



Isolationsfehlerschutz – Voraussetzung für den Brandschutz in elektrischen Anlagen

Der Beitrag in Heft 2/99 behandelte die Brandgefahren, Brandursachen sowie die Vorgänge an einer Isolationsfehlerstelle. Die folgenden Ausführungen erläutern die Verhältnisse, wie sie sich im Allgemeinen in fehlerfreien elektrischen Anlagen und im Fehlerfall darstellen und erklären, welche Maßnahmen zum Schutz bei Isolationsfehlern angewendet werden können.

gen Erdpotential und 120 k Ω zwischen den Außenleitern bei einer Netzspannung von 230/400 Volt. Daraus ergibt sich ein maximaler Ableitstrom von 3,3 mA und eine maximale Fehlerleistung von 1,33 W.

Werden bei Anlagenüberprüfungen geringere Isolationswiderstände gemessen, muss die Prüfung bei abgeklemmten elektrischen Verbrauchern durchgeführt werden. Der Isolationswiderstand der Elektroinstallation darf dann 1000 Ω je Volt nicht unterschreiten. Dies entspricht einem Isolationswiderstand von 230 k Ω gegen Erdpotential und 400 k Ω zwischen den Außenleitern bei einer Netzspannung von 230/400 Volt. Bei einer Netzspannung von 230 Volt entsteht eine Verlustleistung von 0,23 W und bei 400 Volt Netzspannung stellt sich eine Verlustleistung von 0,4 W ein. Es fließt dann ein maximaler Ableitstrom von 1 mA. Dieser Wert entspricht also den Vorgaben für neu errichtete Installationen.

Für besondere Anlagen, z.B. in IT-Systemen, werden aus Gründen höherer Verfügbarkeit der elektrischen Anlagen noch geringere Isolationswiderstände zugestanden. Diese verursachen eine maximale Verlustleistung von 14 W, was einem Ableitstrom von etwa 35 mA entspricht. Auch bei diesen relativ großen Ableitströmen, die über die Isolierungen der Außenleiter im System fließen können, ist eine Brandgefahr noch nicht gegeben. Aber nur, wenn die vorgeschriebenen Mindestwiderstandswerte eingehalten werden, ergibt die zugrunde liegende Sicherheitsphilosophie einen Sinn. Nach DIN VDE 0105 sind dann auch wiederkehrende Anlagenüberprüfungen vorgeschrieben. Hierbei erlangt die Isolationswiderstandsmessung eine besondere Bedeutung, um dem Personen- und Sachschutz gerecht zu werden.

Leider ist bereits seit Jahren festzustellen, dass Isolationswiderstandsmessungen immer weniger durchgeführt werden. Vielfältige Gründe hierfür können angeführt werden. Hauptgrund ist die Tatsache, dass in vielen Fällen die Abschaltung

Elektrische Anlagen

1. Die fehlerfreie elektrische Anlage

Nach der Norm DIN VDE 0100, in der die Anforderungen für die Errichtung elektrischer Anlagen bis 1000 VAC gestellt werden, gelten für neu errichtete, jedoch noch nicht in Betrieb genommene elektrische Anlagen Isolationswiderstände, die einen maximalen Ableitstrom von weniger als 1 mA zulassen. Für netzspannungsbetriebene elektrische Anlagen bedeutet dies, dass die Verlustleistung über die Isolierung etwa 0,4 W beträgt. Bei dieser Leistung ist ein Brand nicht möglich.

Nach DIN VDE 0105 werden für elektrische Anlagen, die bereits in Betrieb gegangen sind, Werte für den Isolationswiderstand festgelegt, die kleiner sind als nach den Errichtungsbestimmungen DIN VDE 0100. Damit wird insbesondere den Einflüssen auf elektrische Geräte während des Betriebes Rechnung getragen. Die Werte müssen zwangsläufig niedriger angesetzt werden, da sich Fremdeinflüsse wie Feuchte, Staub und andere Stoffe auf den Isolierstrecken absetzen und ihre Leitfähigkeit mindern. Aber auch bei Einhaltung dieser Mindestwiderstände kann davon ausgegangen werden, dass die Brandsicherheit in elektrischen Anlagen gewährleistet ist.

In Stromkreisen mit angeschlossenen und eingeschalteten Verbrauchsmitteln ist ein Isolationswiderstand von 300 Ω je Volt Nennspannung zulässig. Dies entspricht einem Widerstand von 70 k Ω ge-

der elektrischen Anlage aus betrieblichen Gründen nicht gewollt ist. Dies ist aber Voraussetzung für die Durchführung einer Isolationswiderstandsmessung.

Es stellt sich die Frage nach Alternativen. Mit der Vereinbarung der Sicherheitsvorschriften für Starkstromanlagen bis 1000 Volt, VdS 2046, hat der Versicherer die Möglichkeit, diesen Praxismangel auszugleichen. Danach darf auf die Isolationswiderstandsmessung verzichtet werden, wenn der Schutz bei Isolationsfehlern durch Abschaltung mittels Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen gewährleistet wird. Als weitere Möglichkeit zur Realisierung des Schutzes dürfen auch von der Netzspannung unabhängige Differenzstrom-Meldegeräte (RCM) eingesetzt werden. Dies gilt nur dann, wenn garantiert wird, dass die Anzeige eines Isolationsfehlers wahrgenommen werden kann, z. B. an besetzter Stelle und der Fehler schnellstens behoben wird.

Bei der Messung nach DIN VDE 0100-610 oder DIN VDE 0105, die bekanntlich mit Gleichstrom durchgeführt wird, wird der Widerstand der Isolierung ermittelt. Dieser Widerstand besteht bei fehlerfreien Kabeln und Leitungen aus vielen, kleinen, parallelen, etwa gleichgroßen Einzelwiderständen. Der Widerstand des Leiters selbst und die Leitungsinduktivitäten

können in der Regel vernachlässigt werden, da sie im Vergleich zum Isolationswiderstand sehr gering sind. Der durch C_{abl} verursachte kapazitive Ableitstrom ist ebenfalls brandungefährlich. Auch wenn der Gesamtbetrag der kapazitiven Ableitströme mit zunehmender Leitungslänge größer wird, sind jedoch entlang der Leitung nur die einzelnen Teilbeträge wirksam. Sie sind so gering, dass von ihnen keine brandgefährliche Wirkung ausgeht.

Die Erfahrung zeigt, dass bei Überschreitung der nach Norm festgelegten zulässigen Mindestwerte für den Isolationswiderstand R ein gefährlicher Isolationsfehler vorliegen muss, da eine „gesunde“ Leitung/Kabel einen um mehrere Zehnerpotenzen größeren Isolationswiderstand aufweist.

2. Die fehlerbehaftete elektrische Anlage

Hinsichtlich der Problematik „Isolationsfehler“ gilt eine elektrische Anlage als fehlerbehaftet, wenn die nach Norm vorgeschriebenen Mindestwerte für den

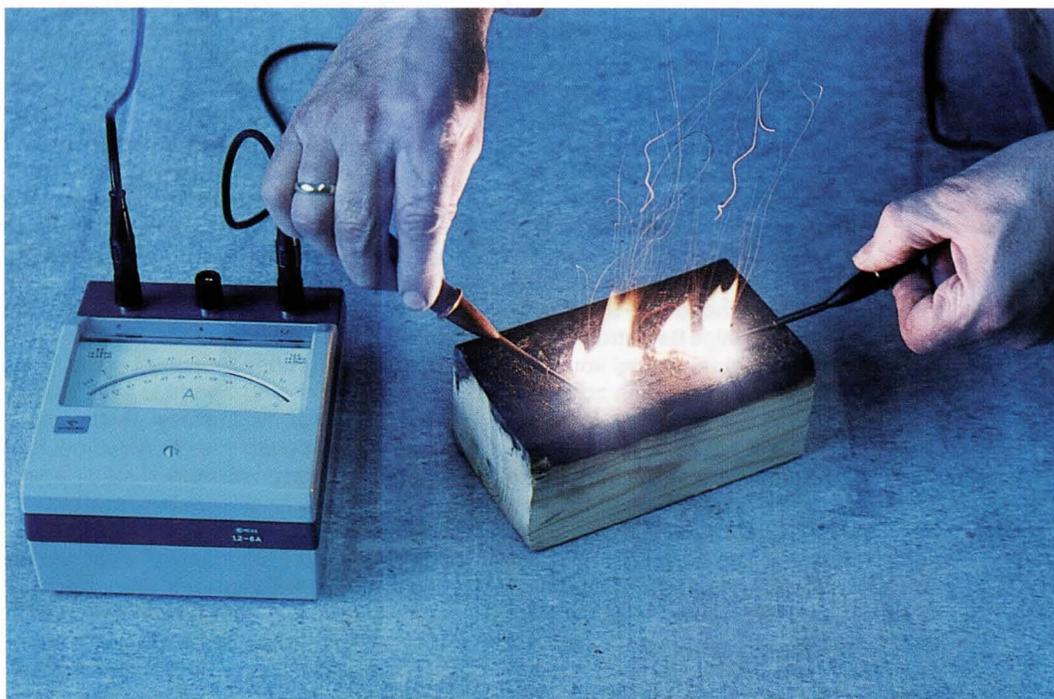


Bild 1: Ein Fehlerstrom von weniger als 200 mA führt zur unmittelbaren Entzündung von Fehlerstellen eines Isoliermaterials



Isolationswiderstand unterschritten werden. Für die Betrachtung des Brandschutzes sind zu unterscheiden der vollkommene (satte) Kurz- oder Erd-/Körperschluss und der unvollkommene, widerstandsbehaftete Kurz- oder Erd-/Körperschluss.

