Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 78 (1987)

Heft: 23

Artikel: Über das Löschverhalten von Luftstrecken bei Stossspannungsbeanspruchungen

Autor: Biegelmeier, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903945

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 20.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Über das Löschverhalten von Luftstrecken bei Stossspannungsbeanspruchungen

G. Biegelmeier

Nach neuesten Erkenntnissen treten Gewitterüberspannungen nicht nur in Freileitungsnetzen, sondern auch im verkabelten Netz auf. Die Überspannungen wirken dabei praktisch ohne Laufzeiterscheinungen in der gesamten Anlage und können Überschläge bei den Luftstrekken mit Folgeströmen aus dem Netz verursachen. Experimentelle Untersuchungen sind aufschlussreich und dürften für die Technik der Fehlerstromschutzschaltung eine besondere Bedeutung erlangen.

Comme on sait depuis peu de temps, des surtensions dues à la foudre, se présentent non seulement dans des réseaux de lignes aériennes, mais aussi dans des câbles enterrés, ceci pratiquement sans durée de propagation dans toute l'installation. Les surtensions élevées donnent lieu à des claquages dans les distances d'isolement dans l'air suivies de pointes de courant provenant du réseau. Des recherches expérimentales de ces phénomènes ont une importance particulière pour la technique du couplage de sécurité à courant de défaut.

Dieser Aufsatz ist eine erweiterte Vorveröffentlichung eines für die 18. Internationale Blitzschutz-Konferenz (25.–29.4.1988) eingereichten Referates.

Adresse des Autors
Prof. Dr. Ing. *Gottfried Biegelmeier*,
CTI-Cooperative Testing Institute,
Greinergasse 30, A-1195 Wien.

1. Gewitterüberspannungen in Niederspannungsanlagen

Die Ursachen der Überspannungen, die während Gewittern in Niederspannungsanlagen auftreten, sind:

a) direkte Blitzeinschläge in das Mittel- oder Niederspannungsnetz, die durch hohe Stromstärken und Spannungen gekennzeichnet sind. Die Stossspannungen entstehen dabei durch das Abfliessen der Blitzströme über die Netzerdungen oder die Leitungen mit gegebenen Wellenwiderständen.

b) Blitzeinschläge in der Umgebung der Leitungen, die durch elektromagnetische Felder Überspannungen im Netzsystem induzieren oder infolge plötzlicher Feldstärkeänderungen durch Abfliessen der Influenzladungen Wanderwellen verursachen.

c) Schnelle Spannungsänderungen infolge des Ansprechens von Ableitern im Mittelspannungsnetz, die über die Transformatorkapazitäten ins Niederspannungsnetz eingekoppelt werden.

d) Blitzeinschläge in leitfähige Teile, die mit dem Erdungssystem des Niederspannungsnetzes verbunden sind (z. B. Blitzschutzanlagen) und die dadurch verursachten Ausgleichsströme im Erdreich. Dies dürfte die Überspannungen in verkabelten Netzen verursachen.

Man war bisher der Meinung, dass Überspannungen durch Gewitter nur in Freileitungsnetzen von Bedeutung sind. Ein vor kurzem durchgeführter Grossversuch im Bereich der Wiener Stadtwerke-Elektrizitätswerke (WEW) hat aber bewiesen, dass auch in einem grossen verkabelten Netz im Stadtgebiet Gewitter beachtliche Überspannungen verursachen können. Es lag nahe zu vermuten, dass durch die hohen Blitzströme der Direkteinschläge im vermaschten Erdungssystem eines Stadtgebietes Ausgleichsströme entstehen, deren Spannungsabfälle über die Betriebserdungen des Neutralleiters im Versorgungsnetz als kurzzeitige Überspannungen wirksam werden. Dies ist nun als bewiesen anzusehen; die Ergebnisse des Wiener Versuches sind in der Folge kurz beschrieben.

Im August 1986 tobten über Wien zwei schwere Gewitter. Der Anlass wurde benützt, um 1988 Anlagen im Versorgungsbereich der WEW zu überprüfen. Es sollte festgestellt werden, wieviele FI-Schutzschalter durch Gewitterüberspannungen ausgelöst haben und wieviele FI-Schutzschalter noch mit der Prüftaste ausgelöst werden konnten. Besonders interessant war dabei, dass 1365 Anlagen im verkabelten Netz liegen und nur 623 Anlagen in den Randbezirken über Freileitungen angespeist werden. Bei den beiden Gewittern lösten im Kabelnetz in 76 Anlagen und im Freileitungsnetz in 102 Anlagen die FI-Schutzschalter aus. Damit ist bewiesen, dass es auch im verkabelten Netz bei Gewittern zu Fehlauslösungen von FI-Schutzschaltern kommt.

Es handelt sich um reine Fehlauslösungen, denn ein Überspannungsschutz wird dadurch, wie oft fälschlich geglaubt, in keiner Weise erreicht. Die Überspannungen spielen sich ja im µs-Bereich ab, während die FI-Schutzschalter, die dadurch ausgelöst werden, erst nach 10 bis 30 ms abschalten, also nachdem die Überspannungen längst abgeklungen sind. Ein wirksamer Überspannungsschutz kann nur durch Überspannungsableiter erzielt werden.

Die Auslösekontrolle wurde nur in Anlagen durchgeführt, bei denen der Anlagenbesitzer dafür seine Zustimmung gab. Es waren dies 1865 Anlagen, und es wurden nur 15 FI-Schutzschalter gefunden, die beim Drücken der Prüftaste versagten, das sind 0,8%.

Da die Neutralleiter der Anlagen

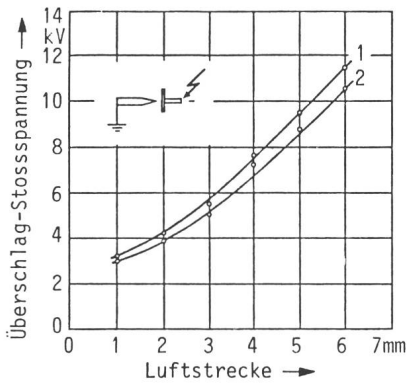
nach dem FI-Schutzschalter ebenso von Erde isoliert sind wie die Aussenleiter, können die Fehlauslösungen nur durch Überspannungen entstanden sein. Überspannungsableiter sind im Wiener Stadtgebiet in den Hausinstallationen praktisch nicht installiert.

Den folgenden Betrachtungen sollen Niederspannungs-Verbraucheranlagen zu Grunde gelegt werden, die durch Freileitungen versorgt werden. In derartigen Freileitungsverteilungsnetzen entstehen durch Gewitter Überspannungen, deren elektrische Kenndaten in Tabelle I wiedergegeben sind.

