt oder Schema IT

Der Sternpunkt ist isoliert, d.h. nicht geerdet. Die Massen der Anlage sind normalerweise miteinander verbunden (wie bei den Schemas TN und TT).

■ Im Normalbetrieb (ohne Isolationsfehler) wird das Netz durch die Streuimpedanz des Netzes geerdet.

Es sei daran erinnert, dass die Streuimpedanz eines Drehstromkabels gegen Erde durch die folgenden typischen Werte charakterisiert wird:

- $C = 1 \mu\text{F}/\text{km}$
- $R = 1 \text{ M}\Omega/\text{km}$ , was (bei 50 Hz) ergibt:
- $Z_{cf} = 1/j \cdot C \cdot \omega = 3\,200 \Omega$
- $Z_{rf} = R_f = 1 \text{ M}\Omega$

somit  $Z_f \leq Z_{cf} = 3\,200 \Omega$ .  
Um das Potential eines IT-Netzes gegenüber Erde festzulegen, wird – besonders wenn es kurz ist –

empfohlen, eine Impedanz ( $Z_n \leq 1\,500 \Omega$ ) zwischen den Sternpunkt des Transformators und die Erde zu schalten. Dann haben wir das Schema IT mit über eine Impedanz geerdetem Sternpunkt.

■ Verhalten beim ersten Fehler

□ Isolierter Sternpunkt:

Der Fehlerstrom entsteht wie folgt (Maximalwert bei einem satten Fehler und nicht verteiltem Sternpunkt).

$I_f = I_{c1} + I_{c2}$ , wobei:

$$I_{c1} = j \cdot C_f \cdot \omega \cdot V_{13} \text{ und}$$

$$I_{c2} = j \cdot C_f \cdot \omega \cdot V_{23}, \text{ woraus:}$$

$$I_d = U_0 \cdot 3 C_f \cdot \omega.$$

Für 1 km 230/400-V-Netz beträgt die Fehlerspannung:

$$U_c = R_b \cdot I_d, \text{ d.h. } 0,7 \text{ V, wenn } R_b = 10 \Omega.$$

Diese Spannung ist ungefährlich, weshalb die Anlage in Betrieb bleiben kann.

Wenn der Neutral-Leiter (N-Leiter) verteilt ist, fügt die Potentialverschiebung vom N-Leiter gegenüber der Erde einen Strom  $I_{cn} = U_0 \cdot C_f \cdot \omega$  hinzu, und  $I_f = U_0 \cdot 4 \cdot C_f \cdot \omega$  (siehe Abb. 12).

□ Über eine Impedanz geerdeter N-Leiter:

Strom des ersten Fehlers:

$$I_d = \frac{U}{Z_{\text{eq}}}, \text{ wobei}$$

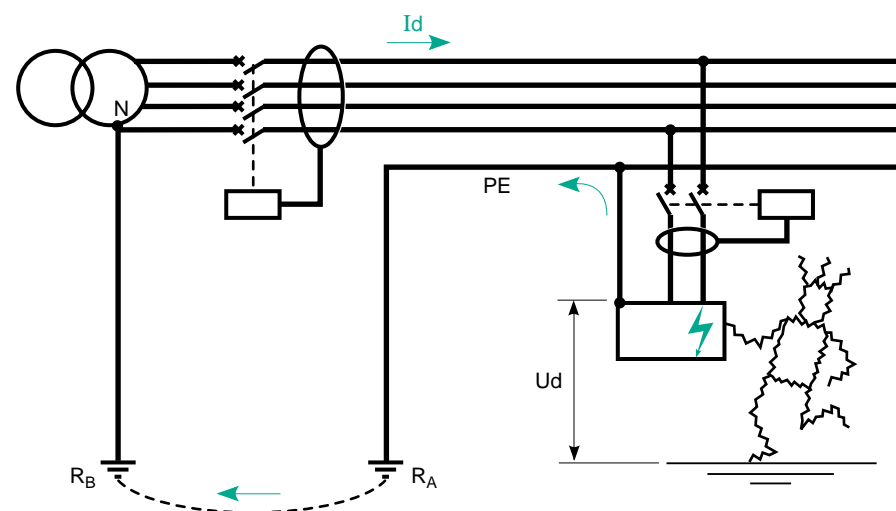
$$\frac{1}{Z_{\text{eq}}} = \frac{1}{Z_n} + 3j \cdot C_f \cdot \omega.$$

Die entsprechende Fehlerspannung bleibt niedrig und ungefährlich und die Anlage kann in Betrieb bleiben.

Die gefahrlose Weiterführung des Betriebs ist sehr interessant, man muss jedoch

$U_0$ (Volt) Phasenspannung	Abschaltzeit (Sekunden) $U_L = 50 \text{ V}$	Abschaltzeit (Sekunden) $U_L = 25 \text{ V}$
127	0,8	0,35
230	0,4	0,2
400	0,2	0,05
$\leq 400$	0,1	0,02

Abb. 9: Abschaltzeiten im Schema TN (siehe IEC 364 und NF C 15-100, Tabellen 41 A und 48 A).



$$I_d = \frac{U_0}{R_A + R_B} \quad U_d = U_0 \frac{R_A}{R_A + R_B}$$

Abb. 10: Fehlerstrom und Fehlerspannung im Schema TT.

$$I_{\Delta n} \leq \frac{U_L}{R_A} \text{ Maximalwiderstand der Erders } R_A$$

$U_L$	50 V	25 V
3 A	16 $\Omega$	8 $\Omega$
1 A	50 $\Omega$	25 $\Omega$
500 mA	100 $\Omega$	50 $\Omega$
300 mA	166 $\Omega$	83 $\Omega$
30 mA	1660 $\Omega$	833 $\Omega$

Abb. 11: Oberer Grenzwert des Erdwiderstandes der Masse, der in Funktion der Empfindlichkeit der Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen und der maximal zulässigen Berührungsspannung  $U_L$  nicht überschritten werden darf, ( $I_{\Delta n} = f(R_A)$ ).

– wissen, dass ein Fehler vorhanden ist,  
 – diesen schnell suchen und beseitigen, bevor ein zweiter Fehler auftritt.  
 Um diese Anforderungen zu erfüllen  
 – wird die Fehler-Information von einer Isolationsüberwachungseinrichtung (CPI) gegeben, die alle aktiven Leiter einschliesslich des Neutralleiters überwacht,  
 – erfolgt die Suche mit Hilfe eines Fehlerortungsgerätes.

■ Verhalten beim zweiten Fehler  
 Wenn ein zweiter Fehler auftritt, während der erste Fehler noch nicht beseitigt ist, müssen die folgenden drei Fälle betrachtet werden:

- Der Fehler betrifft denselben aktiven Leiter: Es geschieht nichts und der Betrieb kann weitergehen.
- Der Fehler betrifft zwei verschiedene aktive Leiter: Wenn alle Massen miteinander verbunden sind, ist der Doppelfehler ein Kurzschluss (über den Schutzleiter PE).

Die Elektrisierungsgefahr ist ähnlich wie diejenige im Erdungsschema TN. Die ungünstigsten Bedingungen für die Kurzschlusschutzeinrichtungen (niedrigster  $I_d$ ) ergeben sich, wenn die beiden Fehler an Abgängen mit den gleichen Eigenschaften (Querschnitt und Länge) auftreten (siehe Abb. 13). Die Kurzschlusschutzeinrichtungen müssen die folgenden Bedingungen erfüllen:

– Wenn der N-Leiter verteilt und einer der beiden fehlerhaften Leiter der Neutralleiter ist:

$$I_a \leq \frac{0,8 U_0}{2Z}$$

– oder wenn der N-Leiter nicht verteilt ist:

$$I_a \leq \frac{0,8 U_0 \cdot \sqrt{3}}{2Z}$$

Es muss darauf hingewiesen werden, dass, wenn einer der beiden Fehler den Neutralleiter betrifft, der Fehlerstrom und die Fehlerspannung zweimal niedriger sind als im Schema TN. Dies hat die Normierungsstelle veranlasst, längere Abschaltzeiten der Kurzschlusschutzeinrichtungen zuzulassen (siehe Abb. 14.)