Der vollkommene (satte) Kurz- oder Erd-/Körperschluss

Es fließt ein Kurz- bzw. Erdschlussstrom, dessen Höhe von der Leistung der vorgeschalteten Stromquelle und der Impedanz der Fehlerschleife abhängt.

Der Widerstand an der Fehlerquelle kann bei einem vollkommenen Kurz- oder Erdschluss/Körperschluss quasi gleich Null gesetzt werden.

Überstrom-Schutzeinrichtungen (Sicherungen, Leitungsschutzschalter, Leistungsschalter) beherrschen solche Fehler. Diese Schutzeinrichtungen sprechen dann nach ihrer Auslösekennlinie im sogenannten Kurzschlussbereich an. Bei vorschriftsmäßiger Bemessung der Schutzeinrichtungen, Leiterquerschnitte und Leitungslängen erfolgt die Trennung des fehlerhaften Stromkreises vom Netz, bevor die Leiterisolierung und der Leiterwerkstoff unzulässig erwärmt werden. Vollkommene Kurz- und Erdschlüsse in vorschriftsmäßig errichteten elektrischen Anlagen kommen deshalb nicht als Brandursache infrage. Dies wird jedoch häufig in den Medien behauptet.

Der vollkommene Kurz- oder Erd-/Körperschluss ist brandschutztechnisch gesehen der „Idealfehler“. Er wird in der Schutzphilosophie nach den Sicherheitsregeln des VDE bis auf wenige Anwendungsfälle allgemein vorausgesetzt, was natürlich realitätsfremd ist. Zusätzliche Maßnahmen sollen die Wahrscheinlichkeit von impedanzbehafteten Fehlern möglichst gering halten. Diese sind beispielsweise ausreichende IP-Schutzgrade, um eine unzulässige Beeinträchtigung der elektrischen Betriebsmittel vor schädigenden äußeren Einflüssen zu schützen.

Der unvollkommene, widerstandsbehaftete Kurz- oder Erd-/Körperschluss

Bei diesem Fehlerfall können aufgrund des höheren Widerstandes an der Fehlerstelle Fehlerströme auftreten, die Überstrom-Schutzeinrichtungen zu spät oder gar nicht zum Auslösen bringen. Die dann möglichen, auf elektrische Isolierungen und andere brennbare Stoffe einwirken-

den Fehlerleistungen bedeuten Brandgefahr. Bereits Fehlerströme > 100 mA können Brände entzünden (**Bild 1**).

Leiterisolierungen und Leiterwerkstoff werden im Fehlerfall nur dann nicht unzulässig erwärmt, wenn die für den jeweiligen elektrischen Leiter vorgegebene Kurzzeit-Temperaturbelastung eingehalten wird. Bei PVC-isolierten Leitern darf bis 5 s eine maximale Temperatur von 160° C auftreten. Nur, wenn diese Bedingung erfüllt wird, kann davon ausgegangen werden, dass der Schutz der Klemm-, Löt- und sonstiger Verbindungen sowie der Leiterisolierung gegeben und deren Vorschädigung auszuschließen ist.

Nachfolgend soll deutlich gemacht werden, welche Fehlerleistungen Überstrom-Schutzeinrichtungen zulassen:

Überstrom-Schutzeinrichtungen funktionieren auf der Basis einer Zeit-Strom-Auslösekennlinie (**Bild 2**).

Die Auslösekennlinien von Leitungsschutzschaltern und Sicherungen sind unterschiedlich. Allen gemeinsam ist jedoch, dass sie im Auslösebereich mit zunehmender Stromstärke in immer kürzeren Zeitabständen auslösen. Der Auslösebereich beginnt erst bei einem Vielfachen ihres Bemessungsstromes (früher Nennstrom). Das bedeutet, dass Überstrom-Schutzeinrichtungen zwar Fehlerströme abschalten können, aber erst oberhalb ihres Bemessungsstromes.

Die üblicherweise zum Einsatz kommenden Überstrom-Schutzeinrichtungen dürfen erst auslösen, wenn sie von einem Strom größer dem des kleinen Prüfstromes durchflossen werden. Bis zum kleinen Prüfstrom darf die Schutzeinrichtung nicht auslösen. Beim Überschreiten des kleinen Prüfstromes darf die Auslösung nicht innerhalb einer Stunde erfolgen. Wird die Schutzeinrichtung von einem Strom durchflossen, der mindestens gleich dem großen Prüfstrom ist, muss die Schutzeinrichtung innerhalb einer Stunde auslösen. Für die Auslösekennlinien von Überstrom-Schutzeinrichtungen mit größeren Bemessungsströmen als 63 A sind noch längere Auslösezeiten zulässig.

Die Höhe der Prüfströme ist ebenfalls unterschiedlich. Bauart und Bemessungsstrom sind maßgebende Kriterien. Der kleine Prüfstrom von Leitungsschutzschutzeinrichtungen liegt in der Größenordnung von etwa dem 1,3-fachen Bemessungsstrom.

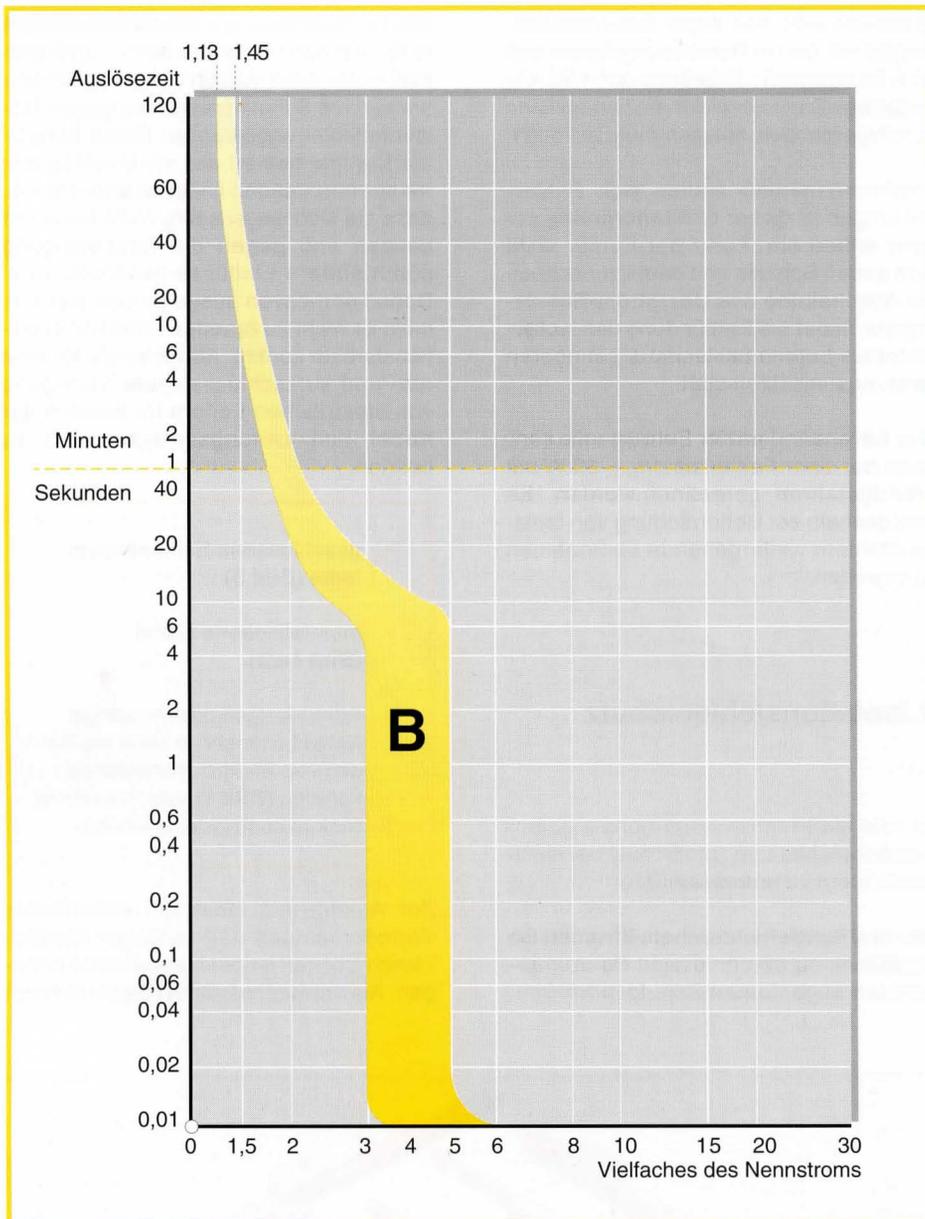


Bild 2: Auslösekennlinie von Leitungsschutzschaltern 16 A mit der Auslöse-Charakteristik B, wie sie üblicherweise für Licht- und Steckdosen-Stromkreise eingesetzt werden

Der große Prüfstrom beträgt bis zu einem Bemessungsstrom von 63 A das 1,45-fache des Bemessungsstromes der Schutzeinrichtung. Bei anderen – vor allem älteren Schutzeinrichtungen – kann der große Prüfstrom mehr als das Doppelte des Bemessungsstromes ausmachen. Für Schmelzsicherungen gelten ähnliche Werte.

Fließt über eine Fehlerstelle ein Strom in der Größenordnung des kleinen Prüfstromes, so kann bei Verwendung eines Leitungsschutzschalters LS 16 A (Auslösecharakteristik B) eine Fehlerleistung von $P = U \times 1,3 I_N = 230 \text{ V} \times 20,8 \text{ A} = 4784$

$W = 4,78 \text{ kW}$ dauernd wirksam werden. Bei derselben Schutzeinrichtung steht die elektrische Verlustleistung an der Fehlerstelle mindestens bis zu einer Stunde an, wenn der über die Fehlerstelle fließende Strom den Wert des großen Prüfstromes der Schutzeinrichtung annimmt ($1,45 \times I_N$). Die Verlustleistung beträgt dann $P = 5,34 \text{ kW}$. Dies sind größere elektrische Leistungen, als sie zum Betrieb vieler elektrischer Geräte benötigt werden.