Da die Niederspannungsfreileitungen meist auf Holzmasten verlegt werden, sind ihre Stehstossspannungen gegen Erde sehr hoch [2], und die Überspannungsbegrenzung erfolgt einerseits durch die im Verteilungsnetz montierten Überspannungsableiter und Betriebserdungen des neutralen Leiters und durch Überschläge in den Anlagen, deren Luftstrecken im mm-Bereich liegen [3], sowie durch Potentialausgleich. Die Stehstossspannungen der Maste von Freileitungen sind aus Tabelle II ersichtlich.

Rusk hat schon 1958 bewiesen, dass diese Überschläge häufiger sind, als meist angenommen wird [4].

Die Luftstrecken in den Anlagen stellen also eine Art natürlicher Überspannungsableiter dar, denn sonst würden sich die Überspannungen nur wenig abgeschwächt und ohne Laufzeiterscheinungen in den Anlagen ausbreiten. Wie Messungen in den Anlagen und im Laborversuch gezeigt haben, verringern sich die Überspannungen während des Ausbreitens in der Installation in ihrer Höhe nicht wesentlich, ausser wenn dies durch Ableiter in Kaskadenschaltung erzwungen wird [5; 6; 7]. Es ist nützlich, sich in diesem Zusammenhang an die Überschlag-Stossspannungen einer Spitze-Platte-Funkenstrecke zu erinnern, wie sie schon oft experimentell bestimmt worden sind.



Figur 1 Überschlag-Stossspannungen einer Spitze-Platte-Funkenstrecke in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand nach [8]

1 100% Überschlag-Stossspannung 1/50 µs
2 0% Überschlag-Stossspannung 1/50 µs (Steh-Stossspannung)

Figur 1 zeigt die Versuchsergebnisse von Überschlagsmessungen an einer Spitze-Platte-Funkenstrecke mit einer Stossspannung der Wellenform 1/50 µs, die der Arbeit von *Sollergren* und *Hyltén-Cavallius* [8] entnommen ist. Sie weist bereits auf die oben erwähnte «natürliche» Überspannungsbegrenzung durch die Luftstrecken in elektrischen Anlagen hin.

Man erkennt, dass für eine 3-mm-Luftstrecke die Überschlag-Stossspannungen zwischen 5 und 6 kV liegen. Um Verhältnisse nachzuahmen, wie sie in der Praxis auftreten, wurde mit der im nächsten Abschnitt beschriebenen Messschaltung die Überschlag-Stossspannung einer Funkenstrecke gemessen, die aus einem Kupferdraht 1,5 mm² gegen eine Kupferplatte bestand. Dabei war der Kupferdraht mit einer gewöhnlichen Installateurzange abgezwickt worden. Die Werte für die Überschlag-Stossspannungen dieser Anordnung sind in Tabelle III wiedergegeben.

Bei einer Luftstrecke von 3 mm führten 6 kV noch häufig zu Überschlägen. Da ein Wert von 3 mm als Luftstrecke für viele der üblichen elektrischen Betriebsmittel in den Normen vorgeschrieben ist, kann man verstehen, wieso gerade 6 kV für normale Drehstromnetze 220/380 V oder 240/415 V für den Maximalwert der auftretenden Überspannung am Hausanschluss (Überspannungskategorie IV nach IEC) vorgeschlagen und angenommen worden ist. Man muss sich aber darüber im klaren sein, dass dies nicht durch maximal mögliche Überspannungen im Verteilungsnetz, sondern eben durch die Überspannungsbegrenzung infolge von Überschlägen in der Anlage zum Erfahrungswert geworden ist.

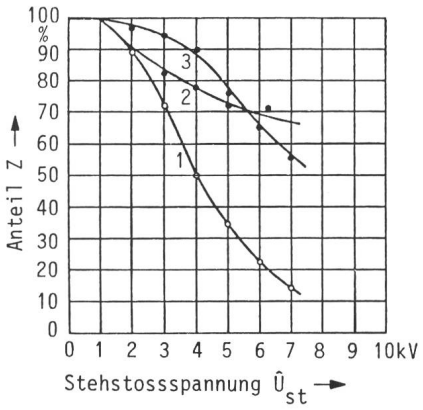
Das Stossspannungsverhalten von Niederspannungsanlagen zeigt Figur 2, wobei mit einem Stossspannungs-Prüfgenerator mit der Wellenform 1,2/50 µs geprüft wurde [2].

	Spannungs-Parameter		Strom-Parameter			
	Scheitelwert (kV)	Steilheit (kV/µs)	Scheitelwert (kA)	Steilheit (A/s)	Ladung (As)	Stromquadrat Impuls (A^2s)
	einige	einige	einige	—	kleiner	kleiner
Ferneinschläge	10	10	0,1		1	10^3
Naheinschläge	—	—	150	$80 \cdot 10^9$	50	10^6

Tabelle I Spannungs- und Stromparameter bei Fern- und Naheinschlägen nach [1]

Tabelle II Stehstossspannungen von Netzen nach [2]

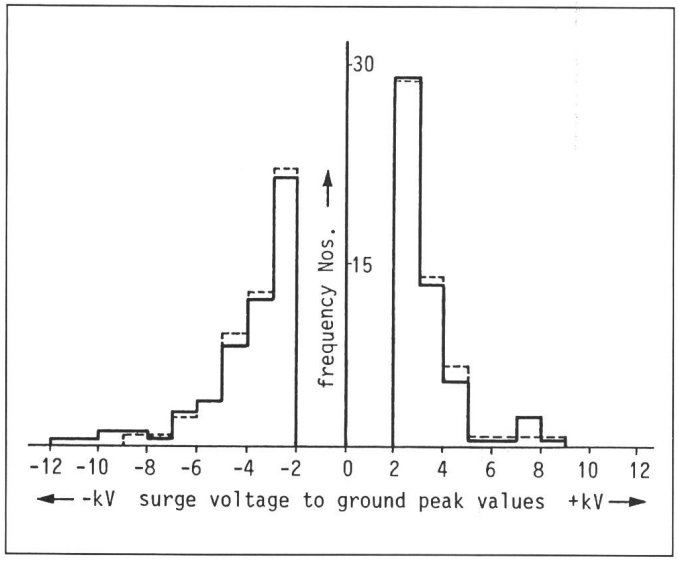
	Stehstossspannung (kV)
Eisenmastleitung	80
Holzmastleitung mit geerdetem Neutralleiter	400
Holzmastleitung mit Eisenanker	300
Holzmastleitung ohne geerdeten Leiter	2000



Figur 2 Stossspannungsverhalten von Niederspannungsanlagen nach [2]

ermittelt in (1) Dresden (1965, 1966), (2) Dänemark und (3) Schweden

Z ist der Anteil der Hausinstallationsgruppen, deren Steh-Stossspannung den Abszissenwert übersteigt



Figur 3
Messungen von Überspannungen in Niederspannungsinstallationen in Frankreich in den Jahren 1973 bis 1975, die durch Gewitter verursacht wurden [9]

Messungen zwischen Aussenleiter und Anlagenerder.

