

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 57 (1966)  
**Heft:** 25

**Artikel:** Über die Vergleichbarkeit von Koronamessungen an Spitze-Platte-Funkenstrecken in Luft bei Wechselspannung  
**Autor:** König, D.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-916660>

### **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:** 06.01.2026

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

Zum Schluss sei erwähnt, dass Gl. (19) eine Berechnung von  $\Delta I_C$  ermöglicht, wenn man in Gl. (20) und (21) statt  $R_{EE'}$  und  $R_{BB'}$  die Widerstände  $R_E + R_{EE'}$  und  $R_G + R_{BB'}$  berücksichtigt. Hier bedeuten  $R_E$  und  $R_G$  Aussenwiderstände in einer Schaltung. Man findet dann aus Gl. (19), (20), (21) für  $\Delta I_C$  bei  $U_{EB} = \text{konst.}$  folgende Extremfälle:

$$\text{a) } (R_G + R_{BB'}) \rightarrow \infty;$$

$$(R_E + R_{EE'}) = 0,$$

daher

$$K_u = 0; K_i = -\frac{1}{\beta_N}$$

$$\Delta I_C = \frac{I_C}{\beta_N} \Delta \beta_N \quad (23)$$

$$\text{b) } (R_G + R_{BB'}) \rightarrow 0;$$

$$(R_E + R_{EE'}) = \infty;$$

daher

$$K_u = 0; K_i = -1$$

und

$$\Delta I_C = \frac{I_C}{\beta_N} \Delta \beta_N \quad (24)$$

#### Literatur

- [1] W. Guggenbühl: Transistoren in Gleichstromverstärkern. Neue Technik 3(1961)1, S. 31...43.
- [2] M. Milkovič: Beitrag zur Stabilisierung des Ruhearbeitspunktes einer Transistor-Verstärkerstufe. Landis & Gyr Mitt. 10(1962)1, S. 85...91.
- [3] M. Milkovič: Untersuchungen über regenerative Transistor-Niveauschalter, Type N, für kleine Ein- und Ausschalt-niveaus und Hysterese sowie über regenerative «Null»-Niveauschalter. Dissertation der ETH Nr. 3560, Zürich 1964.
- [4] M. Milkovič: Über die äquivalenten Temperatur-Driftquellen-Ersatzschaltbilder eines Transistors. Arch. elektr. Übertrag. 20(1966)6, S. 343...352.
- [5] W. Guggenbühl, M. J. O. Strutt und W. Wunderlin: Halbleiterbauelemente. Band I: Halbleiter und Halbleiterdioden. Birkhäuser Basel 1962.
- [6] J. G. Linvill und J. F. Gibbons: Transistors and Active Circuits. McGraw-Hill New York 1961.

#### Adresse des Autors:

Dr. M. Milkovič, Zentrallaboratorium der Landis & Gyr AG, 6301 Zug.

## Über die Vergleichbarkeit von Koronamessungen an Spitze-Platte-Funkenstrecken in Luft bei Wechselspannung

Von D. König, Braunschweig

621.319.51.015.532

Gegenstand der Untersuchungen sind die Einflussgrößen, die für die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit von Koronamessungen an Spitze-Platte-Funkenstrecken in Luft bei Wechselspannung von Bedeutung sind. Zunächst wird ein kurzer Überblick über die Existenzbereiche der verschiedenen, möglichen Entladungsformen gegeben und dargelegt, dass für vergleichende quantitative Untersuchungen nur die negativen Koronaimpulse wenig oberhalb der Koronaeinsatzspannung hinreichend eindeutig und reproduzierbar sind. Nach einer Beschreibung der verwendeten Versuchsanordnung wird der Einfluss der Messkreisdaten auf den gemessenen zeitlichen Verlauf der Koronaimpulse untersucht und die Verfälschung der Impulsform durch einen Ankopplungsvierpol mit RC-Verhalten diskutiert. Anschliessend wird der Einfluss der Elektrodenform auf die Amplitude der oszillographierten Koronaimpulse untersucht. Zur Klärung des Einflusses der Beanspruchungsdauer durchgeführte Dauerversuche unter Verwendung von Spitzenelektroden aus verschiedenen Werkstoffen werden beschrieben und diskutiert. Abschliessend wird auf Folgerungen aus den Messergebnissen eingegangen.

L'objet des présentes recherches se rapporte aux grandeurs d'influence importantes au point de vue de la faculté de comparaison et de la reproductibilité des mesures d'effets de couronne des éclateurs disposés pointe contre plaque dans l'air pour tension alternative. L'auteur fournit en premier lieu un aperçu succinct des domaines d'existence des diverses formes de décharge possibles en précisant toutefois, que pour les études quantitatives comparatives seules les impulsions coronaires négatives peu au-dessus de la tension d'amorçage coronaire fournissent un critère précis et reproductible. Après la description des dispositifs d'essai adoptés, l'auteur étudie l'influence des caractéristiques des circuits de mesure par rapport aux variations dans le temps des impulsions coronaires et discute au sujet d'une altération de la forme des impulsions d'un quadripôle de couplage à comportement RC. L'étude se rapporte ensuite à l'influence exercée par la forme des électrodes sur l'amplitude des impulsions coronaires enregistrées par l'oscillographe. L'auteur décrit également des essais de durée lors de l'application d'électrodes à pointes exécutées en matériaux divers, essais servant à préciser l'influence de la durée de charge. L'analyse des conséquences des résultats des mesures termine l'exposé.

### 1. Einführung

Die Entladungsvorgänge an stark gekrümmten Elektroden in Luft sind bereits Gegenstand zahlreicher experimenteller und theoretischer Untersuchungen gewesen. Als besonders fruchtbar hat sich hierbei die Entdeckung des impulsförmigen Charakters der negativen Gleichspannungskorona im stark inhomogenen Feld einer Spitze-Platte-Funkenstrecke in der Nähe der Einsatzspannung durch G. W. Trichel im Jahre 1938 erwiesen [1]<sup>1)</sup>. Daran anschliessende Arbeiten lieferten dem Gasentladungsphysiker wertvolle Erkenntnisse über den Mechanismus des räumlich-zeitlichen Entladungsaufbaues bei Gleich- und Wechselspannung, dem Hochspannungstechniker Unterlagen für die zweckmässige Ausführung von Hochspannungs-Übertragungsanlagen.

In neuerer Zeit interessieren die impulsförmigen Entladungsvorgänge in einer Spitze-Platte-Funkenstrecke bei

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Wechselspannung auch vom Standpunkt der messtechnischen Erfassung und Bewertung äusserer und innerer Koronaentladungen bei Isolationsprüfungen, insbesondere da die Anordnung Spitze-Platte das Grundelement einer Koronastörstelle für Koronaentladungen in Gasen an Spitzen, scharfen Kanten oder Drähten darstellt [2] und sich als «Korona-normal» (discharge standard) [3] anbietet. Darüber hinaus sind Vorschläge bekannt geworden, mit Hilfe derartiger Funkenstrecken als Pulsgeber das Übertragungsverhalten von Koronaprüfschaltungen zu ermitteln [4; 5].

In diesem Zusammenhang ist der Frage der Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit von Koronamessungen an Spitze-Platte-Funkenstrecken bei Wechselspannung besondere Beachtung zu schenken. In der vorliegenden Arbeit soll daher aufgezeigt werden, welchen Einfluss Spannungshöhe, Messkreisdaten, Elektrodenform und Beanspruchungsdauer auf den gemessenen zeitlichen Verlauf der Koronaimpulse haben.

## 2. Die Existenzbereiche der verschiedenen Entladungsformen

Die Entladungserscheinungen an einer Spitze-Platte-Funkenstrecke in atmosphärischer Luft sind je nach Polarität und Höhe der anliegenden Spannung sehr unterschiedlich. Dennoch steigt unabhängig davon der Entladungsstrom  $I$  der Funkenstrecke mit zunehmender Spannung stetig an, wie dies Fig. 1 z. B. für negative Gleichspannung auf Grund von Messergebnissen nach *Woboditsch* [6] veranschaulicht. Für positive Gleichspannung ergeben sich prinzipiell ähnliche Verläufe.

Einen Überblick über die Existenzbereiche der verschiedenen Entladungsformen an einer Nadelspitze (Punktspitze) bei Gleichspannung gibt Tabelle I. Auch dieser Darstellung wurden

Existenzbereiche der verschiedenen Entladungsformen bei Gleichspannung an einer Spitze-Platte-Funkenstrecke in atmosphärischer Luft nach *Woboditsch* [6]

Tabelle I

Polarität der Spitzenelektrode			
Negativ		Positiv	
Bereich I 0...2,4 kV	Dunkelentladung kein sichtbares Glimmen keine impulsförmigen Entladungen	Bereich I 0...4,0 kV	Dunkelentladung kein sichtbares Glimmen keine impulsförmigen Entladungen
Bereich II 2,4...23 kV	impulsförmige Korona (Trichel-Impulse) sichtbares Glimmen impulsförmige Entladungen	Bereich II 4,0...4,8 kV	impulsförmige Korona kaum sichtbares Glimmen impulsförmige Entladungen
Bereich III 23...38 kV	impulslose Korona (Dauer-Korona) sichtbares Glimmen keine impulsförmigen Entladungen	Bereich III 4,8...13,8 kV	impulslose Korona (Dauer-Korona) sichtbares Glimmen keine impulsförmigen Entladungen
Bereich IV > 38 kV	Bogenentladung Lichtbogen	Bereich IV 13,8...16,0 kV	Büschelentladungen sichtbares Glimmen impulsförmige Entladungen
		Bereich V > 16 kV	Bogenentladung Lichtbogen

Messergebnisse von *Woboditsch* [6] zugrunde gelegt, die durch eigene orientierende Messungen grundsätzlich bestätigt werden konnten.

