Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 57 (1966)

Heft: 13

Artikel: Vorentladungen an den Elektrodenanordnungen "Spitze-Spitze" und "Spitze frei im Raum" in Isolieröl bei Beanspruchung mit einer Stoßspannungen von 1,2|450

Autor: Nikolopoulos, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916613

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: 11.12.2025

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

Ausnutzung «kleiner» nichtlinearer Effekte bei nichtresonanten Wechselwirkungen. Ein Beispiel hierfür ist die kürzlich gelungene Realisation eines parametrischen Lichtoszillators [5].

Wenn es gelänge eine wirtschaftlich einsetzbare Ausführung logischer Elemente auf Laserbasis zu finden, so könnte dies zu einem starken Auftrieb der Forschung in diesem Gebiet führen, da in der Nachrichtenverarbeitung jeweils ein Bedarf nach grossen Stückzahlen gleichartiger Elemente besteht. Bei der Fülle der auf dem Lasergebiet zu lösenden Aufgaben könnte ein solides wirtschaftliches Interesse so helfen die zweifellos grossen technischen Möglichkeiten der Laserphysik in absehbarer Zukunft einer Realisierung zuzuführen.

Literatur

[1] *D. Röss:* Laser. Bull SEV 56(1965)9, S. 333...342.

[2] *D. Röss:* Laser Lichtverstärker und -Oszillatoren. Frankfurt a/M. Akademische Verlagsgesellschaft 1966.

[3] *W. Kosonocky:* Optical Processing of Information. RCA-Report 19, S. 255...280, Clark N. J., RCA-International 1965.

[4] *D. Röss:* Selektiv sättigbare organische Farbstoffe als optische Schalter — optische Impulsverstärker. Z. Naturforsch. 20a(1965)5, S. 696...700.

[5] *J. A. Giordnaine* and *R. C. Miller:* Tunable Coherent Parametric Oscillation in $LiNbO_3$ at Optical Frequencies. Physic Rev. Letters. 14(1965)24, S. 973...976.

Adresse des Autors:

Dr. *D. Röss,* Siemens & Halske AG, Hofmannstrasse 51, D-8, München 25.

Vorentladungen an den Elektrodenanordnungen «Spitze—Spitze» und «Spitze frei im Raum» in Isolieröl bei Beanspruchung mit einer Stoßspannung von 1,2|450

Von *P. Nikolopoulos,* Nellingen

537.528

Die 50-%-Durchschlagspannung bei positiver und negativer Stoßspannung (Stoßspannung 1,2|450) und der Verlauf der Stosskennlinien an der Elektrodenanordnung «Spitze—Spitze» (scharfe Spitze) werden angegeben. Die Ergebnisse werden mit den an der Elektrodenanordnung «Spitze—Platte» gewonnenen Ergebnissen verglichen. Das Starten und Vorwachsen der Vorentladungen sowie das Einleiten des Durchschlags wird an Hand von Entladungsfiguren deutlich. Diese wurden auf Photopapier, das in der Elektrodenachse angebracht war, bei verschiedenen Stoßspannungen und verschiedenen Abschneidezeiten aufgenommen. Ebenfalls an Hand von Entladungsfiguren wird das Starten und Vorwachsen der Vorentladungen bei Stoßspannung an mehreren Elektroden «frei im Raum» verfolgt. Die an Hochspannungselektroden mit mehreren scharfen Spitzen gewonnenen Entladungsfiguren lassen den Einfluss jeder Einzelfigur auf ihre Nachbarfiguren deutlich werden. Die Vorwachsgeschwindigkeit der positiven Grundfigur bei verschiedenen Stoßspannungen wird für alle Elektodenanordnungen angegeben.

L'auteur indique la tension disruptive à 50 % pour une tension de choc positive et négative (tension de choc 1,21450), de même que le tracé des caractéristiques de choc dans les électrodes disposées «de pointe à pointe» (pointes vives). Les résultats sont ensuite comparés aux données obtenues avec des électrodes disposées «pointe contre plaque». La formation et l'accroissement de la prédécharge, ainsi que le déclenchement du percement sont illustré par des figures de décharge sur papier sensible. Ce papier photographique a été fixé dans l'axe des électrodes et les figures se rapportent à diverses tensions de choc et également à divers temps de coupure. Ces figures de décharge permettent en outre de suivre le déclenchement et l'accroissement des prédécharges lors de tensions de choc, appliquées à plusieurs électrodes, disposées «à pointe dégagée dans l'espace». Les figures de décharge réalisés aux électrodes à haute tension, munies de plusieurs pointes aiguës indiques l'influence exercée par chaque figure individuelle sur ses voisines. L'auteur indique enfin la vitesse de propagation de la figure de base positive lors de diverses tension de choc et pour toutes les dispositions d'électrodes.

1. Einleitung

Isolieröl stellt ein wichtiges Isoliermittel in elektrischen Anlagen dar. Beim Auftreten von inneren und äusseren Überspannungen in den Netzen wird das Öl kurzzeitig durch Spannungen beansprucht, die zu seinem Durchschlag und damit zu Schäden der Betriebsmittel führen können. Es ist deshalb für die Technik besonders wichtig, dass das Verhalten des Isolieröls bei Beanspruchung mit Stoßspannung, durch die die Überspannungen nachgebildet werden, bekannt ist. Durch die Anwendung von Stoßspannungen bei den Untersuchungen in Öl wird ausserdem der Einfluss von Verunreinigungen, die in Öl unvermeidlich bzw. sehr schwer fernzuhalten sind, beseitigt. Dies geht auf Erkenntnisse zurück, die bereits Ende der 20er Jahre gemacht wurden (s. z. B. [1; 2][1]).

Die Kenntnisse über den Stossdurchschlag in Öl dürfen nicht als ausreichend angesehen werden, obwohl das vorhandene Material in den letzten Jahren durch einige neue Untersuchungen [3...6] bereichert worden ist. Es fehlen Aussagen über den Durchschlag bei grösseren Schlagweiten der für die Technik interessanten Elektrodenanordnungen Stab—Stab und Stab—Platte.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden mit einer Stossspannung von 1,2|450 an der Elektrodenanordnung Spitze—Spitze und «Spitze frei im Raum» durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in [6] ausführlich beschrieben worden, daher wird er hier nur kurz angegeben.

Die Elektroden wurden aus Messing (Durchmesser 10 mm) angefertigt. Die Spitzen waren kegelförmig mit einem Winkel von 40°. Der Krümmungsradius r an der Spitze betrug weniger als 0,1 mm. Es wurden drei Schlagweiten $S = 30$, 57 und 97 mm untersucht.

Wie Fig. 1 zeigt, war die Elektrodenachse waagerecht. Die Elektrodenanordnung befand sich in einem vollkommen aus Isoliermaterial angefertigten Versuchsgefäss, ungefähr 40 cm über dessen Boden, der ungefähr 20 cm über dem Erdboden lag. Eine Umwälzanlage in Verbindung mit einem feinen Papierfilter ermöglichte die Beseitigung der durch die Verrussung des Öls entstandenen Verunreinigungen. Die Öltemperatur wurde auf +15 °C konstant gehalten.

Mit Hilfe eines Zweistrahl-Stoßspannungsoszillographen wurde der zeitliche Verlauf der Stoßspannung und des Stromes der Vorentladungen am Prüfling aufgenommen. In allen folgenden Oszillogrammen gibt die obere Kurve den Verlauf der Stoßspannung und die untere den des Stromes wieder. Entladungsfiguren (Gleitfiguren) wurden auf Photopapier aufgenommen, das in der Elektrodenachse angebracht war (Fig. 1).

Bei allen Untersuchungen lag in Serie zur Hochspannungselektrode ein Widerstand von 2 kΩ (Vorwiderstand). Wie in [6] festgestellt wurde, hatte er keinen Einfluss auf das Starten und

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

34941 - 34954

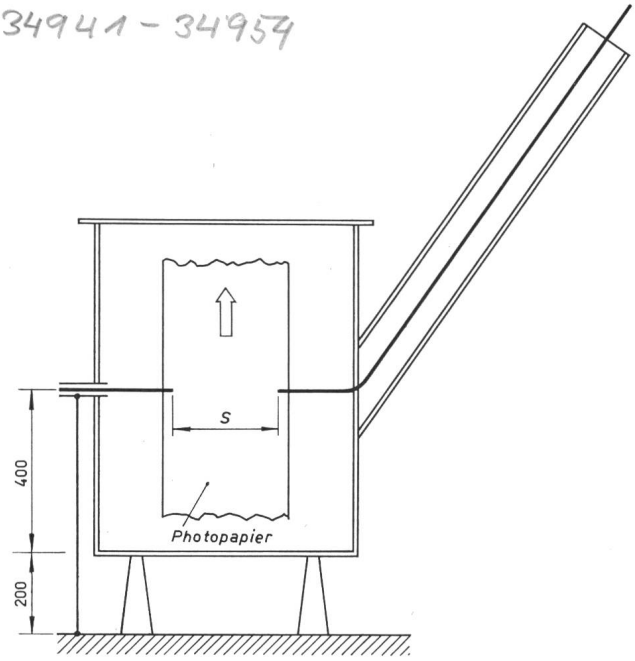


Fig. 1
Versuchsgefäss mit Elektrodenanordnung Spitze—Spitze
S Schlagweite
Masse in mm

Vorwachsen der Vorentladungen an der Elektrodenanordnung Spitze—Platte.

Um das räumliche Vorwachsen der Vorentladungen zu verfolgen, wurden bei konstanter Stoßspannung Serienaufnahmen mit abgeschnittenen Stoßspannungen aufgenommen, bei denen die Abschneidezeit t_a (Zeitdauer vom Beginn der Stoßspannung bis zum Abschneidemoment) von Aufnahme zu Aufnahme verlängert wurde. Die Untersuchungen wurden bei atmosphärischem Druck durchgeführt.

