Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 24 (1933)

Heft: 2

Artikel: Das Verhalten glasgekapselter Einfach-Funkenstrecken gegenüber Stossspannungen

Autor: Berger, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059500

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: 02.10.2025

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:
Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

VERLAG UND ADMINISTRATION:
Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G., Zürich 4
Stauffacherquai 36/38

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXIV. Jahrgang | N° 2 | Mittwoch, 18. Januar 1933

Das Verhalten glasgekapselter Einfach-Funkenstrecken gegenüber Stoßspannungen.

Von Dr. *K. Berger*, Ingenieur des SEV, Zürich.

537.523.4:621.3.015.5:621.316.933

Es werden die Resultate von oszillographischen Messungen über die Verzögerung des Ansprechens verschiedenartiger Schutzfunkenstrecken mit Schlagweiten einiger mm mitgeteilt. Dabei wird auf den günstigen Einfluss der Ionisierung von Einfachkugelfunkenstrecken kleiner Schlagweiten hingewiesen. Die Aufhebung der Verzögerung ist besonders deutlich ersichtlich beim Auftreffen sehr steiler Spannungswellen auf glasgekapselte Kugelfunkenstrecken. Bei den Spitzenfunkenstrecken dagegen lässt sich die Ansprechverzögerung auch durch Ionisierung bekanntlich nicht restlos aufheben.

Ferner wird eine anormale, bisher offenbar nicht genauer bekannte Verzögerung beschrieben, die sich nur bei gekapselten, aber nicht bei offenen Kugelfunkenstrecken zeigte. Sie wurde deshalb als anormal bezeichnet, weil sie nicht bei steilsten, sondern bei mässig steilen, flachern Wellen zu beobachten war. Vermutlich wird sie durch eine Aufladung der Glaswandung verursacht.

L'auteur communique les résultats de mesures oscillographiques sur le retard au fonctionnement de différents éclateurs de protection dont la distance entre électrodes est de l'ordre de grandeur de quelques mm, et signale l'influence favorable de la ionisation dans les éclateurs simples à boules. La suppression du retard est particulièrement remarquable lorsque des ondes de tension à front très raide pénètrent dans des éclateurs à boules enfermés dans un ballon de verre. Pour les éclateurs à pointes par contre, le retard ne peut même pas être complètement supprimé par ionisation.

L'auteur décrit ensuite une sorte de retard anormal, peu connu jusqu'à présent, qui ne s'est produit que dans les éclateurs à boules enfermés. Ce retard a été qualifié d'anormal, parce qu'il ne s'est pas présenté pour les ondes à front très raide, mais seulement, pour celles à front relativement raide ou peu incliné. Ce retard est dû probablement à une charge qui se forme sur la paroi du ballon de verre.

1. Einleitung.

Bei Versuchen an Ueberspannungsableitern verschiedener Systeme zeigte sich ein merkwürdiges Verhalten von glasgekapselten Schutzfunkenstrecken der Form nach Fig. 1. Diese Funkenstrecken wurden bei verschiedenen Fabrikaten von Ueberspannungsschutzapparaten der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) benutzt, um die Aufstellung der Apparate auch im Freien zu ermöglichen. Die Funkenstrecke muss hierbei vor Regen, Schnee und Insekten geschützt werden, weil sonst z. B. bei Regen die Kugelfunkenstrecke sehr oft ansprechen würde, wodurch der Apparat nutzlos schwer gefährdet und der Betrieb grundlos beunruhigt würde.

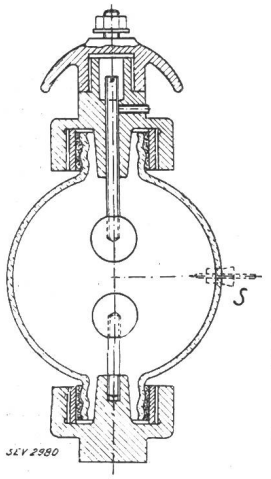
Die eigentliche Kugelfunkenstrecke, bestehend aus zwei Kugeln von 30 mm Durchmesser, ist in eine gemeinsame Umhüllung aus Glas von ca. 5 mm Wandstärke und 150 mm Aussendurchmesser eingeschlossen. An beiden Enden sind Metallkappen auf zylindrische Ansätze der Glaskugel aufgekittet, in welchen die Trägerbolzen der Kugelelektroden verstellt werden können.