In diesem Zusammenhang ist eine von *Wagner* [7] durchgeführte Nachrechnung bemerkenswert, die ergab, dass die impulsförmigen Entladungsvorgänge im Bereich II nur einen Teil des insgesamt durch die Funkenstrecke fließenden Entladungsstromes  $I$  liefern. Der aus den Impulsen ermittelte Strom ist nach *Wagner* kleiner als der im Galvanometer gemessene, was als Beweis für das Vorhandensein weiterer, nicht impulsförmiger Entladungen gewertet wird.

Bei Wechselspannung treten in der negativen Halbschwingung die gleichen grundsätzlichen Entladungserscheinungen auf wie bei negativer Gleichspannung. Es existieren also je nach Höhe der Momentanwerte der negativen Wechselspannung die einzelnen in Tabelle I angegebenen Entladungsformen. Das gleiche gilt sinngemäss für die positive Halbschwingung. Allerdings ist die Spannung, bei der in der posi-

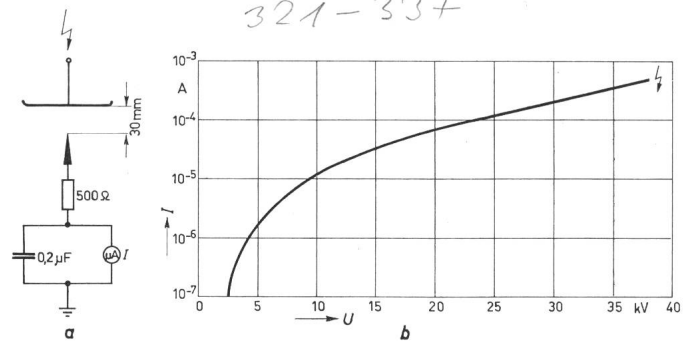


Fig. 1

Abhängigkeit des Entladungsstromes  $I$  von der Hochspannung  $U$  (Gleichspannung, Spitzenelektrode negativ) nach *Woboditsch* [6]

Spitzenelektrode: handelsübliche Stahlnähnel, 45 mm lang, Schaftdurchmesser 0,85 mm; Durchmesser der Plattenelektrode: 500 mm; Rand gerundet

a Meßschaltung; b Messergebnis

tiven Halbschwingung die ersten Impulse auftreten (Grenze zwischen Bereich I und II), viel höher als bei Gleichspannung. Der Grund für diese Erscheinung ist im Verbleib positiver Ionen vor der Spitze zu suchen, die in der positiven Halbschwingung abschirmend wirken. Da die Spannungsbereiche, in denen impulsförmige Entladungen auftreten können, sehr eng sind und von den Momentanwerten der Hochspannung rasch durchlaufen werden, können in einer positiven Halbschwingung nur vergleichsweise wenige Entladungsimpulse auftreten.

Die Verhältnisse bei Wechselspannung zeigt Fig. 2, in der die Lage der Entladungsimpulse in der negativen und in der positiven Halbschwingung bei Wechselspannungen mit verschiedenen Scheitelwerten schematisch dargestellt ist.

### 3. Die negative Impulskorona («Trichel»-Impulse)

Von allen möglichen Entladungserscheinungen, die in den einzelnen Existenzbereichen nach- oder nebeneinander auftreten, ist für die im folgenden beschriebenen Untersuchungen nur die *negative Impulskorona in der Nähe der Koronaeinsatzspannung*, also im unteren Teil von Bereich II von Interesse.

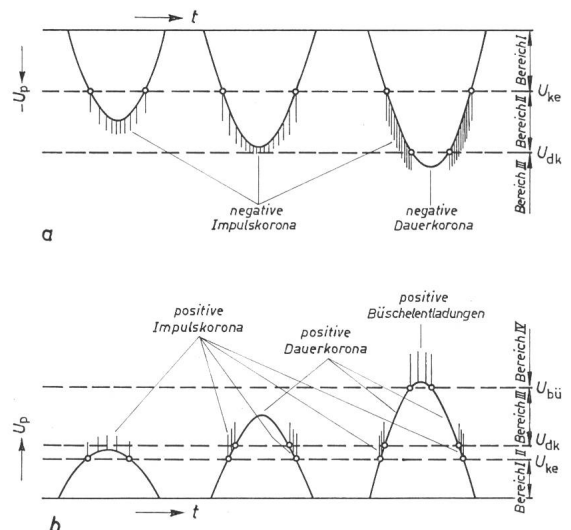


Fig. 2

Existenzbereiche der verschiedenen Entladungsformen an einer Spitze-Platte-Funkenstrecke in atmosphärischer Luft bei Wechselspannung nach *Woboditsch* [6]

a negative Halbschwingung; b positive Halbschwingung  
 $U_{ke}$  Einsatzspannung der impulsförmigen Korona;  $U_{dk}$  Einsatzspannung der Dauer-Korona;  $U_{bü}$  Einsatzspannung der positiven Büschelentladungen;  $U_p$  Prüfspannung;  $t$  Zeit

Lediglich die in diesem Spannungsbereich auftretenden «Trichel»-Impulse weisen eine hinreichend gleichmässige Impulsform, Impulsamplitude und Impulsfolgefrequenz auf und stellen eindeutige und reproduzierbare «Ausgangs-impulse» für eine genauere Untersuchung der verschiedenen Einflussgrössen auf den gemessenen zeitlichen Verlauf dar.

Wegen der Bedeutung dieser Entladungsform im Rahmen der vorliegenden Arbeit sei der Entstehungsmechanismus der Trichel-Impulse im folgenden kurz erläutert. Trichel-Impulse kommen dadurch zustande, dass die an der negativen Spitze entstehenden und in Richtung der Platte laufenden Elektronenlawinen durch die vor der Spitze stark abfallende Feldstärke verkümmern. Durch Bildung negativer Ionen entsteht eine die

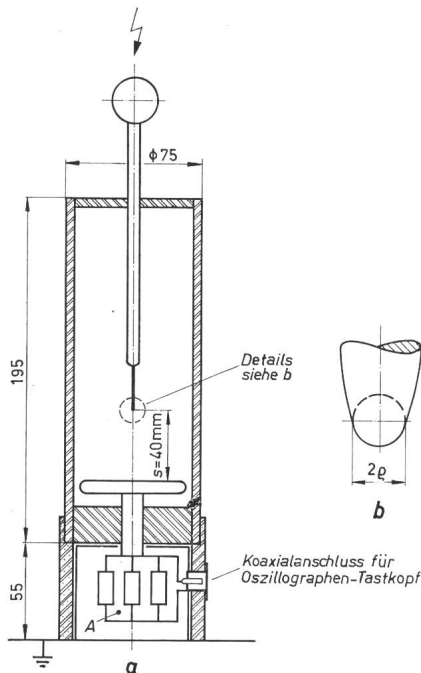


Fig. 3

#### Versuchsanordnung

a) Versuchsgefäss und Fussteil;  $s = 40$  mm; A Ankopplungsvierpol; b) schematische Darstellung einer mikroskopischen Vergrößerung der Nadelspitze;  $\rho$  Krümmungsradius der Nadelspitze

Kathodenspitze abschirmende Raumladung. Hierdurch wird eine kontinuierliche Auslösung weiterer Lawinen verhindert. Erst nach Beseitigung dieser Raumladung durch Rekombination oder Abwanderung können an der Kathode eine neue Lawine und damit ein neuer Trichel-Impuls entstehen.