2. Anordnung Spitze—Spitze

2.1 Stosskennlinien

In Tabelle I werden die gemessenen 50-%-Durchschlagspannungen U_{50} bei positiver und negativer Stoßspannung angegeben. Zum Vergleich sind auch die U_{50}-Werte für die Anordnung Spitze—Platte [6] zu sehen. Sowohl bei positiver als auch bei negativer Stoßspannung ist U_{50} hier höher als bei Spitze—Platte. Bei $S = 97$ mm beträgt der Unterschied, bezogen auf die U_{50}-Werte für Spitze—Platte, 30 % bei positiver und 17 % bei negativer Stoßspannung. Bei $S = 57$ und 30 mm steigt er bis auf 50 % bei positiver und ungefähr auf 40 % bei negativer Stoßspannung. Wie Fig. 2 zeigt, besteht kein lineares Verhältnis zwischen U_{50} und S. U_{50} nimmt weniger als linear mit S zu. Daher verkleinert sich der Unterschied gegenüber Spitze—Platte, der bei $S \approx 40...70$ mm am grössten ist, mit zunehmender Schlagweite. Nimmt man an, dass man die U_{50}-Kurven in Fig. 1 für $S > 97$ mm extrapolieren kann, so muss U_{50} für die Anordnungen Spitze—Spitze und Spitze—Platte bei beiden Polaritäten der Stoßspannung ungefähr bei $S = 140$ mm gleich werden. Für $S > 140$ mm müsste dann U_{50} bei Spitze—Spitze kleiner als bei Spitze—Platte sein.

In Fig. 3 und 4 sind Messpunkte zur Ermittlung der Stosskennlinien bei $S = 97$ mm eingetragen. Bei positiver Stossspannung verläuft der untere Teil der Stosskennlinie nicht geradlinig, sondern hyperbolisch. Die Durchschlagzeiten nehmen hier mit zunehmender Stoßspannung rascher als bei der Anordnung Spitze—Platte ab.

In Nähe der 50-%-Durchschlagspannung tritt eine grosse Streuung der Durchschlagzeiten auch bei positiver Stossspannung auf. Während diese Streuung z. B. bei der Anordnung Spitze—Platte mit $S = 97$ mm weniger als 10 µs betrug, ergab sich hier bei einer Messung eine Durchschlagzeit von 148 µs (Fig. 3). Bei der gleichen Spannung würde die mittlere Durchschlagzeit ungefähr 40...45 µs betragen (Fig. 3), wobei Messpunkte mit ungewöhnlich grosser Abweichung nicht berücksichtigt sind. Der erwähnte Messpunkt weist also gegenüber dieser mittleren Durchschlagzeit eine Abweichung von über 100 µs auf!

Es ist in der Anordnung Spitze—Platte festgestellt worden, dass bei einer Spannung, die «Übergangsgrenze» oder «Übergangsspannung» genannt wurde, eine plötzliche Verkürzung der Durchschlagzeiten stattfindet [6]. Damit erhält die Stoss-

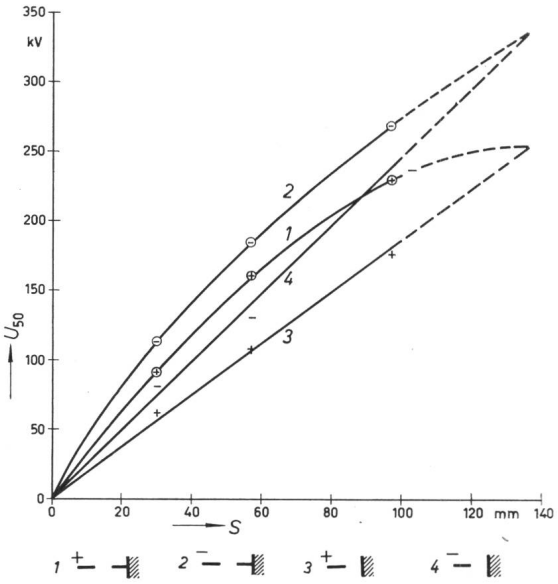


Fig. 2
50-%-Durchschlagspannung U_{50} in Abhängigkeit von der Schlagweite S
Stoßspannung 1,2|450, Vorwiderstand 2 kΩ

50-%-Durchschlagspannung U_{50} und Übergangsspannung $U_ü$ der Anordnungen Spitze—Spitze und Spitze—Platte[1])

Tabelle I

Schlagweite S mm	50-%-Durchschlagspannung U_{50} kV				Übergangsspannung $U_ü$ kV			
	+ Spitze	+ Platte	− Spitze	− Platte	+ Spitze	+ Platte	− Spitze	− Platte
97	229	176	269	231	> 430	360	?	360
57	161	107	184	130	350	270	?	270
30	91	61	113	81	340	188	280	188

[1]) In beiden Fällen wurden scharfe Spritzen angewendet.

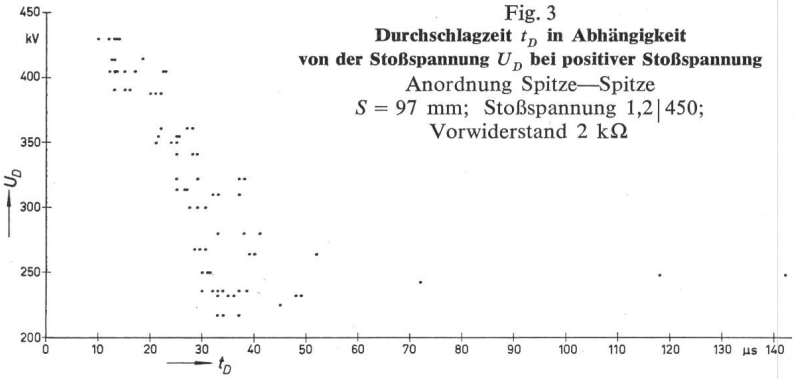


Fig. 3
Durchschlagzeit t_D in Abhängigkeit von der Stoßspannung U_D bei positiver Stoßspannung
Anordnung Spitze—Spitze
$S = 97$ mm; Stoßspannung 1,2|450;
Vorwiderstand 2 kΩ

kennlinie einen unstetigen Abschnitt, an den sich beiderseits die stetig verlaufenden Abschnitte anschliessen. Diese sind «erster» oder «unterer» und «zweiter» oder «oberer» Teil der Stosskennlinie genannt worden.

Fig. 5 zeigt Messpunkte zur Ermittlung der Stosskennlinien bei $S = 57$ mm und positiver Stoßspannung. Die plötzliche Verkürzung der Durchschlagzeiten bei einer Spannung von 350 ± 20 kV ist eindeutig zu erkennen. In diesem Fall beträgt also die Übergangsspannung $U_{ü} = 350 \pm 20$ kV.

Eine Übergangsspannung ist aber nicht in allen Fällen festzustellen: Da hier die Durchschlagzeiten mit zunehmender Stoßspannung rascher als bei Spitze—Platte abnehmen, muss die plötzliche Verkürzung der Durchschlagzeiten bei der Übergangsspannung verhältnismässig klein und daher in manchen Fällen überhaupt nicht erkennbar sein. In Tabelle I sind die ermittelten Übergangsspannungen zusammengestellt. Es wurde festgestellt, dass auch dort, wo eine Übergangsgrenze erkennbar ist, diese höher als bei Spitze—Platte liegt. Zwischen Übergangsgrenze und Schlagweite kann kein einfacher Zusammenhang wie bei Spitze—Platte gefunden werden.

Es ist damit zu rechnen, dass für den Verlauf der Stosskennlinien und das Vorhandensein sowie die Höhe einer Übergangsspannung zum Teil die Qualität des verwendeten Öls verantwortlich ist, trotz der Anwendung der Umwälzanlage. Ein solcher Einfluss wurde bei negativer Stoßspannung in der Anordnung Spitze—Platte tatsächlich festgestellt. Bei Spitze—Platte konnte er verhältnismässig leicht begrenzt werden, da der normale Verlauf der Stosskennlinie, bei der die Gegenelektrode keinen Einfluss hat, bekannt war. Bei Spitze—Spitze ist es schwierig, zwischen dem Einfluss der negativen Elektrode und dem der Ölqualität zu unterscheiden.

3. Entladungsfiguren

3.1 Positive Stoßspannung

Zur Aufnahme von Entladungsfiguren wurde 100 mm breites Photopapier verwendet. Um sicherzustellen, dass beide Spitzen mit dem Photopapier in Berührung kommen, wurde zur Aufnahme der Entladungsfiguren die Schlagweite auf $S = 94$ mm verkleinert. Beide Spitzen befanden sich auf dem Photopapier, 3 mm von dem entsprechenden Rand entfernt (Fig. 1). In allen Figuren bei Spitze—Spitze muss man sich die Hochspannungselektrode am oberen und die Erdelektrode am unteren Rand des Photopapiers vorstellen.

Die Entladungsfigur in Öl besteht allgemein aus folgenden drei Elementen:

a) Grundfigur,
b) schwachleitende Kanäle,
c) hochleitende Kanäle.

a) Die Grundfigur nimmt eine verhältnismässig grosse Fläche ein. Sie besteht aus zahlreichen «Ästen», ausserdem ist eine «allgemeine Schwärzung» vorhanden.

b) Der schwachleitende Kanal ist zwar stärker belichtet als die Äste der Grundfigur, jedoch weniger als der hochleitende Kanal. Seine Umgebung weist keine Belichtung auf. Die Belichtungsintensität längs des Kanals ist nicht konstant. Das Photopapier ist nur stellenweise beschädigt. Ein schwachleitender Kanalabschnitt wird in Fig. 9a gezeigt.

c) Der hochleitende Kanal weist eine starke Belichtung auf, die als tiefe Schwärzung des Photopapiers erkennbar wird, ausserdem weist auch die Umgebung des Kanals eine Schwärzung auf. Längs des Kanals ist das Photopapier durchgehend beschädigt, was auf die beim Entstehen des Kanals entwickelte Wärme zurückgeführt werden muss.

Die elektrische Leitfähigkeit der Grundfigur muss am geringsten, die des hochleitenden Kanals am höchsten sein. Die Leitfähigkeit des schwachleitenden Kanals liegt zwischen derjenigen der Grundfigur und der des hochleitenden Kanals.

In Fig. 6 sind drei Aufnahmen, die aus einer grösseren Anzahl ausgewählt sind, zu sehen, die bei einer positiven Stossspannung von 270 kV und immer länger werdenden Abschneidezeiten aufgenommen wurden. Aus Fig. 2 ergibt sich für $S = 94$ mm $U_{50}^{+} = 225$ kV. Bezogen auf diese Spannung sind

$$270 \text{ kV} \approx \frac{270}{225} U_{50}^{+} = 1{,}2\ U_{50}^{+}.$$

Wie bei Spitze—Platte, wächst auch hier mit der positiven Spitze als Mittelpunkt eine kreisförmige Figur (Grundfigur) in Richtung zur erdseitigen Spitze stetig vor. Ihre Vorwachsgeschwindigkeit v^{+} bleibt während des Vorwachsens konstant, sie ist jedoch wie Fig. 7 zeigt, spannungsabhängig. Im Spannungsbereich 179 kV bis 278 kV nimmt sie mit zunehmender Spannung linear zu. Ihr Wert liegt zwischen denjenigen der zwei Anordnungen positive Spitze—geerdete Platte und negative Platte—geerdete Spitze.