Eine noch höhere Fehlerleistung ist möglich, wenn der Stromkreis mit älteren Überstrom-Schutzeinrichtungen, z.B. mit der Charakteristik L (Leitungsschutz)



geschützt wird. Für diese Schutz- einrichtungen mit einem Bemessungsstrom von 16 A ist der große Prüfstrom auf $1,75 \times I_N$ festgelegt. Die Verlustleistung beträgt dann in netzgespeisten Anlagen mehr als 6 kW.

Erfahrungsgemäß stellen sich Fehlerleistungen in dieser Größenordnung nur ganz selten ein. Führt der Fehler nicht zum satten Schluss und damit zur schnellen Abschaltung des Überstrom-Schutzorgans, findet die Entzündung des Isoliermaterials bereits bei weitaus geringeren Leistungsumsätzen statt.

Wie bereits im ersten Beitrag erläutert, muss bei einer Fehlerleistung ≥ 60 W mit Brandgefahren gerechnet werden. Es sind deshalb zur Beherrschung von Isolationsfehlern weitergehende Maßnahmen zu ergreifen.

3. Isolationsfehlerschutz

Es sind Maßnahmen zum Schutz gegen Isolationsfehler und zum Schutz bei Isolationsfehlern zu unterscheiden:

Erd- und kurzschluss-sichere Stromkreise
Zusätzlich zu den im ersten Beitrag genannten allgemeinen Schutzvorkehrun-

gen zur Minimierung von Isolationsfehlern wird insbesondere die kurz- und erdschluss-sichere Ausführung von Stromkreisen als Schutzmaßnahme gegen Isolationsfehler angewendet. Diese Schutzmaßnahme basiert auf der Überlegung, die stromführenden Leiter so anzuordnen, dass sie sich gegenseitig nicht berühren können und gegen die Beschädigung durch äußere Einflüsse geschützt sind. Dann kann davon ausgegangen werden, dass es nicht zu brandgefährlichen Isolationsfehlern kommt. Als Beispiele für eine erd- und kurzschluss-sichere Verlegung von elektrischen Leitern im Bereich der Kabel und Leitungsanlagen sind zu nennen:

- ▶ geschlossene Schienensysteme (**Bild 3**)
- ▶ mineralisolierte Kabel (**Bild 4a/b**)
- ▶ Aderleitungen oder einadrige Kabel/Leitungen in separate Zügen von Elektro-Installationskanälen (**Bild 5**) oder einzeln in Elektro-Installationsrohren.

Zur Ausführung innerhalb elektrischer Verteileranlagen und sonstiger Geräte-kombinationen ist der Hersteller zu befragen. Als Schwachstelle bei dieser Schutz-

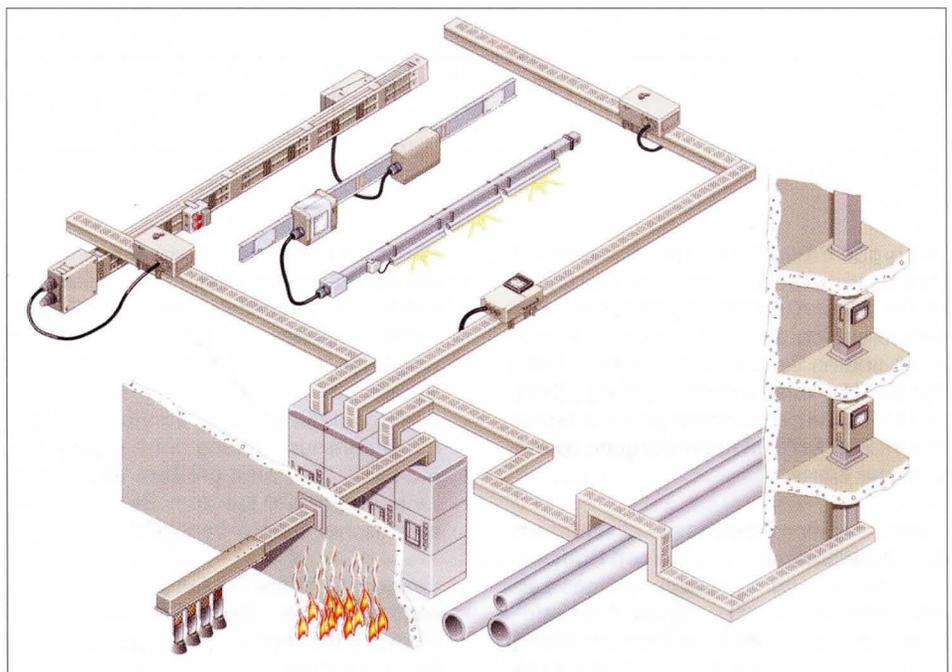


Bild 3: Erd- und kurzschluss-sichere Verlegung durch geschlossene Schienensysteme

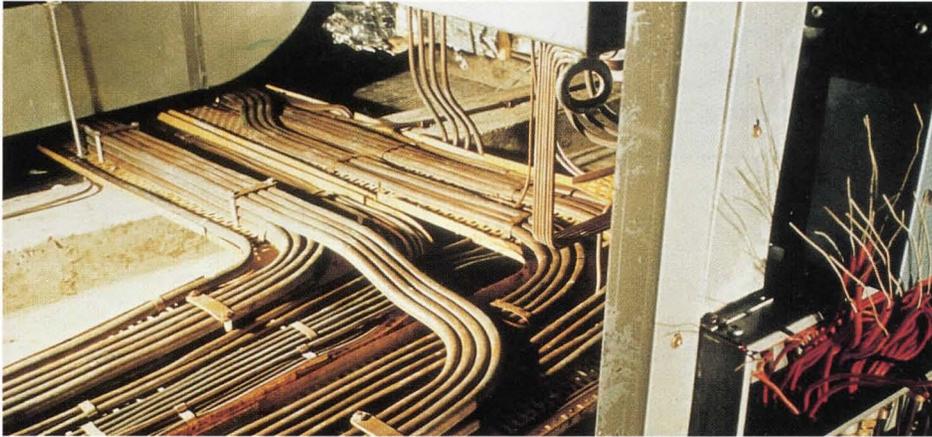
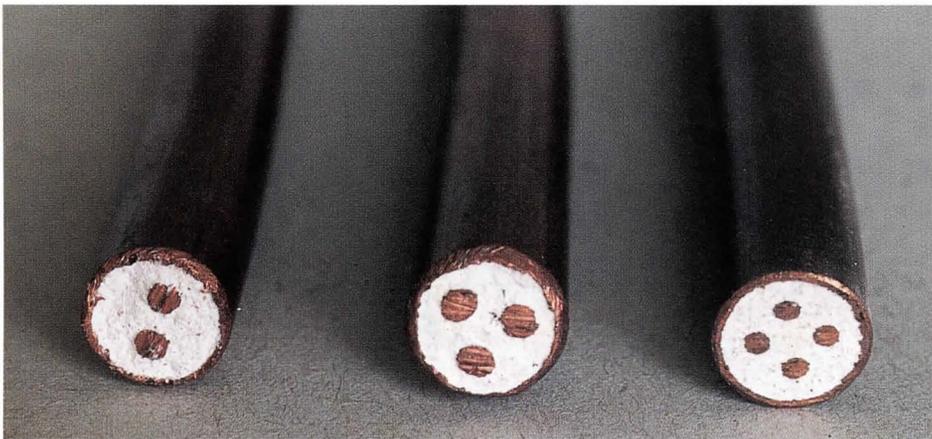


Bild 4a/b:
Mineralisierte
Kabel erfüllen die
Anforderungen
für eine erd- und
kurzschluss-
sichere Verlegung



maßnahme müssen die elektrischen Betriebsmittel selbst gesehen werden. Auch hier muss der Hersteller ggf. Lösungen anbieten.

Wenn die Kurz- oder Erdschlusssicherheit nicht durchgehend sichergestellt werden kann, sind lokal Isolationsfehler möglich. Es sollte deshalb, um den Schutz in diesen Bereichen zu gewährleisten, eine der im folgenden Abschnitt beschriebenen Maßnahmen zusätzlich vorgesehen werden, damit der Brandschutz lückenlos ist. Weiterhin sind auch die im Kurz- oder Erdschlussfall auftretenden, elektrodynamischen Kräfte zu beachten. Bei dieser Art der Kabel-/Leitungsverlegung (parallele Leitungsführung) ist weiterhin darauf zu achten, dass ggf. die elektromagnetische Verträglichkeit der elektrischen Anlage gewährleistet ist.

Die kurz- und erdschlusssichere Ausführung von Stromkreisen wird erfahrungsgemäß nur in bestimmten elektri-

schen Anlagen angewendet, z. B. wenn besondere Anforderungen an die Verfügbarkeit der elektrischen Anlage gestellt werden. In der Praxis sind vor allem Maßnahmen zum Schutz bei Isolationsfehlern durch Abschaltung oder Meldung anzutreffen, wie sie im folgenden Abschnitt erläutert werden.