### 4. Der zeitliche Verlauf der negativen Koronaimpulse

#### 4.1 Beschreibung der Versuchsanordnung

Die Untersuchungen wurden an der in Fig. 3a dargestellten Anordnung mit Wechselspannung durchgeführt. Als Spitzenelektrode wurden bei den in Abschnitt 4.3 beschriebenen Untersuchungen unveränderte handelsübliche Nähnadeln aus Stahl verwendet. Die Spitze derartiger Nadeln besitzt keine geometrisch definierte Form. Dies ist durch den Herstellungsvorgang bedingt. Trotzdem war es möglich, mit diesen Nadeln als Spitzenelektrode eindeutige und reproduzierbare Koronaimpulse für Vergleichszwecke zu erhalten, wenn folgendes beachtet wurde: Jede Nadel wurde nur jeweils einige Minuten durch Koronaentladungen beansprucht und anschliessend ausgewechselt (vgl. Abschnitt 4.5). Die neu eingesetzte Nadel wurde jeweils dem gleichen Päckchen entnommen wie die aus-

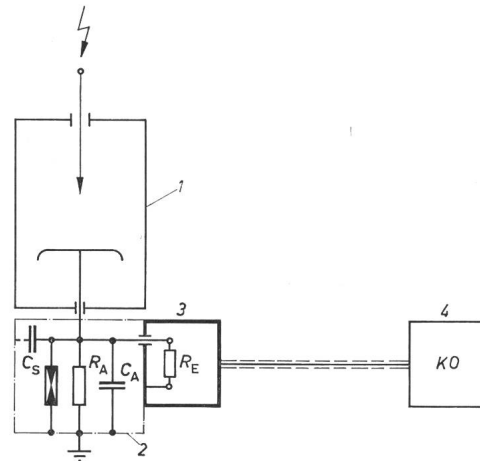


Fig. 4

#### Meßschaltung zur oszillographischen Aufnahme des zeitlichen Verlaufes von Koronaimpulsen

1 Versuchsgefäss; 2 geerdetes Fussteil mit den Elementen des Ankopplungsvierpols; 3 Tastkopf (Impedanzwandler-Stufe); 4 Verstärker und Kathodenstrahl-Oszillograph;  $R_A$  Ankopplungswiderstand;  $C_A$  Ankopplungskapazität (konzentriertes Element);  $C_S$  Streukapazität;  $R_E$  Eingangswiderstand

gewechselte Nadel, da in der Regel nur Nadeln aus dem gleichen Päckchen in ihrer Form hinreichend genau übereinstimmen (vgl. Abschnitt 4.4). Für die in den Abschnitten 4.2, 4.4 und 4.5 beschriebenen Untersuchungen wurden dagegen angeschliffene Nadelelektroden aus Palladium, Gold, Kupfer und Stahl verwendet, bei denen die nadelförmige Spitze mit einer kugeligen Abrundung versehen wurde, wie dies Fig. 3b zeigt. Die Plattenelektrode bestand in allen Fällen aus Messing und hatte einen Durchmesser von 60 mm. Die Schlagweite betrug bei allen Versuchen  $s = 40$  mm.

Die Messungen wurden in atmosphärischer Luft durchgeführt. Es erfolgte keine Korrektur auf Normalbedingungen, da die relative Luftdichte sich nur geringfügig änderte.

Die verwendete einfache Meßschaltung zeigt Fig. 4. In die Erdverbindung der Plattenelektrode wurde ein Ankopplungswiderstand A eingeschaltet und der zeitliche Verlauf des hieran auftretenden Spannungsabfalls mit einem Kathodenstrahl-

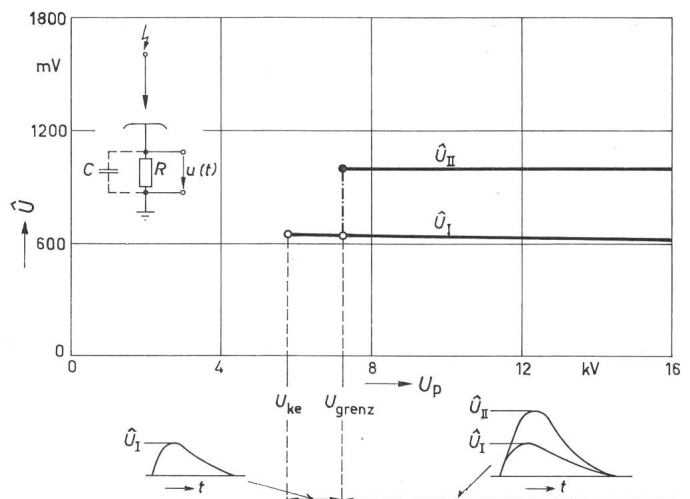


Fig. 5

#### Abhängigkeit der Koronaimpulsamplitude $\hat{U}$ von der Hochspannung $U_p$ für Impulstyp I und Impulstyp II

Krümmungsradius der Spitzenelektrode:  $\rho = 280$   $\mu$ m, Werkstoff: Stahl, Meßschaltung nach Fig. 4

C Kapazität; R Widerstand;  $U_p$  Prüfwechselspannung;  $u$  Koronaspansungsimpuls;  $\hat{U}$  Scheitelwert des Koronaspansungsimpulses;  $t$  Zeit

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6

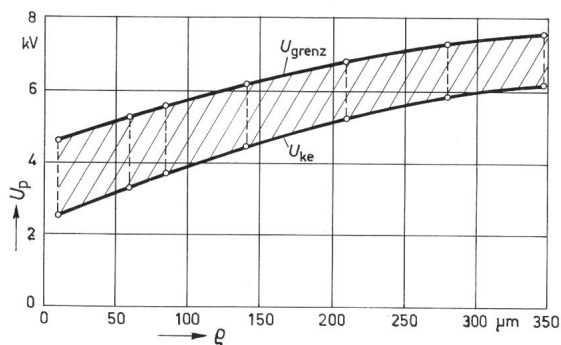


Fig. 6

**Bereich der Hochspannung  $U_p$ , in dem nur Koronaimpulse mit einheitlicher Amplitude (Impulstyp I) auftreten, in Abhängigkeit vom Krümmungsradius  $\rho$  der Spitzenelektrode**

Meßschaltung nach Fig. 4

$U_{ke}$  Koronaeinsatzspannung (Trichel-Impulse, Impulstyp I);  
 $U_{grenz}$  Einsatzspannung eines weiteren Impulstyps mit grösserer Amplitude (Impulstyp II)  
 Werkstoff der Spitzenelektrode: Stahl

Oszillographen über einen unmittelbar am Prüfling angeordneten Tastkopf aufgenommen. Die obere Grenzfrequenz des Oszillographen in dieser Schaltung beträgt etwa 100 MHz, die Anstiegszeit etwa 3,5 ns. Die auf Grund des Messaufbaues zum Ohmschen Ankopplungswiderstand  $R_A$  parallel liegende Streukapazität  $C_S$  betrug 26 pF einschliesslich der Eingangskapazität des Oszillographentastkopfes von 10 pF. Der reelle Eingangswiderstand  $R_E$  des Tastkopfes betrug 100 k $\Omega$  und erhöhte sich bei der Verwendung von Vorsteckteilern je nach Teilverhältnis auf 200, 500 oder 1000 k $\Omega$ . Für die in Abschnitt 4.3 beschriebenen Untersuchungen wurden die Werte der Schaltelemente  $R_A$  und  $C_A$  systematisch verändert. Der wirksame Ohmsche Widerstand des Ankopplungsvierpols  $A$  ergibt sich dann als:

$$R = \frac{R_A \cdot R_E}{R_A + R_E} \quad (1)$$

und die wirksame Kapazität als:

$$C = C_A + C_S \quad (2)$$

Sofern nicht anders erwähnt, wurden die Messungen bei folgenden Werten des Ankopplungsvierpols  $A$  durchgeführt:  $R = 576 \Omega$ ,  $C = 26$  pF.

#### 4.2 Einfluss der Spannungshöhe

Bei der Wahl einer Prüfspannung, die die Koronaeinsatzspannung  $U_{ke}$  etwas überschreitet, treten — wie in den Abschnitten 2. und 3. beschrieben — im Scheitel der negativen Halbschwingung Koronaimpulse auf, die einander so sehr gleichen, dass bei Dauertriggerung des Oszillographen auf dessen Schirm ein stehendes Bild mit scharfer Kontur erscheint. Die Helligkeit dieses stehenden Bildes nimmt bei Steigerung der Prüfwechselspannung zu, da dann auf dem Leuchtschirm mehr Impulsverläufe pro Zeiteinheit übereinandergeschrieben werden.

Wird die Prüfwechselspannung<sup>2)</sup> jedoch über einen Wert  $U_{grenz}$  hinaus erhöht, so entsteht zusätzlich zu den Koronaimpulsen mit der Amplitude  $\hat{U}_I$  ein zweiter Typ von Trichel-Impulsen mit einer erheblich grösseren Amplitude  $\hat{U}_{II}$ . Fig. 5 veranschaulicht diesen Vorgang. Für eindeutige und reproduzierbare Koronamessungen sind daher Werte der Prüfwechselspannung zu wählen, die zwischen Koronaeinsatzspannung

<sup>2)</sup> Im folgenden wird der Wert der Prüfwechselspannung  $\hat{U}_p/\sqrt{2}$  mit  $U_p$  bezeichnet.

$U_{ke}$  und der Spannung  $U_{grenz}$  liegen. Fig. 6 zeigt, dass dieser interessierende Spannungsbereich auch vom Krümmungsradius  $\rho$  der Spitzenelektrode abhängt.

#### 4.3 Einfluss der Messkreisdaten

Obwohl schon seit langem und oft versucht wurde, den zeitlichen Verlauf der negativen Koronaimpulse entweder unmittelbar zu oszillographieren (z. B. [7; 8; 9]) oder über das Frequenzspektrum der Impulse zu rekonstruieren [10], führte erst die in den letzten Jahren erreichte wesentliche Verbesserung der Oszillographietechnik zu Ergebnissen, an deren grundsätzlicher Richtigkeit nicht mehr zu zweifeln ist [2; 11].

Fig. 7 zeigt eine Gegenüberstellung der von verschiedenen Autoren angegebenen Impulsformen bei Gleich- und Wechselspannung. Es überrascht die mangelnde Übereinstimmung der einzelnen Impulsformen. Bei einem Vergleich ist jedoch zu berücksichtigen, dass die von den einzelnen Autoren untersuchten Entladungsvorgänge infolge unterschiedlicher Versuchsbedingungen unterschiedlich gewesen sein können. Eine mögliche Ursache für die mangelnde Übereinstimmung der angegebenen Impulsformen können jedoch auch unterschiedliche Messkreisdaten sein. Im folgenden soll daher der Einfluss der Messkreisdaten näher untersucht werden.