Während die positive Grundfigur sich gleich nach Anlegen der Spannung zu entwickeln beginnt, fällt der Beginn der von der geerdeten negativen Spitze ausgehenden Figur auf einen späteren Zeitpunkt. Die Verzögerung hängt von der Spannung ab: bei 217 kV begann die Entwicklung der negativen Figur frühestens 9,3 µs nach dem Beginn der Stoßspannung, bei 233 kV, 270 kV und 287 kV war die Verzögerung gleich oder grösser als 8,5 µs, 5,3 µs und 2,2 µs. Eine so grosse Verzögerung wird in der Anordnung Spitze—Platte bei negativer Stoßspannung nicht festgestellt: Der Beginn der negativen Figur fällt im allgemeinen mit dem Scheitelwert der Stoßspannung zusammen, wobei die Figur umso früher beginnt, je höher die Spannung wird.

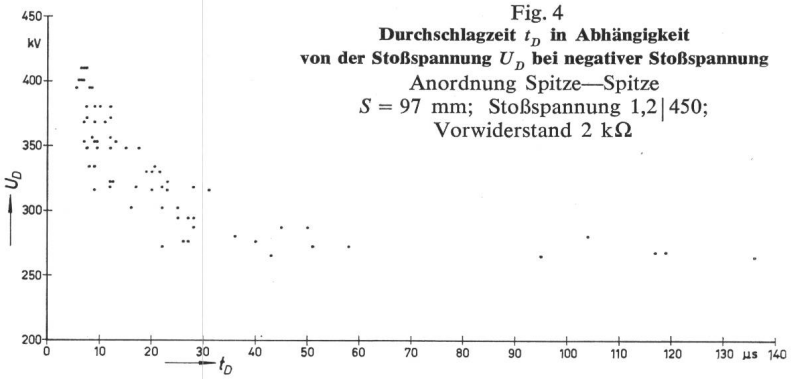


Fig. 4
Durchschlagzeit t_D in Abhängigkeit von der Stoßspannung U_D bei negativer Stoßspannung
Anordnung Spitze—Spitze
$S = 97$ mm; Stoßspannung 1,2|450;
Vorwiderstand 2 kΩ

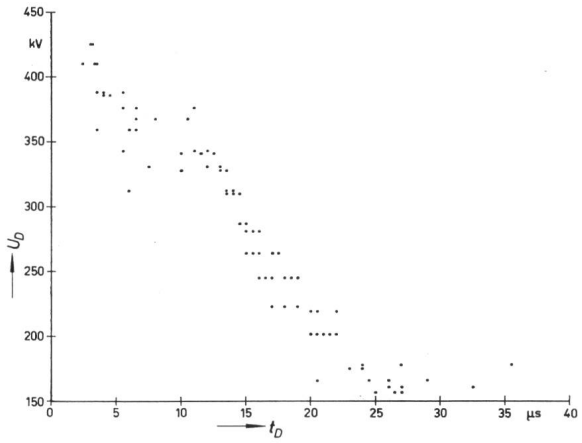


Fig. 5

Durchschlagzeit t_D in Abhängigkeit von der Stoßspannung U_D bei positiver Stoßspannung

Anordnung Spitze—Spitze

S = 57 mm; Stoßspannung 1,2|450; Vorwiderstand 2 kΩ

Da die negative Figur langsamer als die positive vorwächst, breitet sie sich weniger als die positive aus. Das Gebiet, in dem sich beide Figuren treffen, liegt in der Nähe der negativen Spitze. Die Art, wie sich beide Figuren überbrücken, zeigt die letzte Entladungsfigur von Fig. 6 sowie Fig. 8a und 8b, die bei 233 kV bzw. 217 kV, d. i. 1,04 U_{50}^{+} bzw. 0,96 U_{50}^{+} aufgenommen wurden. Die Überbrückung erfolgt entweder über einen Ast der positiven und einen der negativen Grundfigur (Fig. 6c) oder über einen hochleitenden Kanal (Fig. 8a und 8b). Dieser entstand in Fig. 8a, ähnlich wie bei Spitze—Platte, am Rand der positiven Grundfigur. In Fig. 8b dagegen entstand er am Rand der negativen Grundfigur.

Die Rolle der negativen Grundfigur beim Einleiten des Durchschlags ist nicht eindeutig. Es wurde bei Spitze—Platte festgestellt, dass die negative Grundfigur den Durchschlag nicht direkt herbeiführen kann [6]. Betrachtet man Fig. 8c (aufgenommen bei 217 kV), bei dem die Stoßspannung nicht abgeschnitten wurde, muss man zur selben Schlussfolgerung gelangen. Dagegen muss man auf Grund von Fig. 6c annehmen, dass ein Durchschlag auch über die Äste der negativen Grundfigur erfolgen kann. Auch wenn dies gilt, ist vom Augenblick, in dem sich die Äste beider Figuren treffen, bis zur Ausbildung des Funkenkanals offensichtlich eine längere Zeit erforderlich, als vom Berühren der positiven Grundfigur mit der Platte in der Anordnung Spitze—Platte bis zum Durchschlag erforderlich ist.

In Fig. 7 ist die Spannung eingezeichnet bei der schätzungsweise die Bildung von Kanälen einsetzt. Das geschieht hier bei ungefähr 265 kV. Wird die Spannung höher, so vermehrt sich die Anzahl der schwach- und hochleitenden Kanäle, die zunächst ruckartig vorwachsen. Das stufenartige Vorwachsen eines zum grössten Teil hochleitenden Kanals erkennt man in Fig. 9a, das bei 287 kV aufgenommen wurde. Bei 300 kV erfolgt der Durchschlag durch das schnelle Vorwachsen eines hochleitenden Kanals, der von der positiven Hochspannungselektrode ausgeht. In Fig. 9b (das dazugehörige Oszillogramm wurde bei der Auswertung beschädigt) wurde die Spannung 1,9 µs nach ihrem Beginn abgeschnitten. Der hochleitende Kanal hat fast die gesamte Funkenstrecke überbrückt. Man stellt fest, dass das Photopapier eine Herabsetzung der Übergangsspannung verursacht. Mit Photopapier muss die Übergangsgrenze bei ungefähr 300 kV gesetzt werden.

3.2 Negative Stoßspannung

Die Entwicklung der negativen Figur geschieht wie bei der Anordnung Spitze—Platte: Ungefähr am Scheitelwert der Stoßspannung entsteht in der Nähe der Hochspannungselek-

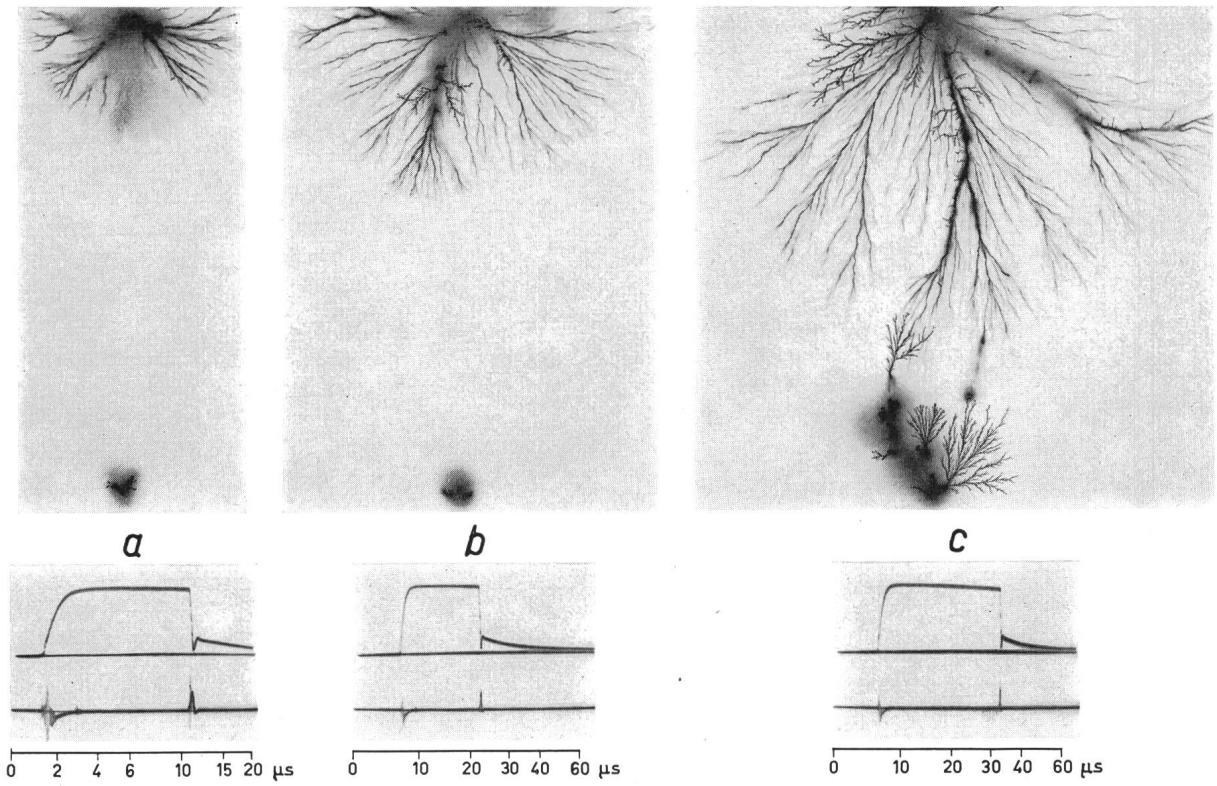


Fig. 6

Grundfiguren bei konstanter positiver Stoßspannung von 270 kV an der Elektrodenanordnung Spitze—Spitze