Wie beim Erdungsschema TN ist der Schutz durch Kurzschlusschutzeinrichtungen nur für die folgenden maximalen Kabellängen wirksam:

– Verteilter Sternpunkt:

$$L_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,8 U_0 \cdot S_{ph}}{\rho (1 + m) \cdot I_a}$$

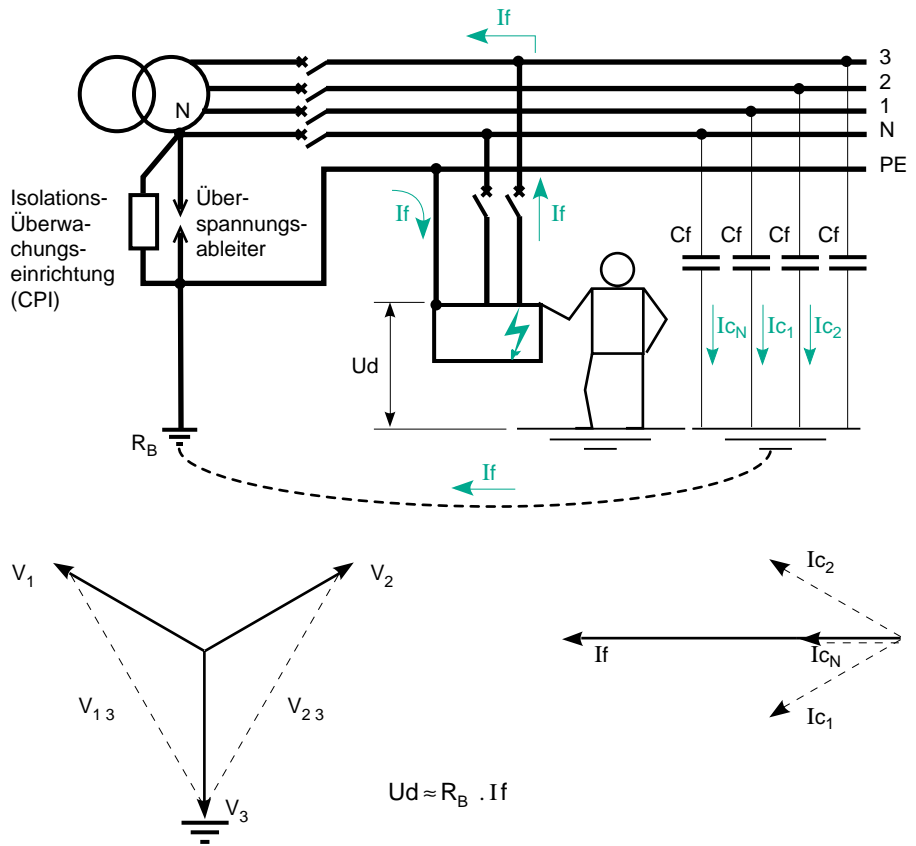


Abb. 12: Strom beim ersten Isolationsfehler im Schema IT.

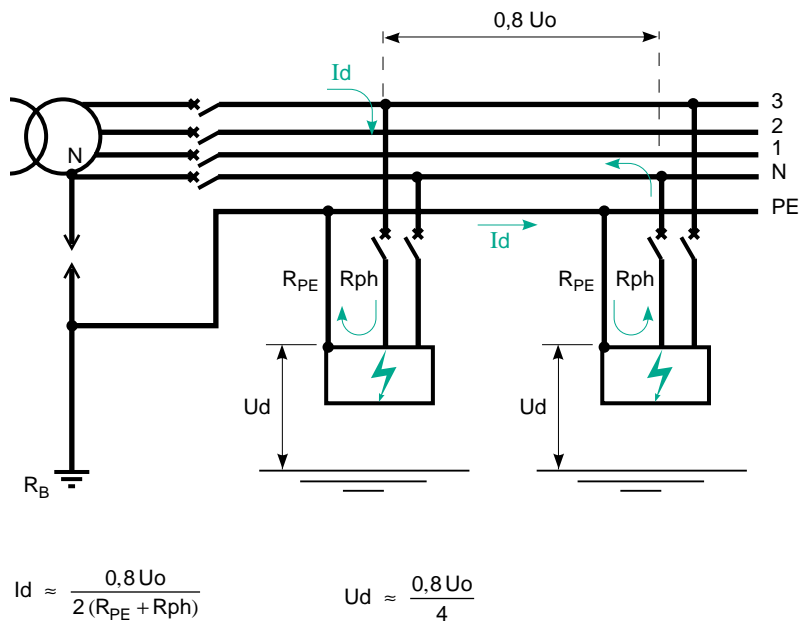


Abb. 13: Strom beim zweiten Isolationsfehler im Schema IT (verteilter N-Leiter), wobei Abgänge von gleichem Querschnitt und gleicher Länge betroffen sind.

– Nicht verteilter N-Leiter:

$$L_{\max} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{0,8 U_0 \cdot S_{ph}}{\rho (1 + m) \cdot I_a}$$

Dies unter der Bedingung, dass der Neutralleiter geschützt ist und denselben Querschnitt wie die Phasenleiter hat. Dies ist im wesentlichen der Grund dafür, dass die französische Norm davon abrät, den Sternpunkt zu verteilen.

□ Der Fehler betrifft zwei verschiedene aktive Leiter, es sind aber nicht alle Masse miteinander verbunden. Für einzeln oder gruppenweise geerdete Massen muss jeder Stromkreis oder jede Stromkreisgruppe mit einer Fehlerstrom-Schutzeinrichtung geschützt werden. Bei einem Isolationsfehler an Gruppen, die an zwei verschiedene Erder

angeschlossen sind, ist das Verhalten des Erdungsschemas gegenüber dem Isolationsfehler (Id, Ud) effektiv analog demjenigen eines Schemas TT (der Fehlerstrom fliesst über die Erde). Der Personenschutz bei indirektem Berühren wird somit auf dieselbe Weise

$$\text{mit } I\Delta n \leq \frac{U_L}{R_A} \quad \text{wie gemäss Tabelle}$$

der Abbildung 11 gewährleistet.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass aufgrund der von der Norm vorgeschriebenen Zeiten eine horizontale Zeitselektivität realisiert werden kann, um die Kontinuität der Versorgung bestimmter Abgänge zu bevorzugen.

**Anmerkung:** Um ein von Erde isoliertes NS-Netz vor Spannungsanstiegen (Überschlag im MS/NS-Transformator, zufällige Berührung mit einem Netz höherer Spannung, Blitzschlag im MS-Netz) zu schützen, schreibt in Frankreich die Norm vor, zwischen den Sternpunkt des MS/NS-Transformators und Erde (Rb) einen Überspannungsableiter zu schalten. Dem Leser, der das Studium des Erdungsschemas IT vertiefen möchte, wird das Technische Heft Nr. 178 empfohlen.

Um eine Übersicht über die Grössen zu geben, welche die einzelnen Erdungsschemas in bezug auf den Personenschutz charakterisieren, sind die wichtigsten Formeln in der Tabelle der Abbildung 15 zusammengefasst.

U <sub>0</sub> /U (Volt) U <sub>0</sub> : Phasenspannung U: Verkettete Spannung	U <sub>L</sub> = 50 V Abschaltzeit (Sekunden)		U <sub>L</sub> = 25 V Abschaltzeit (Sekunden)	
	Nicht verteilter Sternpunkt	Verteilter Sternpunkt	Nicht verteilter Sternpunkt	Verteilter Sternpunkt
127/220	0,8	5	0,4	1,00
230/400	0,4	0,8	0,2	0,5
400/690	0,2	0,4	0,06	0,2
580/1 000	0,1	0,2	0,02	0,08

Abb. 14: Vorgeschriebene maximale Abschaltzeiten im Schema IT (gemäss IEC 364).

	Id	Ud	L <sub>max</sub>	Kontinuität der Versorgung
TN	$\frac{0,8 U_0 \cdot S_{ph}}{\rho (1 + m) \cdot L}$	$\frac{0,8 U_0}{1 + m}$	$\frac{0,8 U_0 \cdot S_{ph}}{\rho (1 + m) \cdot I_a}$	Vertikale Selektivität
TT	$\frac{U_0}{R_a + R_b}$	$\frac{U_0 \cdot R_a}{R_a + R_b}$	Keine Einschränkung	Vertikale Selektivität
IT	1. Fehler Doppelfehler mit Neutralleiter Doppelfehler zwischen Phasen	< 1 A $\leq \frac{m}{2} \cdot \frac{0,8 U_0}{1 + m}$ $\leq \frac{m \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot \frac{0,8 U_0}{1 + m}$	$\ll U_L$ $\frac{1}{2} \cdot \frac{0,8 U_0 \cdot S_{ph}}{\rho (1 + m) \cdot I_a}$ $\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{0,8 U_0 \cdot S_{ph}}{\rho (1 + m) \cdot I_a}$	Keine Abschaltung Vertikale Selektivität und Möglichkeit der horizontalen Selektivität zugunsten von Abhängen mit hoher Stromstärke

Zur Erinnerung:

■  $r = 22 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2/\text{m}$  für Cu (36 für Al)

■  $m = \frac{S_{ph}}{S_{PE}}$  ;

■ Der Querschnitt des Leiters PE, der normalerweise gleich dem Querschnitt der Phasenleiter ist, kann gleich der Hälfte des Querschnitts der Phasenleiter sein, wenn dieser grösser als 35 mm<sup>2</sup> ist. Dies erhöht bei TN und IT die Fehlerleistung Ud.

Abb. 15: Charakteristische Grössen der einzelnen Erdungsschemas.

### 3. Die Erdungsschemas und die Gefahr eines Brandes oder der Nichtverfügbarkeit der elektrischen Energie

#### Gefahr eines Brandes

Es ist nachgewiesen und hierauf von den Normierungsstellen übernommen worden, dass eine Punktberührung zwischen einem Leiter und einem Metallteil in besonders empfindlichen Räumen einen Brand auslösen kann, wenn der Fehlerstrom 500 mA übersteigt.