———

erste Messserie mit 183 Registrierungen

------

zweite Messserie mit 150 Registrierungen

In den Jahren 1973 bis 1975 wurden auch in Frankreich umfangreiche Überspannungsmessungen in Verbraucheranlagen durchgeführt. Figur 3 zeigt die Ergebnisse von zwei Versuchsserien, wobei 183 Registrierungen bzw. 150 Registrierungen durchgeführt worden sind. Die Registrierung der Überspannungen erfolgte in der Verbraucheranlage zwischen den aktiven Teilen und dem Anlagenerder. Man erkennt klar, dass die Überspannungen zwischen 2 und 5 kV vorherrschen, also Werte, die den in Niederspannungsinstallationen üblichen Luftstrecken zugeordnet werden können [9]. Man meinte allerdings damals noch, dass es sich um Ladeerscheinungen der Erdkapazitäten in den Anlagen handeln würde und übersah die wichtige Rolle der Überspannungsbegrenzung durch die Luftstrecken.

Jüngste japanische Messungen sind in Figur 4 wiedergegeben, und auch hier zeigt sich, dass 90% der gemessenen Überspannungen in einem Bereich liegen, der den Luftstrecken der Anlagenpraxis für Spannungen bis 250 V gegen Erde entspricht.

Reine Ladevorgänge der Erdkapazitäten der Anlagen spielen für die Überspannungsbegrenzung wegen der geringen Erdkapazitäten der Anlagen keine Rolle. Man erkennt dies, wenn man z. B. für indirekte Blitzschläge für die Überspannungswelle eine Ladungsmenge von 0,5 As annimmt (Tabelle I). Mit einer Erdkapazität von 100 nF ergibt sich die Ladespannung, selbst wenn man die Ladungsmenge auf 100 Anlagen aufteilt (5 mAs pro Anlage), zu

$$U = Q/C = 5\ \text{mAs}/100\ \text{nF} = 50\ \text{kV}$$

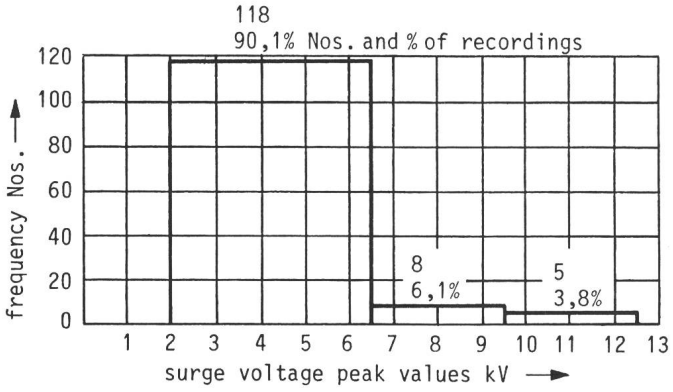
also wesentlich höher als die möglichen Stehstossspannungen in einer Niederspannungsanlage.

In diesem Zusammenhang sollen zum Verständnis der Ausbreitung von Überspannungen in den üblichen Niederspannungsinstallationen bedeutsame Versuchsergebnisse von *Martzloff* besonders erwähnt werden [5]. Figur 5 zeigt die Ausbreitung einer Stosswelle 1,2/50 µs, 6 kV Scheitelwert (Leerlaufspannung des Stossgenerators, Haefely P6R) entlang einer 25 m langen Leitung in einem leitfähigen Installationsrohr verlegt. Das Ergebnis gilt auch für andere Verlegungsarten, z. B. für Mantelleitungen. Man erkennt, dass die Stossspannung praktisch ohne Laufzeiterscheinung am Anfang und am Ende der Leitung auftritt. Sind in der Anlage Verbraucher eingeschaltet oder Verteilungen vorhanden, dann treten durch Reflexionen die verschiedenartigsten Formen von Stossspannung und Stossstrom auf. Immer, wenn durch Belastungen Stossströme fliessen, wird durch die Spannungsabfälle im Netz und in der Anlage eine Absenkung der Leerlaufscheitelwerte der Überspannungen auftreten.

Figur 6 zeigt die Form der registrierten Stossspannung am Anfang einer 10 m langen Leitung, von der aus vier Endstromkreise, ebenfalls mit 10 m Länge, versorgt werden. Am Ende eines Endstromkreises wurde ein Kurzschluss simuliert. Auch hier war

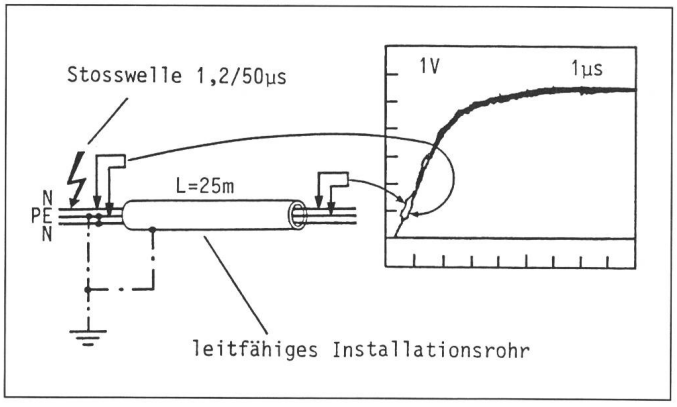
Figur 4
Messungen von Überspannungen in japanischen Anlagen