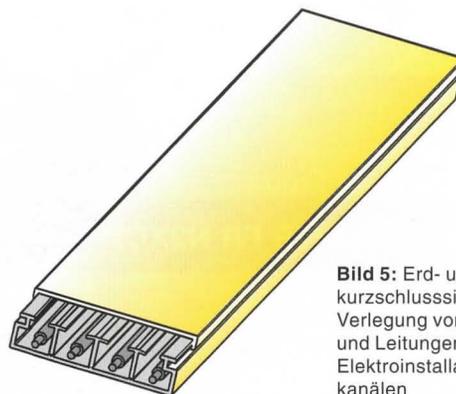
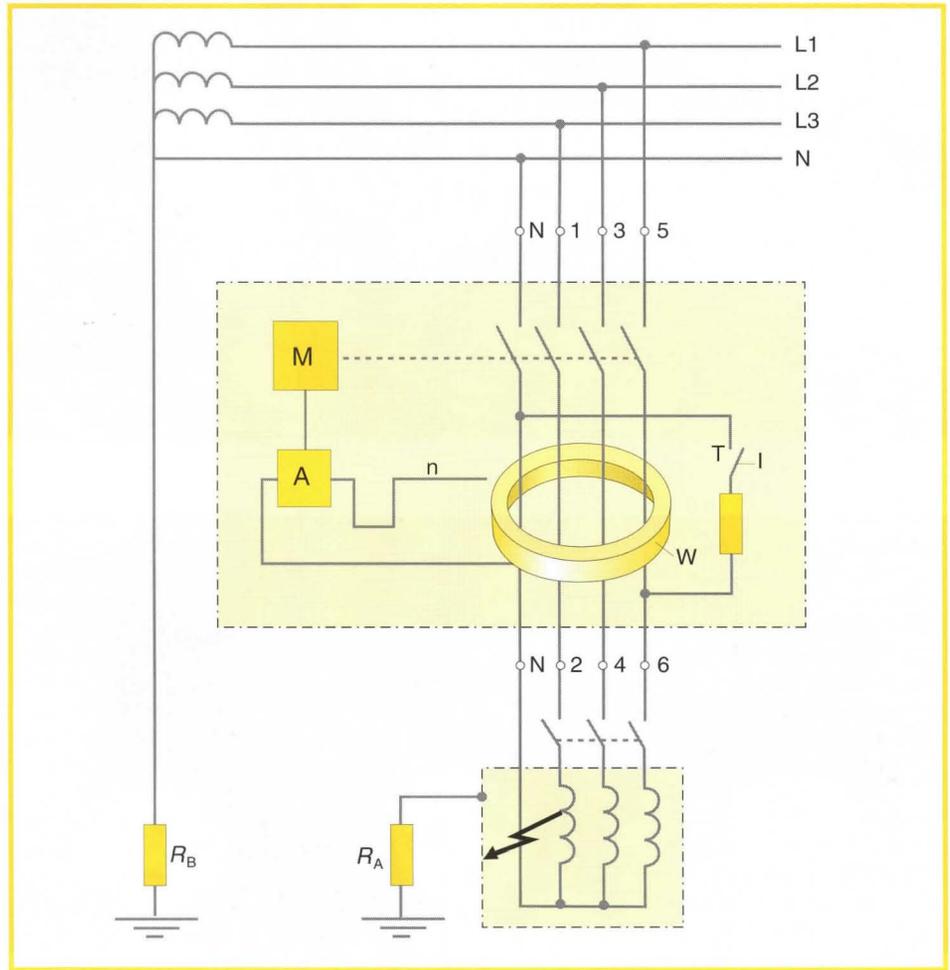


Bild 5: Erd- und kurzschluss-sichere Verlegung von Kabeln und Leitungen mittels Elektroinstallationskanälen



Bild 6:
Fehlerstromschutz-
einrichtung
im TT-System

A - Auslöser
M - Mechanik
W - Summenstromwandler
T - Prüfeinrichtung
n - Sekundärwicklung
 R_B - Erdungswiderstand
Betriebsende
 R_A - Erdungswiderstand
Verbraucher



10

Schutz bei Isolationsfehlern durch Abschaltung oder Meldung

Der Einsatz von Fehlerstrom-Schutz-
einrichtungen ist sicherlich die am meisten
verbreitete Maßnahme zum Schutz bei
Isolationsfehlern. Bei diesen Schutz-
einrichtungen wird die Technik genutzt, mit
der heute unter relativ geringen Kosten
ein Optimum an Brandsicherheit erreicht
werden kann (Bild 6). Fehlerstrom-

Schutz-
einrichtungen erkennen Erd- bzw.
Körperschluss-Fehlerströme und schal-
ten den fehlerhaften Stromkreis inner-
halb 40 ms ab. Fehlerströme, die auf-
grund von Kurzschlüssen zwischen den be-
triebsstromführenden Leitern, den Außen-
leitern entstehen, können Fehlerstrom-
Schutz-
einrichtungen unmittelbar nicht er-
fassen. Wird jedoch in den Stromkreisen
konsequent der Schutzleiter mitgeführt,

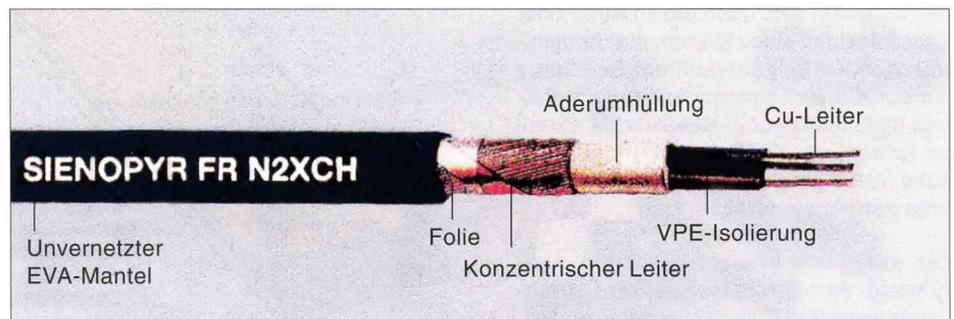


Bild 7: Kabel mit
konzentrischem Leiter

so ist es sehr wahrscheinlich, dass von Außenleitern herrührende brandgefährliche Fehlerströme durch Kontaktierung mit dem Schutzleiter zur Erde abfließen und dadurch von der Schutzeinrichtung abgeschaltet werden, bevor eine Brandausbreitung erfolgen kann.

Bei Einsatz von mehradrigen Kabeln oder Leitungen ist diese Forderung ohnehin erfüllt. Eine noch bessere Schutzwirkung bieten Kabel mit konzentrischem Leiter (**Bild 7**). Es kann davon ausgegangen werden, dass sich im Fehlerfall eine Entzündung der elektrischen Leiterisolation nicht zum Brand ausweiten kann. Zuvor wird der Fehlerstrom durch den konzentrischen Leiter über den angeschlossenen Schutzleiter zur Erde fließen und somit die Auslösung der Fehlerstrom-Schutzeinrichtung bewirken. Es sind Schutzeinrichtungen mit einem Bemessungsdifferenzstrom von $I_{\Delta N} \leq 300 \text{ mA}$ auszuwählen. In elektrischen Anlagen mit Heizleitungen oder Flächenheizelementen (Direktbeheizung) sind Schutzeinrichtungen mit einem Bemessungsdifferenzstrom $\leq 30 \text{ mA}$ vorzusehen, da in diesen Anlagen schon Fehlerströme $\leq 100 \text{ mA}$ zu Bränden führen können. Dies liegt in den verwendeten Materialien begründet. Eine brandschutztechnische Ertüchtigung der Heizmittel selbst ist aus Funktionsgründen nicht möglich. Der Brandschutz kann hier nur im Zusammenwirken mit externen Schutzgeräten erfüllt werden.

Der Fehlerstromschutz in TN-S-Systemen, früher auch „schnelle Nullung“ genannt, stellt nach den heutigen Er-

kenntnissen ein Optimum an Sicherheit dar (**Bild 8**). Mit dieser Schaltung wird nicht nur der Brandschutz, sondern auch die notwendige Grundlage für eine EMV-gerechte Elektro-Installation geschaffen (EMV = Elektromagnetische Verträglichkeit). Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen übernehmen in diesem Zusammenhang zusätzlich die Überwachung eines TN-S-Systems; d. h. auch bei nachträglich zufällig oder unbewusst hergestellten elektrischen Verbindungen zwischen Neutralleiter und Schutzleiter wird die Schutzeinrichtung ausgelöst und so ein EMV-widriges Stromversorgungssystem abschalten.

Das oft angeführte Argument, die Verfügbarkeit elektrischer Anlagen würde bei einem Einsatz von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen übermäßig herabgesetzt, lässt sich durch eine entsprechende Auswahl der Schutzeinrichtungen (Abstufung der Bemessungsdifferenzströme, Einsatz von **S**-gekennzeichneten Schutzeinrichtungen) und durch die Errichtung mehrerer, dem Risiko angepasster, Stromkreise voll entkräften. Ein Fehler in einer derart aufgebauten elektrischen Anlage wird dann auch nur zur Abschaltung des fehlerhaften Stromkreises führen. Die weiteren fehlerfreien Stromkreise der Anlage werden nicht beeinträchtigt und können weiter betrieben werden. Und die Tatsache, dass Stromkreise mit brandgefährlichen Fehlern vom Netz getrennt werden müssen, ist sicherlich unstrittig.