Beispiele:

- Räume mit hohem Risiko: Petrochemische Betriebe, landwirtschaftliche Betriebe
- Räume mit erhöhtem Risiko, wo jedoch die Auswirkungen sehr schwerwiegend sein können: Hochhäuser, die dem Publikum offenstehen usw.

Bei isoliertem Sternpunkt ist die Brandgefahr

- beim ersten Fehler sehr niedrig,
- beim zweiten Fehler ebenso gross wie beim Schema TN.

Bei den Erdungsschemas TT und vor allem TN ist der Fehlerstrom  $I_d$  angesichts der entwickelten Leistung ( $P = R_d \cdot I_d^2$ ) bei den folgenden Werten gefährlich:

- Schema TT:  $5 \text{ A} < I_d < 50 \text{ A}$
- Schema TN:  $1 \text{ kA} < I_d < 100 \text{ kA}$

Die an der Fehlerstelle ins Spiel gebrachte Leistung ist insbesondere im Schema TN beträchtlich, weshalb es angebracht ist, bereits bei den niedrigsten Stromstärken möglichst schnell einzugreifen, um die Durchlassenergie ( $\int R_d \cdot i^2 \cdot dt$ ) zu begrenzen.

Dieser von der IEC vorgeschriebene Schutz wird durch eine unverzüglich auslösende Fehlerstrom-Schutzeinrichtung mit einem Auslösestrom  $\leq 500 \text{ mA}$  gewährleistet, und dies unabhängig vom Erdungsschema.

Wenn die Brandgefahr besonders gross ist (Herstellung bzw. Lagerung von entflammaren Stoffen usw.), muss, eventuell obligatorisch, ein Erdungsschema mit geerdeten Massen angewendet werden, das diese Gefahr von Natur aus minimal hält (TT oder IT). Zu bemerken ist, dass TN-C in Frankreich verboten ist, wenn Brand-

gefahr (Bedingungen BE2) und/oder Explosionsgefahr (Bedingungen BE3) besteht. Da die Schutzleiter PE und der Neutralleiter miteinander verbunden sind, können keine Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen eingesetzt werden.

#### Gefahr der Nichtverfügbarkeit der elektrischen Energie

Diese Gefahr stellt für den Betreiber in Anbetracht der Kosten für den Produktionsausfall und für die Reparatur, die sehr hoch sein können, ein grosses Risiko dar.

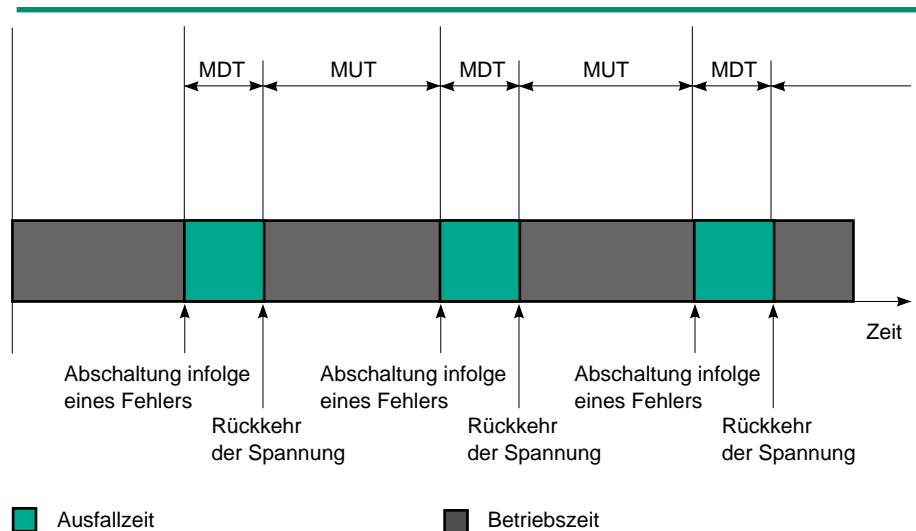
Sie ist je nach dem gewählten Erdungsschema verschieden. Es sei daran erinnert, dass die Verfügbarkeit (V) eine statistische Grösse ist (siehe Abb. 16) und dem Verhältnis zwischen den beiden Grössen:

- Zeit, während der das Netz verfügbar ist,
- Bezugszeit, die der Zeit, während der das Netz verfügbar ist, plus der Zeit, während der das Netz nicht verfügbar ist, entspricht.

Die mittlere verfügbare Betriebszeit (MUT) hängt vom allgemeinen Zustand der Isolation des Netzes ab, wobei die Güte der Isolation mit der Zeit infolge der thermischen Beanspruchung und der elektrodynamischen Kräfte, die insbesondere eine Folge von Fehlerströmen ist, abnimmt.

Die mittlere Ausfallzeit (MDT) hängt ebenfalls vom Fehlerstrom ab, und insbesondere von dessen Stärke, die je nachdem

- mehr oder weniger grosse Zerstörungen in den Verbrauchern, Kabeln usw.,
- Brände,



■ Ausfallzeit

■ Betriebszeit

- V = Verfügbarkeit
- MUT = Mean Up-Time
- = Mittlere verfügbare Betriebszeit nach einer Reparatur
- MDT = Mean Down-Time
- = Mittlere Ausfallzeit bei einer Störung (Feststellung + Reaktion + Reparatur + Wiederinbetriebnahme)

$$V = \frac{MUT}{MDT + MUT}$$

Abb. 16: Verfügbarkeit der elektrischen Energie.

■ Funktionsstörungen der Schwachstromeinrichtungen der Leittechnik bewirken kann.

In bezug auf die Verfügbarkeit der elektrischen Energie muss somit jedes Erdungsschema separat betrachtet werden. Das Schema IT verdient besondere Beachtung, da es das einzige Schema ist, das beim Auftreten eines Fehlers keine Abschaltung erfordert.

■ Erdungsschema IT

Um alle Vorteile des Schemas IT aufrechtzuerhalten, die darin bestehen, die Elektrizitätsverteilung beim ersten Fehler nicht zu unterbrechen, muss ein zweiter Fehler verhindert werden, da dieser dieselben grossen Gefahren wie beim Schema TN mit sich bringt. Zu diesem Zweck muss der erste Fehler beseitigt werden, bevor der zweite auftritt. Der Einsatz von leistungsfähigen Detektions- und Ortungsmitteln durch ein rasch reagierendes Wartungspersonal reduziert die Wahrscheinlichkeit eines "Doppelfehlers" ganz wesentlich. Zudem stehen heute Überwachungseinrichtungen zur Verfügung, mit denen die Alterung der Isolation der einzelnen Abgänge überwacht und somit eine Fehlervorhersage gemacht und das Auftreten des ersten Fehlers vorhergesehen werden kann.

Deshalb ist mit dem Erdungsschema IT eine maximale Verfügbarkeit möglich.

■ Erdungsschemas TN und TT

Diese erfordern eine selektive Abschaltung.

Im Schema TN wird diese mit den Kurzschlusschutzeinrichtungen erreicht, wenn der Schutzplan der Anlage gut überlegt ist (Stromselektivität).

Im Schema TT kann diese auf einfache Weise mit Hilfe der Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen erreicht werden, mit denen eine Strom- oder Zeitselektivität möglich ist.

Es sei daran erinnert, dass im Schema TN die Reparaturzeit angesichts des

$j_i^2$  dt die Tendenz hat, schwerwiegender zu sein als im Schema TT, was auch für die Verfügbarkeit gilt.

■ Für alle Erdungsschemas

Es ist immer von Interesse, Isolationsfehler vorauszusehen, insbesondere Isolationsfehler bestimmter Motoren während des Anlaufs. Man darf nicht vergessen, dass 20% des Motorstörungen die Folge eines Isolationsfehlers sind, der sich beim Einschalten auswirkt. Selbst ein schwacher Verlust der Isolationsfestigkeit an einem warmen Motor, der sich in feuchter Umgebung abkühlt (Kondensation) entwickelt sich beim Wiederanlauf zu einem satten Fehler, wodurch einerseits die Wicklungen stark beschädigt werden und andererseits eine Betriebsunterbrechung erfolgt, wenn nicht sogar grössere Gefahren auftreten, wenn es sich um einen sicherheitsrelevanten Motor handelt (Entwässerungspumpe, Löschwasserpumpe, Ventilator usw.). Solche Störungen können unabhängig vom Erdungsschema mit einer Isolationsüberwachungseinrichtung

verhindert werden, die den ausgeschalteten Verbraucher überwacht. Wenn ein Fehler vorliegt, wird ein Anlauf verhindert.

Aus diesem Kapitel folgt klar, dass für eine hohe Verfügbarkeit der elektrischen Energie die Erdungsschemas die folgende Rangfolge einnehmen: IT, TT, TN.