131 Registrierungen zwischen Aussenleiter und Anlagenerder



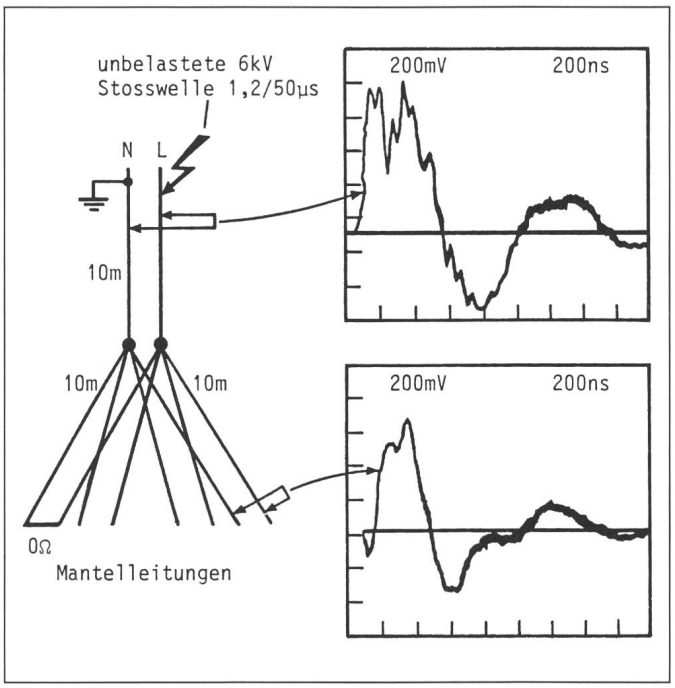
Figur 5
Ausbreitung einer Stossspannungswelle (Leerlaufspannung 1,2/50 µs, 6 kV) entlang einer 25 m langen Leitung in metallenem Installationsrohr

Die Stossspannung tritt praktisch gleichzeitig ohne Laufzeiterscheinung am Anfang und am Ende der Leitung auf (Spannungsteiler 1:1000)



die Wellenform des Stossgenerators im Leerlauf 1,2/50 µs, 6 kV. Durch den Stossstrom und den inneren Widerstand des Generators wird die Spannung stark abgesenkt, tritt aber in der Anlage als gedämpfte Schwingung am Ende der offenen Endstromkreise und am Anfang der Speiseleitung mit nur wenig von einander verschiedenen Scheitelwerten auf.

Weitere Versuche wurden auch mit längeren Leitungen (225 m in metallenem Installationsrohr und 75 m mit einer Mantelleitung) mit 200-ns- und 2-µs-Pulsen und den Stosswellen 1,2/50 µs und der Ringwelle 0,5 µs-100 kHz durchgeführt, die ebenfalls zeigen, dass im allgemeinen nicht mit einer Spannungsabsenkung am Ende offener Stromkreise gerechnet werden kann [6].



Figur 6
Ausbreitung einer Stossspannungswelle entlang einer 10 m langen Mantelleitung mit vier 10 m langen Mantelleitungen als Endstromkreise.
Kurzschluss eines Endstromkreises. Spannungsabsenkung und starke Verzerrung der Kurvenform durch den Spannungsabfall im Stossgenerator und durch Reflexionen im Verzweigungspunkt. Trotzdem Überspannungen am Anfang und am Ende der Anlage nur wenig voneinander verschieden (Spannungsteiler 1:1000)

2. Stossströme und Netzfolgeströme bei Gewitterüberspannungen

Aus dem vorher Gesagten ergibt sich für den Überspannungsverlauf in einer Niederspannungsanlage ein klares Bild. Der Spannungsanstieg erfolgt in der gesamten Anlage vom Hausanschluss bis zur letzten Steckdose gleichartig, infolge der relativ zur Anstiegszeit der Spannung geringen Ausbreitungsdauer des elektromagnetischen Vorganges in der Installation mit begrenzten Leitungslängen (einige 10 m), dies bis der Überschlag an der schwächsten Stelle erfolgt oder die Überspannungsableiter ansprechen. Während des Spannungsanstieges beginnt der Ladestrom der Leitungskapazitäten zu fliessen, und zwar wegen der im Stromkreis vorhandenen Induktivitäten mit geringerer Steilheit als die Stossspannung. Nach dem Überschlag oder dem Ansprechen der Ableiter erhöht sich der Stossstrom sprungartig und geht nach der Entladung der Stossenergie auf Null zurück.

Im Nachfolgenden werden nur mehr die Überschläge der Luftstrecken untersucht, die Koordinierung der Überspannungskategorien durch Ableiter fällt nicht in den Rahmen dieser Arbeit [10]. Sie ist, soweit versucht wird, die Überspannungskategorien bestimmten Installationsabschnitten zuzuordnen, auch sehr problematisch [11; 12].

Die beschriebene Beanspruchung durch Überspannungen bildet sich voll in Verteilungsnetzen aus, deren Neutralleiter nur in der Transformatorenstation geerdet ist und in denen nur wenige Überspannungsableiter installiert sind. Sind im gesamten Verteilungsnetz die Neutralleiter oder PEN-Leiter direkt geerdet und am letzten Mast vor den Verbraucheranlagen Überspannungsableiter installiert, dann werden die Überspannungen stark herabgesetzt. Eine weitere Verbesserung kann man in den Verbraucheranlagen erreichen, wenn der Schutzleiter, wie bei der Nullung, leitend mit dem PEN-Leiter verbunden ist. Hier wirken dann die Erdungen in der Verbraucheranlage wie ein Faradayischer Käfig und setzen dadurch die Spannungsbeanspruchungen zwischen den aktiven Teilen und dem Schutzleiter oder anderen geerdeten Teilen weiter herab. Aber auch in nicht genullten Verbraucheranlagen werden die Überspannungen reduziert, wenn die Anlagenerder mit den Neutralleitererdungen galvanisch gekoppelt sind, das heisst, wenn sich die Spannungstrichter gegenseitig beeinflussen. Dies ist allerdings theoretisch wegen der Gefahr von Spannungsverschleppungen nicht zulässig.

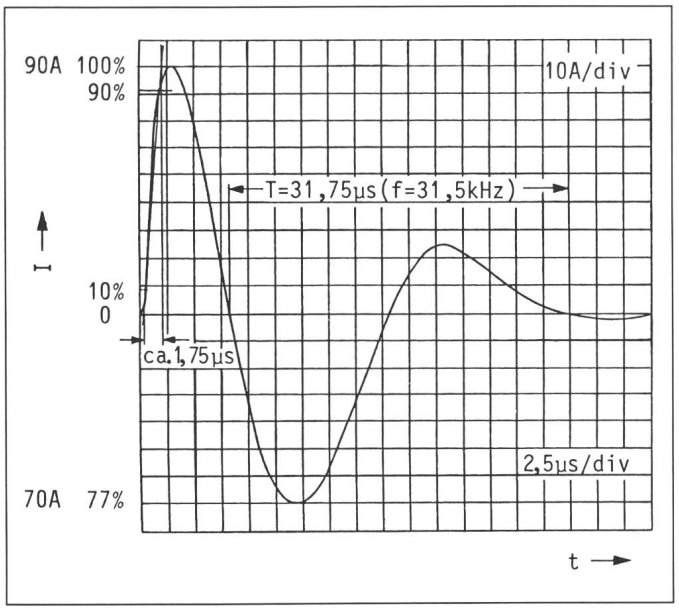
Die durch Überspannungen in Niederspannungsanlagen verursachten Stossströme können also in zwei Gruppen unterteilt werden:

a) Ladeströme der Anlagenkapazitäten gegen Erde,
b) Fehlerströme gegen Erde, die nach dem Überschlag von Luftstrecken als Stossströme fliessen und meist von Folgeströmen aus dem Netz begleitet werden.