Zur Bestimmung der durch den Messkreis hervorgerufenen Verfälschung des am Oszillographen abgebildeten Spannungsimpulses gegenüber dem eigentlichen Koronaimpuls sind bereits verschiedene Ersatzschaltbilder untersucht worden [10; 11; 12]. Ein solches unter Berücksichtigung der vorliegenden Verhältnisse aufgestelltes Ersatzschaltbild zeigt Fig. 8. Vorausgesetzt werden hierbei ein konstanter Wert der sinusförmigen Prüfwechselspannung  $U_p$ , eine konstante Schlagweite  $s$  der Funkenstrecke, sowie während des Versuches konstant bleibende Elektrodenabmessungen, insbesondere eine unveränderte Form der Spitzenelektrode.

Aus diesem Ersatzschaltbild ist zu ersehen, dass die gesamte Ladung  $q$  eines Koronaimpulses nicht sofort aus der Spannungsquelle oder einem Hochspannungskondensator  $C_h$  nachgeliefert werden kann, da dies durch die Induktivitäten dieser

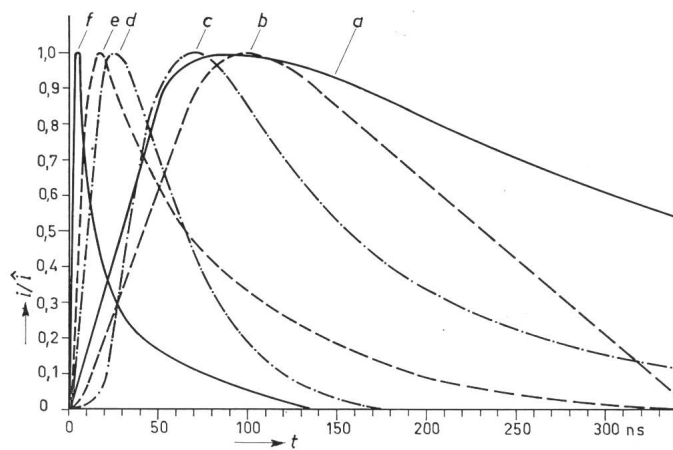


Fig. 7

**Von verschiedenen Autoren angegebene Koronaimpulse an einer Spitze-Platte-Funkenstrecke in der Luft**

$i$  Koronastrom;  $\hat{i}$  Scheitelwert des Koronastromes;  $t$  Zeit  
 a nach Baumann [8] Fig. 2 und [9] Fig. 3, Wechselspannung; b nach Wagner [7] Fig. 6, Gleichspannung, Impuls auf Grund der Verstärkereigenschaften rekonstruiert; c nach Heintz [10] Fig. 9, Gleichspannung, Impuls aus dem Hochfrequenzspektrum rekonstruiert; d nach Kind [2] Fig. 3, Gleichspannung; e nach Schwab [11] Anhang: Osz. Nr. 1, Gleichspannung; f rekonstruierter Koronastromimpuls nach Fig. 11 auf Grund eigener Messungen, Wechselspannung



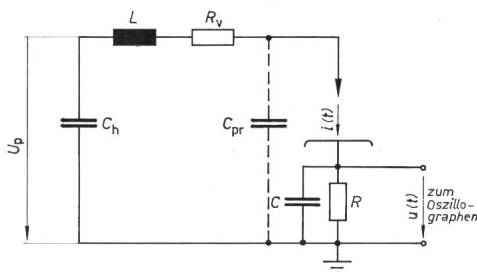


Fig. 8

Ersatzschaltbild des gesamten Messkreises

$R$  wirksamer Ohmscher Widerstand des Ankopplungsgliedes;  $C$  wirksame Kapazität des Ankopplungsgliedes;  $C_{pr}$  Prüflingskapazität;  $R_v$  Ohmscher Widerstand der Zuleitung;  $L$  Induktivität der Zuleitung;  $C_h$  Hochspannungskondensator (parallel zur Spannungsquelle);  $i$  Koronastromimpuls;  $u$  Koronaspannungsimpuls;  $t$  Zeit

Schaltelemente sowie der Zuleitungen verhindert wird. Die Ladung  $q$  eines Impulses muss daher zunächst im wesentlichen aus der Prüflingskapazität  $C_{pr}$  geliefert werden. Hieraus folgt eine Verminderung der Spannung an der Funkenstrecke um:

$$\Delta U = \frac{q}{C_{pr}} \quad (3)$$

die durch Nachladung vom Netz jedoch rasch wieder beseitigt wird. Mit den Richtwerten von  $q = 10^{-10} \dots 10^{-11}$  As und  $C_{pr} = 10$  pF wird  $\Delta U = 1 \dots 10$  V. Eine sprungartige Spannungsänderung vom Betrag  $\Delta U$  kann gegenüber dem Wert der Hochspannung  $U_p$  sicher vernachlässigt werden und hat keinen Einfluss auf die Ausbildung des Koronaimpulses.

Dass die geschilderten Überlegungen zutreffen, konnte durch einen einfachen Versuch nachgewiesen werden. Da die Grösse der Induktivitäten durch die verwendeten Schaltelemente und Zuleitungen vorgegeben war und nur in geringem Masse verändert werden konnte, wurde durch Zuschalten sehr hochohmiger Widerstände  $R_v$  der Prüfling zusätzlich stark von der Hochspannungsquelle entkoppelt. Bis zu dem höchsten Wert von  $R_v = 420$  M $\Omega$ , der zur Verfügung stand, konnte keine Veränderung der Form des am Ankopplungswiderstand  $A$  oszillographierten Koronaimpulses festgestellt werden. Weiterhin zeigte dieser Versuch sehr anschaulich, dass der über den Ankopplungswiderstand  $A$  fließende oszillographisch bestimmte Impulsstrom keinesfalls gleichzeitig über  $R_v$  geflossen sein kann, da dann an  $R_v$  ein grösserer Spannungsabfall aufgetreten wäre, als an treibender Spannung im Kreis überhaupt zur Verfügung stand.

Die elektrischen Daten der Prüfspannungsquelle sind also — wie auch bereits von Heintz [10] festgestellt wurde — ohne Einfluss auf den räumlich-zeitlichen Ablauf des Entladungsvorganges im Feldraum und damit auch ohne Einfluss auf Ausbildung und Form des über die Erdelektrode abfließenden Koronaimpulses. Die von der Anordnung Spitze-Platte gelieferten Koronaimpulse können daher als *eingeprägte Stromimpulse* betrachtet werden, die von einer Quelle eingepprägter Impulsströme entsprechend Fig. 9 geliefert werden. Im folgenden soll daher von Koronastromimpulsen nur gesprochen werden, wenn die von der Störstelle gelieferten Impulse gemeint sind<sup>3)</sup>.

Durchläuft nun ein derartiger eingepprägter Koronastromimpuls den aus  $R$  und  $C$  bestehenden Ankopplungsvierpol, so

<sup>3)</sup> An dieser Stelle sei auf die grundsätzlich andersartigen Verhältnisse bei Prüflingen mit inneren Koronaentladungen hingewiesen. Bei diesen treten an Ohmschen Ankopplungsgliedern der üblicherweise verwendeten Grössenordnung eingepprägte Koronaspannungsimpulse auf [2].

erfolgt eine Verformung des Koronastromimpulses  $i_k(t)$  zu dem Spannungsimpuls  $u(t) = R \cdot i_R(t)$ , mit dem der Oszillographeneingang beaufschlagt wird.

Die Vertikalverstärker des verwendeten Oszillographen verfälschen diese Eingangsspannung  $u(t)$  weiter zu dem auf dem Oszillographenschirm schliesslich sichtbaren Impulsverlauf  $u^*(t)$ . Da diese zusätzliche Verfälschung jedoch bei Verwendung moderner Breitbandoszillographen von 100 MHz Bandbreite (entsprechend einer Anstiegszeit  $t_a = 3,5$  ns, bzw. einer Verstärkerzeitkonstante  $T_V = 1,6$  ns) sehr gering ist, soll der verformende Einfluss des Oszillographen, der grundsätzlich auch erfasst werden kann, im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt werden.

Die hier interessierende Verformung des im folgenden als «Originalimpuls» bezeichneten Koronastromimpulses  $i_k(t)$  durch das  $RC$ -Glied des Ankopplungsvierpols kann auch allgemein rechnerisch erfasst werden, wenn es gelingt, den Originalimpuls durch einen einfachen analytischen Ausdruck anzunähern [11]. Dies ist nach den hier beschriebenen Messungen jedoch nicht der Fall. Insbesondere gibt die naheliegende und in der Stoßspannungstechnik übliche Überlagerung zweier abklingender Exponentialfunktionen der Form:

$$i_k(t) = c(e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) \quad (4)$$

keine befriedigende Näherung für den Verlauf des gesamten Originalimpulses.