**Anmerkung:**

Wenn aus Gründen der Kontinuität der Versorgung die Anlage ein Notstromaggregat oder eine USV – Unterbrechungsfreie Stromversorgung – enthält, besteht beim Übergang auf die Ersatzstromquelle die Gefahr, dass die Kurzschlusschutzeinrichtungen DPCC nicht oder nur verzögert funktionieren (niedrigerer  $I_{cc}$ , siehe Abb. 17). In den Erdungsschemas TN und IT ist es somit aus Gründen des Personen- und Güterschutzes unerlässlich, sich zu vergewissern, dass die Schutzbedingungen (Auslösestrom und Abschaltzeit) insbesondere für lange Abgänge immer eingehalten werden. Wenn dies nicht der Fall ist, ist es ratsam, Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen einzusetzen.

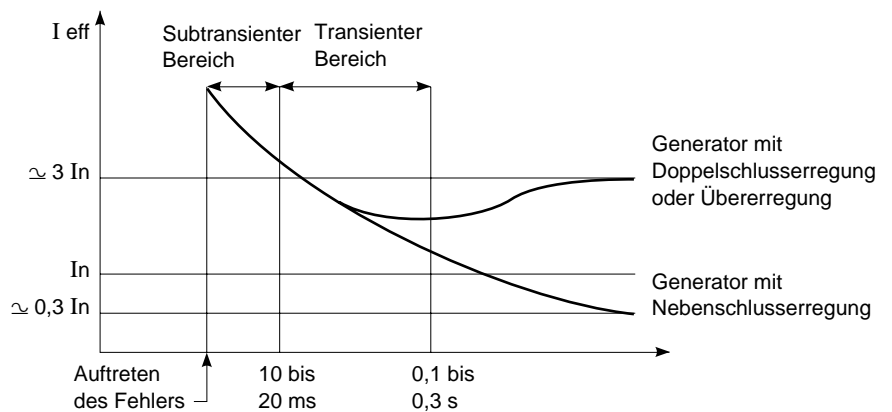


Abb. 17: Auftreten eines Kurzschlussstroms in einem von einem Dieselnotstromaggregat gespeisten Netz.

## 4. Einflüsse der MS auf die NS in Funktion des Erdungsschemas

NS-Netze stehen, ausser wenn sie von einer unterbrechungsfreien Ersatzstromversorgung oder von einem NS/NS-Transformator gespeist werden, unter dem Einfluss der MS.

Dieser Einfluss erfolgt:

- durch kapazitive Kopplung: Übertragung von Überspannungen von den MS-Wicklungen auf die NS-Wicklungen

- durch galvanische Kopplung bei einem Überschlag zwischen den MS-Wicklungen und den NS-Wicklungen

- über die gemeinsame Impedanz, wenn die verschiedenen Erder miteinander verbunden sind und ein von der MS herrührender Strom gegen Erde fliesst.

Er bewirkt auf der NS-Seite Störungen, vor allem Überspannungen, deren Ursache die folgenden Vorgänge auf der MS-Seite sind:

- Blitzschlag
- Schaltüberspannungen
- Transformatorinterner Überschlag zwischen MS und Transformator-Körper
- Transformatorinterner Überschlag zwischen MS und NS

Die häufigste Folge ist eine Zerstörung der NS-Isolationen, wodurch die Gefahr der Elektrisierung von Personen und der Zerstörung von Betriebsmitteln entsteht.

### Blitzschlag

Wenn das MS-Netz ein Freileitungsnetz ist, installiert das Elektrizitätsversorgungsunternehmen, um die Auswirkungen eines direkten oder indirekten Blitzschlages zu begrenzen, ZnO-Überspannungsableiter.

Diese Überspannungsableiter werden am letzten Mast vor der MS/NS-Station angeordnet. Sie begrenzen die Überspannung und leiten den Blitzstrom gegen Erde ab (siehe Technische Hefte Nr. 151 und 168).

Es wird jedoch durch kapazitive Kopplung eine Blitzwelle von den Transformatorwicklungen auf die aktiven Leiter auf der NS-Seite übertragen. Diese kann einen Spitzenwert von 10 kV erreichen.

Obwohl sie von den Streukapazitäten des Netzes gegen Erde nach und nach gedämpft wird, ist es üblich, an der Einspeisestelle des Netzes unabhängig vom Erdungsschema ZnO-Überspannungsableiter anzuordnen (siehe Abb. 18).

Ebenso ist es angebracht, um eine Kopplung über die gemeinsame Impedanz zu vermeiden, in keinem Fall

- MS-Überspannungsableiter,
- Blitzableiter auf dem Dach von Gebäuden

an den Erder des NS-Sternpunktes anzuschliessen.

Der Blitzstrom würde einen Anstieg des Potentials des Schutzleiters PE und/oder des NS-Neutralleiters (Gefahr eines Durchschlages) und den Verlust der Wirksamkeit des Erders (Versinterung) bewirken.

### Schaltüberspannungen

Gewisse MS-Apparate (zum Beispiel Vakuum-Leistungsschalter) bewirken beim Schalten hohe Überspannungen (siehe Technische Heft Nr. 143).

Im Gegensatz zum Blitzschlag, der eine äussere Störung (zwischen Netz und Erde) ist, sind diese Überspannungen in der NS innere Störungen. Sie werden durch kapazitive und magnetische Kopplung auf das NS-Netz übertragen.

Wie alle inneren Erscheinungen haben die Schaltüberspannungen nichts oder nur wenig mit den einzelnen Erdungsschemas zu tun.

### Transformatorinterner Überschlag zwischen MS und Transformator-Masse

Bei einem transformatorinternen Überschlag zwischen MS und Transformator-Masse und wenn die Transformator-Masse und der Sternpunkt der NS-Anlage an denselben Erder angeschlossen sind, kann ein MS-"Nullstrom" (dessen Stärke vom MS-Erdungsschema abhängt) die Masse des Transformators und den Sternpunkt der NS-Anlage auf ein gefährliches Potential bringen.

Der Widerstand des Transformator-Erders bestimmt direkt die Berührungsspannung  $U_t = R_p \cdot I_{hMS}$  in der Station sowie die Stehspannung  $U_{tp} = R_p \cdot I_{hMS}$  der NS-Betriebsmittel in der Station (wenn die Erdung des NS-Sternpunktes von derjenigen der Station getrennt ist).

Der Erder der Station und derjenige des NS-Sternpunktes sind normalerweise nicht miteinander verbunden. Wenn sie miteinander verbunden sind, ist dem Widerstand des gemeinsamen Erders ein Grenzwert gesetzt, um den

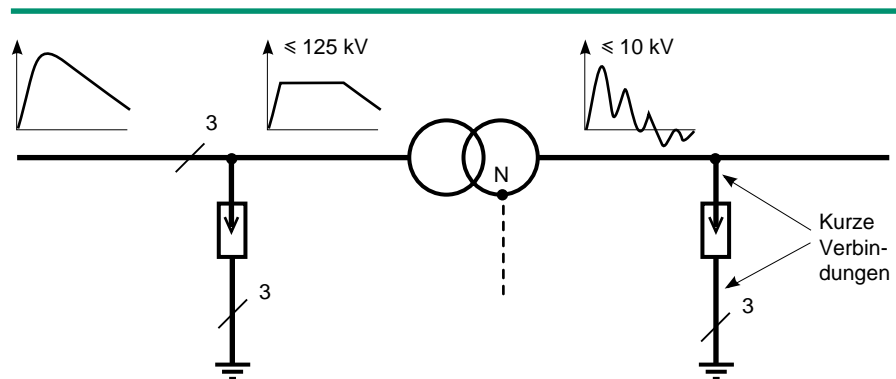


Abb. 18: Begrenzung und Übertragung von Blitzüberspannungen (unabhängig davon, ob der Sternpunkt N geerdet ist oder nicht, treten in den Phasenleitern äussere Überspannungen auf).

Potentialanstieg des NS-Netzes gegen Erde zu verhindern. Die Abbildung 19 nennt die Widerstände des gemeinsamen Erders für die Werte von  $I_{hMS}$  der französischen Netze der öffentlichen Stromversorgung. Der interessierte Leser kann in der Norm IEC 384-4-442 die Gefahren in Abhängigkeit vom NS-Erdungsschema nachlesen.

Die in den Netzen der öffentlichen Stromversorgung (ausser in Australien und in den USA, wo der Fehlerstrom sehr hoch sein kann) angetroffenen Werte gehen von 10 A in Irland (eine Impedanz kompensiert den kapazitiven Strom) bis 1 000 A in Frankreich (Kabelnetze) und in Grossbritannien. Industrielle MS-Netze werden normalerweise im Schema IT mit über eine Impedanz geerdetem Sternpunkt betrieben. Sie haben einen Nullstrom  $I_{hMS}$  von einigen zehn Ampere (siehe Technisches Heft Nr. 62). Der maximal zulässige Widerstand des Erders hängt von den Potentialausgleichsbedingungen der Masse des NS-Netzes ab, d.h. von seinem Erdungsschema.

### Transformatorinterner Überschlag zwischen MS und NS

Um zu verhindern, dass bei einem transformatorinternen Überschlag zwischen MS und NS das Potential gegenüber Erde des NS-Netzes auf dasjenige der Phasenspannung des MS-Netzes ansteigt, muss das NS-Netz geerdet werden.