2.1 Ladeströme der Anlagenkapazitäten gegen Erde

Sie sind von untergeordneter Bedeutung, weil sie in bezug auf den Scheitelwert nach dem Überschlag der Luftstrecke gegenüber dem Stossstrom, der über die Fehlerstelle fliesst, vernachlässigt werden können, und in bezug auf die Dauer verglichen mit dem Netzfolgestrom, der einige ms fliesst, nur sehr kurz wirksam sind (einige 10 µs).

Die Wahrscheinlichkeit von Überschlägen in den Anlagen bei indirekten Blitzeinwirkungen auf das Verteilungsnetz kann verringert werden, wenn im Verteilungsnetz auf dem letzten Mast vor der Anlage oder in der Anlage Überspannungsableiter montiert werden und der Schutzleiter der Anlage mit dem direkt geerdeten Neutralleiter über den Anlagenerder galvanisch gekoppelt bzw. mit dem PEN-Leiter direkt leitend verbunden ist. Jedenfalls treten bis zum Überschlag infolge der Anlagenkapazitäten gegen Erde Ausgleichsströme in Form gedämpfter Schwingungen mit Frequenzen von einigen 10 kHz auf, die durch die Netzimpedanzen und die Leitungsimpedanzen in der Verbraucheranlage begrenzt werden. Diesbezügliche



Figur 7
Ladestrom einer Niederspannungsanlage ohne Überschlag durch eine Stossspannungswelle (Leerlaufspannung 4 kV, Wellenform 1,2/50 µs), Erdkapazität 100 nF pro Leiter, Netzinduktivität 400 µH pro Netzleiter nach (13)
Scheitelwert des Stossstromes 90 A, Frequenz der gedämpften Schwingung 31,5 kHz

Rechnungen und Messungen ergeben Scheitelwerte von einigen 10 A [9] bis zu etwa 200 A [13], wobei die Gesamtdauer des Vorganges unter 0,1 ms liegt.

Figur 7 zeigt einen derartigen Ladestromstoss in einer Anlage mit 100 nF pro Leiter Erdkapazität und 400 µH Induktivität jedes Leiters der Netzleitung, wenn mit einer Leerlaufspannung von 4 kV (Wellenform 1,2/50 µs) gestossen wird.

2.2 Überschläge von Luftstrecken und Netzfolgeströme

Wenn keine ausreichende Absenkung der Überspannung durch die Neutralleitererdungen, Überspannungsableiter oder den Potentialausgleich erfolgt, kommt es in der Anlage zu Überschlägen bei den Luftstrecken und damit zu einer weiteren «natürlichen» Überspannungsbegrenzung. Dies ist bei starken indirekten Blitzeinwirkungen und vor allem bei direkten Einschlägen in das Verteilungsnetz immer der Fall. Direkte Blitzeinschläge in das Gebäude der Anlage oder in seine Blitzschutzanlage können ebenfalls zum Überschlag oder sogar zur Zerstörung der Anlage führen.

Diese Überschläge sind allen Praktikern bekannt und haben stattgefunden, seit Freileitungen verwendet wurden, also seit Jahrzehnten. Trotzdem führen sie nur selten zum Ansprechen der Überstromschutzorgane, aber häufig zum Fehlauslösen der Fehlerstromschutzschalter üblicher Bauform. Auch dies ist seit längerem bekannt [14].

Ausser einigen tastenden Untersuchungen sind aber über diese Erscheinungen keine Veröffentlichungen bekannt geworden, obwohl es klar ist, dass diese Überschläge zu Netzfolgeströmen führen müssen. Es war also notwendig, folgende Fragen zu klären:

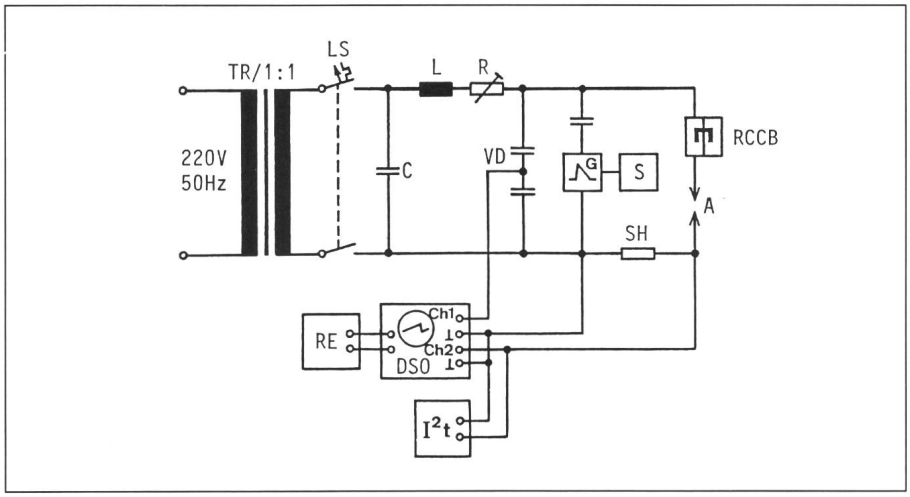
a) Wann führen Überschläge bei Luftstrecken infolge von Stossspannungen zu Netzfolgeströmen?
b) Welche Abhängigkeit besteht von der Phasenlage der Netzspannung?
c) Welche Stromstärken haben diese Netzfolgeströme und wie lange fliessen sie?

Mit den nachfolgend beschriebenen Forschungsarbeiten wurden diese Fragen geklärt, obwohl wegen der begrenzten Zeit und den geringen finanziellen Mitteln vielleicht nicht immer mit der wünschenswerten wissenschaftlichen Genauigkeit gearbeitet werden konnte.