Stoßspannung 1,2|450, Vorwiderstand 2 kΩ

a t_a = 9,5 µs; *b* t_a = 15 µs; *c* t_a = 27 µs

t_a Abschneidezeit

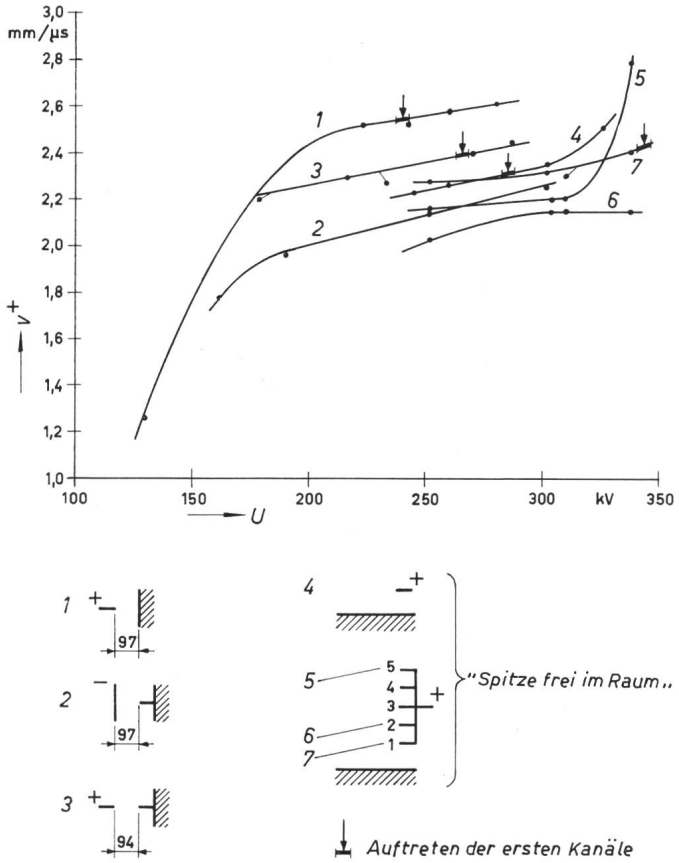


Fig. 7

Vorwachsgeschwindigkeit v^+ der positiven Grundfigur an verschiedenen Elektrodenanordnungen in Abhängigkeit von der Stoßspannung U

Stoßspannung 1,2|450; Vorwiderstand 2 kΩ

trode eine tiefe Schwärzung. Dieser folgt die Bildung eines hochleitenden Kanalabschnittes an der Spitze. Anschliessend wachsen Grundfiguren von mehreren Punkten dieses Kanalabschnittes oder von einzelnen «Ausgangspunkten» aus kreisförmig vor. Die positive Grundfigur, die also hier von der erdseitigen Spitze ausgeht, setzt mit einer Verzögerung ein. In Fig. 10a hatte sie 20 µs nach dem Beginn der Stoßspannung noch nicht eingesetzt. Fig. 10a und 10b wurden bei −202 kV aufgenommen. Aus Fig. 2 ergibt sich für $S = 94$ mm $U_{\overline{50}} =$ 264 kV, infolgedessen ist 202 kV $= \frac{202}{264} U_{\overline{50}} = 0{,}77\ U_{\overline{50}}$.

Wie Fig. 10c zeigt, wächst die positive Grundfigur kreisförmig vor. Ihre Vorwachsgeschwindigkeit ist viel kleiner, als wenn sie von der Hochspannungselektrode ausgeht: Aus den Entladungsbildern ergab sich als Mittelwert 1,13 mm/µs bei −227 kV und 1,54 mm/µs bei −236 kV.

Im allgemeinen ist hier die positive Grundfigur sehr schwach und sie besteht nur aus einigen Ästen. Man stellt gegenüber dem Fall, bei dem die Figur zur Hochspannungselektrode gehört, dieselben Abweichungen fest, die bei Platte—geerdete Spitze gegenüber Spitze—geerdete Platte festgestellt worden sind, und die offensichtlich auf das niedrige Potential der geerdeten Spitze zurückgeführt werden müssen. Da die positive Grundfigur zu schwach ist, um selbst den Durchschlag einzuleiten, kann dieser nur durch das Vorwachsen eines hochleitenden Kanals aus der Hochspannungselektrode erfolgen. Dies erkennt man in Fig. 10c, das bei 236 kV, d. i. nur 0,9 $U_{\overline{50}}$, aufgenommen wurde. Die Bildung eines hochleitenden Kanals bei dieser verhältnismässig niedrigen Spannung erscheint ungewöhnlich und ist vielleicht auf den Einfluss des Photopapiers zurückzuführen.

4. «Spitze frei im Raum»

4.1 Positive Stoßspannung

Bei den folgenden Untersuchungen wurden vom Versuchsgefäss die erdseitige Elektrode und jede Verbindung zur Erde entfernt. Dadurch war keine Strommessung mehr möglich.

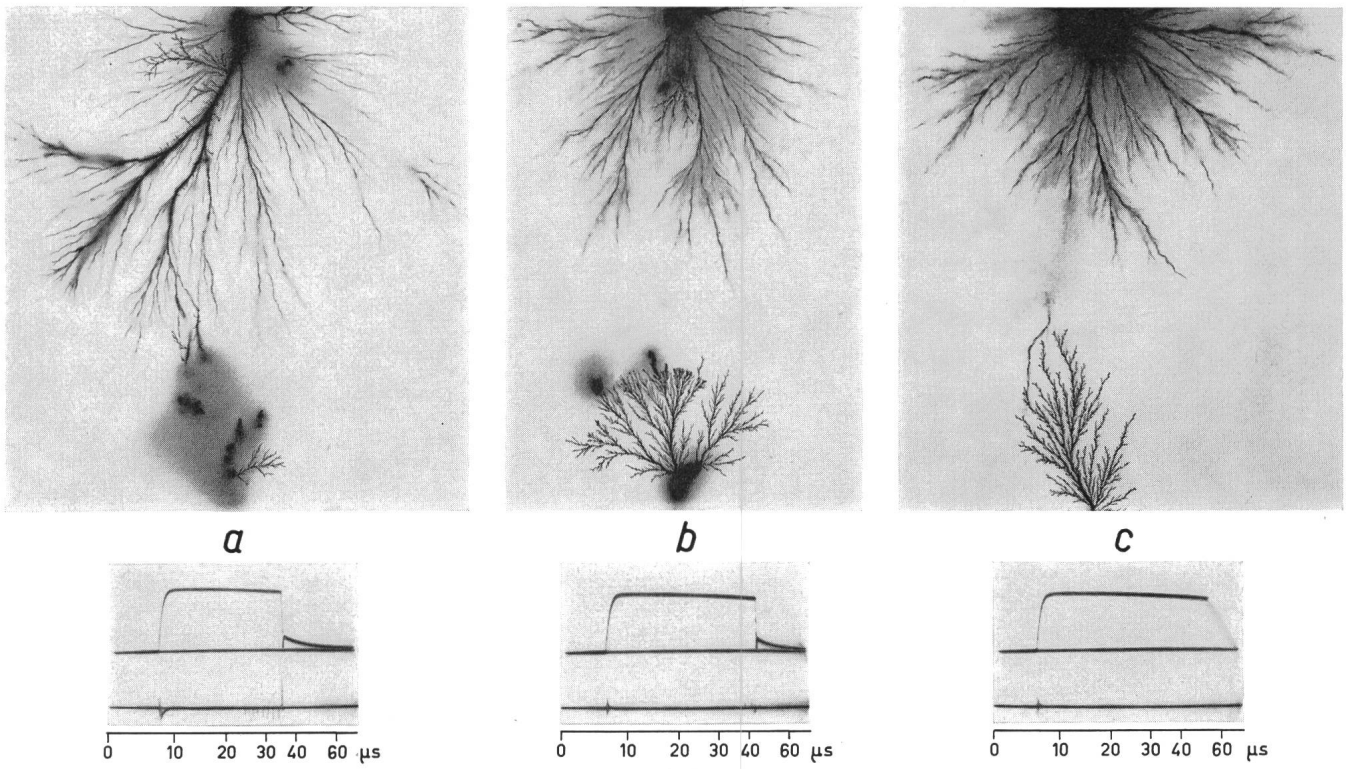


Fig. 8

Einleiten des Durchschlages an der Elektrodenanordnung Spitze—Spitze bei positiver Stoßspannung

Stoßspannung 1,2|450; Vorwiderstand 2 kΩ

a 223 kV; *b*, *c* 217 kV

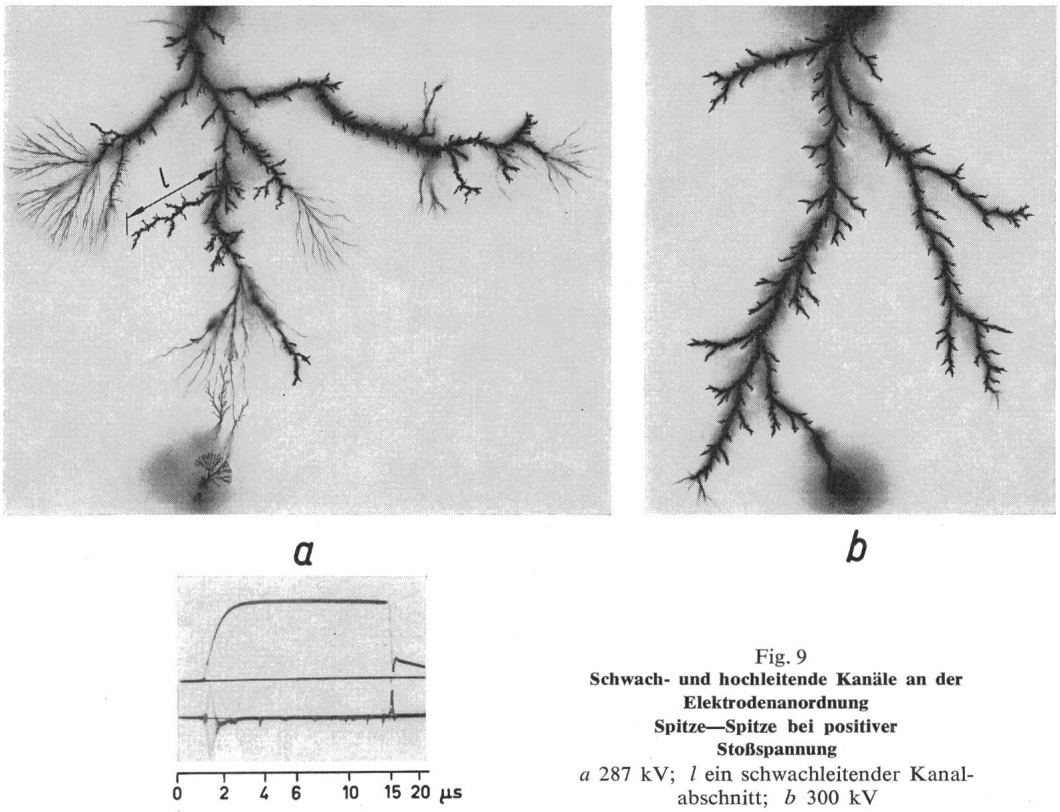


Fig. 9
Schwach- und hochleitende Kanäle an der Elektrodenanordnung Spitze—Spitze bei positiver Stoßspannung
a 287 kV; *l* ein schwachleitender Kanalabschnitt; *b* 300 kV

