

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 60 (1969)
Heft: 15

Artikel: Funkenstrecken unter Steilstoßspannungen und ihre Bedeutung für die Isolationskoordination
Autor: Wiesinger, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916168>

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: 04.04.2026

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

Funkenstrecken unter Steilstoßspannungen und ihre Bedeutung für die Isolationskoordination

Von J. Wiesinger, München
2979 - 2999

621.319.51

Es wird das Ansprechverhalten von prinzipiellen Elektrodenanordnungen (Stab—Platte, 10-cm-Kugel—Platte und 25-cm-Kugel—Platte) mit Schlagweiten bis zu 30 cm bei der Beanspruchung mit überschüssenden Steilstoßspannungen 0,03|43 behandelt. Die sich ergebenden Stoßkennlinien zeigen insbesondere bei weitgehend homogenen Anordnungen im Zeitbereich zwischen etwa 0,1 und 1 μ s einen extrem flachen Verlauf.

Besondere Beachtung verdienen die vor dem eigentlichen Durchschlag fließenden Vorströme, die Werte von mehreren hundert Ampère erreichen können und die Ursprungsspannung während der Zeit bis zum Durchschlag auf einen nahezu konstanten Wert reduzieren; das zeitliche Integral über die Vorströme, die Vorstromladung, nimmt mit abnehmenden Zeiten bis zum Durchschlag sehr stark zu, so dass gerade stark überschüssende Stoßspannungen beträchtlich abgesenkt werden.

Aus den Untersuchungen kann im Hinblick auf die Isolationskoordination der Schluss gezogen werden, dass weitgehend homogene Anordnungen als Pegelfunkenstrecken in elektrischen Anlagen bei Steilstoßspannungen infolge naher Blitzeinschläge oder rückwärtiger Überschläge, bei denen ein sicherer Schutz durch Überspannungsableiter nicht mehr gewährleistet ist, einen wirklichen Notschutz für die elektrischen Geräte darstellen können.

1. Einführung

Es ist eine wesentliche Erkenntnis der Blitzforschung, dass die bei Blitzeinschlägen in Freileitungen oder Schaltanlagen fließenden Ströme eingepreßte Stoßströme sind, deren Größe und zeitlicher Verlauf von den Gegebenheiten an den Einschlagstellen, z. B. dem Wellenwiderstand einer Freileitung oder dem Erdungswiderstand eines Mastes, nicht beeinflusst werden. Deshalb kann man auf Grund der mit ausreichender Sicherheit vorliegenden Kennwerte der Blitzströme [1]¹⁾ die in Hochspannungsleitungen und Anlagen entstehenden Stoßspannungen berechnen, wenn die elektrischen Daten der betroffenen Objekte bekannt sind [2]. Auf Grund dieser Berechnungen ergibt sich, dass zumindest in unmittelbarer Nähe des Einschlagortes bei Blitzen mit grossen Stromanstiegen, wie sie insbesondere bei multiplen Blitzen zu erwarten sind, ausserordentlich rasch ansteigende Stoßspannungen mit Stirnzeiten im Nanosekundenbereich entstehen können. Weiterhin sind extreme Steilstoßspannungen möglich bei rückwärtigen Überschlägen, bei denen die Stirnzeiten von nur einigen zehn Nanosekunden durch die Zusammenbruchszeit der überschlagenen Luftstrecken bestimmt werden. Auf Grund dieser Erkenntnisse ist es eine vordringliche Aufgabe, im Hinblick auf eine möglichst sichere Isolationskoordination die Anlagenteile — zunächst prinzipielle Elektrodenanordnungen — nicht nur mit Normstoßspannungen, sondern auch mit Steilstoßspannungen zu beaufschlagen und insbesondere auch ihre Stoßkennlinien im Zeitbereich kleiner eine Mikrosekunde aufzunehmen.

In der vorliegenden Abhandlung wird deshalb gezeigt, wie sich Stab—Platte- und Kugel—Platte-Anordnungen mit Schlagweiten bis zu 30 cm unter einer Steilstoßspannung 0,03|43 verhalten; diese Stoßspannung stellt in erster Näherung eine

Le comportement à l'amorçage de dispositions usuelles des électrodes (tige—plaque, sphère de 10 cm—plaque, sphère de 25 cm—plaque) avec distances disruptives jusqu'à 30 cm, sollicitées par des tensions de choc à front raide 0,03|43, dépassantes, est examiné. Les caractéristiques au choc qui en résultent sont extrêmement plates entre 0,1 et 1 μ s, surtout pour des dispositions très homogènes.

Il convient de considérer les courants qui circulent avant le claquage proprement dit et qui peuvent atteindre plusieurs centaines d'ampères. Ces courants peuvent réduire à une valeur presque constante la tension initiale, pendant le laps de temps jusqu'au claquage. L'intégrale temporelle par ces courants, c'est-à-dire la charge préalable, croît très fortement avec la diminution des durées jusqu'au claquage, de sorte que des tensions de choc dépassantes sont considérablement réduites.

Ces investigations permettent d'en conclure que des dispositions très homogènes peuvent représenter une protection de secours efficace pour les appareils électriques, en constituant des éclateurs de protection dans des installations électriques, quand il s'agit de surtensions à front raide engendrées par des coups de foudre dans le proche voisinage ou de contournements en retour, pour lesquels des parafoudres ne garantissent plus une protection sûre.

Sprungfunktion dar und ist deshalb für grundlegende Untersuchungen besonders geeignet.

2. Zur Dimensionierung von Stossgeneratoren

Das Durchschlagverhalten von Elektrodenanordnungen bei überschüssenden Stoßspannungen wird durch die Stoßkennlinien beschrieben. In den VDE-Vorschriften 0433, Teil 3, ist eine Anleitung zur Bestimmung der Durchschlag-Stoßspannung U_d und der Zeit bis zum Durchschlag T_d auf Grund von charakteristischen Größen der abgeschnittenen Stoßspannungen zu finden. Vor einiger Zeit wurde von Kärner und dem Verfasser [3] auf Schwierigkeiten bei der Ermittlung von Stoßkennlinien gemäss den VDE-Vorschriften hingewiesen und u. a. gezeigt, dass die Vorströme von üblichen Elektrodenanordnungen, die vor dem eigentlichen Durchschlag fließen, je nach der Dimensionierung der Kapazitäten und Widerstände in den Stossgeneratoren zu einer so erheblichen Verformung der Ursprungsstoßspannungen führen können, dass die VDE-Anleitungen sinnlos werden. Es genügt somit nicht in allen Fällen, nur den zeitlichen Verlauf einer Ursprungsstoßspannung festzulegen; vielmehr müssen auch die Schaltungssele-

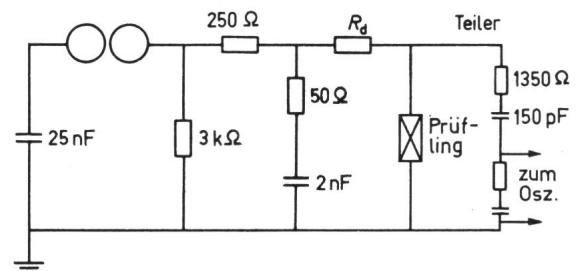


Fig. 1
Stossgenerator
 R_d Dämpfungswiderstand

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

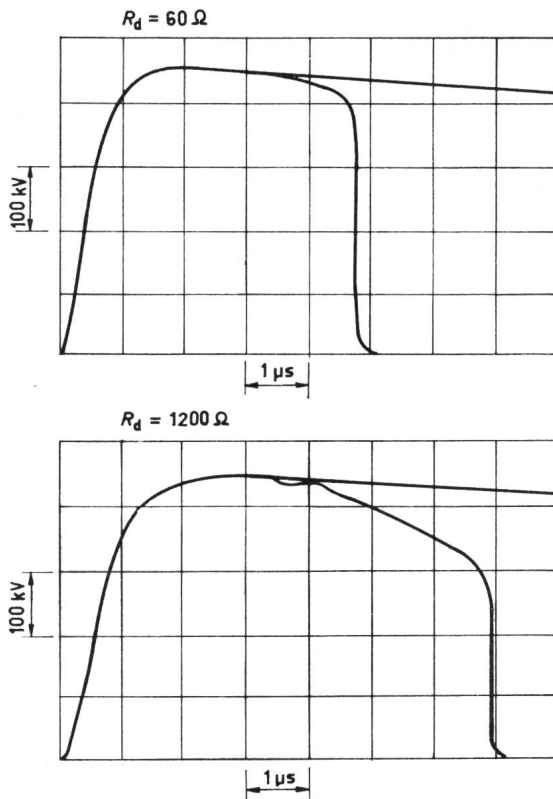


Fig. 2

Spannungsabsenkung durch Vorströme

25-cm-Kugel—Platte-Anordnung, Schlagweite $a = 60$ cm; R_d Dämpfungswiderstand

mente der Stossgeneratoren angegeben werden, wenn die ermittelten Stosskennlinien miteinander verglichen oder zur Isolationskoordination herangezogen werden sollen. Der Einfluss des Schaltungsaufbaus von Stossgeneratoren auf die Stosskennlinien soll an folgenden Beispielen aufgezeigt werden:

2.1 An einen Stossgenerator gemäss Fig. 1, der eine Stossspannung 1,2|50 erzeugt, wurde eine 25-cm-Kugel—Platte-Anordnung mit einer Schlagweite von 60 cm angeschlossen. Der Schaltungsaufbau des Generators wurde dadurch verändert, dass in einem ersten Fall der dem Prüfling vorgeschal-

tete Dämpfungswiderstand $R_d = 60 \Omega$, in einem zweiten Fall $R_d = 1200 \Omega$ gewählt wurde. Bei einer Betrachtung der Fig. 2 erkennt man, dass es in beiden Fällen zu recht unterschiedlichen Spannungszusammenbrüchen kommt: Während bei $R_d = 60 \Omega$ vor dem Durchschlag, der an dem rapiden Zusammenbrechen der Stoßspannung zu erkennen ist, die Ursprungsspannung nicht wesentlich verformt wird, ist bei $R_d = 1200 \Omega$ die Ursprungsspannung erheblich verändert. Aus der durch den Vorstrom abgesenkten Spannung resultiert im zweiten Fall bei gleichem Scheitelwert der Stoßspannung auch eine längere Zeit bis zum Durchschlag als im ersten Fall.