3. Experimentelle Untersuchungen über das Löschverhalten von Luftstrecken

3.1 Schaltung und Arbeitsprogramm

Die Versuche wurden mit einer Schaltung nach Figur 8 durchgeführt. Als Funkenstrecke wurde zuerst eine Kugelfunkenstrecke (Stahlkugel 20 mm Durchmesser) verwendet, mit der in der ersten Versuchsreihe ohne



Figur 8 Versuchsschaltung zur Untersuchung von Netzfolgeströmen bei Stossspannungs-Beanspruchungen von Luftstrecken

TR	Trenntransformator 220/220 V, 104 kVA
LS	Leitungsschutzschalter Nennstrom 16 A, Kennlinie L
C, L	Filter (Tiefpass), 5 µF, ca. 100 µH (Luftinduktivität)
R	Einstellbarer Widerstand
VD	Hochspannungsteiler (voltage divider) 1000:1
G	Stossspannungsgenerator (Haefely PU 12)
A	Funkenstrecke (air gap)
SH	Messshunt 100 mOhm oder 4 mOhm
DSO	Digitalspeicheroszilloskop (Gould OS 4035)
$I^2 t$	Ampèrequadrat-Sekunden-Messgerät
RE	I-t-Recorder
S	Synchronschalter
RCCB	Fehlerstromschutzschalter (übliche Bauform ‹G› stossstromfest 800 A, 8/20 µ, oder selektive Bauform ‹S›)

anliegende Netzspannung die 50%- und 100%-Überschlag-Stossspannung 1,2/50 µs für die nach IEC-Publ. 664 für die Überspannungskategorie I (1500 V) und II (2500 V) vorgeschriebenen Luftstrecken (umgerechnet auf 500 müM: 0,35 mm bzw. 0,71 mm) und für eine Luftstrecke von 1 mm bestimmt wurde. Danach wurden die gleichen Messungen mit der früher beschriebenen Spitze–Platte-Funkenstrecke (Kupferdraht 1,5 mm²–Kupferplatte) mit einem Abstand von 1 mm und 2 mm durchgeführt. Ebenso für eine ordnungsgemäss installierte Schutzkontaktsteckdose und einen Schutzkontaktstecker zwischen den aktiven Teilen und dem Schutzleiteranschluss.

Nach dem Einschalten der Netzspannung von 220 V, 50 Hz, wurden mit dem Widerstand R in der Fehlerschleife Fehlerströme von etwa 1 A bis 120 A (Scheitelwerte) eingestellt, wobei noch ein Leitungsschutzschalter, Nennstrom 16 A, Kennlinie L in Serie geschaltet war, der bei einem Scheitelwert von 120 A bereits elektromagnetisch auslöste. Der Einschaltzeitpunkt der Stossspannung wurde mittels eines Synchronschalters so auf der Halbwelle der Netzspannung gewählt, dass der maximale I^2t-Wert des Netzfolgestromes erreicht wurde. Mit dieser Einstellung wurde dann das Löschverhalten des Netzfolgestromes untersucht. Ausserdem wurde wahlweise ein Fehlerstromschutzschalter üblicher Bauform (G) in die Fehlerschleife eingeschaltet, der bis zu einem Scheitelwert von 800 A der Wellenform 8/20 µs stossstromfest war, oder ein selektiver Fehlerstromschutzschalter der Bauform S (verzögerte Auslösezeit bei $I_f \geqq 5 \cdot I_{\Delta N}$, $t \geqq 45$ ms), um festzustellen, ob die Schalter durch den Netzfolgestrom ausgelöst werden.

Für jede Anordnung wurde weiter bei einer Stromstärke von etwa 10 A Effektivwert die Wahrscheinlichkeit des Entstehens eines Netzfolgestromes bei einem Einschaltzeitpunkt der Stossspannung von 0° bis 180°el auf der Halbwelle der Netzspannung ermittelt.

Bei allen Versuchen mit Netzspannung wurde mit einer Stossspannung von 6 kV, 1,2/50 µs gearbeitet, da dies der für ein 220/380 V-Netz für die Überspannungskategorie IV nach IEC 664 vorgeschriebene Spannungswert ist, oder mit der 100%-Überschlag-Stossspannung, wenn 6 kV für den Überschlag nicht ausreichten.

Tabelle III Überschlag-Stossspannungen verschiedener Luftstrecken

Elektroden	Luftstrecke (mm)	Überschlag-Stossspannung (kV)	
		50%	100%
Kugelfunkenstrecke 20 mm ∅	0,35	2,75	2,9
	0,71	5,25	5,75
	1,00	8,00	9,25
Funkenstrecke Spitze–Platte	1,00	2,85	3,75
	2,00	4,35	4,75
Schutzkontakt-Steckdose L + N gegen PE	4,00	7,75	8,5
Schutzkontakt-Stecker L + N gegen PE	3,00	8,25	9,00

3.2 Ermittlung der Überschlag-Stossspannung

Die 50%- und 100%-Überschlag-Stossspannungen wurden mit je 100 Stössen ermittelt, wobei zur Verringerung des Elektrodenabbrandes der Generatorstrom mit einem stossspannungsfesten 6,8-kOhm-Widerstand begrenzt wurde. Die Wellenform 1,2/50 µs der Stossspannung wurde im Leerlauf eingestellt. Es ergaben sich die in Tabelle III wiedergegebenen Werte.

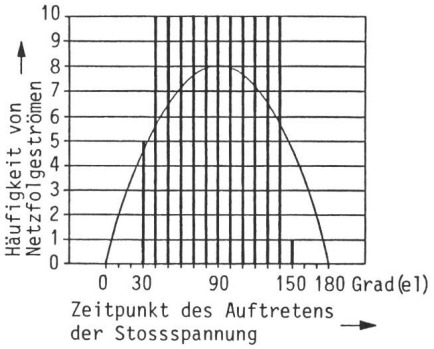
Es wurde bereits erwähnt, dass bei der Funkenstrecke Spitze–Platte für eine Luftstrecke von 3 mm (bei Betriebsmitteln häufig vorgeschriebener Normwert) festgestellt wurde, dass ein Scheitelwert der Stossspannung von 6 kV häufig zu Überschlägen führt. Bei 4 mm Luftstrecke liegt der Wert bei 8 kV. Die beim Schutzkontaktstecker, trotz einer Luftstrecke von 3 mm, gemessenen hohen Überschlag-Stossspannungen dürften auf eine günstige Feldform zurückzuführen sein.

3.3 Häufigkeitsverteilung der Netzfolgeströme

Die Prüfung in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Auftretens der Stossspannung innerhalb einer Halbwelle der Netzspannung wurde mit allen Elektrodenanordnungen und mit allen Abständen mit je 10 Stössen 6 kV oder mit der 100%-Überschlag-Stossspannung durchgeführt, und zwar im Abstand von 10°el der Spannungshalbwelle. Der Folgestrom war auf etwa 10 A eingestellt. Die Häufigkeitsverteilung war bei allen Elektrodenanordnungen ähnlich und ist für die Kugelfunkenstrecke (Abstand 0,71 mm) in Figur 9 dargestellt. Man erkennt, dass über einen weiten Bereich der Halbwelle der Netzspannung Folgeströme auftreten, so dass mit einer Wahrscheinlichkeit von über 50% bei Überschlägen von Luftstrecken in elektrischen Anlagen mit Folgeströmen aus dem Netz gerechnet werden muss.