Die internationale (IEC) und die regionale (CENELEC) Normung hat für Fehler-

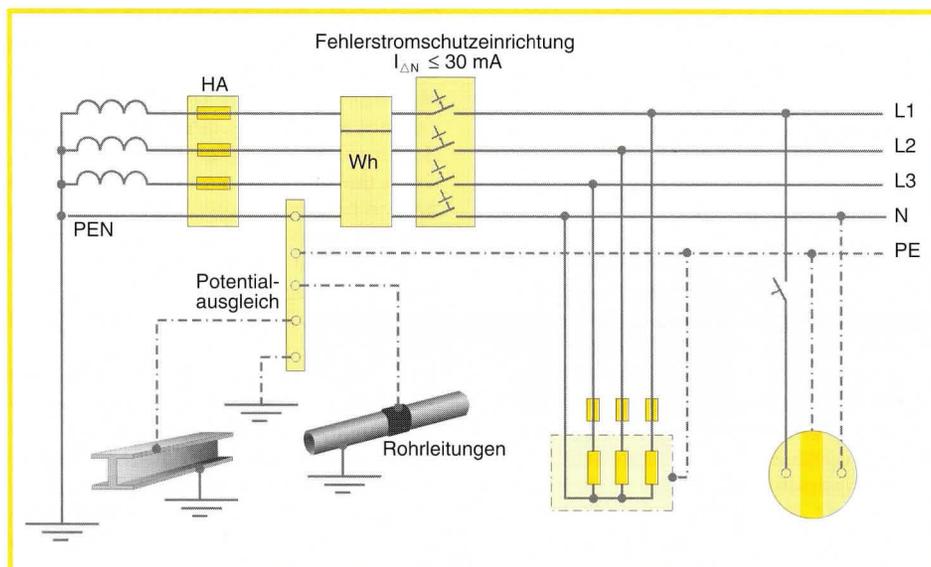


Bild 8: Fehlerstromschutz im TN-S-System



strom-Schutzeinrichtungen ein neues Kunstwort hervorgebracht: Das Kürzel RCD! Es steht für den englischen Begriff „Residual Current Device“. Unter diesem Begriff sind alle Bauarten von Schutzeinrichtungen zusammengefasst, die Differenzströme erfassen können. Dazu gehören auch solche, die nur mit zusätzlicher Spannungsversorgung funktionieren. Diese Schalter sind nach den VDE-Bestimmungen jedoch nicht zur Realisierung von Schutzmaßnahmen zulässig. Ebenso bringt es die übernationale Normung mit sich, dass auch Schutzeinrichtungen genormt werden, die nur Wechselfehlerströme erfassen können. Sicherheitsstandard der fünfziger Jahre! Es ist jedoch kaum eine elektrische Anlage denkbar, in der heute nicht mindestens ein elektrisches Gerät betrieben wird, das im Fehlerfall einen Gleichfehlerstrom hervorruft.

Die Anwender von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen sind deshalb gut beraten, wenn sie sich bei der Auswahl eingehend mit den Geräteeigenschaften befassen. Schutzeinrichtungen mit der Kennzeichnung AC (Alternating current) können nur Wechselfehlerströme registrieren und sind daher zur Realisierung des Personen- und Sachschutzes nicht geeignet.

Schutzeinrichtungen mit der Kennzeichnung A lösen bei Wechsel- und Gleichfehlerströmen aus. Diese Art von Schutzeinrichtungen kommen seit Jahren in Deutschland zum Einsatz. Nur sie dürfen für Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag (Personenschutz) nach DIN VDE 0100-410 vorgesehen werden.

Bei der Auswahl ist darauf zu achten, dass die Schutzeinrichtungen DIN VDE 0664 entsprechen.

Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen werden für Bemessungsströme bis 200 A gebaut. Gängige Bemessungsdifferenzströme sind 0,5 A, 0,3 A, 0,03 A und 0,01 A. Erfordern einzelne Anwendungen höhere Bemessungsströme, können sogenannte Fehlerstrom-Schutzrelais eingesetzt werden. Diese bestehen aus einem separaten Wandler und dem sogenannten Fehlerstrom-Schutzrelais, das mit einem Hilfskontakt ausgerüstet ist und mit dem ein Abschaltorgan, z. B. ein

Leistungsschutz oder Leistungsschalter angesteuert werden kann. Die Wandler sind zum universellen Einbau auf die verschiedenen Bemessungsströme abgestimmt.

Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen nach DIN VDE 0664 sind bis 250 A stoßstromfest. Schutzeinrichtungen mit der Kennzeichnung **S** beherrschen Stoßströme bis 3000 A und sind daher auch bei Überspannung, z. B. durch Blitzeinwirkung, weniger anfällig für Fehlauflösungen. Außerdem bieten sie Selektivität bei Serienschaltung.

Immer wieder werden Stimmen laut, die hinsichtlich der Zuverlässigkeit von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen Klage führen, und dabei auch Untersuchungen anführen. Tatsache ist jedoch, dass es aus Sicht des Sachschutzes und hier insbesondere des Isolationsfehlerschutzes keine gleichwertige Alternative gibt, wenn die Abschaltung im Fehlerfall realisiert werden soll. Sicherlich müssen die Anwender auf die ständige Verbesserung von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen drängen. Ebenso wichtig ist es aber auch, dafür Sorge zu tragen, dass Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen vorschriftsmäßig errichtet und in geeigneten Zeitabständen auf ihre Funktion hin überprüft werden. Durch Betätigen der Prüftaste am Schalter muss die Schutzeinrichtung ausgelöst werden. Diese Überprüfung kann auch von elektrotechnischen Laien vorgenommen werden. Zur Überprüfung der „Fehlerstrom-Schutzschaltung“ insgesamt sollte in jedem Fall eine Elektro-Fachkraft hinzugezogen werden.

Der Vollständigkeit halber wird im Zusammenhang mit dem Isolationsfehlerschutz auch auf sogenannte Differenzstrom-Meldeeinrichtungen (RCM = Residual Current Monitoring) hingewiesen. Diese Geräte werden vor allem dann eingesetzt, wenn die Verfügbarkeit der elektrischen Anlage höchste Priorität hat. Sie können alle Wechsel- und Gleichfehlerströme erfassen und geben eine Meldung ab, wenn der eingestellte Fehlerstrom überschritten wird. Es erfolgt keine Abschaltung!

Anwendungsbereiche für diese Geräte werden hauptsächlich komplexe, elektrische Anlagen in Gewerbe- und Industriebetrieben sein. Denn für derart überwachte elektrische Anlagen muss Fachpersonal zur Verfügung stehen, das im Fehlerfall umgehend aktiv wird und die Fehlersuche beginnt.

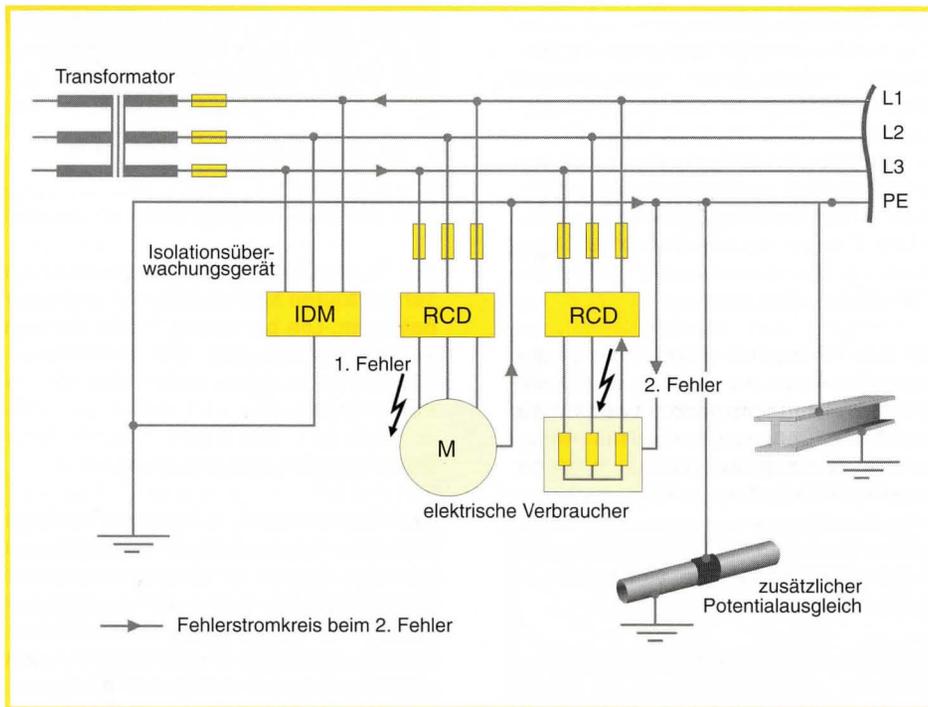


Bild 9: Überwachung eines IT-Systems durch Meldung des 1. Fehlers mittels Isolationsüberwachungsgerät (IDM) und Abschaltung beim 2. Fehler mittels Fehlerstromschutzeinrichtung (RCD)

RCD bzw. RCM sind die Schutz- bzw. Meldeeinrichtungen in elektrischen Anlagen mit geerdet betriebenem Stromversorgungssystem (TN- und TT-System). In ungeerdet betriebenen Stromversorgungssystemen (IT-System) werden zum Schutz bei Isolationsfehlern in der Hauptsache sogenannte Isolationsüberwachungseinrichtungen eingesetzt. Ungeerdete Stromversorgungssysteme werden ebenfalls dann angewendet, wenn die Verfügbarkeit der elektrischen Anlage besondere Bedeutung hat, z. B. in Krankenhäusern (Operationsräume) oder für industrielle Produktionsprozesse, deren unvorhergesehener Ausfall zwangsläufig zu Personen- oder hohen Sachschäden führen würde.

Isolationsüberwachungseinrichtungen registrieren und melden den ersten Fehler, der aufgrund des besonderen Versorgungssystems noch keine Unfall- oder Brandgefahr bedeutet. Es fließt in der Regel kein Fehlerstrom. Aufgrund der Meldung soll unverzüglich mit der Fehlerbehebung begonnen werden, um einen zweiten Fehler zu verhindern, der in jedem Fall zur Abschaltung der elektrischen Anlage führen muss, weil nunmehr ein brandgefährlicher Fehlerstrom über beide Isolationsfehlerstellen fließen kann (Bild 9).