2.2 In Fig. 3 ist ein Ausschnitt aus einer positiven Stosskennlinie einer 25-cm-Kugel—Platte-Anordnung mit einer Schlagweite von 30 cm dargestellt, an die mit dem Generator der Fig. 1 eine Stoßspannung 1,2|50 angelegt wurde. Die gemäss den VDE-Vorschriften ermittelten Messpunkte der Stosskennlinie sind abhängig von R_d : In einem Bereich (I) sind nur Messpunkte für $R_d = 60 \Omega$, in einem anderen Bereich (II) nur Messpunkte für $R_d = 1200 \Omega$ zu finden; der Unterschied verliert sich erst im Bereich III.

Da, wie im Verlauf dieser Abhandlung noch gezeigt wird, bei den im folgenden vornehmlich untersuchten Zeiten bis zum Durchschlag unter $1 \mu s$ der Einfluss der Vorströme wesentlich stärker in Erscheinung tritt als bei längeren Zeiten bis zum Durchschlag, ist es unbedingt notwendig, die Schaltungselemente des für die Erzeugung der Stoßspannung 0,03|43 erforderlichen Steilstoßgenerators sinnvoll festzulegen.

Wenn man davon ausgeht, dass durch einen Stossgenerator die Beanspruchung, wie sie in einer Freileitung, einer Kabelstrecke oder in einer Schaltanlage auftritt, möglichst den natürlichen Verhältnissen entsprechend nachgebildet werden soll, ist es wohl richtig, dem Stossgenerator einen Innenwiderstand in der Grösse des Wellenwiderstandes des Systemes zuzuordnen, über das die Stoßspannung auf den Prüfling aufläuft. Dies soll an Hand einer einfachen Betrachtung näher erläutert werden.

Es wird gemäss Fig. 4 angenommen, dass der Blitzstrom $i(t)$ in eine Freileitung mit dem Wellenwiderstand Γ fliesst. Als

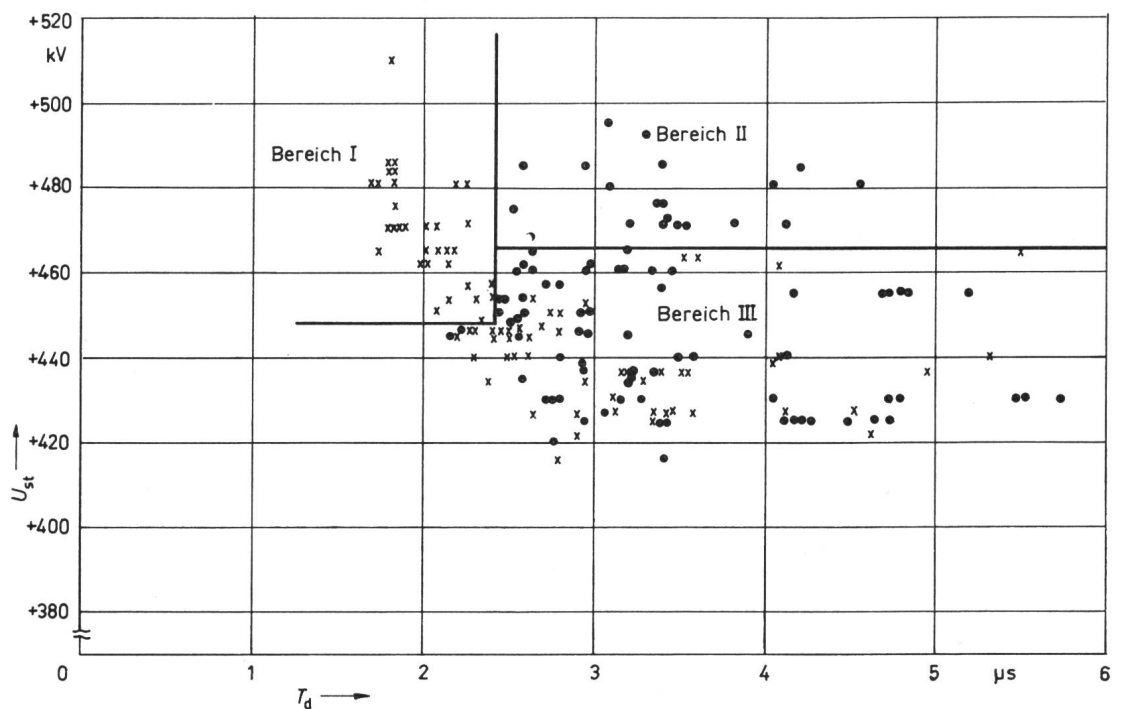


Fig. 3

1,2|50-Stosskennlinie
25-cm-Kugel—Platte-Anordnung, Schlagweite $a = 30$ cm; U_{st} Stoßspannung; R_d Dämpfungswiderstand;
x $R_d = 60 \Omega$;
• $R_d = 1200 \Omega$

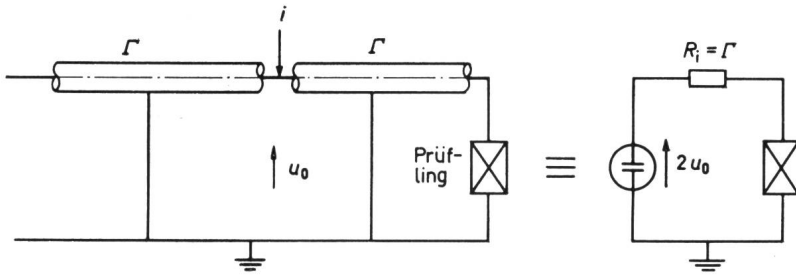


Fig. 4
Zur Festlegung des Innenwiderstandes von Stossgeneratoren
 i Blitzstrom; R_i Innenwiderstand; U_0 Ursprungsspannung;
 Γ Wellenwiderstand

Folge breitet sich eine Stoßspannung $u_0(t) = i \cdot \Gamma/2$ links und rechts der Einschlagstelle aus. Erreicht die Stoßspannung am Ende der Leitung den Prüfling, z. B. eine Pegelfunkenstrecke, tritt hier die Spannung $2 \cdot u_0(t)$ auf. Wenn die Leitung zwischen der Einschlagstelle und dem Prüfling so lang ist, dass der an der Einschlagstelle reflektierte Impuls den Prüfling in dem betrachteten Zeitraum nicht mehr erreicht, können die Verhältnisse durch eine äquivalente Stoßschaltung nachgebildet werden: Die Ursprungsspannung des Stossgenerators ist $2u_0(t)$, der Innenwiderstand $R_i = \Gamma$. Der Wert für Γ liegt bei Freileitungen bei etwa 500Ω , bei Kabeln bei etwa 50Ω .

3. Steilstossgenerator

Ein Steilstossgenerator nach Kärner [4] mit einer Schaltung gemäss Fig. 5 kann eine Steilstoßspannung 0,03|43 bis zu Scheitelwerten von ca. 600 kV erzeugen. Wenn die Funkenstrecke F_1 zum Zeitpunkt $t = 0$ zündet, muss die Aufsteilfunkenstrecke F_2 zum Zeitpunkt t_{F2} schliessen, damit eine möglichst ideale Sprungfunktion ohne Ausgleichsvorgänge am Prüfling erhalten wird:

$$t_{F2} = - (R_{d1} + R_{d2}) \cdot \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \ln \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{C_s R_{d1}}{(C_s + C_b)(R_{d3} + R_t)}} \right] = 1,37 \mu s \quad (1)$$

Wird der Steilstossgenerator durch die zeitabhängige Leerlaufspannung u_{p0} am Prüfling und den konstanten Innenwiderstand R_i charakterisiert, ist zu einem bestimmten Zeitpunkt t :

$$(u_{p0})_t = \frac{R_t [R_{d2}(u_{cs})_t + R_{d1}(u_{cb})_t]}{R_{d1} R_{d2} + R_{d1} R_{d3} + R_{d2} R_{d3} + R_t (R_{d1} + R_{d2})} \quad (2)$$

wobei u_{cs} und u_{cb} die Spannungen an C_s und C_b sind.

$$R_i = \frac{R_t (R_{d1} R_{d2} + R_{d1} R_{d3} + R_{d2} R_{d3})}{R_{d1} R_{d2} + R_{d1} R_{d3} + R_{d2} R_{d3} + R_t (R_{d1} + R_{d2})} = 177 \Omega \quad (3)$$

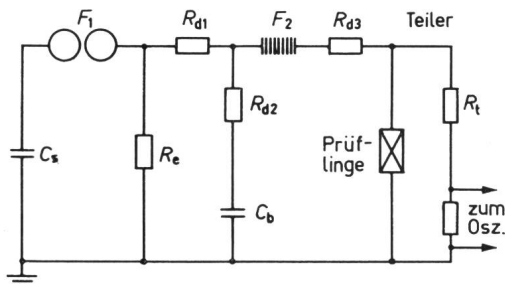


Fig. 5

Schaltung eines Steilstossgenerators

$C_b = 2 \text{ nF}$, Grundbelastungskapazität; $C_s = 25 \text{ nF}$, Stosskapazität;
 F_1 Zündfunkenstrecke; F_2 Aufsteilfunkenstrecke;

$R_{d1} = 250 \Omega$
 $R_{d2} = 50 \Omega$
 $R_{d3} = 150 \Omega$ } Dämpfungswiderstände

$R_e = 120 \Omega$, Entladewiderstand; $R_t = 2320 \Omega$, Teilerwiderstand

Die Leerlaufspannung u_{p0} ist ohne angeschlossenen Prüfling während der ersten μs nach dem Durchzünden von F_2 nahezu konstant und wird erst bei einem beträchtlichen Ladungsentzug von mehr als einigen zehn μC als Folge hoher Vorströme durch den Prüfling merklich abgesenkt. Der Innenwiderstand von 177Ω stellt etwa den geometrischen Mittelwert zwischen den Wellenwiderstandswerten einer Freileitung und eines Kabels dar.