3.4 Untersuchungen über das Löschverhalten der Folgeströme

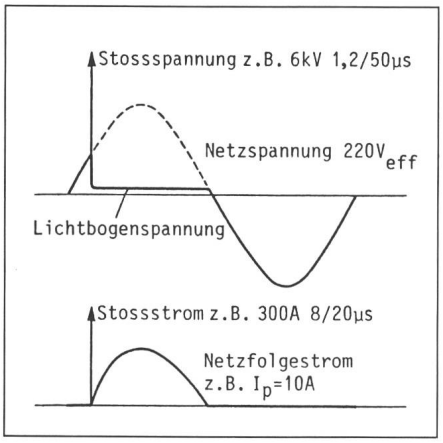
Mit den gewonnenen Erkenntnissen kann der physikalische Ablauf beim Überschlag von Luftstrecken bei Stossbeanspruchungen und des Folgestromes aus dem Netz erklärt werden.



Figur 9 Häufigkeitsverteilung von Netzfolgeströmen in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Auftretens einer Stossspannung 6 kV, 1,2/50 µs innerhalb einer Halbwelle der Netzspannung

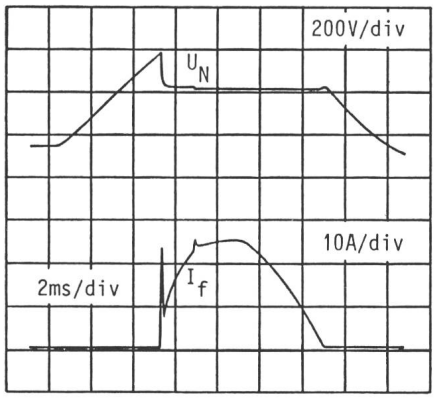
Kugelfunkenstrecke, Abstand 0,71 mm, Netzfolgestrom auf ca. 10 A Effektivwert eingestellt, Netzspannung 220 V, 50 Hz.
Anzahl n von 10 Stössen, die zum Folgestrom führen

Nach erfolgtem Überschlag führt die Stosswelle zunächst zu einem Stossstrom (typisch dafür ist die Wellenform 8/20 µs), dessen Höhe von der Höhe der Stossspannung, der Stossenergie und den Stossimpedanzen abhängt. Sein Scheitelwert kann von wenigen A bis zu einigen 1000 A gehen. Nach der Stossentladung, die einige 10 µs dauert, ist, abhängig vom Momentanwert der Netzspannung zum Zeitpunkt des Auftretens der Stossspannung, der Vorgang entweder beendet, oder es beginnt der Netzfolgestrom zur Erde zu fliessen (Fig. 10). Er wird durch die Impedanzen der Erdfehlerschleife und die Netzspannung gegen Erde vermindert, um die Lichtbogenspannung der Luftstrecke, bestimmt. Da die Erdfehlerschleife meist überwiegend ohmisch ist, geht der Netzfolgestrom mit der Netzspannung durch Null und erlischt dann praktisch immer.



Figur 10 Prinzipielle Darstellung des Überschlags einer Luftstrecke durch eine Stossspannung mit Folgestrom aus dem Netz

Löschung des Folgestromes im Nulldurchgang der Netzspannung



Figur 11 Oszillogramm eines Versuches mit der Spitze-Platte-Funkenstrecke, Luftstrecke 1 mm, Löschung des Folgestromes im Spannungsnulldurchgang, Stossspannung 6 kV, 1,2/50 µs

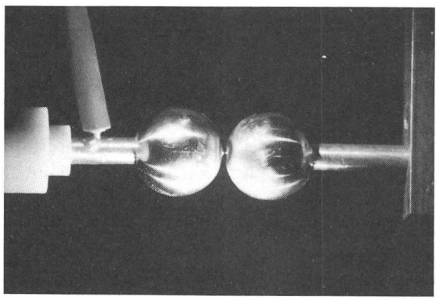
Netzspannung 228 V, Widerstand der Fehlerschleife 11 Ohm, Folgestrom ca. 18 A (Effektivwert), Lichtbogenspannung ca. 30 V

Der Anlagenerder, dessen Erdungswiderstand häufig in der Grössenordnung von wenigen Ohm liegt, begrenzt den Netzfolgestrom bei der Fehlerstromschutzschaltung auf einige 10 A, so dass die Überstromschutzeinrichtungen nicht ansprechen. Selektive Fehlerstromschutzschalter sprechen wegen der kurzen Stromflussdauer (unter 10 ms) ebenfalls nicht an, Fehlerstromschutzschalter üblicher Bauform (Bauform G) lösen aus, ohne dass es notwendig wäre, auch wenn sie mit der Wellenform 8/20 µs geprüft, eine hohe Stossstromfestigkeit haben (bis zu einigen 1000 A Scheitelwert). Bei der Nullung ist die Fehlerschleife niederohmig, so dass in der Regel die Überstromschutzeinrichtungen ansprechen, ebenso die Fehlerstromschutzschalter üblicher Bauform, nicht dagegen die selektiven FI-Schutzschalter. Das heisst, dass in diesem Falle nur der Stromkreis weggeschaltet wird, in dem der Überschlag aufgetreten ist, wenn zentral für den Brandschutz ein selektiver Fehlerstromschutzschalter montiert ist.

In sehr seltenen Fällen bildet das verdampfte Elektrodenmaterial im homogenen Feld und bei sehr kleinen Luftstrecken eine semimetallische Brücke zwischen den Elektroden. Dann löscht der Folgestrom nicht nach der ersten Halbwelle und stellt damit eine Brandgefahr dar. In diesen Fällen schaltet der selektive Fehlerstromschutzschalter aus und stellt damit einen nicht hoch genug zu bewertenden Brandschutz für die Anlage dar.

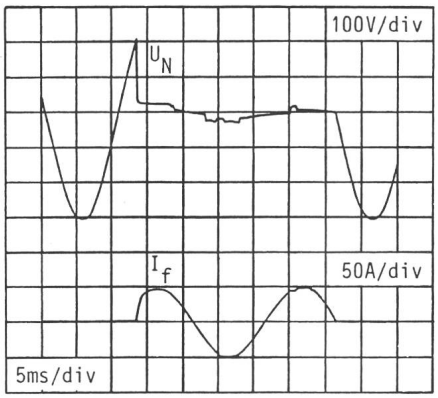
Die durchgeführten Versuche haben die obige Darstellung voll bestätigt. Die Versuche wurden mit allen Elektrodenanordnungen und Luftstrecken nach Tabelle III durchgeführt. Jede Versuchsreihe bestand aus Prüfserien mit folgenden Widerständen der Fehlerschleife: 220, 44, 22, 11, 4.4, 2.2 und 1.83 Ohm. Nur für die Steckdose und den Stecker wurden die Reihen mit 2.2 und 1.83 Ohm weggelassen, da die Ergebnisse von vornherein klar waren.