Ein solcher Fehler hat die folgenden Folgen:

#### ■ Schema TN

Das gesamte NS-Netz einschliesslich des Schutzleiters PE wird der Spannung  $I_{hMS} \cdot R_{PAB}$  oder  $R_{AB}$  unterworfen. Wenn diese Überspannung die Stehspannung des NS-Netzes übersteigt (die in der Regel 1 500 V beträgt), sind auf der NS-Seite Überschläge möglich, wenn der Potentialausgleich aller elektrischen oder nichtelektrischen Körper in einem Gebäude unvollständig ist.

#### ■ Schema TT

Wenn sich die Körper der Verbraucher auf Erdpotential befinden, wird das gesamte NS-Netz der Spannung  $I_{hMS} \cdot R_{PB}$  oder  $R_B$  unterworfen. Es besteht

die Gefahr eines Durchschlags der Verbraucher, wenn die in  $R_{PB}$  oder  $R_B$  auftretende Spannung ihre Stehspannung übersteigt.

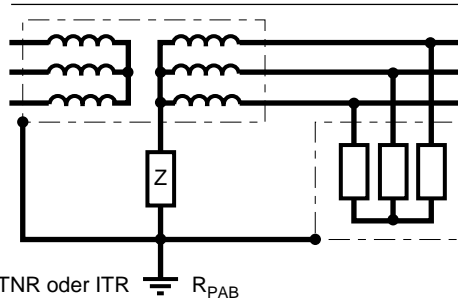
#### ■ Schema IT

Das Ansprechen eines Überspannungsableiters, der kurzschliesst, sobald seine

Ansprechspannung erreicht ist, führt das Problem auf dasjenige eines TN-Netzes zurück (oder eines TT-Netzes, wenn mehrere Erder der Anwendungen vorhanden sind).

In allen Fällen bewirken MS/NS-Überschläge unter Umständen starke

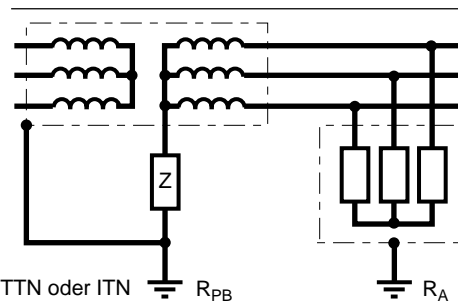
#### Schema (1)



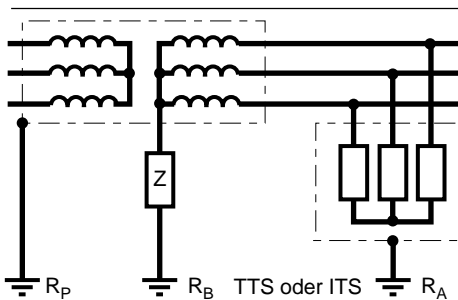
#### Maximaler Widerstand $R_P$ (W) des Erders der Körper der Station $R_P$ ( $\Omega$ )

Kein vorgeschriebene Wert, mit den nachstehenden Werten kann jedoch ein Potentialanstieg des Ganzen verhindert werden

$I_{hMT}$ (A)	$R_{PAB}$ ( $\Omega$ )
300	3 à 20
1 000	1 à 10



$I_{hMT}$ (A)	$R_{PB}$ ( $\Omega$ )
300	3
1 000	1



Utp (kV)	2	4	10
$I_{hMT}$ (A)	$R_P$ ( $\Omega$ )		
300	4	8	20
1 000	1	3	10

Z: Direkte Verbindung bei den Schemas TN und TT

Verbindung über Impedanz oder isoliert beim Schema IT mit Überspannungsableiter  
 $I_m$ : Maximaler Stromwert beim ersten einfachen Erdschluss des die Station speisenden Hochspannungsnetzes

Utp: Stehwechselfspannung der Niederspannungs-Betriebsmittel der Station

(1) Der dritte Buchstabe der Erdungsschemas bedeutet nach NF C 13-100:

■ Alle Körper sind miteinander verbunden: R

■ Der Körper der Station ist mit der Erde des Sternpunktes verbunden: N

■ Die Erder sind separat: S

Abb. 19: Maximaler Widerstand des Erders der Körper der Station in Funktion des Erdungsschemas des Netzes.

Belastungen der NS-Anlage und der Verbraucher, wenn der Widerstand des Erders des NS-Sternpunktes nicht beherrscht wird. Der interessierte Leser kann in der Norm IEC 364 die Gefahren in Abhängigkeit vom Erdungsschema nachlesen.

Das Beispiel der öffentliche Stromversorgung über Freileitung in Frankreich zeigt eine Lösung für eine Situation, in der die Gefahren von Blitzschlägen, Schaltüberspannungen und Überschlä-

gen zwischen der MS und dem Körper der MS/NS-Transformatoren vorhanden sind (siehe Abb. 20). Es zeigt, dass der Potentialausgleich der gesamten Verteilung (alle MS-Körper und die Sternpunkte und die Körper der Anwendungen miteinander verbunden) nicht unerlässlich ist, indem jede Gefahr separat behandelt wird. In diesem Kapitel ist der Einfluss des MS-Netzes beschrieben worden, woraus sich ergibt:

- dass es von Vorteil ist, unabhängig vom Erdungsschema auf der Einspeisungsseite der NS-Anlage Überspannungsableiter anzuordnen, wenn die MS- und insbesondere die NS-Einspeisung über eine Freileitung erfolgt,
- dass die Verbindung des Erders der Station mit dem Erder des NS-Sternpunktes oder sogar mit den Erden der Masse des Verbrauchers variable Belastungen des NS-Netzes in Funktion des MS-Erdungsschemas (Wert von  $I_h$ ) bewirkt.

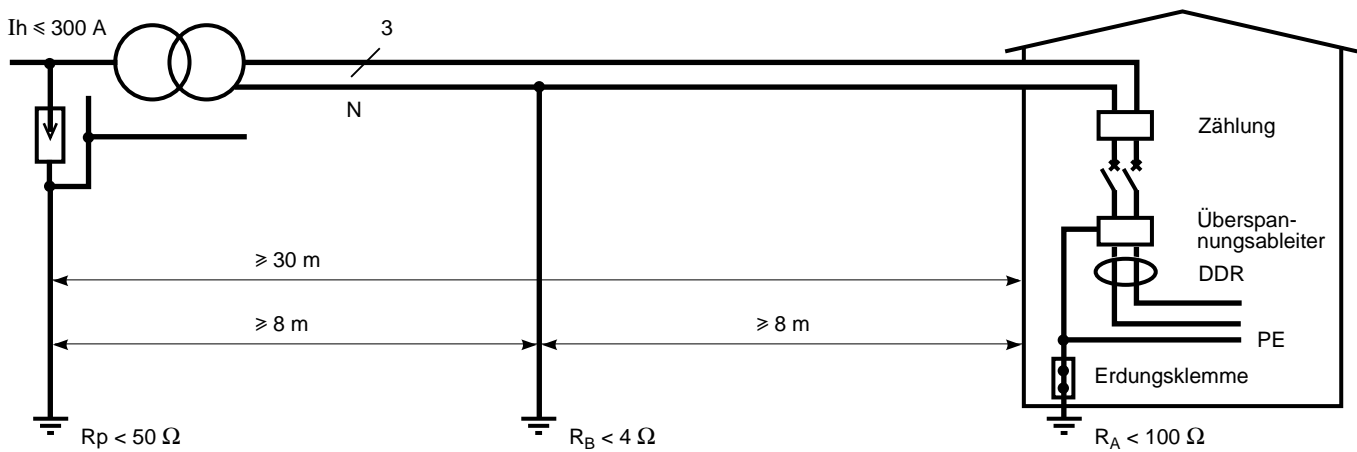


Abb. 20: Ländliche öffentliche Stromversorgung über Freileitung in Frankreich.

## 5. Mit der Wahl des Erdungsschemas verbundene Geräte

Die Wahl des Erdungsschemas wirkt sich in bezug auf die Sicherheit (im weiteren Sinn) aus, jedoch auch in bezug auf die Anlage, insbesondere, was die einzusetzenden Geräte anbetrifft.

### Erdungsschema TN, "Nullung"

Bei diesem Schema sind es die Kurzschluss-Schutzeinrichtungen (Leistungsschalter oder Sicherungen), die in der Regel den Schutz gegen Isolationsfehler mit einer automatischen Abschaltung nach einer vorgeschriebenen maximalen Abschaltzeit sicherstellen (die von der Phasenspannung  $U_0$  abhängt: siehe Abb. 9).

#### ■ Leistungsschalter

Sobald der Fehlerstrom den Auslösestrom des (in der Regel unverzögerten) Kurzschlussauslösers übersteigt, öffnet der Schalter in einer wesentlich kürzeren Zeit als die maximal zulässige Abschaltzeit, zum Beispiel 5 s für Verteilerkreise (Absatz 413-1-34 der Norm) oder 0,4 s für Verbraucherkreise (siehe Abb. 21).