Die Antwortzeit des gesamten Stoßspannungsmesssystems, bestehend aus Ohmschem Spannungsteiler, Messkabel und Hochleistungsoszillographen, beträgt 10 ns . Hieraus folgt, dass Sprungfunktionen nach 46 ns bereits mit einem Fehler von nur 1% wiedergegeben werden und somit die Stosskennlinien der Stoßspannung 0,03|43 bis zu Zeiten von einigen zehn ns aufgenommen werden können.

4. Rechteckstosskennlinien

Die Stosskennlinien einer Sprungfunktion, als die die Steilstoßspannung 0,03|43 in erster Näherung anzusehen ist, werden

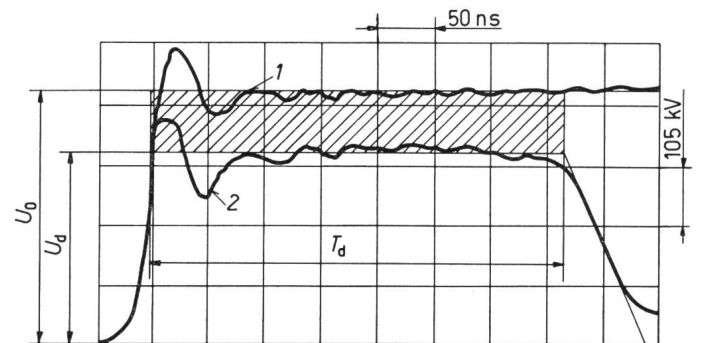


Fig. 6

Spannungsverlauf an einer positiven Stab—Platte-Anordnung Schlagweite $a = 20 \text{ cm}$

U_0 Mittelwert der Ursprungsspannung; U_d Mittelwert der Durchschlagsspannung; T_d Zeit bis zum Durchschlag; 1 Spannung ohne Prüfling; 2 Spannung mit Prüfling

als Rechteckstosskennlinien bezeichnet. Zur Veranschaulichung der bei der Ermittlung dieser Stosskennlinien anstehenden Probleme wird in Fig. 6 der Spannungsverlauf an einer Stab—Platte-Anordnung mit einer Schlagweite von 20 cm bei der Beanspruchung mit einer überschüssigen Steilstoßspannung gezeigt. In dieser Figur sind dargestellt: Der Spannungsverlauf mit Prüfling sowie der Spannungsverlauf ohne Prüfling, also die Ursprungsspannung; bei dieser Messung wurde die Schlagweite des Prüflings so weit erhöht, dass kein Durchschlag mehr erfolgte. Man erkennt folgendes: Vor dem eigentlichen Spannungszusammenbruch, der innerhalb etwa 50 ns erfolgt, wird die Ursprungsspannung während etwa 370 ns um ca. 100 kV abgesenkt. Dieser Spannungseinbruch muss durch einen Strom von mehreren 100 A hervorgerufen werden, der in die Funkenstrecke vor dem Zusammenbruch fließt.

Da im vorliegenden Fall eine Ermittlung der für die Stosskennlinien charakteristischen Werte gemäss den VDE-Vorschriften nicht mehr möglich ist, müssen hier neue Definitionen

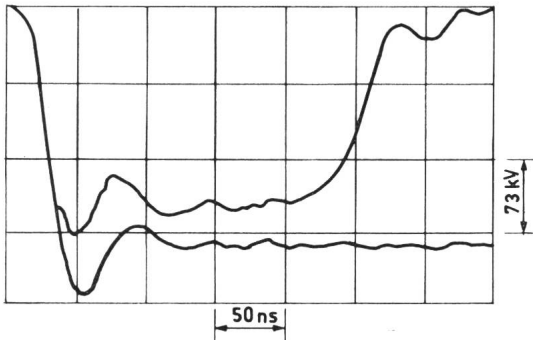
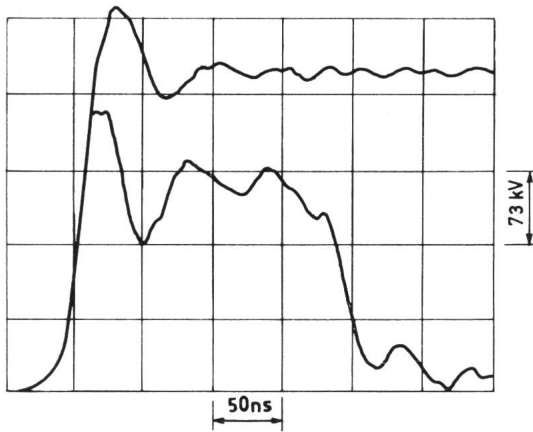


Fig. 7
Stab—Platte
Schlagweite = 10 cm

eingeführt werden, die das Durchschlagverhalten bei überschüssigen Steilstoßspannungen beschreiben. Wie aus Fig. 6 zu ersehen ist, können als charakteristische Werte entnommen werden:

- Der Mittelwert der Ursprungsspannung U_0 .
- Der Mittelwert der tatsächlich am Prüfling liegenden Spannung U_d (wegen der nahezu konstanten Spannungsabsenkung ist eine Mittelwertbildung recht gut möglich).
- Die Zeit bis zum Durchschlag T_d , die von dem Augenblick an gezählt werden soll, zu dem die ansteigende Spannung den Wert U_d erreicht; das Ende von T_d , der Zeitpunkt des beginnenden Spannungszusammenbruches, wird durch den Schnittpunkt von U_d mit einer Tangente an die zusammenbrechende Spannung festgelegt. Diese Definition ist wohl sinnvoller als diejenige der VDE-Vorschriften, bei der durch eine Gerade durch den 70- und 10-%-Wert der zusammenbrechenden Spannung das Ende von T_d festgelegt wird (siehe auch [3]).

Wagner und Hileman bestätigen auf Grund ihrer Untersuchungen an Stab—Stab- und Rohr—Rohr-Anordnungen grosser Schlagweiten, dass vor dem eigentlichen Durchschlag Vorströme von mehreren 100 A sogar während mehrerer μ s fließen können [5; 6; 7]. Die Autoren stellen weiterhin in Übereinstimmung mit den Experimenten des Verfassers folgendes fest: Wird durch eine Abschneidefunkenstrecke die Spannung zu einer Zeit $t < T_d$ weggeschaltet, so erfolgt kein Zusammenbruch des Prüflings, der als eine Lichtbogenentladung zwischen den Elektroden charakterisiert ist, obwohl schon Ströme von vielen 100 A in die Funkenstrecke geflossen sein können.

Im folgenden sollen nun die Anordnungen Stab—Platte (Schlagweite $a = 10, 20$ und 30 cm), 10-cm-Kugel—Platte ($a = 7,5, 15$ und $22,5$ cm) und 25-cm-Kugel—Platte ($a = 7,5, 15$ und $22,5$ cm) näher untersucht werden.

In den Fig. 7...9 sind einige typische überschüssige Steilstoßspannungen zusammengestellt, die an den aufgeführten

Anordnungen gemessen wurden. Hierbei ist jeweils eine positive Stoßspannung einer negativen gegenübergestellt. Aus diesen Figuren ist folgendes ersichtlich:

- Die aus Fig. 6 abgeleiteten charakteristischen Werte sind auch für die Stoßspannungsverläufe der Fig. 7...9 sinnvoll.
- In allen hier gezeigten Fällen erfolgt bereits in der Stirn der beanspruchenden Stoßspannung eine Spannungsabsenkung, so dass sich die maximale Amplitude der Ursprungsspannung nicht ausbilden kann.
- Bei gleichem U_0 kann bei negativer Polarität T_d kleiner sein als bei positiver Polarität.

In den Fig. 10...15 sind die positiven und negativen Rechteckstoßkennlinien $U_d = f(T_d)$ der verschiedenen Elektrodenanordnungen angegeben für einen Zeitbereich bis zum Durchschlag etwa zwischen $0,1$ und $1,5 \mu$ s. Zu jedem eingezeichneten Messpunkt, der aus ca. 20 Einzelmessungen algebraisch gemittelt wurde, ist die zugehörige Ursprungsspannung U_0 vermerkt. Aus diesen Figuren geht hervor:

- Die Differenz zwischen U_0 und U_d nimmt mit kleiner werdendem T_d sehr stark zu.
- Bei weitgehend homogenen Anordnungen (z. B. 10-cm-Kugel—Platte bei $a = 7,5$ cm und 25-cm-Kugel—Platte bei $a = 7,5$ und 15 cm) liegen die negativen Stoßkennlinien bei allen Werten von T_d unter den positiven Stoßkennlinien. Es sei darauf hingewiesen, dass bei diesen Anordnungen auch die Werte der 50-%-Durchschlag-Stoßspannung bei negativer Polarität niedriger als bei positiver Polarität sind (vgl. auch [8]). Bei weitgehend inhomogenen Anordnungen dagegen liegen die positiven Stoßkennlinien ebenso wie die 50-%-Durchschlag-Stoßspannungen unter den negativen Kennlinien.
- Die Stoßkennlinien für positive und negative Polarität inhomogener Anordnungen können sich bei sehr kurzen Zeiten bis zum Durchschlag überschneiden. Dies ist ersichtlich aus einem Vergleich zwischen den positiven und negativen Stoßkennlinien der