Eingehende Untersuchungen zeigten, dass es keine Wertetripel  $c, T_1$  und  $T_2$  gibt, die im Zusammenhang mit Gl. (4) die gestellten Anforderungen im Hinblick auf gute Übereinstimmung mit dem Originalimpuls erfüllen, der unter Benutzung einer im folgenden Abschnitt beschriebenen graphischen Methode aus oszillographischen Messungen bestimmt wurde. Das zunächst überraschende Versagen des an anderer Stelle bewährten Näherungsansatzes wird verständlich, wenn man sich vergegenwärtigt, dass die Rückenhalbwertszeit des vorliegenden Originalimpulses im Vergleich zur Stirnzeit ausserordentlich kurz ist ( $t_s \approx 4$  ns,  $t_R \approx 12$  ns), also ein Verhältnis  $t_s/t_R \approx 1/3$  vorliegt, während in der Stoßspannungstechnik bisher vornehmlich Impulsspannungen mit  $t_s/t_R = 1/5 \dots 1/50$  von Interesse waren.

Um den impulsverformenden Einfluss des Ankopplungsvierpols dennoch auch quantitativ aufzuzeigen, wird ein graphisches Näherungsverfahren gewählt, das im folgenden beschrieben werden soll.

Den zunächst unbekannten und gesuchten Originalimpuls  $i_k(t)$  denke man sich entsprechend Fig. 10 durch die aus den einzelnen Stromsprüngen  $i_{kv}$  zusammengesetzte Treppenkurve  $i_k^*(t)$  ersetzt. Die Intervallbreite  $\Delta t$  dieser Treppenkurve sei hierbei gleich und hinreichend klein gewählt, so dass der zeitliche Verlauf des Impulsstromes  $i_k(t)$  durch die Treppenkurve

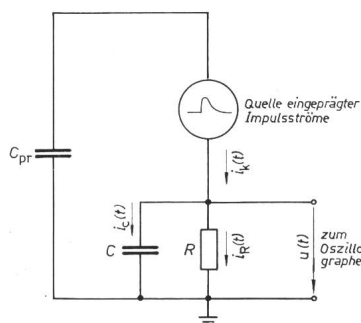


Fig. 9

Ersatzstromkreis der eingepprägten Koronastromimpulse unter Berücksichtigung der Ankopplungsglieder  $R$  und  $C$

$C_{pr}$  Prüflingskapazität;  $i_k$  Koronastromimpuls (Gesamtstrom);  $i_R$  Teilstrom durch  $R$ ;  $i_C$  Teilstrom durch  $C$ ;  $u$  Koronaspannungsimpuls;  $t$  Zeit

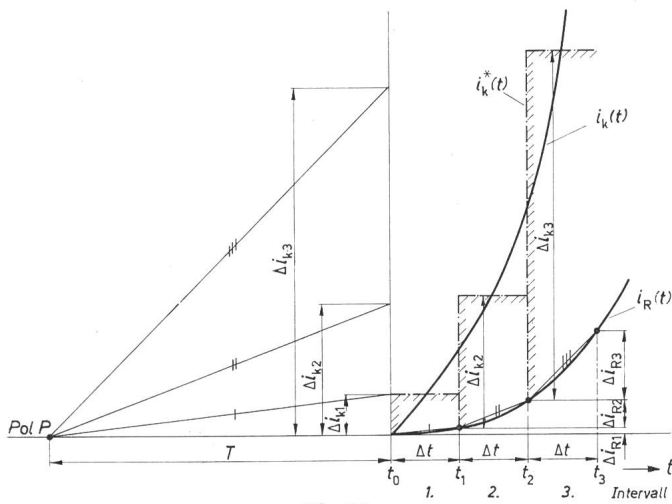


Fig. 10

Graphisches Näherungsverfahren zur Ermittlung der Impulsverformung durch den Ankopplungsvierpol

Erläuterungen siehe im Text

$i_k^*(t)$  gut angenähert wird. Man denke sich nun das  $RC$ -Glied nach Fig. 9 mit dem eingepprägten Strom  $i_k^*(t)$  beaufschlagt. Als Folge des Stromsprunges  $\Delta i_{k1}$  fließt dann während des 1. Intervalles durch den Ohmschen Widerstand  $R$  des  $RC$ -Gliedes der Strom:

$$i_{R1} = \Delta i_{k1} (1 - e^{-t/T}) \quad (5)$$

mit

$$T = RC$$

Für die mittlere Steigung dieses Stromes ergibt sich unter der Voraussetzung  $\Delta t \ll T$  die Näherungsgleichung:

$$\frac{\Delta i_{R1}}{\Delta t} \approx \frac{\Delta i_{k1}}{T} \quad (6)$$

Für das  $v$ -te Intervall gilt bei Berücksichtigung der zugehörigen Randbedingungen sinngemäß:

$$\frac{\Delta i_{Rv}}{\Delta t} \approx \frac{\Delta i_{kv}}{T} \quad (7)$$

Ist nun der zeitliche Verlauf des verfälschten Koronaimpulses  $i_R(t)$  bekannt, so kann der ungefähre Verlauf des Originalimpulses  $i_k(t)$  nach der durch Gl. (7) gegebenen Konstruktionsanweisung als aus einzelnen Stromsprüngen  $\Delta i_{kv}$  zusammengesetzte Treppenfunktion  $i_k^*(t)$  ermittelt werden. Es ist zweckmässig, diese Konstruktion mit Hilfe des Poles  $T$  entsprechend Fig. 10 durchzuführen. Eine Ergänzung der Treppenkurve  $i_k^*(t)$  zu einem stetigen Verlauf liefert in guter Näherung den gesuchten Koronaimpuls  $i_k(t)$ . Die Näherung ist umso besser, je kleiner  $\Delta t/T$  gewählt wird (Richtwert:  $\Delta t/T \leq 0,3$ ).

Fig. 11  
Ermittlung des Originalimpulses  $i_k(t)$  aus dem Oszillogramm eines verformten Koronaimpulses  $u(t)/R$

Daten des Ankopplungsvierpols:  $T = 15$  ns,  $R = 576 \Omega$ ,  $C = 26$  pF

a Konstruktion des Originalimpulses  $i_k(t)$  entsprechend Fig. 10, bezogene Darstellung;  
b Oszillogramm des verformten Koronaimpulses  $u(t)$ , Meßschaltung nach Fig. 4, Prüfspannung  $U_p = 4,5$  kV, Spitzenelektrode: Stahlnähnadel

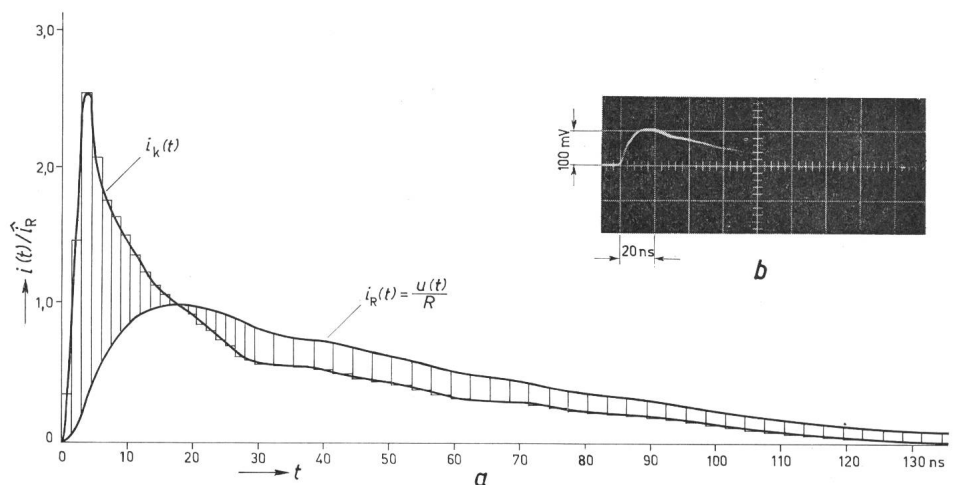


Fig. 11a zeigt als Ergebnis einer auf diese Weise durchgeführten Konstruktion den bereits in Fig. 7 wiedergegebenen Originalimpuls  $i_k(t)$ . Dieser Impuls wurde aus einem Oszillogramm der Spannung  $u(t)$  (Fig. 11b) ermittelt, das bei folgenden Werten des Ankopplungsvierpols aufgenommen wurde:  $T = 15$  ns,  $R = 576 \Omega$ ,  $C = 26$  pF. Der für die Stirnzeit des Originalimpulses ermittelte Wert  $t_s \approx 4$  ns entspricht der Eigenanstiegszeit des verwendeten Oszillographen. Nach [11] ist bei Normaldruck mit einer Anstiegszeit der Koronastromimpulse von 2,5 ns zu rechnen. Das angegebene Näherungsverfahren liefert also auch hierfür ein durchaus zufriedenstellendes Ergebnis.

Es ist nun wünschenswert, bei Kenntnis des Originalimpulses  $i_k(t)$  die Impulsverformung durch das  $RC$ -Glied für beliebige Werte  $R$  und  $C$  des Ankopplungsvierpols im voraus bestimmen zu können. Auch diese Aufgabe kann mit Hilfe von Gl. (7) gelöst werden. Hierfür wird zunächst der Originalimpuls  $i_k(t)$  in die Treppenfunktion  $i_k^*(t)$  zerlegt. Aus den einzelnen Werten  $\Delta i_{kv}$  können die zugehörigen Werte  $\Delta i_{Rv}/\Delta t$  bestimmt und zu einem Kurvenzug ergänzt werden, der den gesuchten verformten Koronaimpuls  $i_R(t)$  darstellt.

