Schutz von Niederspannungsanlagen und Regelstromkreisen vor Überspannungen

Autor(en): **Hasse, P.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **73 (1982)**

Heft 9

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904957

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Schutz von Niederspannungsanlagen und Regelstromkreisen vor Überspannungen

P. Hasse

621.3.015.3

Am Beispiel verschiedener Schadenfälle wird aufgezeigt, welche Folgen nicht konsequent durchdachte Schutzkonzepte für die Sicherheit von Geräten und Industrieanlagen haben können. Mögliche Ursachen für Überspannungen werden genannt. Ferner werden Wirkungsweise und Einsatzbereiche von Bauteilen und Geräten für die Überspannungsbegrenzung besprochen.

En prenant comme exemples diverses avaries, on montre le risque de conceptions de protection insuffisamment élaborées sur la sécurité d'appareils et d'installations industrielles. Des causes possibles de surtensions sont indiquées, de même que le fonctionnement et les domaines d'emploi de composantes et d'appareils servant à limiter les surtensions.

1. Beispiele für Überspannungsschäden

Überspannungen in Niederspannungsanlagen werden hauptsächlich durch Blitzentladungen oder Schaltvorgänge hervorgerufen.

In den letzten Jahren haben Gewitterüberspannungsschäden an Niederspannungs-Verbraucheranlagen, insbesondere solchen mit elektronischen Geräten, erheblich zugenommen. Die Schadenstatistiken der Sachversicherer [1; 2] weisen aus, dass diese indirekten Gewitterschäden bereits ein Mehrfaches der direkten Blitzschäden betragen; besonders deutlich zeigt dies die Blitzschadenstatistik 1967 bis 1979 der Brandverhütungsstelle für Oberösterreich [3]: Sie führt für 1979 an direkten Blitzschäden eine Summe von 8,6 Mio Schilling auf, während die Schadensumme, verursacht durch Gewitterüberspannungen 21,8 Mio Schilling beträgt.

Durch Überspannungen stark gefährdet sind Elektrogeräte wie Kühlschränke, Tiefkühltruhen, Waschmaschinen, Durchlauferhitzer, Alarmanlagen, Fernsehgeräte (Fig. 1), elektronische Einrichtungen für Nachtstromspeicheranlagen, Wasserversorgungsanlagen sowie elektrische Verteilungsanlagen (Fig. 2). Überspannungsschäden in ausgedehnten Industrieanlagen mit elektronischen Einrichtungen haben oft ein erhebliches Ausmass. Welche verheerenden Folgen Blitzschläge in explosionsgefährdeten Bereichen haben können, zeigen das in [4; 5] beschriebene Beispiel eines 5000-m³-Kerosintanks sowie das folgende Ereignis:

Im Juli 1965 kam es in Karlsruhe bei einem Blitzeinschlag in einen Benzintank zur Zündung in der eigensicheren Messeinrichtung im Tankdom [6]. Der Tank brannte daraufhin vollständig aus (Fig. 3). Im Inneren des Tanks diente der ohmsche Widerstand einer Nickelspirale mit Schwimmer als Mass für die Temperatur des Benzins (Fig. 4). Im Tankoberraum, der mit explosiblem Gasgemisch gefüllt war, wurden einfache Lüsterklemmen für die Messleitungen verwendet. Beim Blitzschlag in den Tank kam es zum Überschlag vom Tank über die Klemmen zu den Adern des Messkabels, die eine fremde, ferne Erde darstellten. Dabei wurde das explosible Gemisch gezündet.

Besonders empfindlich gegen Überspannungen sind elektronische Mess-, Steuer- und Regelkreise von ausgedehnten Industrieanlagen [7], wie gerade die Schäden in den Sommern 1979/80 gezeigt haben: die Schadensummen infolge Gewitterüberspannungen lagen hier in einzelnen Fällen über 350000 DM.

Die beim Blitzschlag in ein Gebäude auftretenden Überspannungen betragen einige 10 kV bis viele 100 kV, während die Stossüber- bzw. Stossdurchschlagspannungen in Niederspannungs-Verbraucheranlagen oder elektronischen Einrichtungen weitaus niedriger liegen, wie Tabelle I zeigt [8; 9].

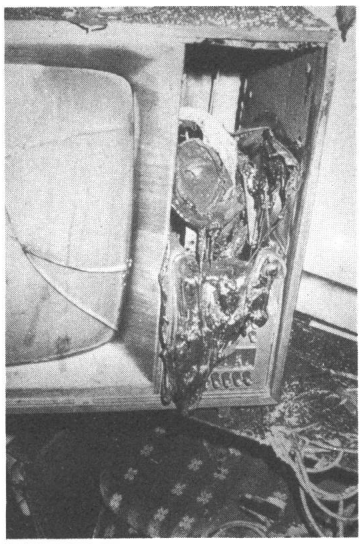


Fig. 1
Durch Blitzüberspannung und Netzfolgestrom zerstörtes Fernsehgerät

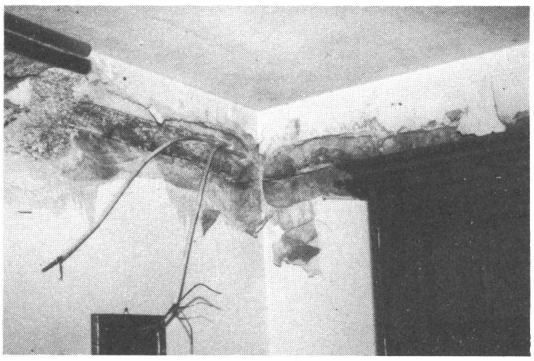


Fig. 2 Schäden durch Gewitterüberspannungen und Blitzteilströme an einer unter Putz verlegten Starkstromleitung

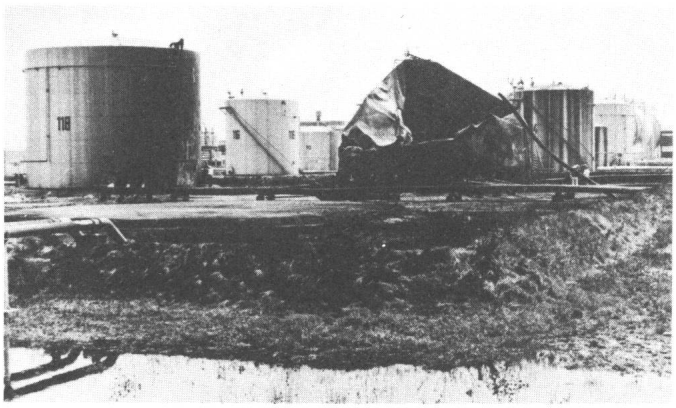


Fig. 3 Infolge Blitzschlags ausgebrannter Tank, Karlsruhe 1965

Stossüber- bzw. Stossdurchschlagspannungen in elektrischen Anlagen bis 1000 V Tabelle I