Als Hochspannungselektrode diente die gleiche scharfe Spitze aus Messing, wie bei den vorangegangenen Untersuchungen. Entladungsfiguren auf Photopapier, das an der Achse der Spitzenelektrode lag, starteten an der Spitze. Diese befand sich auf dem Photopapier 3 mm vom Rand entfernt. Die Spitze lag waagrecht, ungefähr 40 cm über dem Boden des Versuchsgefässes, das wiederum ungefähr 20 cm über der Erde stand. Damit ist, streng genommen, die Bezeichnung «Spitze frei im Raum» zwar unkorrekt, sie kann aber hier deshalb angewandt werden, weil sich die Vorentladungen in der unmittelbaren Nähe der Spitze abwickeln.

Bei positiver Stoßspannung wächst von der Spitze aus die bekannte Grundfigur kreisförmig vor. Die Tatsache, dass die Spitze parallel und nicht senkrecht zur Erde liegt, beeinflusst das kreisförmige Vorwachsen der Grundfigur zunächst nicht: wie Fig. 11a zeigt, ist die Entladungsfigur nach allen Richtungen genau so dicht. Es kommt allerdings in manchen Fällen vor, dass einige kräftige Äste in Richtung Erde vorwachsen

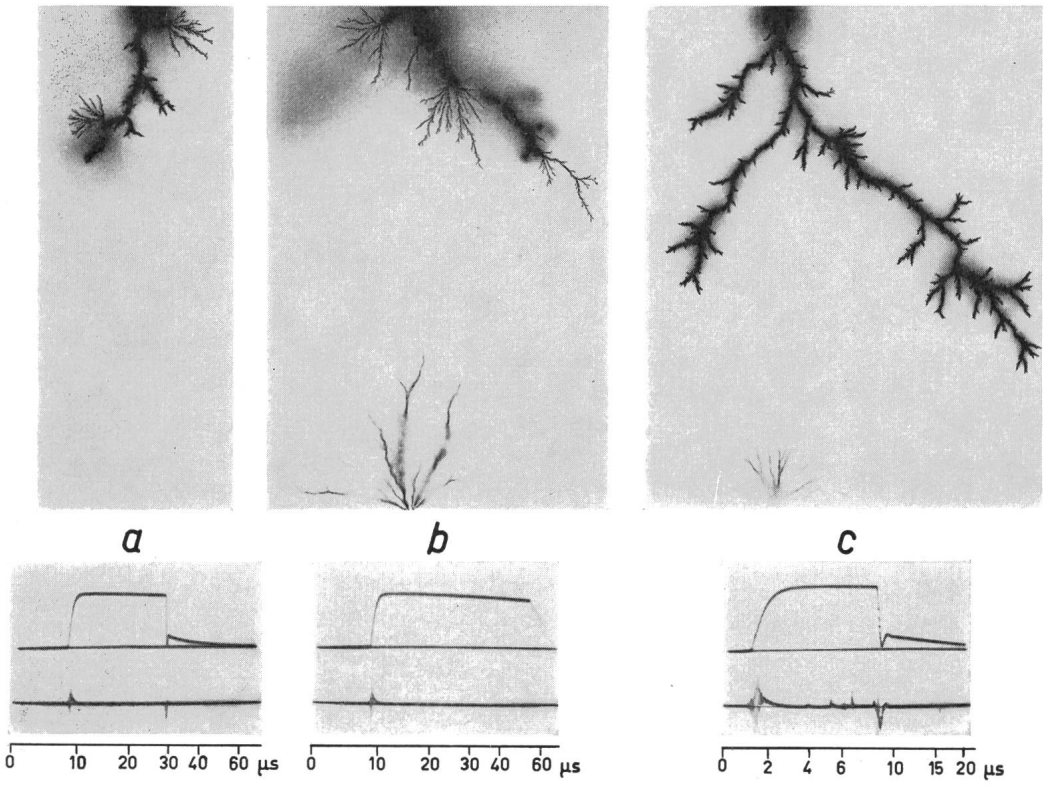


Fig. 10
Entladungsfiguren an der Elektrodenanordnung Spitze—Spitze bei negativer Stoßspannung
Stoßspannung 1,2|450; Vorwiderstand 2 kΩ
a 202 kV, t_a = 20 µs;
b 202 kV, Stoßspannung nicht abgeschnitten;
c 236 kV, t_a = 7,4 µs
t_a Abschneidezeit

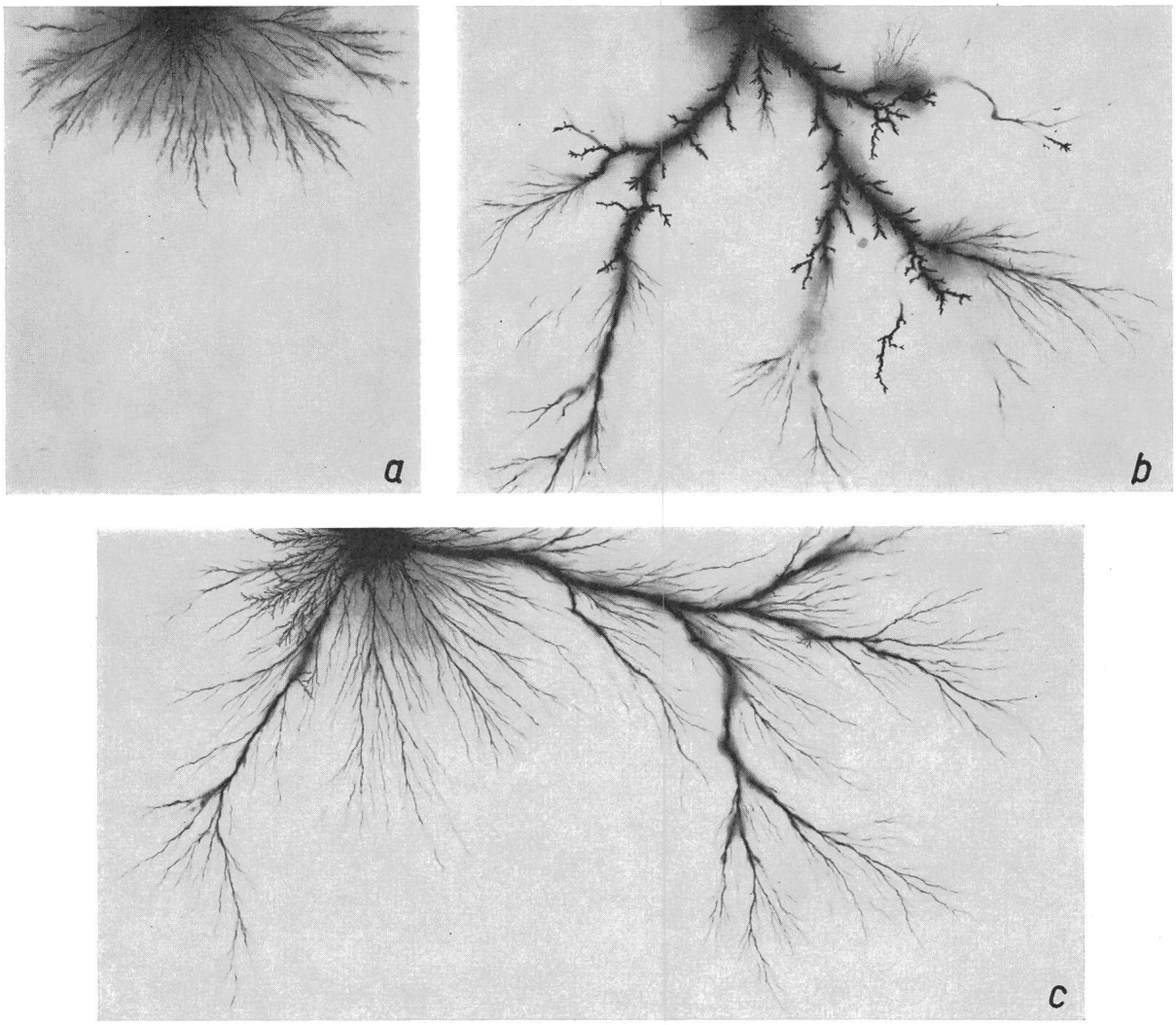


Fig. 11
Entladungsfiguren an der Elektrodenanordnung «Spitze frei im Raum» bei positiver Stoßspannung
Die Stoßspannung wurde in allen drei Entladungsfiguren nicht abgeschnitten
Stoßspannung 1,2|450; Vorwiderstand 2 kΩ
a, c 302 kV, Grundfigur; *b* 326 kV, schwach- und hochleitende Kanäle

und eine Verlängerung der Figur in dieser Richtung verursachen (Fig. 11c).

In Fig. 11a macht man eine sehr wichtige Feststellung: Befinden sich in der am Anfang kreisförmig vorwachsenden Figur keine dickeren Äste (wie z. B. die zwei kräftig belichteten Äste in Fig. 11c), so kann die Grundfigur höchstens einen Radius von 30...50 mm erreichen (s. Fig. 11a; die Stoßspannung wurde nicht abgeschnitten). Ausser den einzelnen Ästen ist in der Entladungsfigur von Fig. 11a noch eine kräftige diffuse Schwärzung vorhanden. Die Figur kann aber eine viel grössere Fläche als in Fig. 11a einnehmen, wenn sie dickere Äste enthält, denn von ihnen aus wachsen weitere Grundfiguren kreisförmig vor. Das ist der Fall in der Entladungsfigur von Fig. 11c, die bei 326 kV aufgenommen wurde (die Stoßspannung wurde nicht abgeschnitten). Diese kräftiger belichteten Äste können nicht als identisch gleich mit denjenigen Entladungselementen angenommen werden, die «schwach- und hochleitende Kanäle» genannt werden (vgl. auch Fig. 11b). Sie und auch ihre Umgebung sind zwar stark belichtet; sie sind jedoch teilweise unscharf, ausserdem ist das Photopapier nicht beschädigt. Es muss daher angenommen werden, dass ihre Leitfähigkeit viel kleiner als die der hochleitenden Kanäle ist.