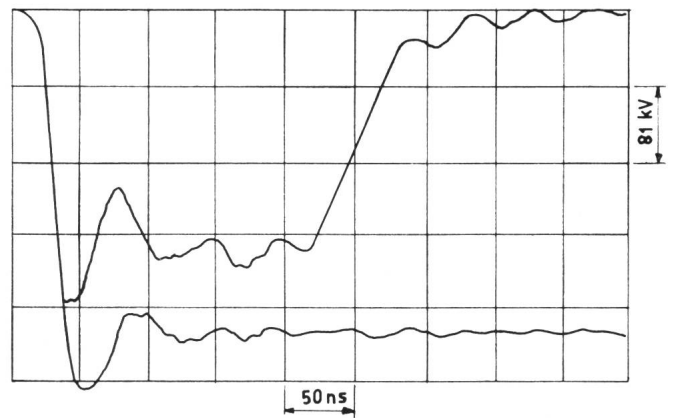
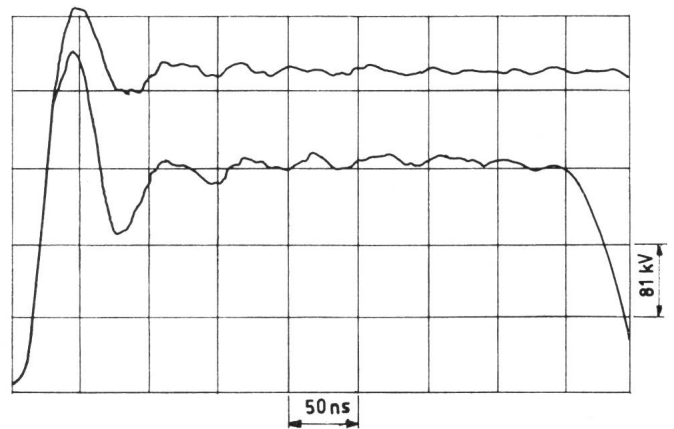


Fig. 8
10-cm-Kugel—Platte
Schlagweite = 15 cm

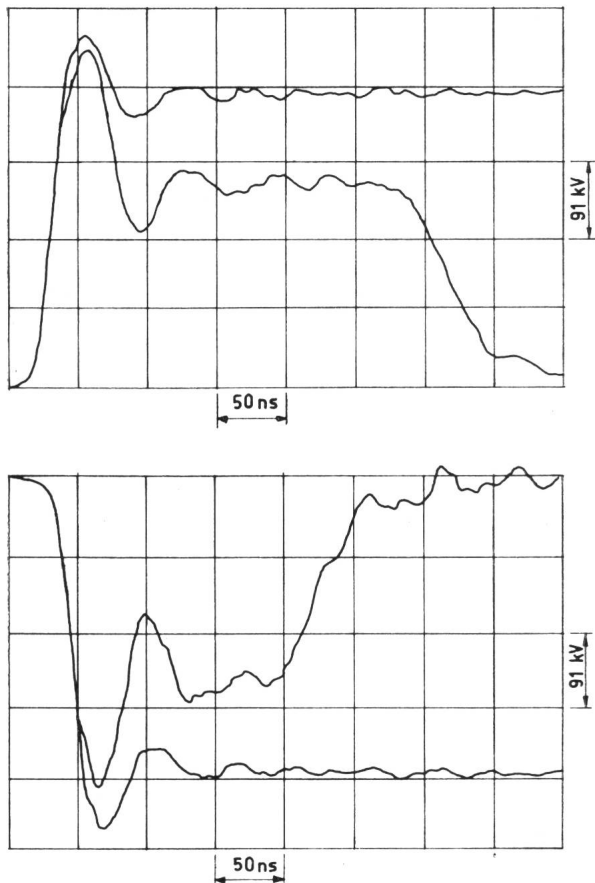


Fig. 9
25-cm-Kugel—Platte
Schlagweite = 15 cm

10-cm-Kugel—Platte-Anordnung bei $a = 15$ cm: sie weisen bei $T_d \approx 0,3 \mu\text{s}$ einen Schnittpunkt auf. Dieser hier beschriebene Effekt, der vom Verfasser erstmals in [2] angegeben wurde, zeigt, wie wichtig eine Isolationskoordination auch bei kurzen Zeiten bis zum Durchschlag ist.

d) Die Stosskennlinien verlaufen — insbesondere bei weitgehend homogenen Anordnungen — ausserordentlich flach. Dies bedeutet, dass weitgehend homogene Anordnungen als Schutzfunkenstrecken hervorragend geeignet sind, da sie die ankommende Ursprungsspannung auf einen von T_d weitgehend unabhängigen Wert U_d begrenzen. Die Anordnungen lassen also nicht zu, dass auch nur für eine sehr kurze Zeit die Spitze von U_0 wirksam wird.

5. Kennlinien zur Charakterisierung der Vorströme

Es ist bekannt, dass Luftfunkenstrecken bei einer Beanspruchung mit überschüssigen Stoßspannungen Vorströme ziehen, die eine notwendige Voraussetzung für den totalen Spannungszusammenbruch an den Funkenstrecken sind [9]. Die Vorgänge während der Vorstromperiode und der Zusammenbruchsperiode müssen streng auseinandergehalten werden, obwohl in beiden Fällen Ströme vergleichbarer Grösse in die Funkenstrecken fließen können.

Während der Vorstromperiode werden offenbar durch Einbringen von Ladungen zwischen die Elektroden die Bedingungen für die Existenz eines die Elektroden überbrückenden, zunächst noch hochohmigen Plasmakanals geschaffen und in seiner Umgebung das elektrische Feld so weit homogenisiert [9; 10], dass sich längs des Kanales ein etwa konstanter Spannungsgradient ausbilden kann. Die Vorstromladungen schirmen also diesen Kanal, der für sich allein wohl nicht existenzfähig wäre, gegen die Umgebung ab, ein Effekt, den man auch bei dem vorwachsenden Blitzkanal beobachtet.

Sobald nun über diese Elektrodenbrücke Strom fließt, wird in der nun beginnenden Zusammenbruchsperiode der Kanal aufgeheizt und niederohmiger, bis die Spannung zwischen den Elektroden auf die Brennspannung abgesunken ist. Während sich die Vorstromperiode über mehrere μs erstrecken kann, erfolgt der Spannungszusammenbruch bei den hier untersuchten Anordnungen in Luft unter normalen atmosphärischen Bedingungen innerhalb einiger zehn ns. Der Aufheizvorgang im Plasmakanal wird in den Funkengesetzen von *Toepler* oder *Rompe* und *Weizel* beschrieben [11; 12]. Diese Gesetze lassen sich für eine bestimmte Elektrodenanordnung bei konstantem Luftdruck auf folgende Gl. zurückführen:

$$\frac{dA_p}{dt} = \frac{u_p^\kappa i_p}{k} \quad (4)$$

wobei A_p der Leitwert des Plasmakanals, u_p die Spannung am Plasmakanal, i_p der Strom durch den Plasmakanal, k eine Proportionalitätskonstante und κ ein Exponent sind.

Da *Toepler* davon ausgeht, dass die Leitwertänderung des Kanals proportional dem Strom i_p ist, ist $\kappa = 0$; *Rompe* und *Weizel* setzen die Leitwertänderung proportional der Leistung $u_p i_p$, so dass sich $\kappa = 1$ ergibt. Mit Gl. (4) kann der zeitliche Verlauf des Spannungszusammenbruchs an einer Funkenstrecke berechnet werden, wenn die Schaltungselemente des Stossgenerators, an den die Strecke angeschlossen ist, bekannt sind. *Kärner* und *Heilbronner* haben gezeigt, dass sich insbesondere mit dem Ansatz von *Toepler* der berechnete Verlauf des Spannungszusammenbruchs in gute Übereinstimmung mit dem experimentell ermittelten Verlauf bringen lässt [13].

Als Charakteristikum für die Vorstromeinflüsse können die Vorstromladungen Q_v als zeitliches Integral über die während T_d durch die Elektrodenanordnungen geflossenen Ströme an-

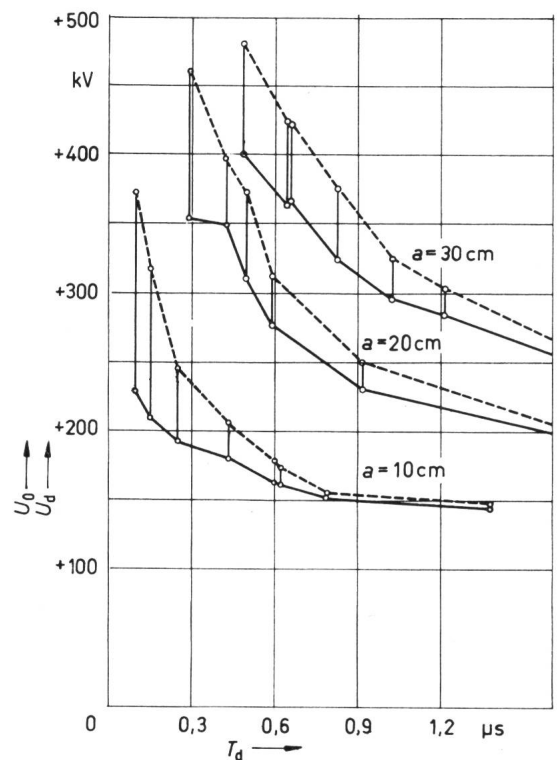


Fig. 10
Rechteckstosskennlinien
Positive Stab—Platte-Anordnung
 a Schlagweite; T_d Zeit bis zum Durchschlag
— U_d Durchschlagsspannung
- - - U_0 Ursprungsspannung

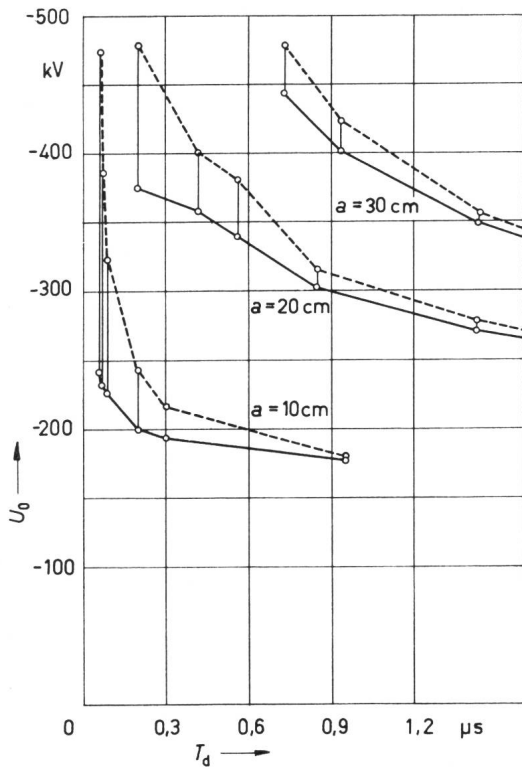


Fig. 11
Rechteckstosskennlinien
Negative Stab—Platte-Anordnung
Bezeichnungen siehe Fig. 10

gesehen werden. Aus den Kennlinien $U_0 = f(T_d)$ und $U_d = f(T_d)$ kann für jeden Punkt der Stosskennlinien der dazugehörige Wert von Q_v berechnet werden, wenn für den Stossgenerator eine Ersatzschaltung nach Fig. 5 zugrundegelegt wird. In der Berechnung muss natürlich die mögliche Änderung der Leerlaufspannung u_{p0} während T_d gemäss Gl. [2] als Folge der teilweisen Entladung von C_s und C_b bei grossen Vorstromladungen berücksichtigt werden. Die Berechnung erfolgt zweckmässig mit Hilfe eines elektronischen Digitalrechners, wobei