Anlagenteil		Stossüberschlag-/ Stossdurchschlag-spannung
Gegen Gehäuse oder Erde	Starkstromgeräte	5...8 kV
	Fernmeldegeräte	1...3 kV
Querspannung zwischen den Eingangsklemmen	Elektronische Schaltungen, Halbleiter	5...100 V
Fernmeldekabel		5...8 kV
Signal- und Messkabel, Starkstromleitungen		bis 20 kV
Starkstromkabel		bis 30 kV

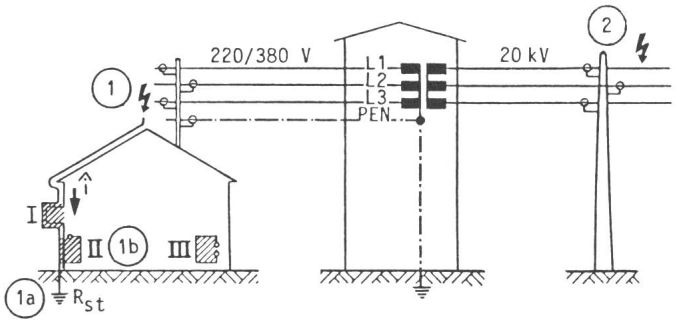


Fig. 5 Ursachen für Überspannungen bei Blitzentladungen
1 Direkteinschlag R_{st} Stosserdungswiderstand
2 Ferneinschlag I, II, III Schleifen

Zu dieser Bedrohung durch Gewitterspannungen kommen Schaltüberspannungen hinzu, die durch plötzliche Veränderungen in Leistungsstromkreisen entstehen: Infolge Schalthandlungen in Hochspannungsanlagen können durch kapazitive oder induktive Kopplung Überspannungen in Niederspannungsanlagen hervorgerufen werden, oder Schaltüberspannungen werden in den Niederspannungsanlagen selbst, z. B. durch das Abschalten von Induktivitäten, erzeugt.

2. Ursachen für Überspannungen bei Blitzentladungen

Die Ursachen von Gewitterüberspannungen [10] lassen sich grundsätzlich unterteilen in Direkt- bzw. Naheinschlag und in Ferneinschlag.

Bei einem Direkteinschlag trifft der Blitz das zu schützende Gebäude; von einem Naheinschlag spricht man, wenn der Blitz in eine ausgedehnte Anlage oder unmittelbar in eine Leitung (z. B. Niederspannungsfreileitung, Rohrleitung, Kabel), die in die zu schützende Anlage/Gebäude führt, einschlägt. Beim Direkt- bzw. Naheinschlag müssen von den Überspannungsschutzeinrichtungen die vollen Blitzströme bzw. erhebliche Teile davon verkraftet werden.

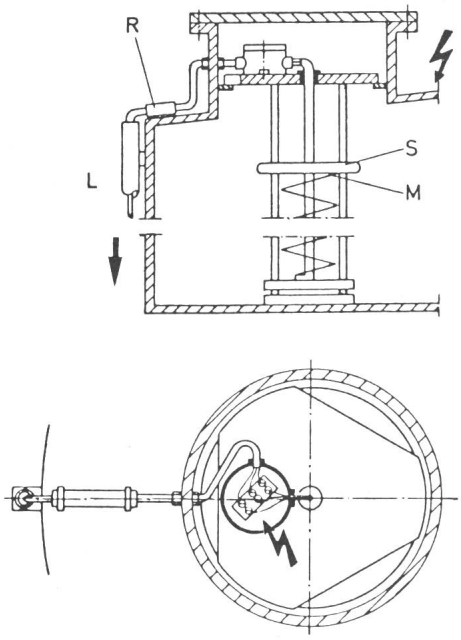


Fig. 4 Tankinneres: Temperaturmessung über Widerstandsänderung der Nickelspirale
S Schwimmer R Schutzrohr aus Stahl
M Messwiderstand L Kabel zur Messwarte

Beim Ferneinschlag wird z. B. die Mittelspannungsfreileitung getroffen, oder durch Blitze von Wolke zu Wolke werden plötzlich «Spiegelladungen» frei, die sich dann wanderwellenartig auf diesen Leitungen ausbreiten, oder es werden durch Blitzeinschläge in die Umgebung von zu schützenden Anlagen Überspannungen induziert. Bei Ferneinschlägen müssen von den Überspannungsschutzeinrichtungen nur kleine Blitzteilströme oder induzierte Ströme verkraftet werden.

Überspannungen, die beim Direkt- oder Naheinschlag auftreten, sind der Spannungsabfall im Stosserdungswiderstand und die Induktionsspannungen in metallenen Schleifen (Fig. 5).

Bei einem Ferneinschlag breiten sich Überspannungswellen mit Lichtgeschwindigkeit längs der Mittelspannungs-Freileitungen aus und gelangen zu den Transformatorstationen, die in die Niederspannungsnetze einspeisen. Durch Überschläge an den Isolatoren und gegebenenfalls durch Überspannungsableiter am Eingang der Transformatorstationen werden die Maximalwerte der über die Niederspannungsfreileitungen oder -erdkabel in die Gebäude eindringenden Überspannungen auf einige 10 kV begrenzt. Sind in den zu schützenden Anlagen keine Überspannungsschutzgeräte vorhanden, so kommt es zu unkontrollierten Über- oder Durchschlägen an Isolationsschwachpunkten in den Installationen und Geräten.

Der Zusammenhang zwischen Überspannungen bei Blitzeinschlägen und den bei Spannungsbegrenzung durch die Überspannungsschutzgeräte fliessenden Strömen ist bei den Ferneinschlägen durch den Wellenwiderstand der Versorgungsleitung von einigen 10 Ω bei Erdkabeln und einigen 100 Ω bei Freileitungen gegeben. Damit errechnen sich die in Tabelle II aufgeführten Stoßströme, die von den Überspannungsableitern abgeführt werden müssen [11]. Bei einem Direkt-/Naheinschlag fliessen nach dem Ansprechen der Überspannungsschutzgeräte über diese erhebliche Blitzstromteile, wie ebenfalls aus Tabelle II hervorgeht [5].

3. Ursachen für Schaltüberspannungen

Ursachen für Schaltüberspannungen, die in Niederspannungsanlagen selbst erzeugt werden, können sein:

– Abschalten von Induktivitäten, die parallel zur Spannungsquelle geschaltet sind, wie z. B. Transformatoren, Drosselspulen, Spulen von Schützen oder Relais. Schaltüberspannungen entstehen hier in ähnlicher Weise, wie sie beim Abschal-

ten eines leerlaufenden Hochspannungstransformators beschrieben wurde.