Wenn die Impedanz der Quelle und der Kabel hoch ist, müssen Auslöser mit niedrigem Ansprechwert verwendet oder die Kurzschluss-Schutzeinrichtungen mit Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen verbunden werden. Diese

Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen können separate Fehlerstromrelais oder mit den Leistungsschaltern verbundene Fehlerstromauslöser mit niedriger Empfindlichkeit sein. Ihr Auslösestrom muss die folgende Bedingung erfüllen:

$$I_{\Delta n} < \frac{0,8 U_0}{R_{ph} + R_{PE}}$$

Die Verwendung von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen hat den Vorteil, dass sie eine Überprüfung der Schleifenimpedanz erübrigt, was von besonderem Vorteil ist, wenn die Anlage abgeändert oder erweitert wird. Diese letztere Lösung lässt sich natürlich nicht auf das Erdungsschema TN-C anwenden (da der Schutzleiter mit dem Neutraleiter kombiniert ist).

#### ■ Sicherungen

Die für den Kurzschlusschutz verwendeten Sicherungen sind vom Typ gG und ihre Zeit/Strom-Kennwerte (siehe Abb. 22) sind in den Normen festgelegt (Haushaltsicherungen: IEC 241, Industriesicherungen: IEC 269). Eine Überprüfung der Übereinstimmung mit maximal vorgeschriebenen Abschaltzeit bedingt somit eine individuelle Bewertung der für jeden Schutzfall vorgesehenen Nenngrösse. Wenn keine Übereinstimmung vorhanden ist, muss entweder die Impedanz der Fehlerschleife reduziert (Vergrößerung der Querschnitte) oder

die Sicherung durch einen Leistungsschalter mit niedrigem Ansprechwert oder mit Fehlerstromauslöser ersetzt werden.

### Erdungsschema TT, "Schutzerdung"

Bei diesem Schema gestatten es die niedrigen Werte der Fehlerströme (siehe vorhergehendes Kapitel) den Kurzschluss-Schutzeinrichtungen nicht, den Personenschutz bei indirektem Berühren zu gewährleisten. Es müssen Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (siehe Abb. 23) in Verbindung mit Leistungsschaltern oder Lasttrennschaltern angewendet werden (siehe IEC 364, Abschnitt 413.1.4.2).

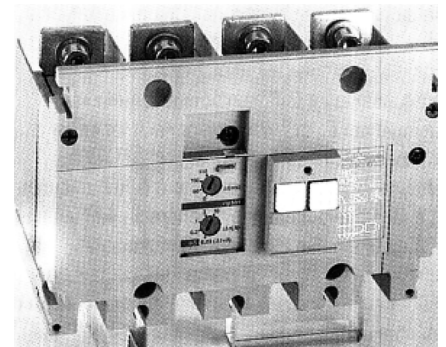


Abb. 23: Vigi-Block des Compact NS.

	Auslöser-Typ	Auslösestrom
Haushalt (EN 60898)	B	$3 I_n \leq I_a \leq 5 I_n$
	C	$5 I_n \leq I_a \leq 10 I_n$
	D	$10 I_n \leq I_a \leq 20 I_n$
Industrie (CEI 947-2)	G (niedriger Ansprechwert)	$2 I_n \leq I_a \leq 5 I_n$
	D	$5 I_n \leq I_a \leq 10 I_n$
	MA Für Motor-Starter	$6,3 I_n \leq I_a \leq 12,5 I_n$

Abb. 21: Auslösestrom (magnetisch oder kurzverzögert) der NS-Leistungsschalter.

$I_n$ gG (A)	$I_{min. 10 s}$	$I_{max. 5 s}$	$I_{min. 0,1 s}$	$I_{max. 0,1 s}$
63	160	320	450	820
80	215	425	610	110
100	290	580	820	1450

Abb. 22: Beispiel der Grenz-Ansprechwerte von Sicherungen (gemäss IEC 269, Abschnitt 5-6-3).

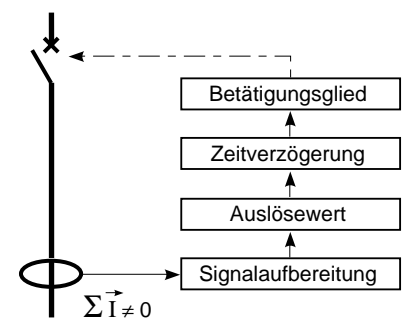


Abb. 24: Funktionsschema einer Fehlerstrom-Schutzeinrichtung.

Diese Einrichtungen müssen insbesondere den folgenden Normen entsprechen:

- IEC 755: Allgemeine Regeln
- IEC 1008: Lasttrennschalter mit Fehlerstromauslösung für Wohnhäuser
- IEC 1009: Kurzschlusschutzeinrichtungen mit Fehlerstromauslösung für Wohnhäuser
- IEC 947-1: Industrielle Leistungsschalter mit Fehlerstromauslösung  
Deren Anwendung muss die folgenden Anforderungen erfüllen:
- Personenschutz:
  - Auslösestrom  $I\Delta n \leq U_L/R_A$
  - Abschaltzeit  $\leq 1s$
- Kontinuität der Versorgung mit Auslösewerten und Zeitverzögerungen, die eine Strom- und Zeitselektivität gestatten
- Brandschutz mit  $I\Delta n \leq 500 \text{ mA}$ .

## Erdungsschema IT, "Isolierter Sternpunkt"

Bekanntlich wird bei einem Doppelfehler der Personenschutz durch die Kurzschlusschutzeinrichtungen sichergestellt. Beim ersten Isolationsfehler hat uns die Berechnung gezeigt, dass keine Gefahr besteht (Berührungsspannung wesentlich niedriger als die Sicherheitsspannung). Eine automatische Abschaltung ist deshalb nicht erforderlich. Dies ist der wesentliche Vorteil dieses Schemas. Zur Aufrechterhaltung dieses Vorteils empfehlen die Normen (IEC 364, Absatz 413.1.5.4) die Anordnung einer Isolationsüberwachungseinrichtung (CPI) und die Suche des ersten Fehlers, oder schreiben dies vor. Denn wenn ein zweiter Fehler auftritt, ist eine automatische Abschaltung unerlässlich, weil Elekrisierungsgefahr besteht. Dies ist die Aufgabe der Kurzschlusschutzeinrichtungen, eventuell vervollständigt durch Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen. Die Suche des ersten Fehlers, um ihn zu reparieren (Instandsetzung), wird durch ein Fehlerortungsgerät (DLD) wesentlich erleichtert. Eine vorbeugende Wartung aufgrund der Überwachung (Aufzeichnung) der Veränderungen der Isolationsimpedanzen der einzelnen Stromkreise ist ebenfalls möglich. Nach dem Schema IT betriebene NS-Netze, die ihren Anfang bei einem MS/

NS-Transformator nehmen, müssen mit Hilfe eines Überspannungsableiters gegen die Gefahren eines Isolationsfehlers zwischen der MS und der NS geschützt werden.

Schliesslich kann, um das Potential des NS-Netzes gegen Erde (von einem MS/NS-Transformator gespeistes kurzes Netz) festzulegen und die Gefahr einer Ferroresonanz zu verhindern, zwischen dem Sternpunkt des Transformators und der Erde eine Impedanz geschaltet werden. Ihr Wert bei 50 Hz von der Grössenordnung 1 500 W ist bei sehr niedrigen Frequenzen und bei Gleichstrom sehr hoch, um die Isolationsmessung sowie die Fehlersuche nicht zu beeinträchtigen.

■ Funktionsprinzip der Isolationsüberwachungseinrichtungen (CPI)  
Ein Fehler in einem Stromkreis zeigt sich im Netz durch eine Reduktion des Isolationswiderstandes, genauer gesagt des Widerstandes des Netzes gegen Erde.

Isolationsüberwachungseinrichtungen haben also die Aufgabe, diesen Isolationswiderstand zu überwachen. Sie arbeiten in der Regel nach dem Prinzip der Einspeisung eines Wechsel- oder Gleichstroms zwischen dem Netz und der Erde und der Messung seines Wertes (siehe Abb. 25).

Durch die Einspeisung eines Gleichstroms kann der Isolationswiderstand des Netzes dauernd überwacht werden. Wenn dieser unter einen bestimmten Wert sinkt, signalisiert die Isolationsüberwachungseinrichtung einen Fehler.

Durch die Einspeisung eines niederfrequenten Wechselstroms (Frequenz = einige Hz) kann der Fehlerwiderstand kontrolliert werden. Dies jedoch mit einer Verzerrung, die eine Folge der Streukapazitäten des Netzes sind. Dieser angesichts der niedrigen Frequenz unbedeutende Nachteil wird durch den Vorteil bei der Suche des ersten Fehlers aufgehoben (eine einzige Einspeiseeinrichtung).

Es gibt heute Geräte mit NF-Stromeinspeisung, die in der Lage sind den Isolationswiderstand und die Isolationsreaktanz des Netzes separat anzuzeigen. Mit diesen Geräten kann ferner, ohne einen Stromkreis zu öffnen und ohne Beeinträchtigung durch stark kapazitive Abgänge, der erste Fehler gesucht werden.