Die Fig. 12a und 12c zeigen verformte Koronaimpulse  $i_R(t) = u(t)/R$ , die nach dieser Konstruktionsanweisung aus dem Originalimpuls  $i_k(t)$  für folgende Werte des Ankopplungsvierpols ermittelt wurden:  $T = 25,7$  ns,  $R = 990 \Omega$ ,  $C = 26$  pF (Fig. 12a) und  $T = 236$  ns,  $R = 9090 \Omega$ ,  $C = 26$  pF (Fig. 12c). Die so ermittelten verformten Koronaimpulse stimmen mit den tatsächlich aufgenommenen Oszillogrammen  $u(t)$  (Fig. 12b und Fig. 12d) gut überein.

Dieses Ergebnis ist eine weitere Bestätigung dafür, dass es richtig ist, die hier betrachteten negativen Koronastromimpulse als eingeprägte Stromimpulse konstanter Form und Amplitude anzusehen, die nicht nur von den elektrischen Daten der Prüfspannungsquelle, sondern auch von dem Wert der jeweiligen Zeitkonstanten  $RC$  des Ankopplungsvierpols unabhängig sind. Dagegen hat diese Zeitkonstante starken Einfluss auf die Form der am Ankopplungsvierpol oszillographierten Impulse, wie die Fig. 12b und 12d anschaulich zeigen. Es ist auch deutlich zu erkennen, dass bei grösseren Werten der Zeitkonstanten des Ankopplungsvierpols der Rücken des oszillographierten Impulses nur noch von dieser jetzt als Entladezeitkonstante wirksamen Grösse bestimmt wird (Fig. 12c).

Das Vorliegen eingepprägter Koronastromimpulse wird weiterhin auch durch das Ergebnis einer Versuchsreihe be-

stättigt, bei der aus Oszillogrammen der Spannungsimpulse  $u(t)$  am Ankopplungswiderstand  $A$  die Gesamtladung eines nach Erde abfließenden einzelnen Koronastromimpulses:

$$q = \frac{1}{R} \int_0^{\infty} u(t) dt \quad (8)$$

in Abhängigkeit von dem Wert der Zeitkonstanten  $RC$  des Ankopplungsvierpols bestimmt wurde. Der Wert von  $R$  wurde bei  $C = 26$  pF in den Grenzen von  $R = 88 \Omega$  bis  $R = 198 \text{ k}\Omega$  verändert, sowie der Wert von  $C$  bei  $R = 5,3 \text{ k}\Omega$  in den Grenzen von  $C = 26$  pF bis zu  $C = 680$  pF. Das Ergebnis zeigt Fig. 13. Die Ladung  $q$  eines einzelnen Koronastromimpulses ist demnach wie erwartet unabhängig vom jeweiligen Wert des Ankopplungsvierpols. Die geringe Streuung der angegebenen  $q$ -Werte dürfte im wesentlichen auf die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Einflüsse zurückzuführen sein.

Es ist also möglich, den Einfluss der Messkreisdaten bei Kenntnis der Werte  $R$  und  $C$  des Ankopplungsvierpols zu berücksichtigen und damit eine weitere Voraussetzung für die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der oszillographischen Messung von Koronastromimpulsen zu schaffen.

#### 4.4 Einfluss der Elektrodenform

Bei einem vorgegebenen festen Wert des Ankopplungswiderstandes  $A$  ist die Amplitude der oszillographierten Koronaimpulse in starkem Masse vom Krümmungsradius der Spitzenelektrode abhängig. Wie Fig. 14 für nach Fig. 3b angeschliffene Spitzenelektroden aus Stahl und Palladium zeigt, nimmt die Amplitude der oszillographierten Koronaimpulse bei einer Vergrößerung des Krümmungsradius von  $\varrho = 10 \mu\text{m}$  auf etwa  $\varrho = 350 \mu\text{m}$  unabhängig vom Werkstoff stetig zu. Dieser Zusammenhang ist durchaus verständlich, denn bei einer Vergrößerung des Krümmungsradius der Spitzenelektrode vergrößert sich auch der am Entladungsvorgang beteiligte Feldraum und die Zahl der an der Entladung beteiligten Ladungsträger, damit aber auch Gesamtladung und Stromamplitude der Koronaimpulse. Der Krümmungsradius  $\varrho$  der Spitzenelektrode beeinflusst weiterhin auch die Höhe der Koronaeinsatzspannung. Dieser Zusammenhang ist bereits in Fig. 6 dargestellt.

Die Angabe der Elektrodenform und gegebenenfalls des Krümmungsradius der Spitzenelektrode ist eine weitere Voraussetzung für vergleichbare und reproduzierbare Koronamessungen.

#### 4.5 Einfluss der Beanspruchungsdauer

Bei orientierenden Versuchen an nicht vorbehandelten Stahlnähnadeln war aufgefallen, dass die Amplitude der

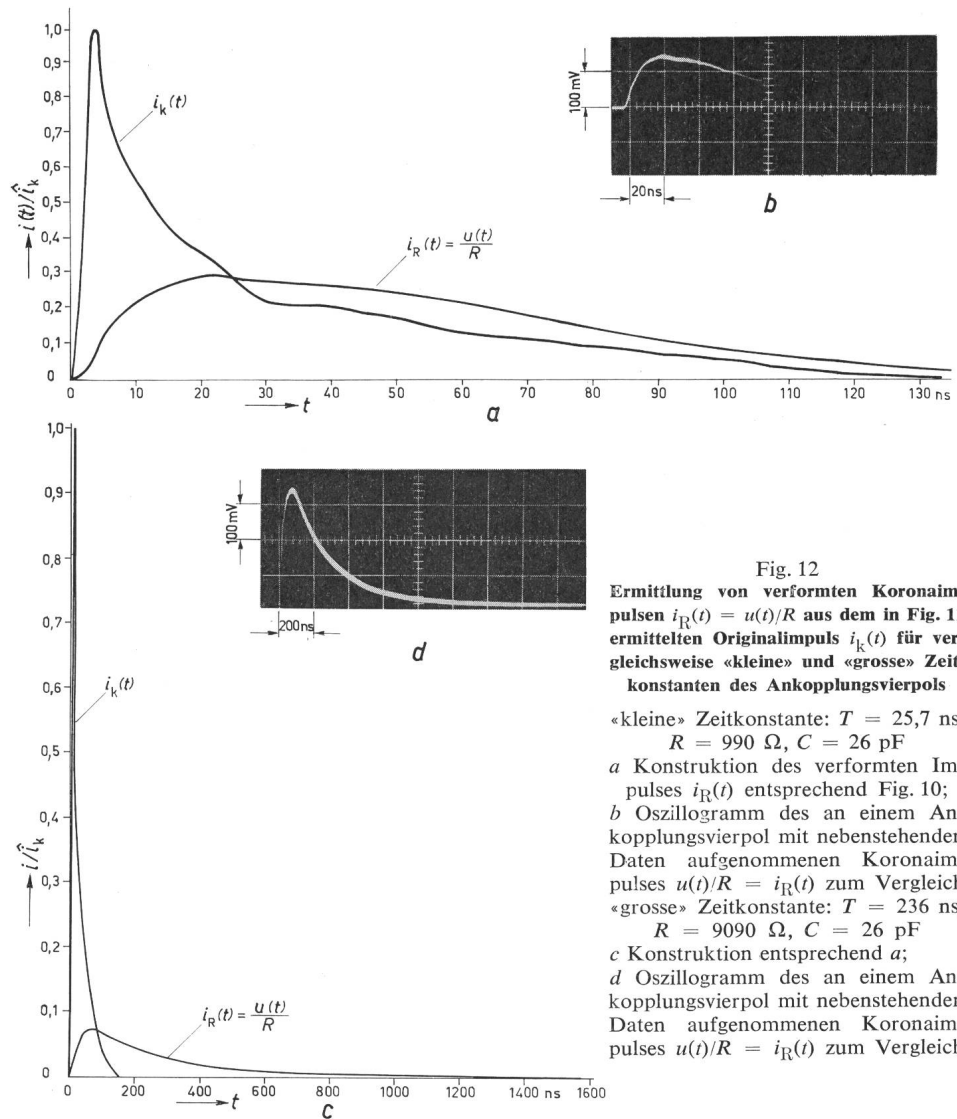


Fig. 12

Ermittlung von verformten Koronaimpulsen  $i_R(t) = u(t)/R$  aus dem in Fig. 11 ermittelten Originalimpuls  $i_k(t)$  für vergleichsweise «kleine» und «grosse» Zeitkonstanten des Ankopplungsvierpols

«kleine» Zeitkonstante:  $T = 25,7$  ns,

$R = 990 \Omega$ ,  $C = 26$  pF

a Konstruktion des verformten Impulses  $i_R(t)$  entsprechend Fig. 10;

b Oszillogramm des an einem Ankopplungsvierpol mit nebenstehenden Daten aufgenommenen Koronaimpulses  $u(t)/R = i_R(t)$  zum Vergleich «grosse» Zeitkonstante:  $T = 236$  ns,