Die Vorwachsgeschwindigkeit v^+ der Grundfigur ist während der ganzen Dauer ihrer Entwicklung konstant, sie ist aber spannungsabhängig (Fig. 7). Sie ist zwar höher als die der Anordnung Platte—geerdete Spitze, jedoch kleiner als die der Anordnung Spitze—Spitze und Spitze—geerdete Platte. Im Spannungsbereich 245...305 kV ändert sich v^+ linear mit der Spannung; bei noch höheren Spannungen nimmt v^+ mit zunehmender Spannung mehr als linear zu.

Bei einer Spannung von ungefähr 285 kV entsteht ein Kanalabschnitt an der Spitze. Dieser ist in der Nähe der Spitze hochleitend und hat bei 285 kV eine Länge von ungefähr 50 mm. Ihm schliessen sich halbleitende Kanäle und Grundfiguren an. Dies zeigt die Entladungsfigur von Fig. 11b, die bei 326 kV aufgenommen wurde (die Stoßspannung wurde nicht abgeschnitten).

Die Länge des hochleitenden Kanals und auch der ganzen Entladungsfigur nimmt mit der Spannung zu. Da der hochleitende Kanal in den ersten 10...20 µs nach dem Beginn der Stoßspannung entsteht und sich die anschliessenden Grundfiguren nur während der nächsten 20...30 µs entwickeln, hört jede Weiterentwicklung der Entladungsfigur 30...50 µs nach dem Beginn der Stoßspannung auf.

Die mit einer Stoßspannung bis zu 326 kV aufgenommenen Entladungsbilder lassen erkennen, dass die Grundfigur bei Schlagweiten, die bedeutend grösser als 100 mm sind, nicht mehr dieselbe wichtige Rolle beim Einleiten des Durchschlags

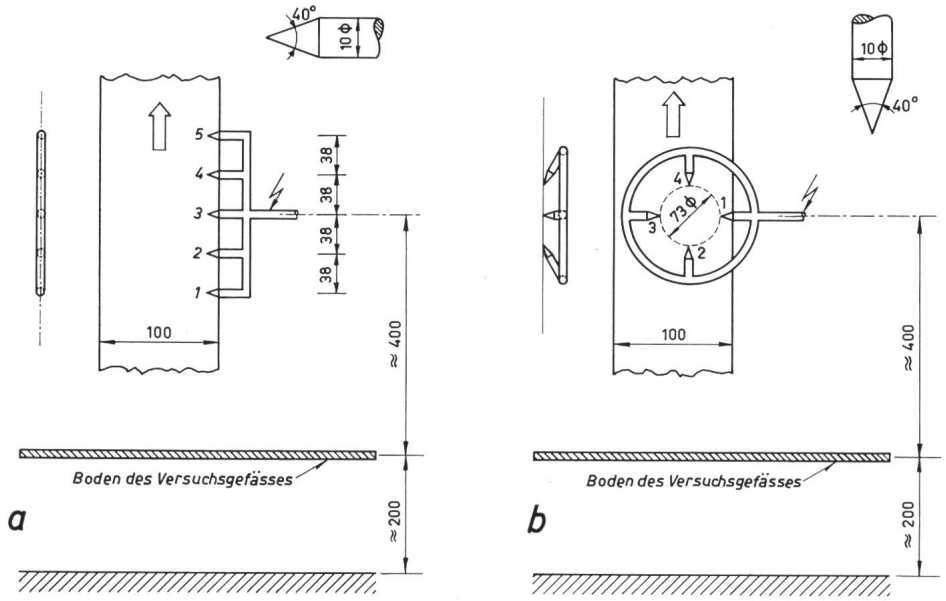


Fig. 12
Zusätzliche Elektroden «frei im Raum»
Anordnung der Elektroden: *a* in Reihe; *b* kreisförmig
Masse in mm

wie bei $S \leqq 100$ mm spielt. Zunächst zeigt Fig. 11b, dass Grundfiguren nicht an der Spitze, sondern an mehreren Punkten des hochleitenden Kanals entstehen. Im Gegensatz zum Fall Spitze—Platte und auch Spitze—Spitze, in denen ein hochleitender Kanal im Anschluss an die Grundfigur gebildet wird, bildet sich hier zuerst der hochleitende Kanal und dann die Grundfigur. Ausserdem ist in Fig.11b deutlich zu sehen, dass schwachleitende Kanäle im Anschluss an einzelne Äste der Grundfigur gebildet werden, was in der Anordnung Spitze—Platte bei $S = 97$ mm nur bei negativer Spitze festgestellt wurde. Man muss also annehmen, dass der Durchschlag an der Elektrodenanordnung Spitze—Platte bei Schlagweiten über 100 mm durch das stufenartige Vorwachsen eines hochleitenden Kanals bzw. durch die stufenartige Umwandlung eines schwach- in einem hochleitenden Kanal zustande kommt. Die Grundfigur spielt nur noch eine untergeordnete Rolle: sie dient zur Überbrückung zweier Kanalabschnitte oder eines Kanals und der Gegenelektrode.

Die vorigen Bemerkungen geben Aufschluss über den zu erwartenden Mechanismus bei Schlagweiten über 100 mm. Die Gültigkeit muss aber durch Untersuchungen bei Schlagweiten $S > 100$ mm bewiesen werden.

4.2 Negative Stoßspannung

Die negative Entladungsfigur entsteht in der gleichen Weise wie in der Anordnung Spitze—Platte und Spitze—Spitze bei $S = 97$ mm: Es bildet sich innerhalb der ersten 10...20 µs ein hochleitender Kanal an der Spitze, dessen Länge von der Spannung abhängt. Im Anschluss an den hochleitenden Kanal bildet sich während der nächsten 20...30 µs eine Grundfigur. Der Vorgang hört dann auf. Er dauert also insgesamt nur 30...50 µs. Ist die Spannung genügend hoch, wächst der hochleitende Kanal stufenartig bis zur Gegenelektrode vor.

5. Weitere Untersuchungen

Das Vorwachsen der positiven Grundfigur, deren Beitrag zum Einleiten des Durchschlages bei $S \leqq 97$ mm ausschlaggebend ist, wurde noch mit zwei besonderen Elektroden ohne Gegenelektrode, also «frei im Raum» untersucht. Diese Elektroden werden in Fig. 12 gezeigt.

Die erste Elektrode (Fig. 12a) bestand aus 5 einzelnen Spitzenelektroden aus Messing, ähnlich wie die bisher verwendeten, die nebeneinander parallel zusammengelötet waren, so dass alle Spitzen auf einer Geraden in gleichen Abständen voneinander lagen. Die zweite Elektrode (Fig. 12b) bestand aus 4 Spitzenelektroden, ebenso wie die bisherigen, die an einem Messingring in Richtung auf seinen Mittelpunkt angelötet waren, so dass ihre Spitzen auf einem Kreis mit 73 mm Durchmesser lagen.

Da es zu erwarten war, dass Grundfiguren an allen Spitzen entstehen, sollte festgestellt werden, wie diese vorwachsen und welchen Einfluss jede auf ihre Nachbarfigur hat. Die Untersuchungen erstreckten sich nur auf die positive Grundfigur, deren Vorwachsgeschwindigkeit bestimmt werden kann.

5.1 Erste Elektrode (Fig. 12a)

In Fig. 13 sind Grundfiguren zu sehen, die bei 310 kV und verschiedenen Abschneidezeiten aufgenommen wurden. (Die Numerierung der einzelnen Figuren entspricht derjenigen der einzelnen Spitzen in Fig. 12a.) Man sieht, dass jede Einzelfigur kreisförmig vorwächst. Die Vorwachsgeschwindigkeit v^+ ist konstant, jedoch spannungsabhängig (Fig. 7). Am grössten ist v^+ an der Spitze *1*: sie ist ungefähr gleich der Vorwachsgeschwindigkeit an einer einzelnen «Spitze frei im Raum». An den Spitzen 2...4, deren Figuren ungefähr die gleiche Vorwachsgeschwindigkeit haben, ist v^+ sehr gering. Sie ist noch kleiner als bei der Anordnung Platte—geerdete Spitze mit $S = 97$ mm. An der Spitze *5* schliesslich liegt die Vorwachsgeschwindigkeit bis ungefähr 310 kV zwischen denjenigen für die Spitzen 1 und *2...4*, jedoch ergab sich bei 338 kV eine hohe Vorwachsgeschwindigkeit von 2,79 mm/µs.

Jede Grundfigur kommt mit ihrer Nachbarfigur nicht in Berührung. Zwischen ihnen bleibt ein Raum von ungefähr 10 mm frei. Die Figuren an den Spitzen 2...4 sind am schwächsten. Bis zu einer Spannung von 340 kV überschreiten sie bei nicht abgeschnittener Spannung kaum eine Länge von ungefähr 60 mm. Die Figur an der Spitze *5* erreicht meistens eine grössere Ausdehnung, am grössten wird aber die Figur an der erdnahen Spitze *1*, die sich in Richtung zur Erde ausbreitet (Fig. 13d). Ein hochleitender Kanal entstand bei 338 kV teilweise nur an der Spitze *1*. An den übrigen Spitzen bildete sich bis zu dieser Spannung, wie bereits erwähnt, nur die Grundfigur.

5.2 Zweite Elektrode (Fig. 12b)

Auch hier wachsen Grundfiguren in Richtung zum Inneren des Ringes vor, oft von allen vier Spitzen. Das ist in Fig. 14a der Fall. In manchen Fällen jedoch entsteht eine Grundfigur an drei oder sogar an zwei Spitzen. Keine Spitze wird in dieser Hinsicht bevorzugt.