– Abschalten von Induktivitäten im Längszweig des Stromkreises wie z.B. Leiterschleifen, Längsdrosseln oder die Induktivität der Leiter oder Stromschienen selbst. Die Grösse der entstehenden Schaltüberspannungen richtet sich nach dem Stromwert zum Abschaltzeitpunkt.

– Dieses Auftrennen von Stromkreisen kann beabsichtigt mit Schaltern, aber auch unbeabsichtigt z.B. durch Auslösen von Sicherungen oder Schutzschaltern oder durch Leitungsbruch vor dem natürlichen Stromnulldurchgang erfolgen. Durch diese erzwungenen raschen Stromänderungen werden Schaltüberspannungen, meist in Form von gedämpften Schwingungen, vom Mehrfachen der Anlagennennspannung erzeugt.

– Schaltüberspannungen können ferner auch beim Betrieb mit Phasenanschnittsteuerung, durch Bürstenfeuer an Schleifringen oder durch plötzliches Entlasten von Maschinen und Transformatoren entstehen.

4. Bauteile und Geräte zur Überspannungsbegrenzung

Kabel für Mess-, Steuer- und Regelanlagen (MSR-Kabel), bei denen nur geringe Längs- und Querspannungen entstehen können (Fig. 6), haben einen Aussenschirm mit geringem Kopplungswiderstand (kleine Längsspannungen) sowie Adern in Paarverseilung, gegebenenfalls Dreier- oder Viererverseilung (sehr kleine Querspannungen).

Verbindungselementen, d.h. geschraubten, genieteten und gepressten Verbindungen, kommt heute bei der Durchführung des konsequenten Potentialausgleichs in der Blitzschutztechnik eine besondere Bedeutung zu. Während die Leiterquerschnitte von Blitzableiterdrähten rechnerisch so festgelegt werden können, dass sie den zu erwartenden Blitzströmen standhalten, lassen sich für die Verbindungselemente bis heute keine blitzstromspezifischen Dimensionierungskriterien angeben.

Von besonderer Bedeutung sind die *Überspannungsschutzgeräte.* Die Vielzahl der bekannten Überspannungsschutzgeräte, wie Funkenstrecken, Ventilableiter usw., lässt sich entsprechend ihrem Ableitvermögen in zwei grundsätzliche Typen einteilen:

– Überspannungsableiter Typ I: Zur Begrenzung von Überspannungen aus Ferneinschlägen, Induktionseffekten und Schalthandlungen.

– Überspannungsableiter Typ II: Zur Begrenzung von Überspannungen aus Direkt- bzw. Naheinschlägen.

Während Ableiter des Typs II Überspannungen aller Arten sicher beherrschen, ist der Standardableiter des Typs I nur zur Überspannungsableitung aus Ferneinschlägen und Schalthandlungen geeignet; bei einem Naheinschlag kann er u.U. schon nach dem ersten Teilblitz zerstört werden, so dass nachfolgende Teilblitze unbegrenzt in die Anlage eindringen können.

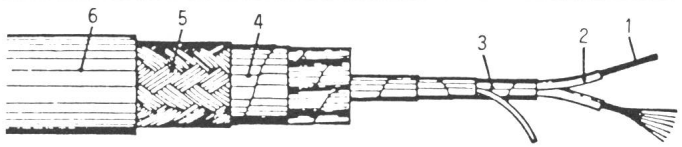


Fig. 6 Aufbau eines MSR-Kabels mit Aussenschirm, Aderpaarabschirmung und Adern in Paarverseilung

1 Cu-Leiter (feindrähtig)
2 PE-Isolierung
3 Geschirmtes Paar mit Beidraht
4 Kunststoffband
5 Cu-Geflecht
6 PVC-Aussenmantel

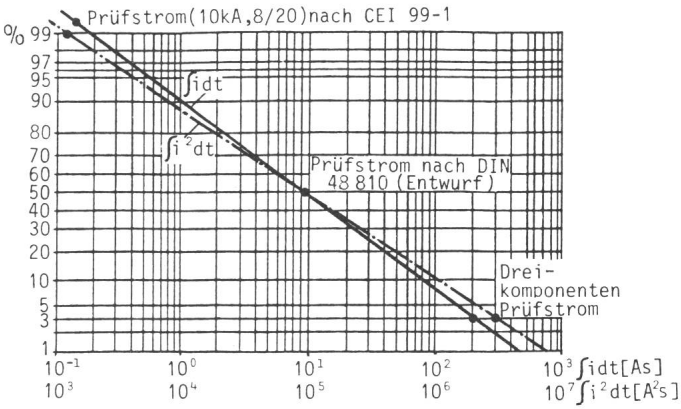


Fig. 7 Statistische Verteilung der Blitzstromparameter
$\int i\,dt$ und $\int i^2\,dt$ nach [15]

5. Prüfströme und Prüfspannungen von Überspannungsschutzgeräten

Für die Blitzstromwirkungen in Überspannungsschutzgeräten, insbesondere in solchen mit Funkenstrecken, und ihren Anschlüssen (Klemmen) sind die folgenden beiden Blitzstromparameter von Bedeutung [5; 12; 13].

– *Ladung* $\int i\,dt$ (das Zeitintegral über den Blitzstrom, in As). Die Ladung bewirkt zusammen mit dem Anoden- bzw. Kathodenspannungsabfall den Energieumsatz an den Stellen, wo der Blitzstrom aus dem Metall austritt und in den Lichtbogen übergeht und umgekehrt. Die Ladung ist deshalb für die Ausschmelzungen bzw. den Materialabtrag an den Elektroden der Funkenstrecken verantwortlich. Wie Untersuchungen gezeigt haben, spielt dabei die Einwirkdauer des Blitzstromes eine entscheidende Rolle: Liegt diese in der Grössenordnung von einigen 10 ms, so wird wesentlich mehr Material abgetragen, als wenn dieselbe Ladung während der Dauer von 1 s und mehr aufgebraucht wird.

– *Stromquadratimpuls* $\int i^2\,dt$ (das Zeitintegral über das Blitzstromquadrat, in A^2s). Der Stromquadratimpuls ist für den Energieumsatz an den Übergangswiderständen von Klemmen und für die elektromagnetischen Kraftimpulswirkungen auf blitzstromdurchflossene Anschlussleitungen (und Lichtbögen) verantwortlich.

Die umfassendsten Blitzstrommessungen wurden von *K. Berger* an Sendetürmen auf dem Monte San Salvatore durchgeführt [14; 15]. Figur 7 zeigt die statistischen Verteilungen der Ladung und des Stromquadratimpulses am Messort.