Störlichtbogenschutz

Der Störlichtbogenschutz ist eine besondere Form des Isolationsfehlerschutzes und kommt insbesondere in leistungsstarken Verteilungsanlagen zur Anwendung. Störlichtbogen-Schutzeinrichtungen werden in der Hauptsache im Bereich von Sammelschienen in Energie- und Schaltverteilern eingesetzt.

Die Beherrschung von Störlichtbögen verlangt den Einsatz von Schutzeinrichtungen, die in der Lage sind, Lichtbögen sehr schnell zu detektieren und unschädlich zu machen, d.h. zu löschen und die fehlerhafte Anlage abzuschalten.

Nach Norm (DIN VDE 0660-500) werden Empfehlungen ausgesprochen, einen höchstmöglichen Schutz für das Bedienungspersonal anzustreben. Die Normanforderungen sind also hauptsächlich auf den Personenschutz abgestellt. Störlichtbögen in elektrischen Anlagen sind verbunden mit einer extremen Temperaturentwicklung und einem daraus resultierenden Druckaufbau. Als Folge können Personen durch Verbrennungen, Blendung, abgesprengte Anlagenteile oder durch Einatmen aggressiver und toxischer Gase verletzt werden.



Die umgesetzte Lichtbogenenergie kann aber auch in erheblichem Maße zur Zerstörung elektrischer Einrichtungen (**Bild unten**) führen und Auswirkungen auf das Gebäude sowie benachbarte Anlagen haben. Die Folgekosten durch Produktionsausfall sind nicht zu vernachlässigen. Unter Umständen kann ein solcher Schaden sogar existenzbedrohend sein, wenn die Stromversorgung für längere Zeit unterbrochen wird.

Der Störlichtbogen ist ein hochstromführender Gasplasmakanal zwischen Metallteilen unterschiedlichen elektrischen Potentials, über das im Normalbetrieb isolierende Umgebungsmedium (in der Regel Luft).

Die Ursachen für die Entstehung eines Störlichtbogens sind vielfältig, z. B.

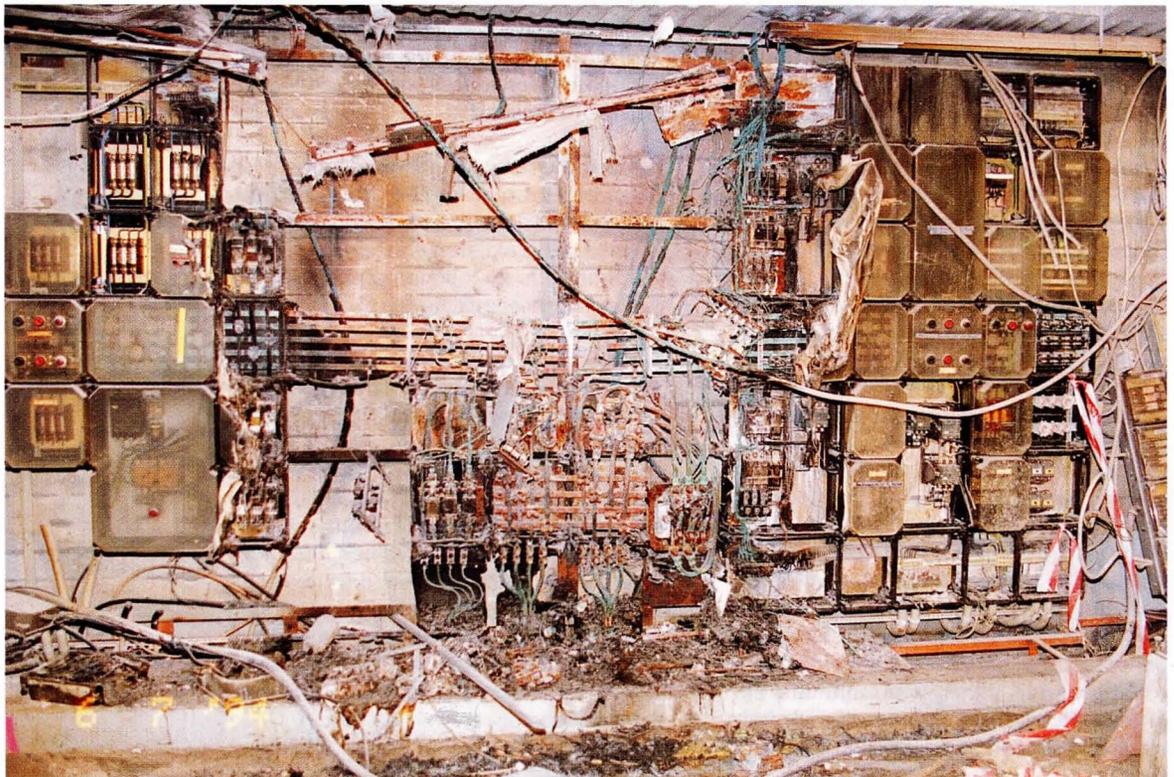
- ▶ transiente Spannungsanstiege
- ▶ zufällige, vorübergehend leitende Überbrückungen von elektrischen Leitern unterschiedlichen Potentials

- ▶ Überlastung falsch dimensionierter oder schadhafter Anlagenteile
- ▶ Bedienungsfehler und anderes mehr.

Die durch Störlichtbögen verursachten Temperaturen können 4.000 K und mehr betragen. Die bei einem Störlichtbogen auftretenden Drücke sind im Wesentlichen von der Konstruktion der elektrischen Anlage abhängig und können z. B. in gekapselten Verteilungsanlagen explosionsartige Schäden verursachen.

Das Ausmaß eines Schadens bzw. eine Betriebsunterbrechung kann nur akzeptabel gering gehalten werden, wenn der Störlichtbogen in sehr kurzer Zeit (max. 5 msec.) erkannt und gelöscht wird. Die fehlerhafte elektrische Anlage wird mit den üblicherweise in diesen Bereichen verwendeten Schaltgeräten, z. B. Leistungsschalter, nach der Lichtbogenlöschung vom speisenden Netz getrennt. Um möglichst kurze Reaktionszeiten der Störlichtbogen-Schutzeinrichtung zu

Bild 10: Schaden an einer elektrischen Verteilungsanlage, entstanden durch umgesetzte Lichtbogenenergie



erreichen, wird für die Erfassung des Störlichtbogens der Fehlerstromanstieg und die Lichtentwicklung durch den Störlichtbogen genutzt.

Die exakten Vorgänge im und während des Störlichtbogens können nur im Prüflabor ermittelt und dokumentiert werden. Lichtbogenparameter lassen sich hier variieren, messen und aufzeichnen.

Bei einer normgerechten Störlichtbogen-Prüfung werden Störlichtbögen mittelstarker Ausprägung zugrunde gelegt. Bei einem typischen Versuch stand ein Strom von nur 36 kA Effektivwert über die Zeit von 0,5 sek. an. Die in dieser kurzen Zeit umgesetzte Energie betrug 8,1 MWs. Der Druck auf die begrenzenden Blechflächen eines Verteilers stieg auf etwa 2000 kN/m². Diese Belastung des Gehäuses verdeutlicht die Bedeutung der mechanischen Stabilität der Kapselung, wenn der Personenschutz gewährleistet werden soll.

Die thermischen und mechanischen Schäden werden von der im Lichtbogen umgesetzten Energie bestimmt. Bei einer Lichtbogenenergie ≤ 90 kWs treten keine gravierenden Schäden in einer Niederspannungsanlage auf. Bei 90 kWs bis 250 kWs ist in typgeprüften Niederspannungsschaltgeräte-Kombinationen (TSK) der Personenschutz noch gewährleistet. Der Sachschaden ist allerdings so groß, dass die Anlage nicht weiter betrieben werden kann. Bei einer Energie ≥ 250 kWs ist ein Totalschaden der Anlage zu erwarten; Menschen sind dann extrem gefährdet.

Die Erfahrungen mit präventiven Maßnahmen, wie die Isolierung oder Abschottung elektrischer Leiter, zeigen, dass Lichtbogenkurzschlüsse nicht zu verhindern sind. Namhafte Schaltanlagenhersteller haben deshalb neue Wege beschritten und Schutzeinrichtungen entwickelt, die einen Störlichtbogen bereits beim Entstehen erfassen und löschen. Aus den mathematisch-physikalischen Zusammenhängen ist leicht zu erkennen, welche Möglichkeiten zur Begrenzung der Lichtbogenenergie bestehen. Dies sind die Reduzierung der Lichtbogenbrenndauer und die Senkung der Lichtbogenleistung.

Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass die Begrenzung der Lichtbogenbrenndauer allein durch die vorgeschalteten Überstrom-Schutzeinrichtungen, z. B.