Die Vorwachsgeschwindigkeit v^+ bleibt bei der gleichen Spannung von Stoss zu Stoss nicht konstant. Es scheint eine Rolle zu spielen, ob Figuren an allen vier, an drei oder an zwei Spitzen entstehen. In der Tabelle II ist die mittlere Vorwachs-

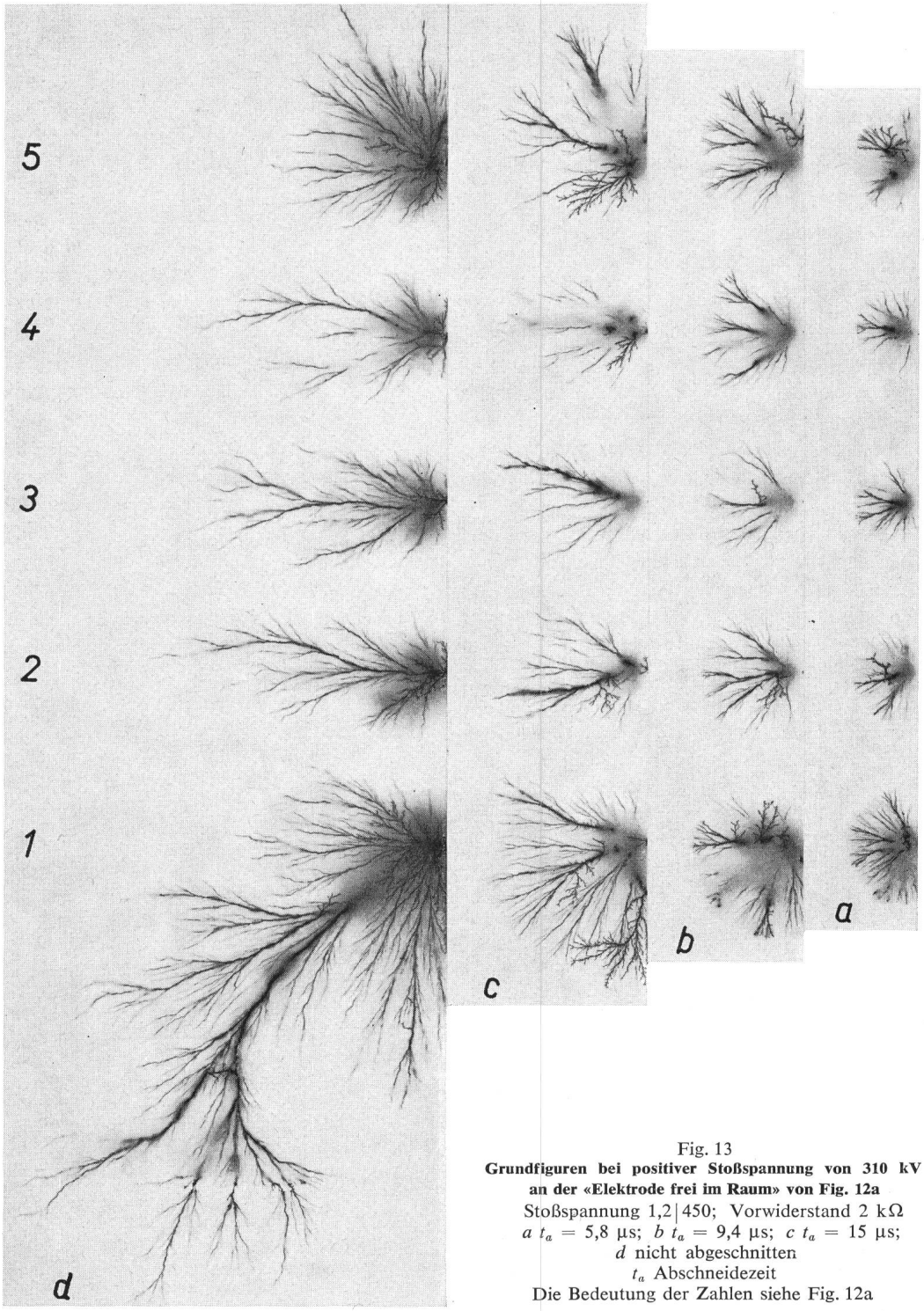


Fig. 13
Grundfiguren bei positiver Stoßspannung von 310 kV an der «Elektrode frei im Raum» von Fig. 12a
Stoßspannung 1,2|450; Vorwiderstand 2 kΩ
a t_a = 5,8 µs; *b* t_a = 9,4 µs; *c* t_a = 15 µs;
d nicht abgeschnitten
t_a Abschneidezeit
Die Bedeutung der Zahlen siehe Fig. 12a

geschwindigkeit für jede Spitze (Numerierung der Spitzen siehe Fig. 12b) zu sehen, ermittelt bei zwei Stoßspannungen aus mehreren Entladungsfiguren.

Im Durchschnitt ist die Vorwachsgeschwindigkeit an der Spitze *1* die höchste; es folgt dann die an der Spitze *3*. Die an den Spitzen *2* und *4* sind die niedrigsten. Die kleineren Vorwachsgeschwindigkeiten an den Spitzen *1* und *3* bei 357 kV gegenüber denjenigen bei 213 kV können als Ursache nur die genannte Streuung haben.

Die Grundfiguren sind auch bei einer Spannung von 357 kV sehr schwach. Sie erreichen kaum einen Radius von 20 mm (s. Fig. 14b, bei dem die Stoßspannung nicht abgeschnitten wurde). Das Gebiet um den Mittelpunkt des Ringes wird von keiner Entladungsfigur besetzt. Unter einer grösseren Anzahl von Entladungsbildern, aufgenommen bei 357 kV, sind zwei, bei denen ein kräftiger Ast von der Spitze *2* in Richtung zur Erde vorgewachsen ist (s. Fig. 14b). Der Anfang eines ebenso kräftigen, in entgegengesetzter Richtung laufenden Astes, ist an der Spitze *1* zu erkennen.

6. Schlussfolgerungen

Herrscht an einer in Öl befindlichen scharfen Spitze oder Kante eine genügend hohe Feldstärke von ungefähr 1000 kV|cm [6], so muss mit dem Starten von Vorentladungen an dieser Stelle gerechnet werden. Wenn eine hohe Feldstärke an mehreren scharfen Spitzen herrscht, startet an jeder Spitze je eine Vorentladung, die den Raum gegen die aus benachbarten Spitzen ausgehenden Vorentladungen abschrimt.

Mittlere Vorwachsgeschwindigkeit der positiven Grundfigur an den Spitzen 1...4 von Fig. 12b

Tabelle II

Nummer der Spitze	Mittlere Vorwachsgeschwindigkeit (in mm/μs) bei einer Stoßspannung von		Sreubereich der Vorwachsgeschwindigkeit (in mm/μs) bei einer Stoßspannung von	
	312 kV	357 kV	312 kV	357 kV
1	2,09	1,75	1,44...2,50	1,36...2,13
2	1,53	1,55	0,72...2,44	0,70...2,13
3	1,85	1,63	1,34...2,24	1,04...1,99
4	1,49	1,60	1,49[1])	1,36...1,85

[1]) Bei 10 Entladungsfiguren entstand nur einmal eine Grundfigur an der Spitze 4.

Drei Punkte, die die Entwicklung der Vorentladungen betreffen, seien hervorgehoben:

Erstens ist für dieselbe Elektrodenanordnung die Einsatzspannung der Vorentladungen in Öl bedeutend höher als in Luft. Zweitens ist ihre Vorwachsgeschwindigkeit in Öl viel kleiner als in Luft, und zwar darf man in Öl bei positiver Spitze mit ungefähr 2 mm/μs rechnen, woraus die erforderliche Zeit für das Vorwachsen der Vorentladungen von einer Spitze bis zu einer Gegenelektrode abgeschätzt werden kann. Bei negativer Spitze ist die Vorwachsgeschwindigkeit sogar noch kleiner. Drittens wirken die Vorentladungen selbst auf ihre Fortentwicklung abschwächend: Da sie von einer Spitze aus kugelförmig vorwachsen und da der von ihnen besetzte kugelförmige Raum eine gewisse Leitfähigkeit aufweist, kommt eine scheinbare Vergrösserung des Krümmungsradius der Spitze zustande. In vielen Fällen hört in einer bestimmten Entfernung von der Spitze jede weitere Entwicklung der Vorentladungen auf.

Wie in [6] festgestellt wurde, nimmt mit zunehmendem Radius der Spitze die Einsatzspannung der Vorentladungen rasch zu. Eine Vergrösserung des Krümmungsradius von Spitzen oder Kanten in Öl ist wirkungsvoller als in Luft, da schon eine leichte Abrundung die Vorentladungen unterdrücken kann. Hierbei sind hauptsächlich Stellen gemeint, an denen eine hohe Feldstärke herrschen könnte; geerdete Teile tragen ohnehin zum Starten von Vorentladungen in Öl wenig bei.

Bei Überspannungen treten hochleitende Kanalabschnitte zuerst an negativen scharfen Spitzen auf. Diese müssen jedoch nicht zum Durchschlag des Öls führen. Bei positiver Spitze treten hochleitende Kanäle erst bei noch höheren Spannungen auf und sie sind ohne weitere Folgen, solange die Schlagweite gross ist (Spitze «frei im Raum»). Ist aber die Schlagweite klein, z. B. liegt sie in der Grössenordnung von einigen Zentimetern, so wird durch die Bildung eines hochleitenden Kanals an der Spitze der Durchschlag eingeleitet, denn es handelt sich um eine Beanspruchung, die zur Übergangsgrenze oder zum oberen Teil der entsprechenden Stosskennlinie gehört. Eine so hohe Beanspruchung des Öls kann entweder bei einer ungewöhnlich hohen Beanspruchung des Gerätes zustande kommen, in dem das Öl verwendet wird, z. B. beim Versagen der Schutzeinrichtungen. Dann müssen noch ernsthaftere Schäden