$R = 9090 \Omega$ ,  $C = 26$  pF

c Konstruktion entsprechend a;

d Oszillogramm des an einem Ankopplungsvierpol mit nebenstehenden Daten aufgenommenen Koronaimpulses  $u(t)/R = i_R(t)$  zum Vergleich

oszillographierten Koronaimpulse bei längerer Spannungsbeanspruchung stark anstieg, in einigen Fällen um den Faktor 5...10. Der Einfluss der Beanspruchungsdauer erschien daher so wesentlich, dass er eingehender untersucht wurde. Um gleichzeitig einen Überblick über das Alterungsverhalten mehrerer möglicher Elektrodenwerkstoffe zu erhalten, wurden vergleichende Untersuchungen an Nadeln aus Palladium, Gold, Kupfer und Stahl mit definiertem Krümmungsradius  $\varrho$  durchgeführt. Palladium, ein Platinmetall, und Gold wurden im Gegensatz zu Kupfer und Stahl als chemisch weitgehend inaktive Elektrodenwerkstoffe ausgewählt, da vermutet wurde, dass chemische Reaktionen an der Spitzenelektrode (Aufreten von Ozon) das Alterungsverhalten massgebend beeinflussen. Überraschenderweise konnte jedoch *weitgehend unabhängig vom Werkstoff* lediglich ein unterschiedliches Alterungsverhalten von Spitzen mit *kleinem* Krümmungsradius und solchen mit *grossem* Krümmungsradius festgestellt werden. Während bei Nadelelektroden mit kleinen Krümmungsradien die Impulsamplitude bereits nach kurzer Beanspruchungszeit stetig ansteigt und bald ein Vielfaches des Ausgangswertes erreicht (Fig. 15), bleibt die Impulsamplitude bei grösseren Krümmungsradien über längere Zeiten hinweg konstant und fällt anschliessend nur geringfügig (Fig. 16)<sup>4)</sup>, wobei schliesslich

<sup>4)</sup> Kreuger beschreibt in [3] Dauerversuche mit seinem «Koronormal», die über 15 Wochen laufen und wobei sich ebenfalls nur geringe Änderungen der Koronaimpulsladungen ergaben, die allerdings mit einem anderen Messverfahren ermittelt wurden.



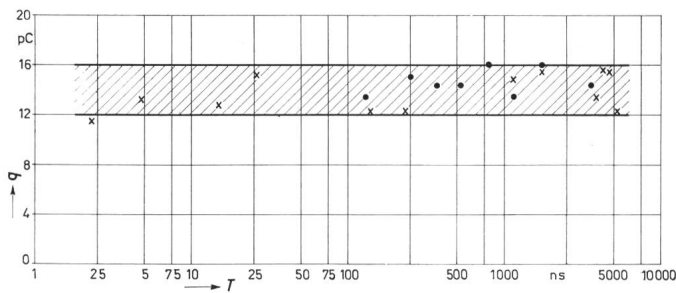


Fig. 13

**Nachweis der Unabhängigkeit der Koronaimpulsladung  $q$  von der Zeitkonstanten des Ankopplungsvierpols  $T = RC$**   
 Meßschaltung nach Fig. 4; Prüfspannung  $U_p = 4,5 \text{ kV} = \text{konst.}$   
 1. Messreihe:  $\times$   $C = 26 \text{ pF} = \text{konst.}$ ;  
 2. Messreihe:  $\bullet$   $R = 5,6 \text{ k}\Omega = \text{konst.}$   
 $T$  Zeitkonstante des Ankopplungsvierpols;  
 Spitzenelektrode: Stahlnähnadel

ein weiterer Typ von Impulsen mit einer grösseren Amplitude auftritt.

Die Spannungsbeanspruchung wurde während des Alterungsversuches mehrmals kurzzeitig unterbrochen und die Nadelelektrode in dieser Zeit mikroskopisch untersucht. Hierbei zeigte sich, dass an allen verwendeten Nadelspitzen unabhängig vom Werkstoff und Spitzenradius  $\rho$  im Laufe der Zeit immer ausgeprägtere Zerstörungserscheinungen auftreten. Fig. 17a und b zeigen zur Veranschaulichung eine Palladiumspitze und eine Goldspitze nach mehrstündiger Beanspruchungszeit. Derartige weitgehend werkstoffunabhängige Zerstörungserscheinungen sind bereits von Untersuchungen mit negativer Gleichspannung bekannt, konnten dagegen an positiven Spitzenelektroden nicht nachgewiesen werden [7]. Für Wechselfspannungsbeanspruchung würde dies bedeuten, dass die Zerstörung der Nadelspitze nur in der negativen Halbschwingung erfolgt.

Da der Werkstoff der Spitzenelektrode das Alterungsverhalten nur geringfügig beeinflusst, scheiden chemische Einflüsse als Ursache hierfür weitgehend aus. Die Veränderungen an der Spitzenelektrode dürften vielmehr — wie auch auf Grund der Polaritätsabhängigkeit der Erscheinung in [7] vermutet wurde — durch heftiges Ionenbombardement bedingt sein und Erosionserscheinungen darstellen. Die Spitzenelektrode behält hierbei nicht die ursprüngliche in Fig. 3b angegebene Form, sondern erfährt Veränderungen, die sich bei kleinen Spitzenradien anders auswirken als bei vergleichsweise

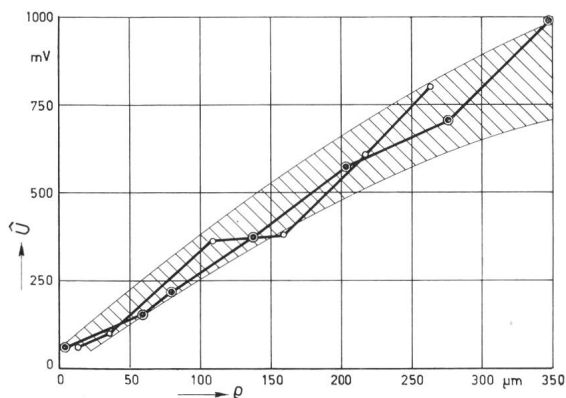


Fig. 14

**Abhängigkeit der Koronaimpulsamplitude  $\bar{U}$  vom Krümmungsradius  $\rho$  der Spitzenelektrode**  
 Meßschaltung nach Fig. 4  
 Werkstoffe der Spitzenelektrode:  $\circ$  Palladium;  $\bullet$  Stahl

grossen Radien. Fig. 17c zeigt die beobachteten Veränderungen der Form der Spitzenelektroden schematisch. Für die Veränderung der Amplitude der Koronastromimpulse bei zunehmender Beanspruchungszeit kann folgende Erklärungsmöglichkeit angegeben werden: Bei einer Nadelspitze mit kleinem Krümmungsradius wird ein Teil der Spitze abgetragen und diese dadurch stärker gerundet. Der wirksame Krümmungsradius vergrössert sich demnach und damit auch entsprechend Fig. 14 die Amplitude der Koronastromimpulse. Bei grossen Krümmungsradien dagegen bewirken die Koronaentladungen zunächst keine wesentlichen Veränderungen an der Spitzenelektrode. Erst nach längerer Zeit entsteht ein Erosionskrater. Auf dessen Boden bilden sich durch ungleichmässige Materialabtragung stärkere Unebenheiten und auf dem Kraterrand kleinere Erhebungen. Dies wirkt sich im Sinne einer Verringerung des wirksamen Elektrodenradius aus, und die Amplitude der Koronastromimpulse sinkt etwas ab.

Für vergleichbare und reproduzierbare Koronamessungen ist der Einfluss der Beanspruchungsdauer nach Möglichkeit auszuschalten. Wie die vorstehenden Ausführungen zeigen, sind beim Betrieb der Funkenstrecke Alterungserscheinungen an der Spitzenelektrode jedoch grundsätzlich nicht zu ver-

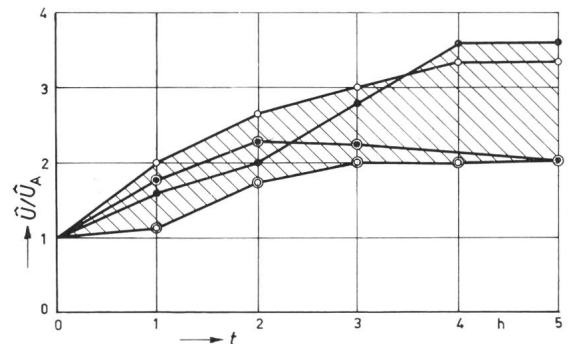


Fig. 15

**Zunahme der bezogenen Koronaimpulsamplitude  $\bar{U}/\bar{U}_A$  mit zunehmender Beanspruchungsdauer  $t$  bei «kleinem» Krümmungsradius  $\rho$  der Spitzenelektrode**  
 $\rho = 20 \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$ ;  $\bar{U}_A = 30 \pm 10 \text{ mV}$ ; Prüfspannung  $U_p = 5 \text{ kV}$ ;  
 Meßschaltung nach Fig. 4  
 Werkstoffe der Spitzenelektrode:  
 $\circ$  Palladium;  $\bullet$  Gold;  $\circ$  Kupfer;  $\bullet$  Stahl

meiden<sup>5)</sup>. Durch Wahl eines nicht zu geringen Krümmungsradius der Spitzenelektrode ist es allerdings möglich, die Amplitude der Koronaimpulse über eine Beanspruchungszeit von einigen Stunden hinweg ausreichend konstant zu halten.