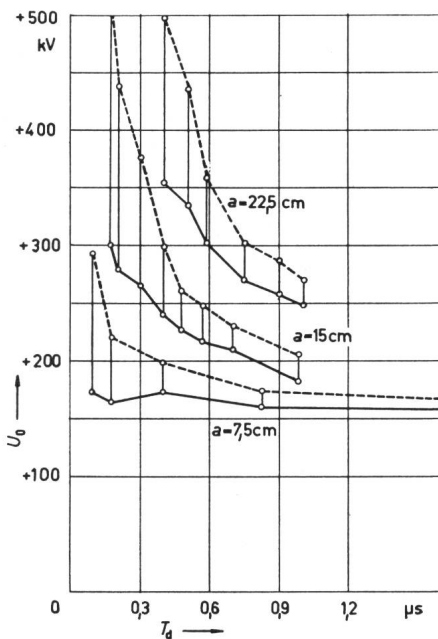


Fig. 12
Rechteckstosskennlinien
Positive 10-cm-Kugel—Platte-Anordnung
Bezeichnungen siehe Fig. 10

der Vorstrom über die Zeit schrittweise integriert wird und während jedes Zeitschrittes stationäre Verhältnisse in der Schaltung angenommen werden.

Die Ladungskennlinien, die Q_v (μC) als Funktion von T_d für die untersuchten Elektrodenanordnungen zeigen, sind in den Fig. 16...18 zusammengestellt. Parameter sind die Schlagweiten der Anordnungen und die Polarität der Steilstoßspannung. Man erkennt daraus:

a) Die Vorstromladung nimmt bei allen Anordnungen mit kleiner werdenden Zeiten bis zum Durchschlag sehr stark zu. So ergibt sich für die positive 10-cm-Kugel—Platte-Anordnung ($a = 22,5$ cm) bei $T_d = 1 \mu s$: $Q_v = 75 \mu C$, und bei $T_d = 0,4 \mu s$: $Q_v = 247 \mu C$. Im letzteren Fall fliesst also während $0,4 \mu s$ ein mittlerer Strom von 617 A in die Funkenstrecke, ohne dass sich ihr Widerstand merklich ändert.

b) Die positiven Ladungskennlinien liegen über den negativen. Bei der 10-cm-Kugel—Platte-Anordnung ($a = 22,5$ cm) ist für $T_d = 0,4 \mu s$ bei positiver Polarität $Q_v = 247 \mu C$, bei negativer Polarität dagegen nur $135 \mu C$.

c) Die auf die Schlagweite bezogene Vorstromladung Q_v/a nimmt mit zunehmender Schlagweite zu.

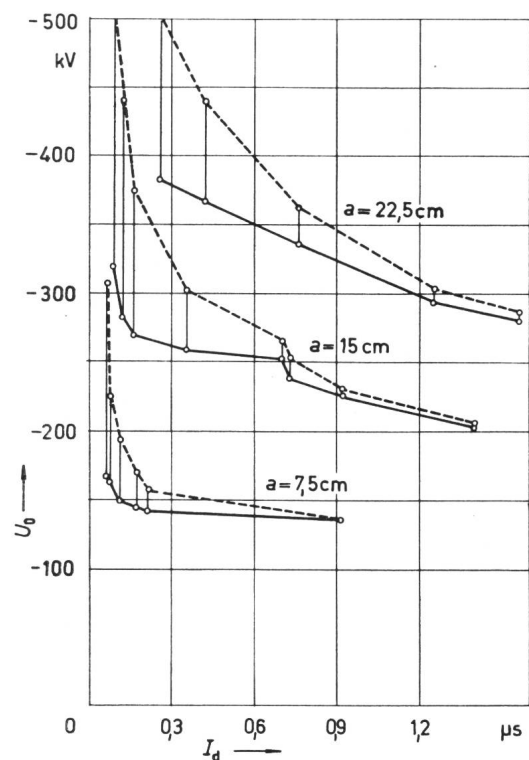


Fig. 13
Rechteckstosskennlinien
Negative 10-cm-Kugel—Platte-Anordnung
Bezeichnungen siehe Fig. 10

Um einen anschaulichen Begriff von der Grösse der Vorstromladung Q_v zu erhalten, soll sie in einer überschlägigen Berechnung verglichen werden mit der Ladung Q_z , die nach dem Funkengesetz von Toepler beim Durchschlag während des Spannungszusammenbruchs in eine Funkenstrecke eingebracht werden muss. Als Zusammenbruchszeit t_z soll das Zeitintervall definiert werden, während dem sich die Spannung am Plasmakanal von $u_{p1} = 0,9 U_d$ auf $u_{p2} = 0,1 U_d$ ändert, entsprechend einer Leitwertänderung des Kanales von:

$$A_1 = \frac{1}{R_i} \left[\frac{(u_{p0})T_d}{0,9 U_d} - 1 \right]$$

auf

$$A_2 = \frac{1}{R_i} \left[\frac{(u_{p0})T_d}{0,1 U_d} - 1 \right]$$

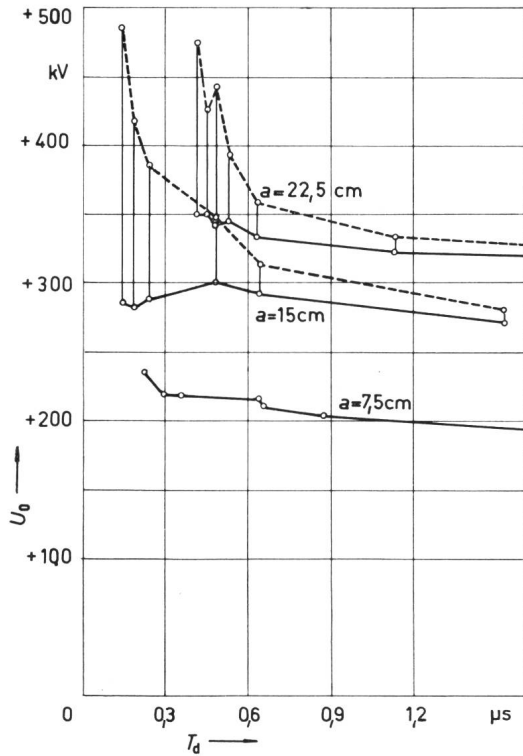


Fig. 14
Rechteckstosskennlinien
Positive 25-cm-Kugel—Platte-Anordnung
Bezeichnungen siehe Fig. 10

wenn $(u_{p0})_{T_d}$ die Leerlaufspannung des Generators am Ende von T_d ist.

Für die Ladung Q_z gilt:

$$Q_z = (u_{p0})_{T_d} \cdot t_z \frac{A_2 - A_1}{R_i (A_2 - A_1) + \ln \frac{A_2}{A_1}} \quad (5)$$

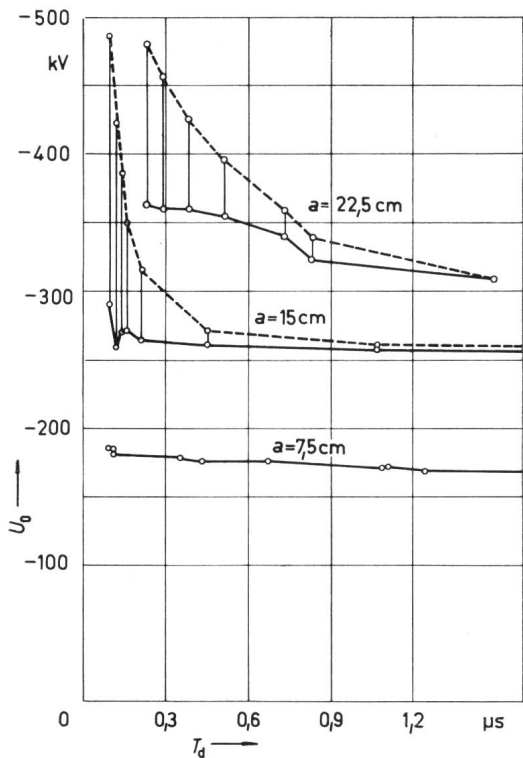


Fig. 15
Rechteckstosskennlinien
Negative 25-cm-Kugel—Platte-Anordnung
Bezeichnungen siehe Fig. 10

Werden nun für ein Zahlenbeispiel die in Gl. (5) enthaltenen Grössen ermittelt, die sich bei positiver Polarität für die 10-cm-Kugel—Platte-Anordnung bei $a = 22,5$ cm und $T_d = 0,4$ μ s ergeben, gilt: $(u_{p0})_{T_d} = 440$ kV (die Leerlaufspannung U_0 von 497 kV gemäss Fig. 12 zu Beginn der Vorstromperiode sinkt während T_d auf 440 kV ab); diese Spannung soll in erster Näherung während t_z als konstant angesehen werden. $U_d = 354$ kV nach Fig. 12. $R_i = 177$ Ω nach Gl. (3). t_z ergab sich aus den Experimenten zu 50 ns. Q_z errechnet sich somit aus Gl. (5) zu 95 μ C.