Spannungen und Ströme bei Blitzeinschlägen — Tabelle II

	Spannungsparameter		Stromparameter			
	Scheitelwert kV	Steilheit kV/µs	Scheitelwert kA	Steilheit A/s	Ladung As	Stromquadratimpuls A^2 s
Ferneinschläge	einige 10	einige 10	einige	–	< 1	< 10^3
Naheinschläge	–	–	150	$80 \cdot 10^9$	50	10^6

5.1 *Prüfstrom für Ableiter-Typ I*

Der Ableiter-Typ I braucht nur relativ kleine Teilblitzströme bei Ferneinschlägen, Induktionsströme oder Entladeströme bei Schaltüberspannungen zu führen. Als Prüfstrom für solche Geräte wird meist der in der CEI-Publikation 99–1 [16][1]) vorgegebene Nennableitstoßstrom (8/20) für Niederspannungsventilableiter mit 5 kA Scheitelwert (selten 10 kA) herangezogen (Fig. 8). Solche Stoßströme (8/20) sind allerdings nicht zur Untersuchung direkter Blitzstromeinwirkungen geeignet, da selbst bei einem Scheitelwert von 10 kA die Ladung nur etwa 0,16 As und der Stromquadratimpuls nur ca. $1{,}3 \cdot 10^3$ A^2s betragen.

Das einwandfreie Verhalten des Ableiter-Typs I auch bei Entladeströmen infolge von Schaltüberspannungen wird nach CEI 99–1 mit dem Langwellenstoßstrom 75 A/1000 µs geprüft. Dieser steigt schnell auf seinen Maximalwert von 75 A an, behält diesen 1000 µs bei und fällt dann schnell wieder auf null ab.

5.2 *Prüfstrom für Ableiter-Typ II*

Zur Nachbildung von Beanspruchungen bei Direkt- bzw. Naheinschlägen, also zur Prüfung von Ableiter-Typ II, ist ein Typ-Prüfverfahren [17] entwickelt worden, bei dem ein durchschnittlicher Blitzstrom durch Kombination aus einem unipolaren Stoßstrom und einem unmittelbar anschliessenden, netzfrequenten Sinushalbwellenstrom dargestellt wird (Fig. 9). Die Ladung beträgt dabei 10 As, und der Stromquadratimpuls weist 10^5 A^2s auf. Das entspricht den 50 %-Werten der statistischen Verteilungen in Figur 7.

Für Ableiter des Typs II, die extrem hohen Anforderungen bezüglich ihres Ableitvermögens genügen müssen, können auch Mehrkomponenten-Prüfströme verwendet werden. Solch ein Mehrkomponenten-Prüfstrom wurde z. B. zum Nachweis der Blitzstromtragfähigkeit der Hochleistungsfunkenstrecken Typ LFS und Typ HSFS (Abschnitt 6.1) verwendet. Sein zeitlicher Verlauf ist in Figur 10 wiedergegeben. Die Ladung beträgt etwa 200 As und der Stromquadratimpuls etwa $3 \cdot 10^6$ A^2s, was etwa den 3 %-Werten (97 % aller Blitze weisen kleinere Werte auf) in Figur 7 entspricht.

5.3 *Prüfspannungen*

Das Ansprechverhalten von Überspannungsableitern ist massgebend für die Begrenzung von Überspannungen und den Schutzbereich.

Die Ansprechwechselspannung gibt einen Anhalt für das Ansprechen bei Schaltüberspannungen. Für das Ansprechen bei Schaltstoßspannungen einer bestimmten Wellenform sind noch keine Grenzwerte festgelegt.

Schaltüberspannungen in Niederspannungsanlagen verlaufen meistens in Form gedämpfter Schwingungen mit Frequenzen zwischen 5 und 500 kHz. Der IEEE-Vorschlag 587.1 sieht daher als Prüfspannung für solche Bauteile und Geräte, die durch steile Spannungsanstiege (du/dt) und Umkehr der Spannungspolarität gefährdet sind, die in Figur 11 wiedergegebene gedämpfte Schwingung von 0,5 µs/100 kHz mit einem Maximalwert von 6 kV vor.

Das Ansprechverhalten der Überspannungsableiter bei Überspannungen infolge Gewittereinwirkungen wird nach CEI 99–1 mit der Blitzstoßspannung 1,2/50 geprüft.

[1]) Auch SNV 413004, 1960: Regeln für Überspannungsableiter sowie VDE 0675, 5.72 Richtlinien für Überspannungsschutzgeräte, Teil 1: Ventilableiter für Wechselspannungsnetze.

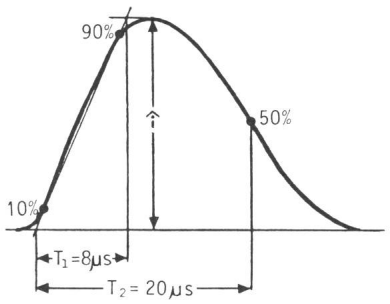


Fig. 8 Prüfstrom (8/20) nach CEI 99-1 für Überspannungsableiter-Typ I

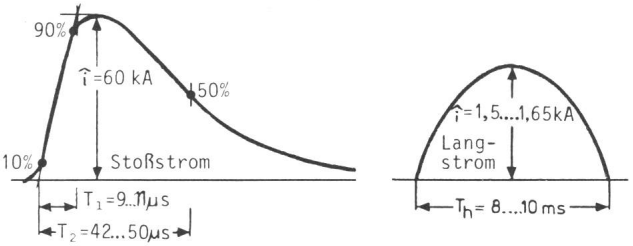


Fig. 9 Prüfstrom nach [17] für Überspannungsableiter-Typ II

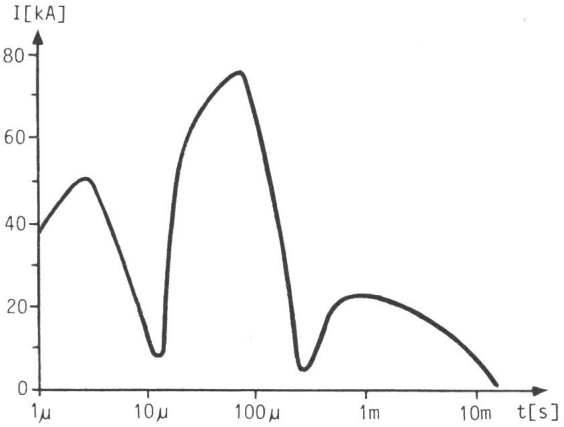


Fig. 10 Dreikomponenten-Prüfstrom für Überspannungsableiter-Typ II mit extrem grossem Ableitvermögen