#### 4.6 Weitere Einflussgrössen

Im folgenden sei noch kurz auf einige Einflussgrössen hingewiesen, die in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht wurden. Hierzu gehören der Einfluss, der Schlagweite, des Durchmessers der Plattenelektrode, der relativen Luftdichte, der Luftfeuchtigkeit sowie der Einfluss einer Verschmutzung der Spitzenelektrode durch Staub, Öl oder Berührung von Hand. Weiterhin ist die Form der Gegenelektrode der Spitze von Bedeutung, wobei eine die Spitzenelektrode umgebende Halbkugel wegen der gleichmässigeren, annähernd radial-symmetrischen Feldverteilung sich nach *Kreuger* [3] als besonders vorteilhaft erwiesen hat.

<sup>5)</sup> Nach einer Mitteilung von *A. Hartig* haben sich Spitzenelektroden aus Wolfram bei Untersuchungen in  $\text{SF}_6$  gut bewährt. Es trat hierbei keine merkliche Alterung auf [13].

## 5. Folgerungen aus den Messergebnissen

Aus den vorliegenden Messergebnissen folgt, dass beim Vergleich von Koronamessungen an Spitze-Platte-Funkenstrecken in Anbetracht der vielen Einflussgrößen Vorsicht geboten ist. Genaue Festlegungen und Angaben der Versuchsparameter sind erforderlich, um charakteristische Messgrößen, wie z. B. Amplitude und Form der Koronaimpulse, vergleichen zu können.

Die Vielzahl der Einflussgrößen erschwert nicht nur physikalische Untersuchungen, sondern auch mögliche technische Anwendungen. So kann die zunächst naheliegende Verwendung der Spitze-Platte-Funkenstrecke als Koronanormal nur mit Vorbehalt empfohlen werden. Auch hier erweisen sich genaue Festlegungen als unbedingt erforderlich. Werden derartige Festlegungen getroffen, dann sind allerdings einwandfreie Ergebnisse zu erwarten. So haben neuere Untersuchungen [13] bestätigt, dass die von *Kreuger* als Koronanormal vorgeschlagene Funkenstrecke [3] unter den von *Kreuger* empfohlenen Bedingungen zufriedenstellend arbeitet.

Die beschriebenen experimentellen Untersuchungen wurden im Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Anlagen der Technischen Hochschule Braunschweig von

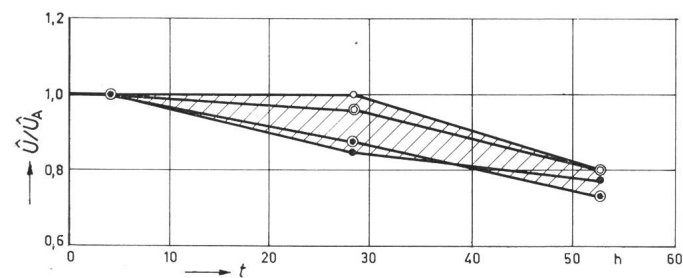


Fig. 16

Abnahme der bezogenen Koronaimpulsamplitude  $\bar{U}/\bar{U}_A$  mit zunehmender Beanspruchungsdauer  $t$  bei «grossen» Krümmungsradius  $\varrho$  der Spitzen-elektrode

$\varrho = 250 \pm 20 \mu\text{m}$ ;  $\bar{U}_A = 580 \pm 80 \text{ mV}$ ; Prüfspannung  $U_p = 5 \text{ kV}$ ; Meßschaltung nach Fig. 4

Werkstoffe der Spitzenelektrode:

○ Palladium; ● Gold; ⊙ Kupfer; ⊗ Stahl

G. Dronsek, H. Stolle und H. J. Hinrichsmeier durchgeführt. Die Anregung zu diesen Untersuchungen gab Prof. Dr.-Ing. D. Kind, Direktor des Institutes, dem der Verfasser an dieser Stelle für die Unterstützung und Förderung der vorliegenden Arbeit seinen besonderen Dank aussprechen möchte.

## Literatur

- [1] G.W. Trichel: Mechanism of Negative Point to Plane Corona Near Onset. Phys. Rev. 54(1938)–, S. 1078...1084.
- [2] D. Kind: Grundlagen der Messeinrichtungen für Korona-Isolationsprüfungen. ETZ-A 84(1963)24, S. 781...787.
- [3] F.H. Kreuger: Detection and Location of Discharges. 2nd Edition. N.V. Nederlandsche Kabelfabrieken Delft, (Diss. TU, Delft 1961).
- [4] Richtlinien für Teilentladungsprüfungen an Betriebsmitteln mit Wechselspannungen bis 500 Hz. VDE-Vorschrift 0434, Teil 2/1.66.
- [5] H. Petry: Hohlraumentladungen in Polyäthylenisierungen. Abhandlungen des Instituts für elektrische Anlagen und Hochspannungstechnik. 2. Auflage, Karlsruhe 1965.
- [6] W. Woboditsch: Die Charakteristiken von technischen Funkenstrecken mit stark inhomogenem Feld. Wiss. Z. techn. Hochschule Dresden 8(1958/59)–, S. 869...891.

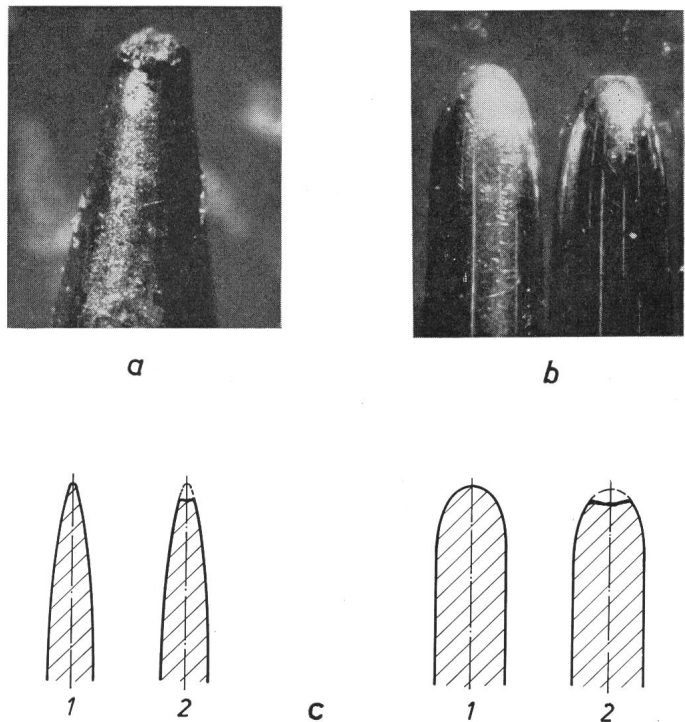


Fig. 17

Veränderung der Form von Spitzenelektroden als Folge einer Beanspruchung durch Koronaentladungen

Prüfspannung  $U_p = 5 \text{ kV}$

a Palladiumspitze, Krümmungsradius  $\varrho = 10 \mu\text{m}$ , nach mehrstündiger Beanspruchung

b Goldspitze, Krümmungsradius  $\varrho = 250 \mu\text{m}$ , rechts: nach mehrstündiger Beanspruchung, links: ursprüngliche Elektrodenform

c schematische Darstellung der Veränderung der Elektrodenform bei kleinen (links) und bei grossen Krümmungsradien (rechts) 1 vor und 2 nach der Beanspruchung

- [7] L. Wagner: Korona-Entladungen an der Spitze-Platte-Funkenstrecke. Arch. Elektrotechn. 40(1952)6, S. 331...342.
- [8] E. Baumann: Messmethode zur Ionisations-Verlustmessung und Messung des zeitlichen Ablaufes von Entladungsimpulsen bei Wechselspannung. ETZ-A 81(1960)4, S. 127...129.
- [9] E. Baumann: Corona Pulses, R. F. Spectra and their Relation to Non-Ionizing Collision Cross-Sections. in: J. S. Forrest et al.: Gas Discharges and the Electricity Supply Industry. Butterworth, London 1962.
- [10] W. Heintz: Untersuchung des hochfrequenten Spektrums periodischer Entladungen. Ztschr. angew. Physik 11(1959)2, S. 51...57.
- [11] A. Schwab: Über die Anstiegszeiten von Koronaentladungsimpulsen in einer Spitze-Platte-Funkenstrecke. Diss. Technische Hochschule Karlsruhe 1963.
- [12] T. A. Blair, F. M. Bruce and D. J. Tedford: Analysis of Pre-Breakdown Current Pulses in Gas Discharge Gaps. Proc. IEE 110(1963)11, S. 2073...2081.
- [13] A. Hartig: Untersuchungen elektrischer Druckschlagsvorgänge in SF<sub>6</sub>. Dissertation TH Braunschweig 1966.
- [14] W. K. Hogg and C. A. Walley: An Assessment of the Point-Hemisphere Discharge Gap as a Partial Discharge Reference. J. Scientific Instrum. 43(1966)1, S. 11...15.

## Adresse des Autors:

Dipl.-Ing. Dieter König, wissenschaftlicher Assistent am Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Anlagen der Technischen Hochschule Braunschweig, Pockelsstrasse 4, D-33 Braunschweig (Deutschland).