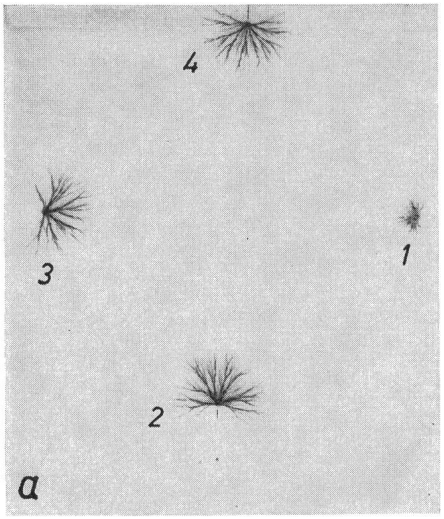
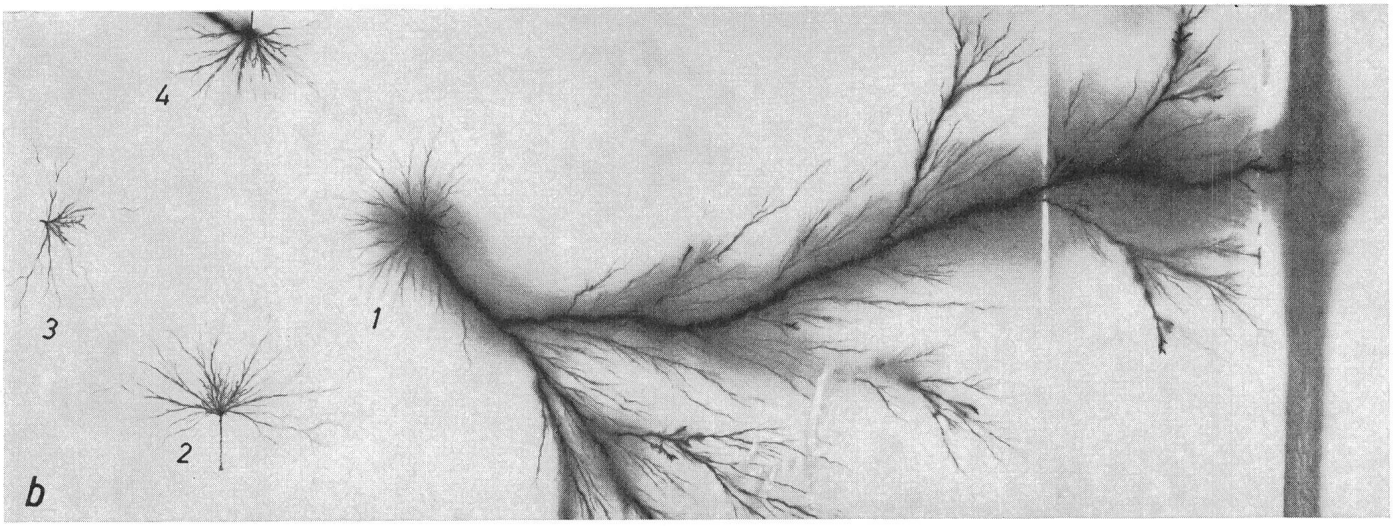


Fig. 14
Entladungsfiguren bei positiver Stoßspannung von 357 kV an der «Elektrode frei im Raum» von Fig. 12b
a t_a = 5,4 μs; *b* Stoßspannung nicht abgeschnitten
t_a Abschneidezeit
Die Bedeutung der Zahlen siehe Fig. 12b



als der Durchschlag des Öls, nämlich Beschädigung der festen Isolation, auftreten. Oder aber diese hohe Beanspruchung des Öls bedeutet, dass die Abstände zwischen unter Spannung stehenden Teilen in Öl zu klein gewählt worden sind.

Der Verfasser dankt Prof. Dr.-Ing. *Herbert Baatz,* dem Vorstand der Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen e. V., Nellingen üb. Esslingen a. N., für die wohlwollende Förderung der vorliegenden Arbeit.

Literatur

[1] *R. Naeher:* Über die Durchschlagsfestigkeit einiger flüssiger Isolierstoffe bei Beanspruchung von langer bis kurzer Dauer. Arch. Elektrotechn. 21(1928)2, S. 169...204.

[2] *A. Nikuradse:* Das flüssige Dielektrikum. Berlin, Springer-Verlag, 1934.

[3] *V. S. Komelkov:* Mechanism of Dielectric Breakdown of Liquids. Comptes rendus de l'académie des sciences de l'URSS 47(1945)4, S. 269...272.

[4] *T. W. Liao* and *I. G. Anderson:* Propagation Mechanism of Impulse Corona and Breakdown in Oil. Trans. AIEE Part. I: Communications and Electronics 72(1953)11, S. 641...648.

[5] *V. Tetzner:* Der Stossdurchschlag der Anordnung Spitze-Platte unter Oel. Arch. Elektrotechn. 44(1958)1, S. 56...68.

[6] *P. Nikolopoulos:* Vorentladungen bei Stoßspannung an der Elektrodenanordnung Stab-Platte in Oel. Dissertation TH Stuttgart 1965.

Adresse des Autors:
Dr. *P. Nikolopoulos,* dipl. Ingenieur, Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen e. V., Zinsholz, Nellingen (über Esslingen a. N.) (Deutschland).

Turbogeneratoren und elektrische Hilfsbetriebe

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 28. Oktober 1965 in Lausanne,

von *R. Noser,* Baden

621.313.322 - 81

Im ersten Teil wird die Entwicklung der Einheitsleistung von Turbogeneratoren in den letzten vierzig Jahren gezeigt. Es werden die Gründe dargelegt, die zur Einführung des Wasserstoffes und der Flüssigkeit als Kühlmedium und zur direkten, unmittelbaren Kühlung von Rotor und Stator führten. Beispiele von Maschinenkonzeptionen werden gezeigt und die Leistungsbereiche angegeben, in welchen die verschiedenen Konzeptionen angewendet werden. Im zweiten Teil wird kurz auf die Erregungsarten von Turbogeneratoren eingegangen. Der dritte Teil behandelt die Hilfsbetriebe der thermischen Kraftwerke, die leistungsmässig 5...7 % der Maschinenleistung ausmachen. Die vier wichtigsten Prinzipschaltungen der Hilfsbetriebe werden diskutiert sowie die Umschaltung der Hilfsbetriebe auf verschiedene Energiequellen.

La première partie de l'exposé illustre l'évolution de la puissance unitaire des turboalternateurs au cours des quarante dernières années. On démontre ensuite les raisons qui ont motivé l'introduction de l'hydrogène et de liquide en tant que milieu réfrigérant et du refroidissement immédiat et direct du rotor et du stator. L'auteur indique en outre quelques exemples de conceptions de machines et les limites de puissance qui leur sont propres. La seconde partie expose rapidement les divers types d'excitation des turboalternateurs. La troisième partie traite des services auxiliaires des usines thermiques qui absorbent de 5 à 7 % de la puissance produite. Les quatre couplages de principe essentiels des services auxiliaires sont ensuite analysés, de même que la commutation des services auxiliaires sur diverses sources d'énergie.

1. Der Turbogenerator

Der jährliche elektrische Energiebedarf der Schweiz und der sie umgebenden Länder nimmt im Mittel pro Jahr um 7 % zu. Dies entspricht rund einer Verdoppelung des Energiebedarfes innerhalb von zehn Jahren. Soll Produktion und Verbrauch im Gleichgewicht bleiben, so erscheint es logisch, dass die Einheitsleistung der Turbogeneratoren ebenfalls diesem Gesetz gehorcht. Fig. 1 zeigt den Verlauf der Einheitsleistung von Turbogeneratoren während den letzten 40 Jahren. In der Kurve sind die gebauten und die in Bau befindlichen Einheitsleistungen berücksichtigt. Während im Jahre 1930 ein

34903-918

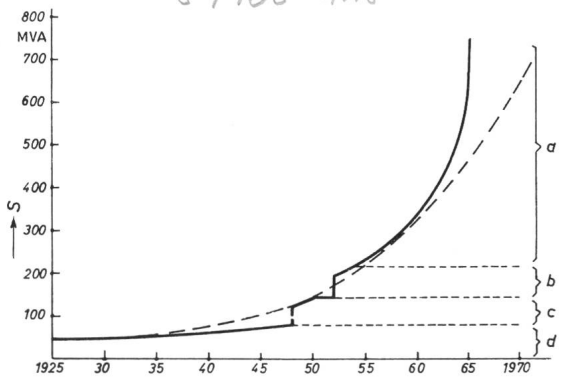


Fig. 1
Verlauf der Einheitsleistung von Turbogeneratoren während der letzten 40 Jahren

Gestrichelt: Vergleichskurve entsprechend Verdoppelung in 10 Jahren
S Scheinleistung; *a* Wasserstoff bis 4 kg/cm², Rotor direkt, Statorwicklung direkt mit Wasser oder Öl; *b* Wasserstoff 2 kg/cm², Rotor direkt, Stator indirekt; *c* Wasserstoff 0,0350...1 kg/cm², Rotor indirekt; *d* Luftkühlung

Turbogenerator von 48 MVA eine Pionierleistung darstellte und bis im Jahre 1947 luftgekühlte Generatoren von 80 MVA hergestellt wurden, trat darauf eine rasche Entwicklung ein. Heute sind in England Generatoren von 588 MVA installiert, in Frankreich solche von 667 MVA in Bau und in Deutschland Generatoren von 750 MVA im Projektstadium. Unter Anwendung der heute bekannten und erprobten Konstruktionsprinzipien ist der Generatorkonstrukteur in der Lage, für 50 Hz zweipolige Generatoren mit einer Einheitsleistung von 1400 MVA bei einem cos φ von 0,9 und einem Kurzschlussverhältnis von 0,35 zu bauen.

Vergleicht man die Kurve der Einheitsleistungen der Generatoren mit der Exponentialkurve, die eine Verdoppelung in 10 Jahren ergibt, so zeigt sich, dass die Wachstumskurve der Einheitsleistung der Generatoren in den letzten Jahren eher steiler verläuft, als die des Verbrauches. Die grosse Steigerung der Einheitsleistung war nur möglich durch die Steigerung der Maschinenausnutzung, das heisst der Leistung pro Volumeneinheit, die in den letzten 15 Jahren auf das 3½fache gestiegen ist. Durch intensive Forschung und Entwicklung gelang es, die magnetische Ausnutzung des Rotors zu steigern, die Verluste zu senken und die konzentriert anfallende Verlustwärme wirksam abzuführen.

In der Kurve der ausgeführten Einheitsleistungen sind zwei charakteristische Sprünge festzustellen. Beide sind gegeben durch die Einführung einer neuen Kühlungsart der Maschine. Der erste Sprung konnte gemacht werden durch die Einführung des Wasserstoffes als Kühlgas anstelle von Luft und der zweite durch die Einführung der direkten Leiterkühlung im Rotor.