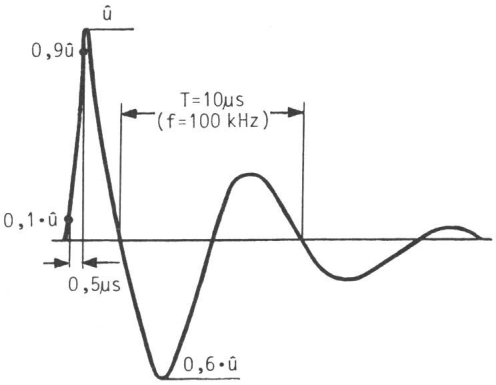


Fig. 11 Prüfspannung zur Darstellung von Schaltüberspannungen in Niederspannungsanlagen
IEEE-Vorschlag 587.1, Prüfspannung 6 kV (0,5 µs/100 kHz)

6. Grundsätzliche Bauformen von Überspannungsschutzgeräten

Vier grundsätzliche Bauformen (Fig. 12) sind für Überspannungsschutzgeräte bekannt; sie lassen sich den Typen I und II wie folgt zuordnen:

– Die Bauform 1 besteht nur aus einer Funkenstrecke. Bei entsprechender Dimensionierung kann diese Bauform auch bei Direkt- bzw. Naheinschlägen funktionstüchtig sein und damit dem Typ II entsprechen.

– Die Bauform 2 besteht nur aus einem Zinkoxid-Varistor. Dieser funkenstreckenlose Ableiter genügt dem Typ I.

– Die Bauform 3 besteht aus der Reihenschaltung einer Funkenstrecke mit einem Silizium-Karbid-Varistor. Sie ist grundsätzlich ebenfalls nur für die Überspannungsbegrenzung bei fernen Blitzeinschlägen und bei Schalthandlungen geeignet und entspricht dem Typ I.

– Die Bauform 4 besteht aus Kombinationen von Funkenstrecken, Widerständen, Induktivitäten, Kapazitäten und Zenerdioden. Diese Geräte sind speziell für den Überspannungsschutz von hochempfindlichen elektronischen Geräten dimensioniert. Sie begrenzen die Ausgangsspannung recht scharf, sind aber nur für relativ kleine Stoßströme ausgelegt, entsprechen also dem Typ I.

6.1 Funkenstrecken

Zu den Funkenstrecken zählen gekapselte Luftfunkenstrecken, Gasentladungsableiter und Hochleistungsfunkenstrecken.

Mit herkömmlichen Luftfunkenstrecken, wie sie auch in der Bauform 3 eingesetzt werden, lassen sich nur Ferneinschläge und Schaltüberspannungen beherrschen. Sie werden mit Prüfströmen nach CEI 99–1 getestet.

Gekapselte Luftfunkenstrecken, die Prüfströme nach Figur 9 zerstörungsfrei führen können, werden unter dem Sammelbegriff Trennfunkenstrecken zusammengefasst. Sie dienen bis zum Auftreten ihrer Ansprechspannung zur elektrischen Trennung zweier metallener Installationen und stellen für den Blitzstrom beim Durchzünden eine elektrische Verbindung her (Sollüberschlagstelle). Diese Kopplung wird nach dem Abklingen des Blitzstromes wieder aufgehoben. Man setzt Trennfunkenstrecken (Fig. 13) an Näherungsstellen zwischen der Blitzschutzanlage und anderen geerdeten Anlageteilen ein, um unkontrollierte Über- oder Durchschläge an diesen Stellen zu vermeiden.

Hohe Anforderungen werden an explosionsgeschützte Trennfunkenstrecken (Fig. 14) gestellt. Sie werden in explosionsgefährdeten Bereichen, z.B. zur Überbrückung von Isolierflanschen an Rohrleitungen, eingesetzt, damit es beim Blitzeinschlag keine offenen Funkenüberschläge gibt. Die Ansprechblitzstoßspannung von explosionsgeschützten Funkenstrecken soll nicht grösser als 50 % der 50-Hz-Überschlag-Wechselspannung (Effektivwert) des zu schützenden Isolierflansches sein [18].

Die Ansprechstoßspannung einer Funkenstrecke hängt von der Steilheit der anlaufenden Überspannungswelle ab. Je steiler die Welle ist, um so kürzer ist die Zeit, in der der Durchschlag erfolgt. Diese Spannung/Zeit-Abhängigkeit wird recht anschaulich mit der Stosskennlinie wiedergegeben. Figur 15 zeigt die Stosskennlinie der in Figur 14 dargestellten explosionsgeschützten Funkenstrecke; sie verläuft extrem flach, d.h. die Funkenstrecke begrenzt auch sehr steil anlaufende Überspannungsimpulse auf einen nahezu gleichbleibenden Wert von etwa 2 kV.

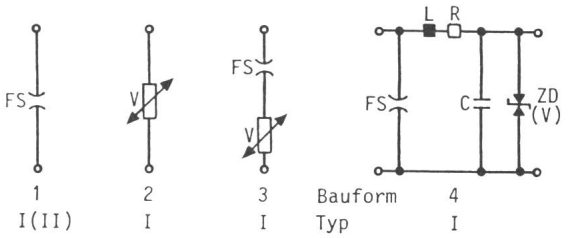


Fig. 12 Grundsätzliche Bauformen von Überspannungsschutzgeräten
FS Funkenstrecke — R Widerstand
V Varistor — C Kondensator
L Induktivität — ZD Zenerdiode

Gasentladungsableiter (gasgefüllte Ableiter) sind Funkenstrecken, bei denen die sich gegenüberstehenden Elektroden mit dem sie umgebenden Isolator einen Entladungsraum bilden, in dem sich ein Edelgas, meistens Argon, befindet (Fig. 16). Häufig sind die Elektroden mit emissionsfördernden Überzügen versehen. Solche Ableiter sind nur zur Ableitung relativ kleiner Teilblitzströme und Schaltüberspannungen geeignet. Darüber hinaus weisen sie gegenüber Trennfunkenstrecken steile Stosskennlinien auf (Fig. 17), d.h. ihre Ansprechspannung wächst stark mit zunehmender Steilheit der zu begrenzenden Überspannungen an.