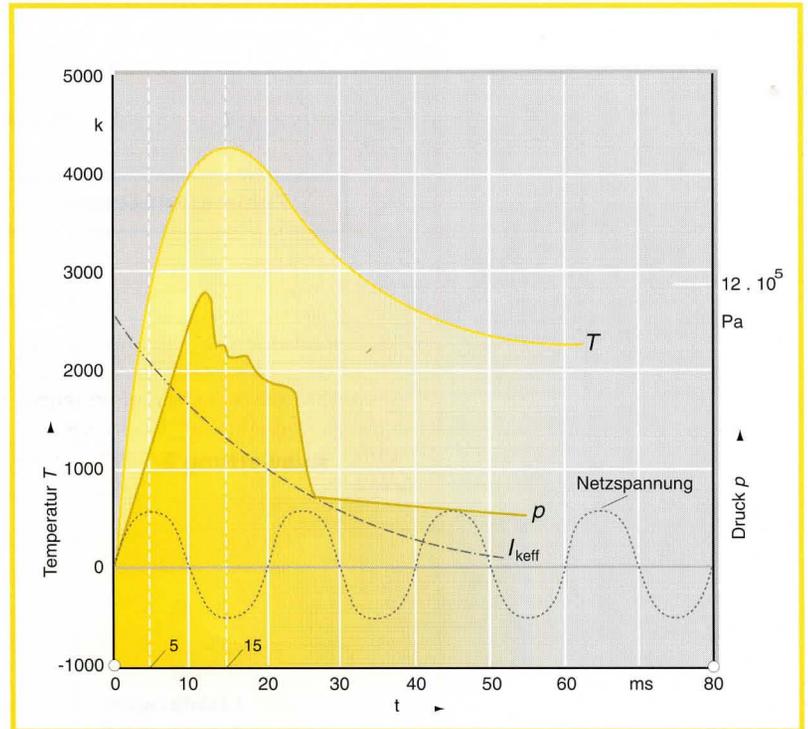


Bild 11: Temperatur- und Druckentwicklung während der Prüfung nach DIN VDE 0660

durch Leistungsschalter, einen wirklichen Anlagenschutz nicht gewährleisten kann. Die so erreichbare minimale Lichtbogenbrenndauer je nach Art der Überstrom-Schutzeinrichtung beträgt 35 ms bis 70 ms. Entscheidend zu lang! Der Temperatur- und Druckverlauf nach **Bild 11** macht deutlich, dass die Maximalwerte schon nach etwa 7 ms bis 15 ms erreicht werden. Sachschutzgerechte Störlichtbogen-Schutzsysteme senken die Störlichtbogenbrenndauer um den Faktor 10 auf maximal 5 ms bei gleichzeitiger Senkung der Lichtbogenleistung.

Nachfolgend wird ein anlagenschutzgerechtes System erläutert. **Bild 12** verdeutlicht schematisch die wesentlichen Systemkomponenten.

► Modul 1:

Die Lichtsensoren bestehen aus speziellen Lichtwellenleitern. Die Sensorenfläche erstreckt sich über die gesamte Länge des Lichtwellenleiters. Über diese wird radial einkoppeltes Licht detektiert. Zur Optimierung der Fehlauflösicherheit werden zusätzlich typische Störlichtbogen-Stromeigenschaften mit Hilfe von Stromsensoren erfasst.

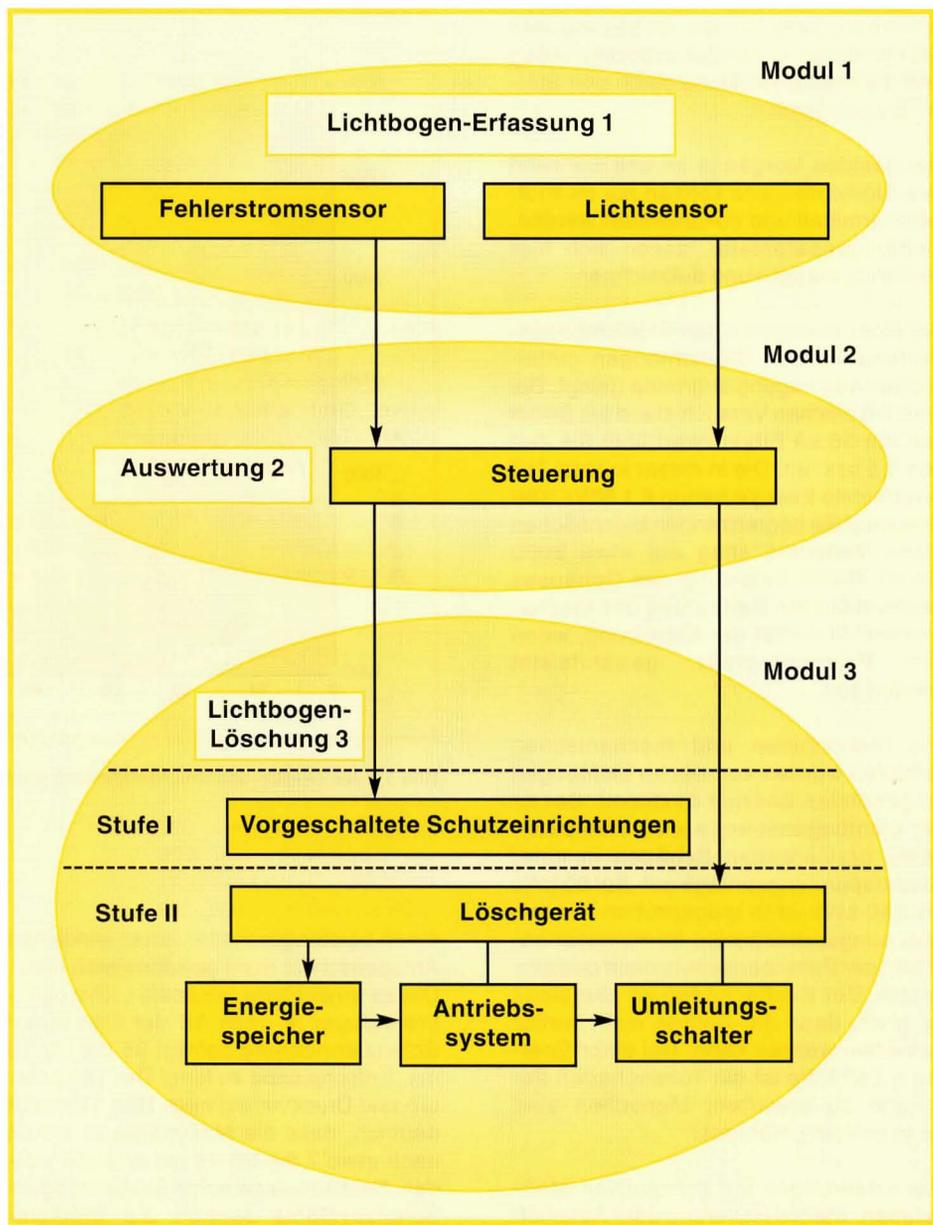


Bild 12:
Hauptmodule des
Störlichtbogen-
Schutzsystems ARCON

► **Modul 2:**

Es werden Signale aus Modul 1 ausgewertet und das Löscherät aktiviert.

► **Modul 3:**

Hier erfolgt die Lichtbogen-Löschung, d.h. das fehlerhafte Stromversorgungssystem wird kurzgeschlossen. Es erfolgt der sofortige Einbruch der Betriebsspannung unterhalb des Niveaus der Störlichtbogenbrennspannung. Die Energie an der Fehlerstelle sinkt auf Null. Zwangsläufig reißt der Lichtbogen ab.

Das Löscherät benötigt für den Schaltvorgang weniger als 2 ms. Dabei muss es einen Kurzschlussstrom von mehr als 100 kA beherrschen. Leistungsschalter haben eine 10 x bis 100 x längere Zeitspanne bis zur Abschaltung. Diese ist durch deren Bauart und Baugröße bedingt. Dies zeigt ganz deutlich, welche Anforderungen an Störlichtbogen-Schutzeinrichtungen gestellt werden, wenn diese von der Erkennung des Störlichtbogens bis hin zu dessen Löschung in weniger als 5 ms reagieren müssen.

Bei der Planung und Auswahl eines Störlichtbogen-Schutzsystems muss neben den vorstehend erläuterten Einzelkriterien vor allem die Abstimmung der Sensorik mit der nachgeordneten Schalteinrichtung (Modul-Löschung) Beachtung finden. Nur wenn mit dem System die erforderliche schnelle Abschaltzeit erreicht werden kann, ist auch der Anlagenschutz ausreichend gesichert. Es werden Schutzsysteme angeboten, bei denen die Anwender insbesondere dieses Leistungsmerkmal nicht ohne weiteres eruieren können, z. B. wenn einzelne Komponenten von verschiedenen Herstellern bezogen werden müssen. Weiterhin sollte das Schaltvermögen der Schalteinrichtung ausreichend groß sein. Die Bemessungskurzzeit-Stromfestigkeit muss bis 100kA-eff sichergestellt sein.

Blitz- und Überspannungsschutz

Blitzereignisse verursachen elektrische Spannungen und Ströme, die wie andere äußere Einflüsse, z. B. thermische oder mechanische Beanspruchungen, zu Isolationsfehlern führen können, wenn geeignete Schutzmaßnahmen nicht getroffen werden. Die elektrischen Isolierungen werden, wenn sie nicht beim ersten Ereignis zerstört werden, vorgeschädigt. Das bedeutet, dass die Isoliereigenschaft durch unzulässigen Stromfluss und der

daraus resultierenden thermischen Belastung herabgesetzt wird. Weitere solche Ereignisse, aber vor allen Dingen auch die permanent anstehende Netzspannung, könnten dann die Isolierung thermisch soweit schädigen, dass sich die Isolierung oder andere brennbare Materialien entzünden.

Die Schädigung elektrischer Isolierungen kann durch die Stromüberlastung der elektrischen Leiter infolge von Blitzteilströmen aber auch aufgrund von Leiterschleifen durch die induktive und kapazitive Einkopplung von blitz- oder betriebsbedingten Überspannungen hervorgerufen werden (**Bild 13**).

Eine weitere Brandgefahr besteht dann, wenn die erforderlichen Mindestabstände zwischen blitzstromdurchflossenen und anderen elektrisch leitenden Teilen nicht eingehalten werden, vor allem in Bereichen, in denen eine äußere Blitzschutzanlage vorhanden ist. Nur wenn Abstände in der Größenordnung von 1 m eingehalten werden, ist ein Überschlag des Blitzstromes auf beispielsweise die elektrische Gebäudeinstallation nicht zu befürchten. Ansonsten wird der Blitzstrom die Leiterisolierung und ggf. andere brennbare Materialien in der Nähe der Überschlagstelle entzünden.