■ Funktionsprinzip der Fehlerortungsgeräte (DLD)

Die am häufigsten angewendete Lösung besteht darin, einen identifizierbaren Strom (mit einer vom Netz abweichenden Frequenz) einzuspeisen. Der Generator kann derjenige der Isolationsüberwachungseinrichtung (CPI) sein. Hierauf werden die Stromkreise mit magnetischen Gebern (Ringstromwandler und/oder Strommesszangen), die mit einem auf die Frequenz des eingespeisten Stromes abgestimmten Verstärker verbunden sind, abgesucht, bis die Fehlerstelle gefunden ist (siehe Abb. 26). Schliesslich wird noch eine weitere Lösung angewendet. Diese besteht darin, den Widerstandswert jedes Abgangs dauernd mit einem festen oder programmierbaren Grenzwert zu vergleichen. Letztere Lösung wird mit Informatik-Mitteln betrieben und gestattet gleichzeitig lokal und auf Distanz,

- den ersten Fehler zu signalisieren (CPI-Funktion),
- ihn hierauf zu orten (DLD-Funktion), um ihn zu reparieren (Instandsetzung) (siehe Abb. 27) und
- die zeitliche Entwicklung des Isolationswiderstandes für jeden Abgang zu kennen, um an den Abgängen etwas zu unternehmen,

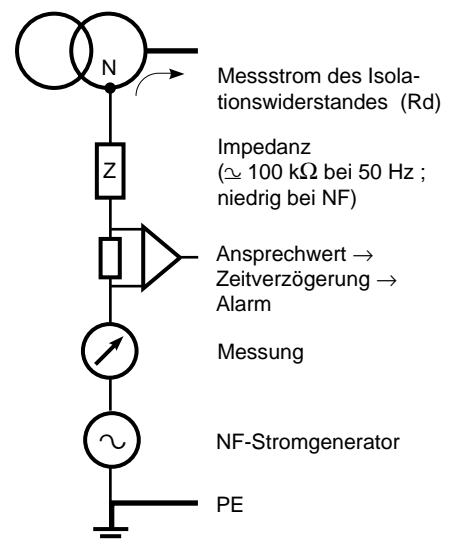


Abb. 25: Funktionsschema einer Isolationsüberwachungseinrichtung (CPI).

deren Isolationswiderstand abnormal abnimmt (vorbeugende Wartung).

■ **Überspannungsableiter**

Diese werden zwischen einen aktiven Leiter (Phasen- oder Neutralleiter) der Anlage und Erde geschaltet. Ihre Ansprechspannung  $U_e$  muss auf die vorgesehene Einbaustelle abgestimmt werden, weshalb für ein 230/400-V-Netz mit 50 Hz zwei Modelle zur Verfügung stehen:

□ 250 V für den Anschluss an den Neutralleiter ( $400\text{ V} < U_e \leq 750\text{ V}$ )

□ 400 V für den Anschluss an eine Phase ( $700\text{ V} < U_e \leq 1\ 100\text{ V}$ ).

Überspannungsableiter haben eine zweifache Aufgabe:

□ Begrenzung der Spannung im NS-Netz bei einem MS/NS-Überschlag im Verteiltransformator. In diesem Fall muss der Ableiter den Differenzstrom des MS-Netzes gegen Erde ableiten.  
 □ Begrenzung der Blitzüberspannungen.

Daraus ergeben sich z.B. für das 250-V-Modell die folgenden technischen Daten:

–  $U_n$ : 250 V

– Ansprechspannung bei 50 Hz: min. 400 V, max. 750 V

– Ansprechspannung bei einer Stosswelle der Form 1,2/50 ms:  $\hat{u} < 1\ 570\text{ V}$

–  $\hat{I}_{\text{Blitz}}$ : 20 x 2 500 A (Welle 8/20 ms), ohne sich in den Kurzschlusszustand zu versetzen

–  $\hat{I}_{50\text{ Hz}}$ : 20 000 A / 0,2 s  
 5 000 A / 5 s  
 1 200 A / 3 min

Dieses Verhalten beim Spitzenstrom  $\hat{I}_{50\text{ Hz}}$  ist wesentlich besser als der Wert des Differenzstroms des MS-Netzes. Es erklärt sich aus der Tatsache, dass ein Überspannungsableiter, der bei einer sehr hohen Überspannung "gezündet" hat, im Kurzschlusszustand bleiben kann. Er muss somit noch in der Lage sein, einen NS-Kurzschlussstrom als Folge eines ersten Isolationsfehlers des geschützten NS-Netzes auszuhalten. Die unter der Marke Merlin Gerin verkauften Überspannungsableiter können 40 kA/0,2 s aushalten.

## Schutz des Neutralleiters in Funktion des Erdungsschemas

Der Neutralleiter muss durch ein allpoliges Gerät abgeschaltet werden:

■ im Schema TT und TN, wenn der Querschnitt des Neutralleiters kleiner ist als der Querschnitt der Phasenleiter,  
 ■ in der Endverteilung angesichts der Gefahr einer Verwechslung Neutralleiter/Phasenleiter.

Der Neutralleiter muss geschützt und unterbrochen werden:

■ im Schema IT für das Eingreifen des Schutzes bei einem Doppelfehler, indem einer der Fehler sich am Neutralleiter befinden kann,

■ im Schema TT und TN-S, wenn der Querschnitt des Neutralleiters kleiner ist als der Querschnitt der Phasenleiter,  
 ■ unabhängig vom Erdungsschema, wenn die Anlage Oberwellenströme 3. Ordnung erzeugt (insbesondere, wenn der Querschnitt des Neutralleiters reduziert ist).

Im Schema TN-C darf der Neutralleiter, der zugleich der Schutzleiter PE ist, nicht unterbrochen werden, da dies wegen der Potentialschwankungen

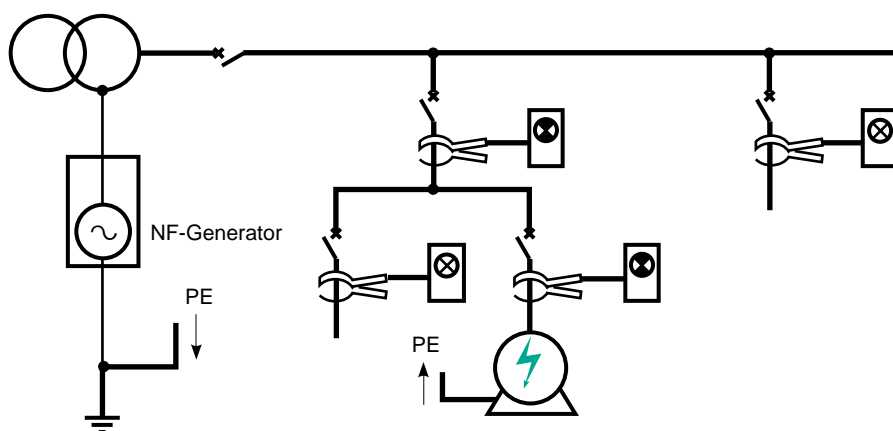
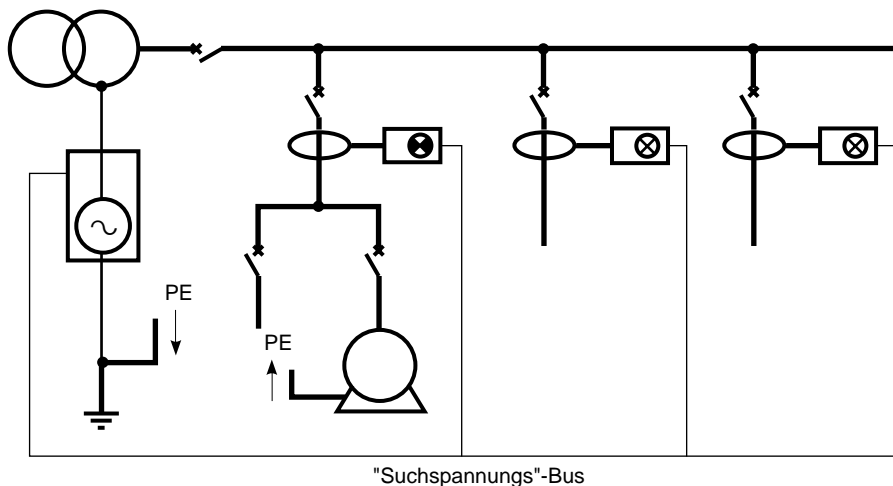
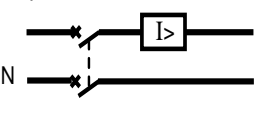
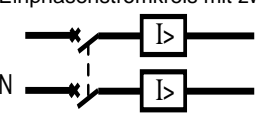
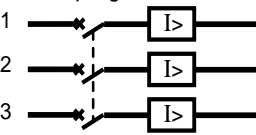
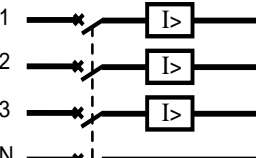
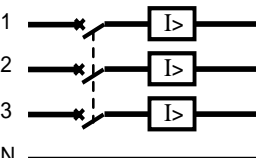
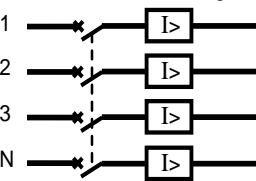


Abb. 26: Ortung des Isolationsfehlers durch Absuchen des Verlaufs eines am Kopf der Anlage eingespeisten niederfrequenten Stromes.