Hochleistungsfunkenstrecken stellen hohe Anforderungen. So sind die beiden erst kürzlich entwickelten Typen LFS und HSFS für Beanspruchungen mit direkten Blitzeinschlägen ausgelegt, und ihre Lebensdauer ist auf mindestens 20 Jahre bemessen. Sie wurden mit dem beschriebenen Dreikomponenten-

Fig. 13 Trennfunkenstrecke für Näherungen und Erdungsanlagen

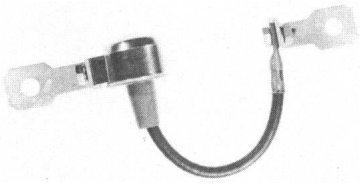


Fig. 14 Explosionsgeschützte Trennfunkenstrecke

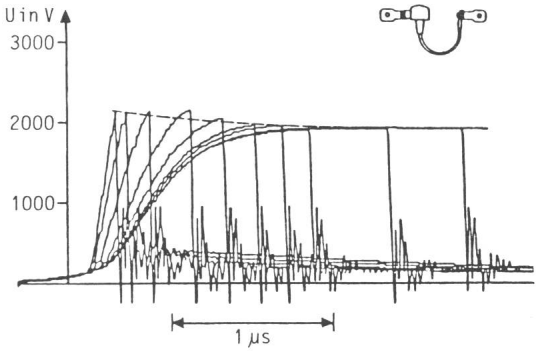


Fig. 15 Stosskennlinie der explosionsgeschützten Trennfunkenstrecke

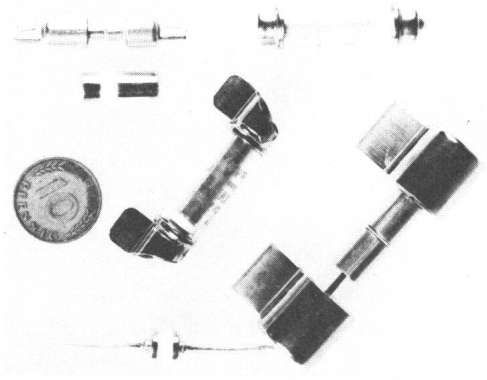


Fig. 16 Bauformen von gasgefüllten Überspannungsableitern

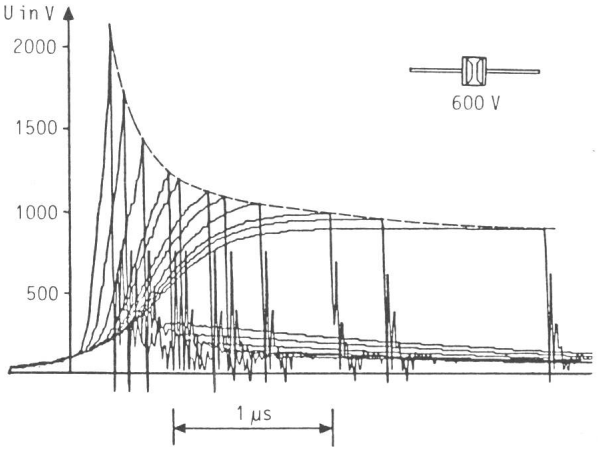


Fig. 17 Stosskennlinie eines gasgefüllten Überspannungsableiters

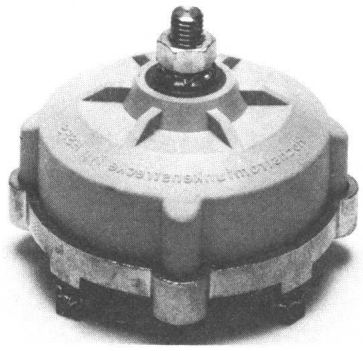


Fig. 18
Hochstromfunkenstrecke
Typ HSFS

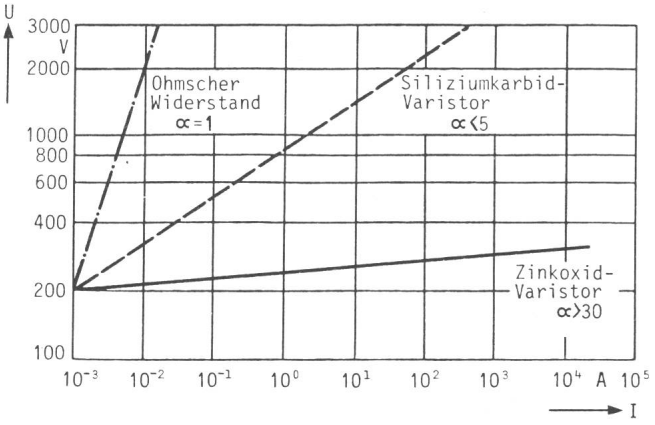


Fig. 19 U/I-Kennlinien spannungsabhängiger Widerstände

Prüfstrom (Fig. 10) getestet. Typ LFS ist eine sog. Löschfunkenstrecke; sie wird vor zu schützenden Geräten jeweils zwischen Netzleiter und Potentialausgleichsschiene geschaltet. Funkenstrecken des Typs LFS können den nach einem Blitzeinschlag aus dem Netz über sie fliessenden Folgestrom löschen. Die Funkenstrecke Typ HSFS wird als Hochstromfunkenstrecke bezeichnet (Fig. 18) und dient bei Direkteinschlägen mit extrem hoher Ladung und besonders grossem Stromquadratimpuls; auch sie wird mit dem Dreikomponenten-Prüfstrom getestet. Mit diesen Funkenstrecken gelingt es, den Netzeingang elektrischer Betriebsstätten auch bei direkten Blitzeinschlägen wirksam vor Überspannungen zu schützen.

6.2 Varistoren

Varistoren sind stark spannungsabhängige Widerstände: $I = k\,U^{\alpha}$. In Figur 19 ist die Spannungsabhängigkeit verschiedener Varistoren dargestellt. Zum Vergleich ist auch die Kennlinie eines ohmschen Widerstandes eingezeichnet worden. Entsprechend dem Grad ihrer Spannungsabhängigkeit und ihres Energieabsorptionsvermögens werden Varistoren im Überspannungsschutzkonzept eingesetzt. So werden z. B. Silizium-Karbid-Varistoren in Reihenschaltung mit Luftfunkenstrecken für Ventilableiter (vgl. Abschnitt 6.3) verwendet, während die Zink-Oxid-Varistoren mit $\alpha > 30$ unmittelbar an die zu schützenden Leitungen angeschlossen werden können. Die Ansprechspannungen von Varistoren («Zenerknick») liegen bei einigen 10 V bis nahe 2000 V bei einer Ansprechzeit von einigen 10 ns.

6.3 Ventilableiter

Der Standardtyp der Bauform 3 enthält eine Luftfunkenstrecke mit einer Ansprechspannung zwischen 1 und 2 kV, bei der der Durchschlag im nahezu homogenen Feldbereich zwischen zwei plattenförmigen Elektroden erfolgt, die sich im Abstand von einigen Zehntelmillimetern befinden. Diese Bauform kann nur Anforderungen erfüllen, die an den Typ I gestellt werden, da bei höheren Beanspruchungen der «eingesperrte» Lichtbogen Verschweissen bzw. starkes Ausschmelzen der Elektroden bewirkt. Ausserdem werden in einer solchen Funkenstrecke grosse dynamische Lichtbogenkräfte entwickelt. Der für die Löschung des Netz-Folgestroms üblicherweise eingesetzte Silizium-Karbid-Varistor ist entsprechend so dimensioniert, dass er den Strombelastungen des Typs I standhält.