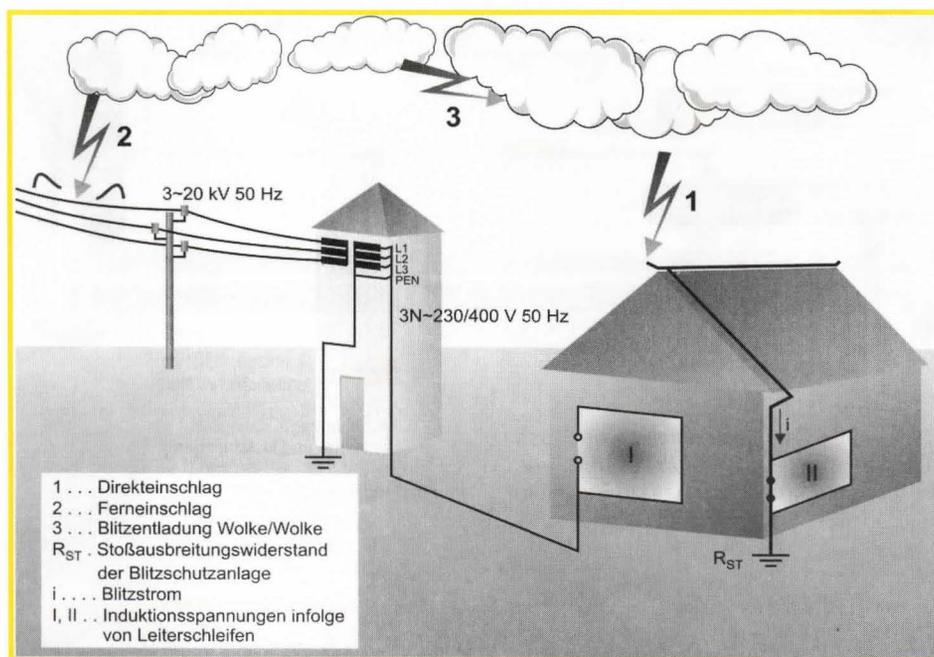


Bild 13: Entstehungsursachen von Gewitterüberspannungen



18

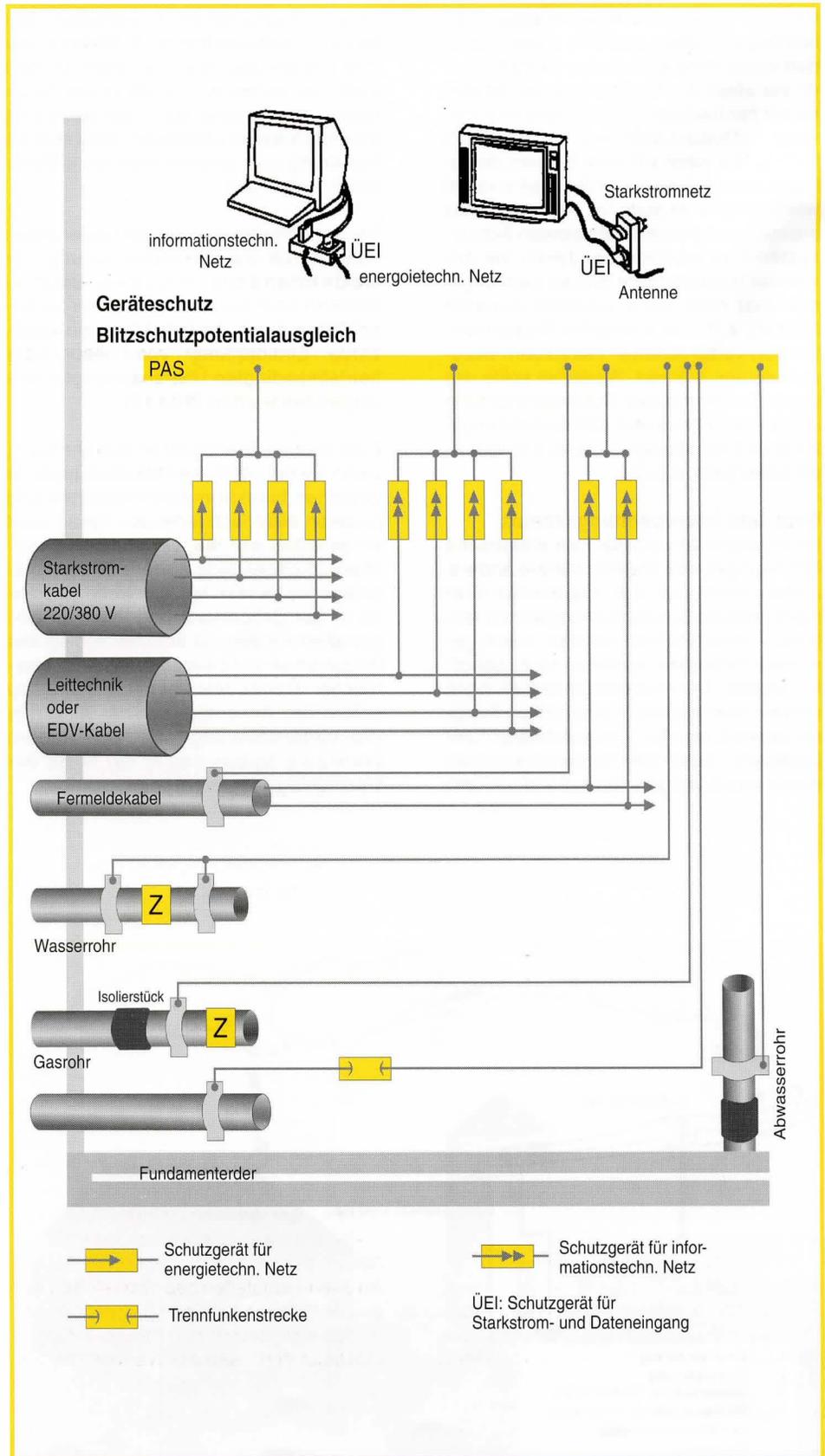


Bild 14: Blitzschutz-Potentialausgleich und Schutz gegen induzierte Überspannungen (Geräteschutz)

Zur Vorbeugung von Brandgefahren durch Blitzeinwirkung und Überspannungen ist ein möglichst umfassender Potentialausgleich zwischen passiven elektrisch leitenden Teilen und den aktiven stromführenden Leitern der elektrischen Anlage herzustellen (**Bild 14**).

Durch diese Maßnahme werden gefährliche Potentialunterschiede, d. h. elektrische Spannungen zwischen elektrisch leitenden Teilen von Gebäuden und anderen baulichen Anlagen vermieden. Je engmaschiger der Potentialausgleich durchgeführt wird, je geringer wird auch die Stromstärke in jedem einzelnen blitzstromdurchflossenen Leiter sein, so dass auch dessen Stromüberlastung vorgebeugt wird.

Können passive elektrisch leitende Teile unmittelbar galvanisch miteinander verbunden werden, ist dies für die aktiven Leiter (elektrischen Leiter) nur mittels besonderer Schutzeinrichtungen (Ableiter) möglich.

Es werden Funkenstrecken und Halbleiter (Varistor)-Ableiter unterschieden, die bei einer bestimmten Überspannung leitend werden. Sie verbinden so während der kurzen Zeit (ns-ms) des Blitzereignisses die aktiven Leiter der elektrischen Anlage mit dem Erdpotential.

Ein optimaler Schutz gegen Isolationsfehler in elektrischen Anlagen und Geräten ist nur möglich, wenn die Ableiter vorschriftsmäßig angeordnet und verschaltet werden. Es ist eine Ableiter-Koordination erforderlich, d. h. im Zuge der elektrischen Anlage sind von der Einspeisung ausgehend bis zum Endgerät in bestimmten Abständen Ableiter anzuordnen.

Die Mindestleitungslängen zwischen den Ableitern sind herstellerspezifisch und deshalb den technischen Unterlagen der Ableiter-Hersteller zu entnehmen. Zwischen den Ableitern müssen Mindestleitungslängen (Dämpfung) eingehalten werden, damit sich bei der einlaufenden Überspannung der erforderliche Spannungsfall einstellen kann, der zum Durchzünden der Ableiter erforderlich ist.

Weiterhin muss auf möglichst kurze Leitungslängen auf der Eingangs- und Abgangsseite der Ableiter geachtet werden. Einer der häufigsten Fehler, die in der Praxis anzutreffen sind, sind zu lange Leitungen von den Außenleitern über die Ableiter zur Potentialausgleichsschiene.

Diese Leitungen müssen niederinduktiv sein, was maßgebend nur durch kurze Leitungslängen erreicht werden kann. Die Höhe des Spannungsfalles ist proportional der Länge der Leitung. Bei den üblicherweise verwendeten Leiterarten kann mit größeren Leiterquerschnitten eine wesentliche Herabsetzung des induktiven Widerstandes nicht erreicht werden. Bei großen Abständen zwischen Ableiter und Potentialausgleichsschiene bzw. Erdungsanlage, z. B. bei Freileitungsanschlüssen, ist es erforderlich, den Haupt-Schutzleiter der elektrischen Anlage unmittelbar am Abgang der Blitzstromableiter anzuschließen. Der Schutzleiter wird dann nur die Spannung in der Größenordnung des Ableiter-Spannungsfalles annehmen. Der Spannungsfall in der Leitung zwischen Ableiter und Potentialausgleichsschiene ist an den Isolierungen der elektrischen Anlage nicht wirksam.

Dipl.-Ing. Adalbert Hochbaum
GDV-Büro Schadenverhütung
Köln