Der Durchgang des Suchstromes durch die Leiter wird mit magnetischen Gebern (Ringkernen) festgestellt. Jeder Empfänger, der mit einem selektiven (auf die Frequenz und Phase des Suchstromes abgestimmten) Verstärker ausgerüstet ist, berechnet den Widerstand und die Kapazität des Stromkreises (mit Hilfe der Spannung und Phase, deren Bezugswerte einem Bus entnommen werden) und signalisiert das Vorhandensein eines Fehlers.

Abb. 27: Funktionsprinzip eines Fehlerortungsgerätes mit NF-Impedanzmessung.

Stromkreis	Schema			
	TN-C	TN-S	TT	IT
<b>Einphasenstromkreis</b>				
Einphasenstromkreis mit einpoligem Schutz 	nein	ja	ja	nein
Einphasenstromkreis mit zweipoligem Schutz 	nein	ja	ja	ja
<b>Drehstromkreis ohne Neutralleiter</b>				
Mit zweipoligem Schutz 	ja	ja	ja	ja
<b>Drehstromkreis mit Neutralleiter</b>				
Ohne Überstromerfassung am Neutralleiter 	nein	ja	ja	nein
	ja	ja	ja	nein
Mit Überstromerfassung am Neutralleiter 	nein	ja	ja	ja

infolge der Lastströme und der Isolationsfehlerströme gefährlich ist. Um diese Risiken zu umgehen, muss für jeden Bereich/Abonnenten ein lokaler Potentialausgleich und ein Erder vorhanden sein. Die Abbildung 28 auf Seite 20 zeigt die je nach dem Erdungsschema einzusetzenden Leistungsschalter-Typen. Zu bemerken ist, dass für die Erdungsschemas TT und TN dieselben Geräte (mit zusätzlich einem Fehlerstromauslöser im Schema TT) verwendet werden können.

Abb. 28: Anwendung von Leistungsschaltern in Abhängigkeit vom Erdungsschema.

## 6. Wahl des Erdungsschemas und Schlussfolgerung

Die drei weltweit angewendeten und in IEC 364 normierten Erdungsschemas haben die **Sicherheit** als gemeinsames Ziel.

Hinsichtlich des Personenschutzes sind diese drei Erdungsschemas gleichwertig, wenn alle Installations- und Betriebsregeln eingehalten werden. In Anbetracht der Besonderheiten der einzelnen Schemas kann deshalb die Wahl nicht unbedenkenhaft getroffen werden.

Diese Wahl muss das Ergebnis einer Abstimmung zwischen dem Benutzer und dem Projektanten (Ingenieurbüro, Installateur usw.) des Netzes hinsichtlich der folgenden Punkte sein:

- Technische Daten der Anlage
  - Einzuhaltende Betriebsbedingungen
- Es ist illusorisch, ein Netz mit isoliertem Sternpunkt in einem Teil der Anlage betreiben zu wollen, die von Natur aus einen niedrigen Isolationspegel (einige tausend Ohm) hat, wie dies bei alten, ausgedehnten Anlagen mit Leitungen im Freien der Fall sein kann. Ebenso wäre es verfehlt, in einem Industriebetrieb, wo die Kontinuität der Versorgung oder der Produktion von ausschlaggebender Wichtigkeit und die Brandgefahr gross ist, die Nullung zu wählen.

### Methodik für die Wahl des Erdungsschemas

- Vor allem darf nicht vergessen werden, dass **die drei Erdungsschemas in derselben elektrischen Anlage koexistieren** können, was Gewähr dafür bietet, die beste Erfüllung

der Sicherheits- und Verfügbarkeitsbedürfnisse zu erhalten.

- Hierauf muss man sich vergewissern, ob **die Wahl nicht durch die Normen oder die Gesetzgebung** (Dekrete, Ministerialerlasse usw.) empfohlen oder vorgeschrieben ist.

■ Schliesslich muss mit dem Benutzer gesprochen werden, um seine Anforderungen und Mittel in Erfahrung zu bringen:

- Anforderungen an die Kontinuität der Versorgung
- Wartungsdienst oder nicht
- Brandgefahr

Alles in allem gilt:

- Kontinuität der Versorgung und Wartungsdienst: die Lösung ist IT.
- Kontinuität der Versorgung und kein Wartungsdienst: keine absolut befriedigende Lösung; TT vorziehen, da dort die Abschaltaktivität einfacher zu bewerkstelligen ist und Schäden im Vergleich zum TN minim gehalten werden.

Erweiterungen lassen sich einfach durchführen (keine Berechnungen).

- Kontinuität der Versorgung nicht unbedingt erforderlich und kompetenter Wartungsdienst: TN-S vorziehen (Reparaturen und Erweiterungen schnell und fachgerecht durchführbar).
- Kontinuität der Versorgung nicht unbedingt erforderlich und kein Wartungsdienst: TT vorziehen.
- Brandgefahr: IT, wenn Wartungsdienst vorhanden, und Anwendung vor Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen, oder TT.
- Besonderheiten des Netzes und der Verbraucher berücksichtigen:

- Verwendung von Ersatz- oder Notstromversorgungen: TT vorziehen
- Gegen hohe Fehlerströme empfindliche Verbraucher (Motoren): TT oder IT vorziehen.
- Verbraucher mit von Natur aus schwachem Isolationsniveau (Öfen) oder mit bedeutendem HF-Filter (Grosscomputer): TN-S vorziehen
- Speisung von Leittechnik-Systemen: IT vorziehen (Kontinuität der Versorgung), oder TT (besserer Potentialausgleich unter kommunikationsfähigen Geräten).

### Schlussfolgerung

Die beste Wahl mit einem einzigen Erdungsschema gibt es nicht, weshalb es **in vielen Fällen** angebracht ist, in derselben Anlage mehrere Erdungsschemas anzuwenden.

Ganz allgemein ist eine Anlage mit parallel geschalteten Abzweigen, wo die Prioritäten gut unterschieden und Notstromquellen oder unterbrechungsfreie Stromversorgungen angewendet werden, einer monolithischen Anlage mit Baumstruktur vorzuziehen. Da der Zweck des vorliegenden Technischen Heftes darin besteht, Ihre Kenntnisse der Erdungsschemas zu vervollkommen, hoffen wir, dass es Ihnen die Möglichkeit geben wird, die **Sicherheit** Ihrer Anlagen zu optimieren. Das Technische Heft Nr. 173, das über die Anwendung in den einzelnen Ländern und die Entwicklung der Erdungsschemas berichtet, enthält nützliche Zusatzinformationen.

## 7. Literaturverzeichnis

### Normen und Dekrete

- IEC 241: Schmelzsicherungen für Wohnhäuser und ähnliche Anwendungen.
- IEC 269: Niederspannungssicherungen.
- IEC 364: Elektrische Installationen in Gebäuden.
- IEC 479: Wirkungen des durch den menschlichen Körper fließenden Stroms.
- IEC 947-2: Niederspannungsschaltgeräte – 2. Teil: Leistungsschalter.
- IEC 755: Allgemeine Regeln für Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen.

### Technische Hefte

- Sternpunktterdung in einem industriellen HS-Netz, Technisches Heft Nr. 62 – F. Sautriau
- Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen, Technisches Heft Nr. 114 – R. Calvas
- Elektrische Störungen in der NS, Technisches Heft Nr. 141 – R. Calvas
- SF6-Leistungsschalter Fluarc und MS-Motorschutz, Technisches Heft Nr. 143 – J. Hennebert und D. Gibbs
- Einführung in das Sicherheitskonzept, Technisches Heft Nr. 144 – P. Bonnefoi

- Überspannungen und Isolationskoordination, Technisches Heft Nr. 151 – D. Fulchiron
- Blitz und elektrische Hochspannungsanlagen, Technisches Heft Nr. 168 – B. De Metz Noblat
- Die Erdungsschemas auf der ganzen Welt und deren Entwicklung, Technisches Heft Nr. 173 – B. Lacroix und R. Calvas
- Kenntnis und Anwendung des Erdungsschemas mit isoliertem Sternpunkt, Technisches Heft Nr. 173 – B. Lacroix und R. Calvas

### Diverse Veröffentlichungen

- Richtlinien für elektrische Installationen (Teil G) Ed. FRANCE IMPRESSION CONSEIL 1991
- Leitfaden der Elektrotechnik Ed. ELECTRA 1986
- Electrical Review November 1991 – Oktober 1992
- Der Fehlerstromschutz Technisches Heft J3E – 02/90

**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