Im Normalbetrieb isoliert die Funkenstrecke den Ableiter vom Netz. Trifft jedoch auf den Ableiter eine Überspannung, die so gross ist, dass sie für die zu schützende Verbraucheranlage gefährlich ist, spricht die Funkenstrecke an, und über den Ableiter fliesst ein Stoßstrom: Am nachgeschalteten Verbraucher tritt nur noch die Summe aus Brennspannung der Funkenstrecke und Spannungsfall am Widerstand auf. Diese Restspannung u_r ist infolge der Spannungsabhängigkeit des Widerstandes im Vergleich mit der anlaufenden Überspannung gering.

Figur 20 zeigt die Schutzkennlinie eines modernen Ventilableiters, aus der man erkennt, dass bei einem Stoßstrom (8/20) von 15 kA (dreifacher Nennableitstoßstrom) an den Klemmen des Ableiters eine Restspannung von nur etwa 2,3 kV auftritt. Wird ein in der elektrischen Anlage eingebauter Ventilableiter durch eine Überspannung gezündet, dann fliesst über ihn, ausser dem Stoßstrom, auch ein Folgestrom aus dem Netz. Nach dem Abklingen der Überspannung erhöht sich der Wider-

standswert des Ableiters jedoch wieder, so dass der Folgestrom beim nächsten Netzspannungs-Nulldurchgang von der Funkenstrecke gelöscht werden kann.

Diejenige netzfrequente Spannung (Effektivwert), bis zu der der Ventilableiter nach einem 5-kA-(8/20-)Stoßstrom den Netz-Folgestrom noch löschen kann, wird als Löschspannung des Ableiters bezeichnet. Mit der Löschspannung ist die Verwendbarkeit eines Ableiters vorgegeben: Zum Beispiel kann ein Ableiter mit der Löschspannung 280 V in Netzen eingesetzt werden, in denen die maximale Betriebsspannung 280 V nicht übersteigt; solche Ableiter werden in Wechselstromnetzen von 220/380 V zwischen Aussenleiter und Erde bzw. Nulleiter geschaltet.

Moderne Ventilableiter enthalten eine im Zerstörungsfall automatisch ansprechende Abtrennvorrichtung, so dass eine zusätzliche Vorsicherung überflüssig ist. Figur 21 zeigt einen derartigen Ventilableiter zum Einsatz im Innenraum. Ähnlich einer Niederspannungs-Hochleistungssicherung kann er in ein Unterteil (Grösse 00) gesteckt werden, so dass ein Ableiterwechsel mit Hilfe eines entsprechenden Aufsteckgriffes auch unter anstehender Netzspannung möglich ist.

Werden Unterteile mit angebautem Mikroschalter verwendet, so betätigt der bei Abtrennung des Ableiters im Defektfall herausspringende Stift diesen Schalter, und eine Fernanzeige des nun erforderlichen Ableiterwechsels ist möglich. Für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen können Ventilableiter in druckfest gekapselte Gehäuse (Fig. 22) eingebaut werden [19].

6.4 Feinschutzgeräte

Die bisher vorgestellten Geräte begrenzen Überspannungen auf etwa 1...2 kV. Für elektronische Einrichtungen, wie sie z. B. in Mess-, Steuer- und Regelanlagen für Öl-, Gas-, Wasserversorgungs- und Klimaanlagen oder in Datenverarbeitungsanlagen verwendet werden, sind diese Restüberspannungen aber bei weitem noch zu gross (vgl. Tab. I) und führen zu Beschädigungen und Betriebsstörungen mit oft schwerwiegenden

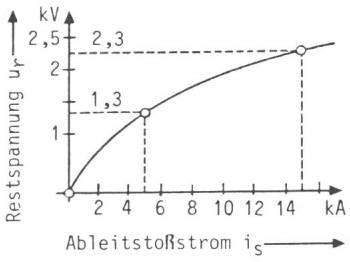


Fig. 20 Schutzkennlinie des Ventilableiters VA 280

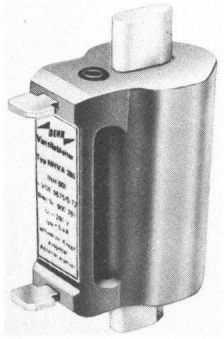
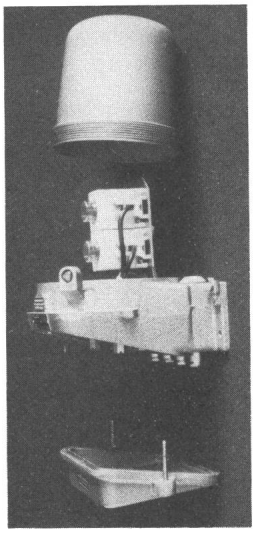


Fig. 21
Ventilableiter für Niederspannungsanlagen Typ NHVA zum Einsetzen in NH-Unterteile (Grösse 00)

Fig. 22
Ventilableiter VA im Gehäuse der Zündschutzart «Druckfeste Kapselung»



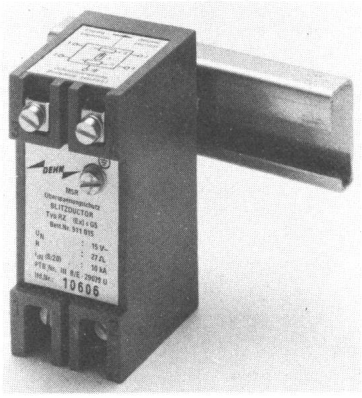


Fig. 23
Überspannungsschutzgerät Blitzductor (R) für Melde-, Steuer- und Regelstromkreise (MSR)

Folgen. Für solche Anwendungsfälle wurden spezielle MSR-Überspannungsschutzgeräte (Fig. 23) entwickelt. Sie setzen hohe Überspannungen auf Werte herab, die für solche elektronischen Einrichtungen ungefährlich sind. Sie sind als Vierpole aufgebaut und begrenzen sowohl Längs- als auch Querspannungen (Fig. 24). Man setzt sie bevorzugt am Ein- und Ausgang von elektronischen Geräten oder an den Enden bzw. im Verlauf von Mess-, Steuer- und Regelleitungen ein. Sie werden nach der Anlagenbetriebsspannung und der Beschaffenheit der MSR-Kreise ausgewählt. Derzeit werden drei Typen von Blitzduktoren gebaut, die sich durch Schaltungs- und Anwendungsmerkmale unterscheiden (Fig. 25).