Durch einen Vergleich zwischen $Q_z = 95$ μ C mit $Q_v = 247$ μ C gemäss Fig. 17 erkennt man, dass die Ladung zur Vorbereitung des Durchschlagkanales wesentlich grösser sein kann als die Ladung, die dem Stossgenerator während des Spannungszusammenbruches entzogen wird.

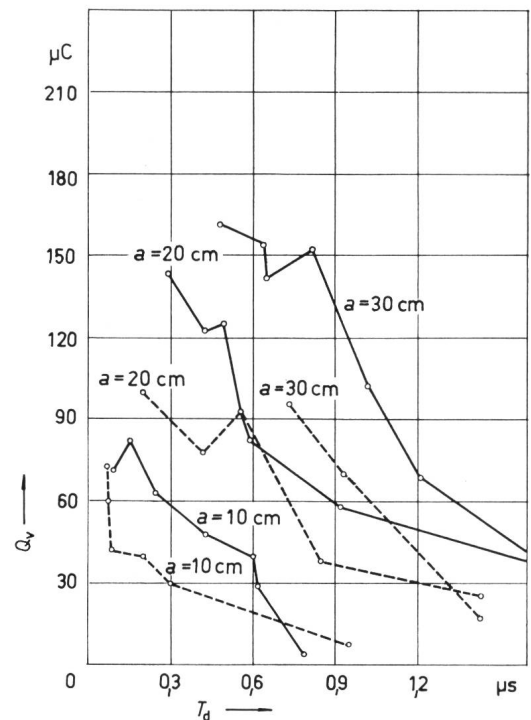


Fig. 16
Ladungskennlinien
Stab—Platte-Anordnung
 a Schlagweite; Q_v Vorstromladung
--- negativer Pol
— positiver Pol

6. Funkenstrecken in elektrischen Anlagen und Netzen

6.1 Spannungsbegrenzung durch Vorströme

Im folgenden soll dargelegt werden, wie sprungfunktionsähnliche Steilstoßspannungen in Netzen und Schaltanlagen durch Luftfunkenstrecken infolge der auftretenden Vorströme beeinflusst werden.

Während die Kennlinien der Ursprungsspannung $U_0 = f(T_d)$ abhängig vom Innenwiderstand der Stoßspannungsquelle sind und deshalb bei verschiedenen Stossgeneratoren verschieden ausfallen werden, müssen die Stosskennlinien $U_d = f(T_d)$ als weitgehend unabhängig vom Innenwiderstand der Spannungsquelle angesehen werden, da, wie an Hand der Fig. 6 gezeigt wurde, schon während der Stirnzeit die Spannung an den Prüflingsfunkenstrecken auf den Wert U_d begrenzt wird; in diesen Fällen tritt also die Ursprungsspannung an den Funken-

strecken überhaupt nicht auf. Wenn aber die Kennlinien $U_d = f(T_d)$ für alle Spannungsquellen gelten, folgt daraus, dass auch die Ladungskennlinien $Q_v = f(T_d)$ unabhängig vom Innenwiderstand der Stoßspannungsquelle sein müssen, da einer Funkenstrecke bei einem bestimmten Wert von U_d während T_d eine bestimmte Ladung zuzuführen ist. Aus einer Vergrößerung des Innenwiderstandes resultiert bei gleichem U_d und T_d eine Erhöhung der Ursprungsspannung U_0 , damit die gleiche Vorstromladung in die Funkenstrecke eingebracht werden kann.

Um die Folgerungen aus diesen Gegebenheiten erkennen zu können, sei angenommen, dass über eine mit einer Luftfunkenstrecke abgeschlossene Freileitung mit dem Wellenwiderstand Γ eine sprunghaftähnliche Stoßspannung einläuft, die ohne die Funkenstrecke einen Scheitelwert U_0 hätte. Mit Hilfe

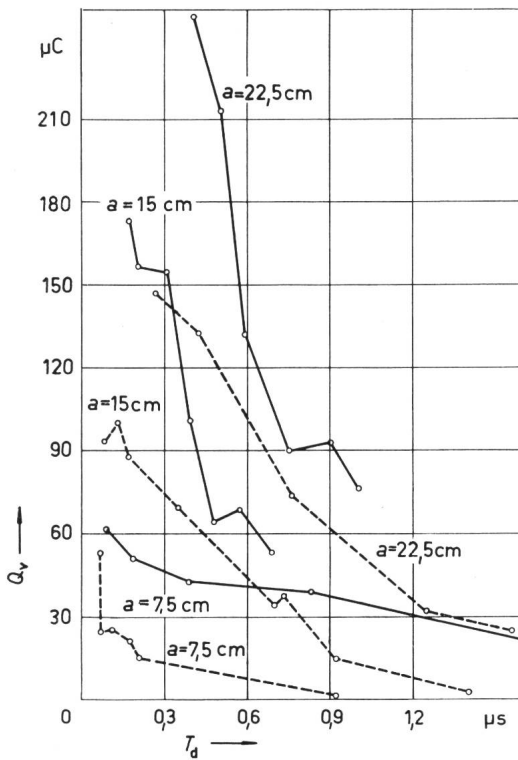


Fig. 17
Ladungskennlinien
10-cm-Kugel—Platte-Anordnung
Bezeichnungen siehe Fig. 16

der Stosskennlinien $U_d = f(T_d)$ und der Ladungskennlinien $Q_v = f(T_d)$ können nun die Kennlinien:

$$U_0 = f(T_d) = U_d(T_d) + \frac{Q_v(T_d)}{T_d} \Gamma \quad (6)$$

berechnet, d. h. für jeden Wert von U_0 die Spannungsabsenkung ($U_0 - U_d$) und die Zeit bis zum Durchschlag T_d ermittelt werden.

In Fig. 19 sind als Beispiel die nach Gl. (6) mit Hilfe der Fig. 13 und 17 berechneten Kennlinien $U_0 = f(T_d)$ mit Γ als Parameter für die negative 10-cm-Kugel—Platte-Anordnung mit $a = 22,5$ cm angegeben. Man erkennt daraus:

Je kleiner der Wellenwiderstand einer Leitung oder allgemein der Innenwiderstand einer Stoßspannungsquelle ist, desto geringer sind bei einer bestimmten Ursprungsspannung die Spannungsabsenkung und die Zeit bis zum Durchschlag. Überspannungen werden also infolge der Vorströme durch Luftfunkenstrecken umso wirksamer abgesenkt, je grösser der Wellenwiderstand oder der Innenwiderstand einer Stoßspannungsquelle ist.

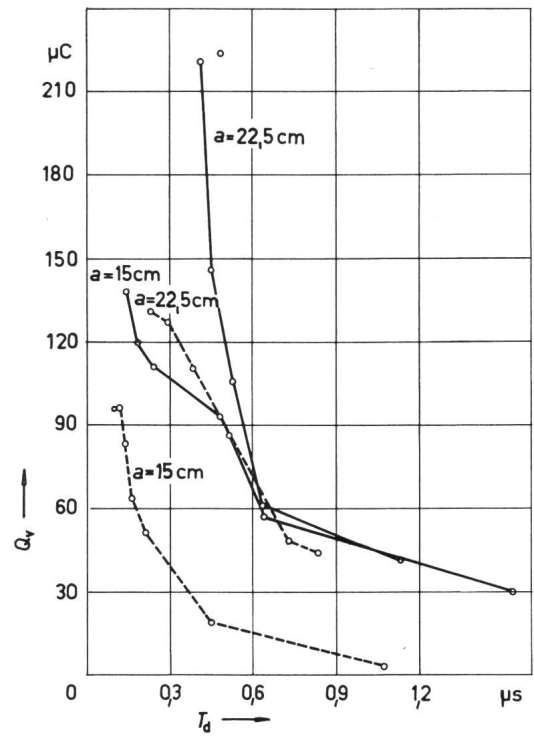


Fig. 18
Ladungskennlinien
25-cm-Kugel—Platte-Anordnung
Bezeichnungen siehe Fig. 16

Zusammenfassend soll festgehalten werden:

Beim Auftreten sprunghaftähnlicher Stoßspannungen an einer Funkenstrecke wird die Ursprungsspannung zunächst auf einen vom Innenwiderstand der Spannungsquelle abhängigen Wert abgesenkt. Während dieser Zeit T_d wird bei etwa konstanter Spannung eine bestimmte Ladung aufgenommen. Die Werte für die Ladung nehmen mit zunehmend überschießenden Stoßspannungen stark zu, so dass extrem hohe Stoss-

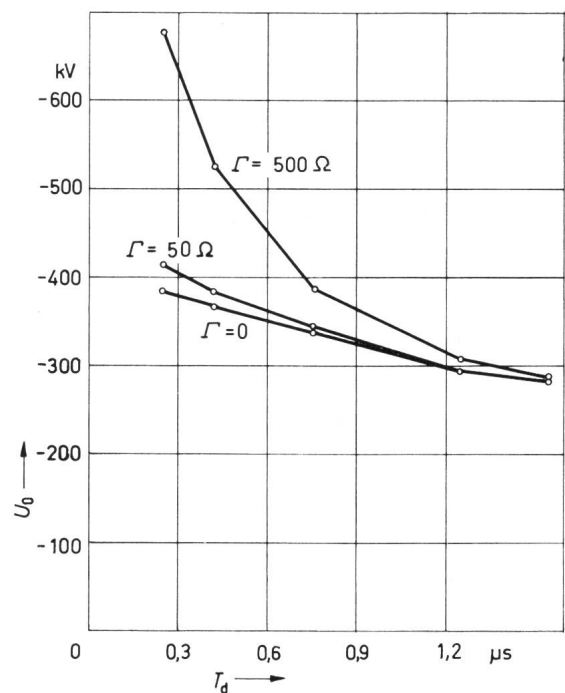


Fig. 19
Kennlinien $U_0 = f(T_d)$
Negative 10-cm-Kugel—Platte-Anordnung, Schlagweite = 22,5 cm;
 Γ Wellenwiderstand; U_0 Ursprungsspannung; T_d Zeit bis zum Durchschlag

spannungen prozentual wesentlich stärker abgebaut werden als relativ niedrige. Bleibt die Spannungsbeanspruchung über T_a hinaus bestehen, bricht die Funkenstrecke innerhalb einiger zehn ns zusammen und stellt einen Kurzschluss dar.