In jeder Prüfserie wurden 10 Stösse ohne FI-Schutzschalter ausgeführt, dann 3 Stösse mit dem «stossstromfesten» FI-Schutzschalter in Serie und 3 Stösse mit dem selektiven FI-Schutzschalter in Serie mit der Funkenstrekke.



Figur 12 Whiskerbildung bei der Kugelfunkenstrecke

Semimetallische Brücke zwischen den Elektroden führt zum Zusammenbruch der Lichtbogenspannung und zum Weiterfliessen des Folgestromes aus dem Netz. Stromunterbrechung durch den selektiven FI-Schutzschalter



Figur 13 Oszillogramm eines Versuches mit der Kugelfunkenstrecke

Luftstrecke 0,35 mm, Whiskerbildung mit Zusammenbruch der Lichtbogenspannung, selbstlöschend nach drei Halbwellen infolge Aufbrechens des Whiskers, Netzspannung 220 V, Netzfolgestrom 35 A (Effektivwert)

Der Netzfolgestrom löschte praktisch immer im Nulldurchgang der Netzspannung (Fig. 11), nur bei der Kugelfunkenstrecke mit einer Luftstrecke von 0,35 mm kam es bei höheren Strömen zur sogenannten «Whiskerbildung» (Fig. 12, 13). Man erkennt im Oszillogramm (Fig. 13) sehr schön den Zusammenbruch der Lichtbogenspannung infolge der semimetallischen Brücke zwischen den Elektroden.

Besonders eindrucksvoll waren die Versuche mit der Schutzkontakt-Steckdose. Der Scheitelwert der Stossspannung betrug in diesem Fall 9 kV, und der Netzfolgestrom bildete sich als Lichtbogen voll zwischen den aktiven Teilen und den Schutzkontaktbü-

geln aus (Fig. 14). Trotzdem löschte der Lichtbogen im Nulldurchgang der Netzspannung, und die Dauer des Stromflusses des Folgestromes blieb unter 10 ms.

Zusammenfassend kann aus den Versuchen folgendes geschlossen werden:

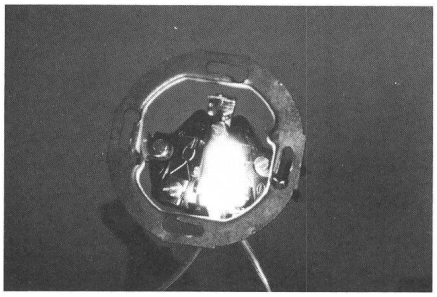
a) Lichtbogenüberschläge infolge von Stossspannungen verursachen mit mehr als 50% Wahrscheinlichkeit in elektrischen Anlagen mit einer Netzspannung von 220 V Folgeströme zur Erde.

b) Diese Folgeströme löschen praktisch immer im Nulldurchgang der Netzspannung oder werden bei hohen Stromstärken (über etwa 100 A) von Überstromschutzeinrichtungen ausgeschaltet.

c) Selektive Fehlerstromschutzschalter werden durch diese selbstlöschenden Folgeströme nicht ausgelöst.

d) In seltenen Fällen treten Whiskerbildungen auf, durch die der Folgestrom nicht löscht. Er wird dann durch den selektiven Fehlerstromschutzschalter weggeschaltet. Dieser Schalter stellt also einen beachtlichen Brandschutz für elektrische Anlagen dar.

e) Stossstromfestigkeiten, auch von einigen 100 A Scheitelwert der Wellenform 8/20 µs, von FI-Schutzschaltern der üblichen Bauform können ein Fehlauslösen bei Auftreten von Netzfolgeströmen nicht verhindern.



Figur 14 Luftstreckenüberschlag bei einer Schutzkontakt-Steckdose

Stossspannung 9 kV Scheitelwert, 1,2/50 µs, Netzfolgestrom 35 A (Effektivwert). Volle Ausbildung des Lichtbogens zwischen aktiven Teilen und Schutzkontaktbügel. Löschung des Folgestromes im Nulldurchgang der Netzspannung

Literatur

[1] *P. Hasse* und *J. Wiesinger:* Handbuch für Blitzschutz und Erdung. 2. Auflage. München, Pflaum-Verlag / Berlin-Offenbach, VDE-Verlag, 1982.

[2] *W. Naumann:* Die Stossspannungsprüfung in Niederspannungsanlagen, ein Hilfsmittel zum Vermeiden von Blitzschäden. ETZ-B 19(1967)17, S. 512...517.

[3] *R. H. Golde:* Lightning. Vol. 2: Lightning protection. London/New York/San Francisco, Academic Press, 1977.

[4] *S. Rusck:* Lightning over-voltages and over-voltage protection in low-voltage networks. ASEA-Journal 31(1958)6, p. 75...81.

[5] *F. D. Martzloff:* The propagation and attenuation of surge voltages and surge currents in low-voltage ac circuits. IEEE Trans. PAS 102(1983)5, p. 1163...1170.

[6] *F. D. Martzloff* and *H. A. Gauper:* Surge and high-frequency propagation in industrial power lines. IEEE Trans. IA 22(1986)4, p. 634...640.

[7] IEEE-guide for surge voltages in low-voltage ac power circuits. ANSI/IEEE-Standard C 62.41-1980.

[8] *B. Sollergren* and *N. Hyltén-Cavallius:* Insulation and over-voltage problems in low voltage network. Acta Polytechnica 57(1950) Electrical Engineering Series 2(1950)8.

[9] Unwanted tripping of residual circuit-breakers due to impulse voltages and test methods for the verification of the resistance of residual circuit-breakers against such tripping. IEC-Document 23E(France)28A, Mars 1982.

[10] Explanation of interfaces for installation categories. Supplement to Appendix B of Report 664. IEC-Document 28A(Secretariat)24, June 1983.

[11] *H. Gatz:* Isolationskoordination in Niederspannungsanlagen - eine korrekturbedürftige Konzeption. ETZ 104(1983)16, S. 817...821.

[12] *G. Biegelmeier* und *W. Nitsche:* Der Schutz von Niederspannungsanlagen durch Überspannungsableiter. E und M 103(1986)2, S. 65...74.

[13] Test method for nuisance tripping of residual current operated circuit breakers. IEC-Document 23E/WG2(Italien Experts)2, February 1985.

[14] *G. Biegelmeier:* Das Auslöseverhalten von Fehlerstromschutzschaltern beim Auftreten atmosphärischer Überspannungen. OZE 30(1977)2, S. 47...51.