Typ RZ: Die ohmschen Längswiderstände *R* liegen in Reihe mit den Leitungswiderständen der MSR-Stromkreise. Deshalb kommt dieser Typ nur für Stromkreise in Frage, bei denen eine Widerstandserhöhung zulässig ist, z. B. bei Anlagen mit eingeprägten Strömen. Querspannungen werden auf wenige Volt begrenzt, so dass z. B. Messverstärker wirkungsvoll geschützt werden können.

Typ LZ: Er enthält anstelle der ohmschen Längswiderstände *R* Induktivitäten *L* mit kleinem Gleichstromwiderstand. Er kommt zur Anwendung, wenn eine nennenswerte Widerstandserhöhung nicht zulässig ist, z. B. bei Stromversorgungsleitungen oder Leitungen mit Widerstandsabgleich. Eingangs-Querspannungen von einigen kV werden ebenfalls auf einige V herabgesetzt.

Typ A: Er enthält lediglich Funkenstrecken, die sowohl Längs- als auch Querspannungen gleich stark reduzieren (z. B.

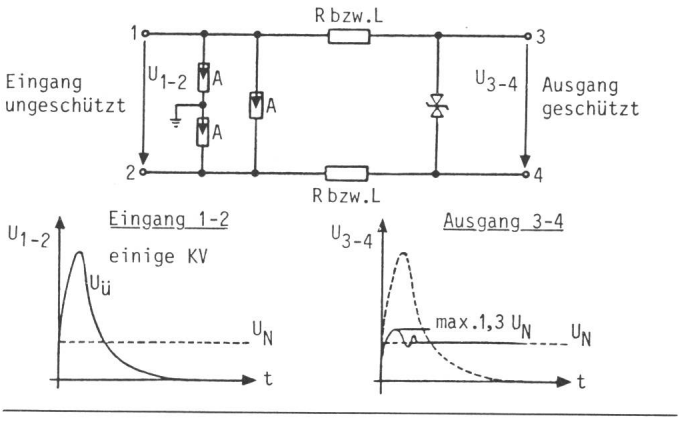


Fig. 24 Prinzipschaltung und Überspannungsbegrenzung eines Blitzductors

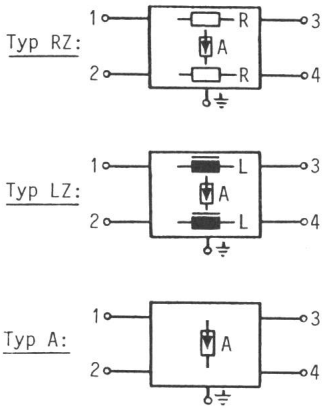


Fig. 25 Blitzductor-Typen

von 6 kV, 1,2/50, am Eingang auf 1,3 kV am Ausgang). Er kann also zum Schutz für Geräte mit einer Stoßspannungsfestigkeit von mindestens 2 kV, z.B. für Grenzwertgeber, Thermoelemente und Potentiometer, verwendet werden.

Alle diese Blitzduktoren sind elektrisch überdimensioniert. Ein durch extreme Überbeanspruchung dennoch auftretender Defekt macht sich durch Kurzschluss innerhalb des Gerätes (Fail-safe-Verhalten) bemerkbar.

Literatur

[1] *O. Egeln:* Blitzschäden durch Überspannungen. ETZ 101(1980)4, S. 227...229.

[2] *F. Wyss:* Welche elektrischen Anlageteile werden bei atmosphärischen Überspannungen am meisten betroffen? EM Elektrotechnik 30(1979)5, S. 101...102.

[3] *A. Gugenbauer:* Tätigkeitsbericht, Schadenstatistik 1979. Linz, Brandverhütungsstelle für Oberösterreich, 1980.

[4] *T.G.P. Brood:* Bericht über infolge Blitzeinschlag verursachte Brände in zwei geschützten Tanks für die Lagerung von brennbaren Flüssigkeiten. 13. Internationale Blitzschutzkonferenz, Venedig 1976, Bericht R-4.5.

[5] *H. Prinz:* Gewitterelektrizität als Gefahr. Bull. SEV/VSE 67(1976)24, S. 1313 bis 1322.

[6] *H.-W. von Thaden:* Tankbrand durch Blitzschlag. Erdöl und Kohle, Erdgas, Petrochemie 19(1966)–, S. 422...424.

[7] *G. Trenkmann* und *D. Naumann:* Auswirkungen von Blitzeinschlägen in einer Chemieanlage mit elektronischem BMSR-System. Chem. Techn. Ztschr. 29(1977)7, S. 407...410.

[8] *H. Neuhaus:* Die Berücksichtigung elektrischer Anlagen im Gebäudeblitzschutz. 13. Internationale Blitzschutzkonferenz, Venedig 1976, Bericht R-3.3.

[9] *K. Berger:* Bericht über die 13. Internationale Blitzschutzkonferenz. Bull. SEV/VSE 67(1976)22, S. 1247...1248.

[10] *P. Hasse:* Schutz von elektronischen Systemen vor Gewitterüberspannungen, Teil I: ETZ 100(1979)23, S. 1335...1340; Teil II: ETZ 100(1979)24, S. 1376 bis 1381.

[11] *P. Hasse* und *J. Wiesinger:* Funkenstrecken für Blitzströme. Anforderungen, Kennwerte, Einsatzgebiete verschiedener Typen. 15. Europäische Blitzschutzkonferenz, Uppsala 1979.

[12] *G. Frühauf:* Erkennung und Beurteilung von Blitzwirkungen. Bull. SEV/VSE 65(1974)26, S. 1903...1908.

[13] *H. Prinz:* Die Blitzentladung in Vierparameterdarstellung. Bull. SEV/VSE 68(1977)12, S. 600...603.

[14] *K. Berger:* Heutiger Stand der Blitzforschung und der Blitzschutztechnik. 15. Europäische Blitzschutzkonferenz, Uppsala 1979.

[15] *K. Berger:* Extreme Blitzströme und Blitzschutz. Bull. SEV/VSE 71(1980)9, S. 460...464.

[16] Parafoudres. Première partie: Parafoudres à résistance variable pour réseaux à courant alternatif. Deuxième édition. Publication de la CEI N° 99-1, 1970.

[17] *J. Wiesinger* und *P. Hasse:* Handbuch für Blitzschutz und Erdung. München, Pflaum-Verlag/Berlin, VDE-Verlag, 1977.

[18] *P. Hasse* und *K.-H.-Gnehm:* Blitzschutzmassnahmen in explosionsgefährdeten Bereichen. Ex. Zeitschrift –(1980)12, S. 12...19.

Adresse des Autors

Dr. Ing. *Peter Hasse,* Firma Dehn + Söhne, D-8430 Neumarkt 1. Vermittelt durch den Schweizer Lizenznehmer: Siegfried Peyer AG, 8832 Wollerau.