6.2 Pegel- und Schutzfunkenstrecken

Gemäss den Grundgedanken der Isolationskoordination bei Stoßspannungen infolge Blitzeinwirkungen, die in den VDE-Bestimmungen 0111 dargelegt sind, wird ein unterer (P_u) und ein oberer Stoßspannungspegel (P_0) einem Schutzpegel (P_s) zugeordnet mit dem Ziel, Überspannungsschäden zu vermeiden. Allgemein gilt gemäss [14]:

$$P_u/P_s \geq 1,2; \quad P_0/P_u \geq 1,15 \quad (7)$$

P_s ist die Spannungsgrenze, die bei der Anwendung von Überspannungsschutzgeräten an deren Einbauort nicht überschritten wird, P_u die Stehstoßspannung der äusseren Isolation, deren schwächste Stellen die Pegelfunkenstrecken – in der Regel als Stabfunkenstrecken ausgeführt – sein sollen, die allerdings nicht als Schutzfunkenstrecken betrachtet werden; P_0 ist die Stehstoßspannung der inneren Isolation der elektrischen Geräte.

Für eine sichere Isolationskoordination wäre zu fordern: Ein ausreichender Pegelabstand nicht nur zwischen dem Schutzpegel P_s und P_u der Pegelfunkenstrecken, sondern auch zwischen der 100-%-Durchschlag-Stoßspannung der Pegelfunkenstrecken und P_0 der inneren Isolation. Nur so kann vermieden werden, dass bei einem Versagen der Überspannungsableiter – hierauf wird noch eingegangen – die innere Isolation der elektrischen Geräte, z. B. der Transformatoren, durchschlägt. Die Koordination müsste bei den möglichen Luftdichten und -feuchtigkeiten sowie bei allen möglichen Blitzstoßspannungen, nicht nur bei Normstoßspannungen, gewährleistet sein.

Gemäss dem gegenwärtigen Stand der Technik sind diese Forderungen aus folgenden Gründen nicht alle erfüllt:

- Die Koordination erfolgt nur für die Stoßspannungen 1,2/50.
- Für Pegelfunkenstrecken werden nur die Stehstoßspannungen angegeben, nicht hingegen die 100-%-Durchschlag-Stoßspannungen. Bei einem Verhältnis $P_0/P_u \geq 1,15$ und bei einer bei Stabfunkenstrecken zu erwartenden Differenz zwischen der Steh- und 100-%-Durchschlag-Stoßspannung von mehr als 15 % wird selbst bei Vollwellen die innere Isolation nicht mehr eindeutig geschützt; dazu kommt noch, dass die elektrische Festigkeit der Pegelfunkenstrecken im Gegensatz etwa zu P_0 der Transformatoren und P_s der Überspannungsableiter abhängig ist von der Luftdichte und -feuchtigkeit.
- Bei überschüssenden Stoßspannungen 1,2/50 überschneiden sich die Stosskennlinien der Pegelfunkenstrecken mit denen der inneren Isolation der Geräte derart, dass bei kurzen Zeiten bis zum Durchschlag die innere Isolation durchschlägt. *Völcker* [15] gibt diesen Schnittpunkt an (für Pegelfunkenstrecke R 20 N und Transformator R 20 N) bei $T_d = 1,8 \mu s$, *Gehring* und *Gens* [16] (für Stabfunkenstrecke mit $a = 41$ cm und Transformator) bei $T_d = 0,7 \mu s$.

Es könnte der Einwand gebracht werden, dass auf eine exakte Koordination von P_u und P_0 verzichtet werden kann, wenn der Schutzpegel P_s sicher eingehalten wird, so dass keine Spannungen, die an P_u oder P_0 heranreichen, auftreten können. Die Überspannungsableiter können aber – selbst unter der Voraussetzung idealer Erdungsverhältnisse – die Überspannungen nicht an allen Anlagepunkten begrenzen. So wird in [17] ausgeführt, dass die Blitzüberspannungen (im Gegensatz zu den Schaltüberspannungen mit wesentlich grösseren Stirnzeiten) in ausgedehnten Stationen auf den doppelten Wert von P_s , auf den die Ableiter an ihrem Einbauort begrenzen, ansteigen können. Dies hängt mit dem begrenzten Schutzbereich

der Ableiter zusammen, wodurch die in eine Station einlaufenden Stoßspannungen nur in einem Bereich l auf einen Spannungswert unter P_u gehalten werden können [18; 19; 20]:

$$l = \frac{P_u - P_s}{2S} v \quad (m) \quad (8)$$

wobei P_u und P_s in kV, die Steilheit der einlaufenden Stossspannung S in kV/ μs und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Stoßspannung v in m/ μs einzusetzen sind.

Da der Wellenwiderstand von Freileitungen mit einigen 100 Ω in erster Näherung unabhängig von der Betriebsspannung U_n ist, treten in den Netzen aller Spannungsreihen grundsätzlich die gleichen Spannungsteilheiten auf; nur die Amplituden der in die Stationen einlaufenden Stoßspannungen werden durch die Freileitungsisolationsfestigkeit begrenzt [21; 14]. Hieraus folgt, dass der Schutzbereich l mit wachsender Reihenspannung grösser wird:

$$l = \frac{P_s}{U_n} \left(\frac{P_u}{P_s} - 1 \right) \frac{v}{2S} U_n = 81 \frac{U_n}{S} \quad (m) \quad (9)$$

wobei: $v = 300$ m/ μs , $P_u/P_s = 1,2$ nach Gl. (7) und $P_s/U_n = 2,7$ gemäss [19]; U_n ist in kV einzusetzen.

In [22] werden Steilheiten von 500...1000 kV/ μs als real angesehen; nach Berechnungen [2] muss aber sicherlich mit Steilheiten von mehreren MV/ μs gerechnet werden, die den Schutzbereich der Überspannungsableiter selbst bei Höchstspannungsleitungen auf wenige Meter begrenzen.

Die Ableiter können auf Grund ihrer Konzeption nur bei weit entfernten Blitzeinschlägen wirksam sein, bei denen über die Freileitungen Stoßspannungen einlaufen; bei Naheinschlägen muss dagegen mit einem eingepprägten Blitzstrom gerechnet werden [23], so dass wegen des Ableiterwiderstandes nicht einmal mehr die Begrenzung der Spannung am Einschlagort gewährleistet ist.

Aus diesen Betrachtungen geht hervor, dass die Überspannungsableiter nicht bei allen denkbaren Beanspruchungen ausreichend zu schützen vermögen. Bei einem Versagen der Ableiter muss daher sichergestellt sein, dass höchstens Überschläge an einer Luftstrecke, keinesfalls aber in der inneren Isolation der elektrischen Geräte auftreten. Diese Forderungen können im Prinzip Pegelfunkenstrecken erfüllen, da sie einmal im Gegensatz zu den Ableitern ohne Schwierigkeit und ohne bedeutenden Kostenaufwand unmittelbar an alle zu schützenden Objekte angebaut werden können und zum anderen durch Blitzstoßströme nicht nennenswert beschädigt werden. Natürlich können diese Funkenstrecken nur die Funktion eines Notschutzes beim Versagen der Ableiter übernehmen, da sie in der Regel einen Kurzschluss verursachen, der nur durch Abschaltung wieder gelöscht werden kann.

Die bisher als Pegelfunkenstrecken verwendeten Stab-Stab-Anordnungen können den Notschutz nicht übernehmen, da sie insbesondere bei sehr steilen und überschüssenden Stoßspannungen, bei denen auch ein Versagen der Ableiter in Rechnung gestellt werden muss, die innere Isolation nicht mehr schützen. Aus den in dieser Abhandlung aufgezeigten Experimenten kann aber der Schluss gezogen werden, dass weitgehend homogene Anordnungen als Notschutzfunkenstrecken wesentlich besser geeignet sein werden als stark inhomogene Anordnungen, wie sie Stabfunkenstrecken darstellen:

Schutzanordnung	Zu schützende Anordnung					
	Stab-Stab in Luft	Kugel-Platte in Luft	Stab-Stab unter Öl			
$U_{d1\%}$ (kV) bei Stoßspannung 1,2 50						
	+	-	+	-	+	-
$\delta = 1$	180	191	199	200	267	275
$\delta = 0,94$	169	180	187	188		
δ relative Luftdichte						

a) Diese Anordnungen weisen gerade bei Steilstoßspannungen und kurzen Zeiten bis zum Durchschlag ausserordentlich flache Stosskennlinien $U_d = f(T_d)$ auf.

b) Die negativen 50- und 100-%-Durchschlag-Stoßspannungen liegen unter den positiven Durchschlag-Stoßspannungen; analog verlaufen die negativen Stosskennlinien unterhalb der positiven Kennlinien, so dass gerade steile negative Stoßspannungen, wie sie bei multiplen negativen Blitzen auftreten, sehr wirkungsvoll begrenzt werden.

c) Die Luftfunkenstrecken haben den grossen Vorteil, dass vor dem eigentlichen Durchschlag bei stark überschüssenden Stossspannungen sehr hohe Vorströme gezogen werden. (Die Vorstromladung nimmt mit abnehmendem T_d stark zu!) Hierdurch werden extreme Spannungsspitzen sehr wirksam abgebaut. Ausserdem begrenzen die Strecken durch die Vorströme für eine bestimmte Zeit bis zum Durchschlag die Amplituden der Stoßspannungen, sie wirken also während T_d ähnlich wie ein Überspannungsableiter.

Aus einer Versuchsreihe mit Stoßspannungen 1,2|50 und Steilstoßspannungen 0,03|43 bei einer rel. Luftdichte von $\delta = 0,94$ geht hervor, wie eine Stabfunkenstrecke als Repräsentant einer bisher üblichen Pegelfunkenstrecke und eine weitgehend homogene Anordnung, eine Kugel-Platte-Anordnung, eine Isolierstrecke unter Öl zu schützen vermögen. Aus Tabelle I sind zu ersehen: Die Abmessungen der Anordnungen sowie die gemäss den VDE-Vorschriften massgebenden Stehstoßspannungen (hier charakterisiert durch die 1-%-Durchschlag-Stoßspannungen $U_{d1\%}$) bei der Beanspruchung mit der Normstoßspannung 1,2|50.

Obwohl die positiven und negativen Stehstoßspannungen der Öl-anordnung deutlich über denjenigen der Stabanordnung liegen, war bei $T_d < 1,3 \mu s$ sowohl bei der positiven und negativen Norm- als auch bei der Steilstoßspannung kein eindeutiger Schutz mehr gegeben. Dagegen vermochte die Kugel-

Platte-Anordnung die Öl-strecke sogar bis zu Zeiten bis zum Durchschlag von 50 ns bei der Steilstoßbeanspruchung einwandfrei zu schützen, obwohl der niedrigste Stehstoßspannungswert der Kugel-Platte-Anordnung etwa 10 % über dem Wert der Stabfunkenstrecke lag.

Als weitere Information sind in Fig. 20 die Spannungsverläufe bei einer Beanspruchung mit einer gleichhohen negativen Steilstoßspannung 0,03|43 gegenübergestellt von

a) der mit der Öl-strecke kombinierten Stabanordnung; hier liegt ein Öldurchschlag vor,

b) der mit der Öl-strecke kombinierten Kugel-Platte-Anordnung; hier wird die Luftstrecke durchschlagen.

Man erkennt, wie ausserordentlich wirksam die Kugel-Platte-Anordnung die Überspannung begrenzt, so dass der Scheitelwert der angelegten Stoßspannung überhaupt nicht mehr wirksam werden kann.

Es wird nicht übersehen, dass die Ausführung einer Pegelfunkenstrecke als Homogen-Strecke aufwendiger ist als die einer bisher üblichen Stabfunkenstrecke. Sie müsste vor Verschmutzung, z. B. durch einen Schutzzyylinder, geschützt werden, um das exakte Ansprechverhalten sicherzustellen. Noch günstiger wäre eine luftdicht gekapselte Ausführung, da hierbei auch die Luftdruckschwankungen eliminiert werden könnten.

In diesem Zusammenhang mag interessant sein, dass man in der amerikanischen Anlagentechnik bei bestimmten Anlagen aus Kostengründen auf Erdseile und Ableiter verzichtet. So werden von der Bonneville Power Administration [16] 115-kV-Transformatoren nur durch Stabfunkenstrecken geschützt, ebenso die Schalter auf der Netzseite. Gerade bei dieser Technik müsste natürlich ein optimales Schutzverhalten der Luftfunkenstrecken angestrebt werden.

Die aus den vorangegangenen Ausführungen resultierende Forderung kann also lauten: Ausbildung der Pegelfunkenstrecken in elektrischen Anlagen als wirksame Notschutzfunkenstrecken!

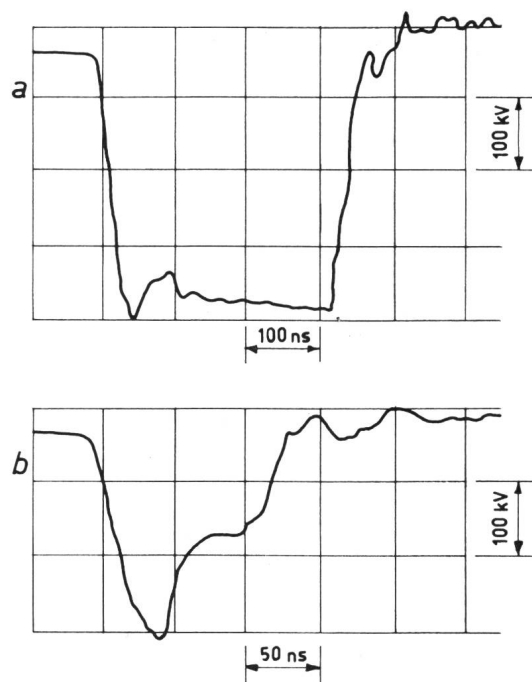


Fig. 20
Steilstoßbeanspruchung
a) Stabanordnung und Öl-strecke; b) Kugel-Platte-Anordnung und Öl-strecke

7. Schlussbemerkung

Die vorliegende Abhandlung entstand am Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Hochschule München. Der Verfasser dankt dem Direktor des Institutes, o. Prof. Dr.-Ing. H. Prinz, für das rege Interesse an der hier aufgegriffenen Thematik sowie der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* für die Bereitstellung von Sachmitteln.

Literatur

- [1] K. Berger und E. Vogelsanger: Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 56(1965)1, S. 2...22.
- [2] H. Prinz: Steilstromblitze und Anlagenschutz. Bull. SEV 58(1967)21, S. 946...951.
- [3] H. Kärner und J. Wiesinger: Kritische Bemerkungen zur Ermittlung der charakteristischen Grössen von abgeschnittenen Stoßspannungen. ETZ-A 88(1967)14, S. 339...343.
- [4] H. Kärner: Erzeugung steilster Stoßspannungen hoher Amplitude. Bull. SEV 58(1967)24, S. 1096...1110.
- [5] C. F. Wagner: Application of predischarge currents of parallel electrode gaps. Trans. IEEE Power Apparatus and Systems 83(1964)9, S. 931...944.
- [6] C. F. Wagner: Der Blitz und sein Einfluss auf das Verhalten von Freileitungen. ETZ-A 84(1963)16, S. 517...530.
- [7] C. F. Wagner and A. R. Hileman: Effect of predischarge currents upon line performance. Trans. IEEE Power Apparatus and Systems 82(1963)65, p. 117...131.
- [8] A. Csernatony-Hofer: Über eine Gesetzmässigkeit des Polaritätseffektes in der Durchschlagspannung von atmosphärischer Luft. Arch. Elektrotechn. 47(1962)4, S. 207...218.
- [9] C. F. Wagner and A. R. Hileman: Mechanism of Breakdown of Laboratory. Gaps. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 80(1961)56, S. 604...622.

- [10] J. Wiesinger: Einfluss der Frontdauer der Stoßspannung auf das Ansprechverhalten von Funkenstrecken. Full. SEV 57(1966)6, S. 243...246.
- [11] M. Toepler: Zur Bestimmung der Funkenkonstante. Arch. Elektrotechn. 18(1927)6, S. 549...562.
- [12] W. Weizel und H. Rompe: Theorie des elektrischen Funkens. Annalen der Physik 6/1(1947)6, S. 285...300.
- [13] F. Heilbronner und H. Kärner: Ein Verfahren zur digitalen Berechnung des Spannungszusammenbruchs von Funkenstrecken. ETZ-A 89(1968)5, S. 101...108.
- [14] H. Baatz: Bemessung und Prüfung der Isolation. ETZ-A 87(1966)2, S. 71...76.
- [15] O. Völcker: Gewittergefährdung und Überspannungsschutz von Mittelspannungsanlagen. Siemens Z. 42(1968)3, S. 176...182.
- [16] E. H. Gehrig and R. S. Gens: Experience revises substation lightning protection. Trans. AIEE 76(1957)-, S. 149...156.
- [17] A. R. Hileman a. o.: Insulation coordination in APS 500 kV stations. 86(1967)6, S. 655...665.
- [18] H. Baatz: Überspannung in Energieversorgungsnetzen. Berlin, Göttingen, Heidelberg, Springer Verlag, 1956.
- [19] A. Goldstein: Koordination der Isolation und Wahl der Überspannungsableiter. Brown Boveri Mitt. 51(1964)1/2, S. 47...55.
- [20] W. Waste: Überspannungsschutz in Drehstromschaltanlagen. ETZ-A 83(1962)6, S. 186...192.
- [21] M. Christoffel: Aktuelle Probleme der Isolationskoordination in Hoch- und Höchstspannungsnetzen. ETZ-A 87(1966)11, S. 372...376.
- [22] H. R. Armstrong, H. O. Stoelting and E. F. Veverka: Impulse studies on distribution line construction. Trans. IEEE Power Apparatus and Systems 86(1967)2, S. 206...214.
- [23] U. Burger: Überspannungsableiter und Funkenstrecke als Schutz von Transformatoren mit direkt eingeführtem Kabel. Bull. SEV 57(1966)26, S. 1211...1220.

Adresse des Autors:

Dr.-Ing. Johannes Wiesinger, Oberingenieur im Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Hochschule München, Arcisstrasse 21, D-8 München 2.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Übertragung, Verteilung und Schaltung Transmission, distribution et couplage

Rauhreifbekämpfung in elektrischen Netzen von 6...10 kV

621.315.1.3.027.5:621.315.175

[Nach D. W. Cholmskij u. a.: Das Abschmelzen des Rauhreifs auf Freileitungen 6...10 kV (russ.), Energetik 18(1969)4, S. 25...28]

Betriebserfahrungen mit Freileitungen zeigen, dass der Anteil von Störungen in Verteilleitungen, die auf Rauhreifbildung zurückzuführen sind, etwa 80...85 % beträgt. In der Praxis der Rauhreifbekämpfung erhielt die Methode des Abschmelzens mit Hilfe des Kurzschlußstromes die grösste Verbreitung. Diese Me-

thode wird heute vornehmlich in Netzen mit Spannungen von 35 kV und darüber angewandt.

Netze mit Netzspannungen von 6...10 kV zeichnen sich in der Regel durch eine weitgehende Uneinheitlichkeit aus, die durch eine grosse Anzahl von Abzweigungen verschiedener Länge mit Leitern verschiedener Typen gekennzeichnet ist. Ausserdem sind sogar die Abschnitte der Hauptleitungen aus Leitern verschiedenen Querschnitts ausgeführt, sodass das Abschmelzen hier äusserst selten durchgeführt wird. Immerhin haben die ersten Versuche, das Abschmelzen des Rauhreifs in Netzen von 6...10 kV anzuwenden, ermutigende Resultate gebracht. Die Erfahrung zeigte, dass auf den Abschnitten, in denen das Abschmelzen praktiziert wird, die Störungshäufigkeit infolge Rauhreifs praktisch auf Null zurückgegangen war.