Die bei den im folgenden beschriebenen Messungen benutzten Funkenstrecken wurden von der EAG Wädenswil in freundlicher Weise zur Verfügung gestellt, wofür auch hier bestens gedankt sei.

Ausser der bereits beschriebenen Funkenstrecke (Fig. 1) wurde eine zweite, äusserlich gleiche Anordnung untersucht, bei der in einer der beiden Kugelelektroden ein Radiumpräparat mit 0,5 mg wirksamer Substanz nach Fig. 2 untergebracht war.

Wir bezeichnen diese Funkenstrecke kurz als *Ra-Funkenstrecke.*

Eine dritte Funkenstrecke besass in der Glashülle ein Loch von 4 mm Durchmesser, durch das



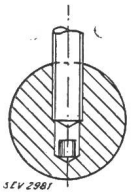


Fig. 2.
Radiumionisierte Kugelelektrode.

Fig. 1 (links).
Glasgekapselte Kugelfunkenstrecke ohne Ionisierung (die gestrichelt gezeichnete Spitze *S* ist wegzudenken).

Fig. 3 (links).
Glasgekapselte Kugelfunkenstrecke mit Glimmspitzenionisierung (durch Spitze *S*).

eine feine Drahtspitze eingeführt werden konnte (Fig. 3). Durch Anschliessen dieser Spitze an eine Hochspannungsquelle konnte jene zum Glimmen gebracht werden, wodurch in ähnlicher Weise wie bei der Ra-Funkenstrecke das Glasinnere ionisiert wurde. Wir bezeichnen diese Funkenstrecke kurz als *Funkenstrecke mit Glimmspitze.*

Eine vierte Vergleichsfunkenstrecke enthielt statt der Kugelelektroden feine Drahtspitzen aus Kupferdraht von 0,8 mm Durchmesser als Elektroden. Wir bezeichnen sie als *Spitzenfunkenstrecke.*

Zum Vergleich des Verhaltens wurden die Elektroden der genannten drei *gekapselten Funkenstrecken* auch in gewöhnlicher Luft ausserhalb der Glashülle untersucht. Diese Anordnung bezeichnen wir im folgenden als *offene Funkenstrecke.*

Es muss noch bemerkt werden, dass die glasgekapselten Funkenstrecken keineswegs luftdicht abgeschlossen waren. Längs der Gewinde konnte sich der Luftdruck ausgleichen. Auch blieb das im folgenden beschriebene Verhalten dasselbe, wenn die Metallkappen der Glaskugel einige kleine Luftlöcher besassen. Ferner wurde auf die Politur oder Reinigung der Elektroden keine besondere Sorgfalt gelegt, um möglichst das Verhalten im technischen Betrieb zu erfassen.

2. Funkenverzögerung.

Die Untersuchung erstreckte sich ausschliesslich auf vielleicht vorhandene Verzögerungserscheinungen im Verhalten der Funkenstrecke gegenüber Stoßspannungen, die als Ueberspannungen in Hochspannungsanlagen hauptsächlich durch Blitzeinschläge entstehen. Diese Stoßspannungen wurden durch eine Stoßschaltung nachgeahmt und der Spannungsverlauf an der Funkenstrecke wurde mit dem Kathodenstrahloszillographen des SEV verfolgt.

Es mag eine kurze Erläuterung des Begriffes der *Funkenverzögerung* vorangestellt werden. An eine Funkenstrecke beliebiger Art, sei es nun eine Schutz- oder Messfunkenstrecke, Kugel- oder Spitzenfunkenstrecke oder ein Isolator irgendwelcher Art, werde eine elektrische Spannung angelegt, die von kleinen Werten langsam immer höher steigt. Bei einem Wert U der Spannung tritt der elektrische Durchbruch der Luft ein: die Funkenstrecke überschlägt. Die Höhe der Ueberschlagsspannung hängt von vielen Faktoren ab: von Form und Grösse der Elektroden, von Art und Druck des zwischen diesen befindlichen Gases, von Form, Art und Entfernung benachbarter Körper und elektrischer Zusatzfelder, und schliesslich auch von der Raschheit und Art, mit der die Spannung zwischen den Elektroden erhöht wird.

In Fig. 4 sind durch die Geraden g_0, g_1 und g_2 über dem Zeitmaßstab gleichmässig ansteigende Spannungen aufgezeichnet, deren Steilheit ein Mass der Raschheit des Spannungsanstieges ist. Bei sehr langsamem Anstieg (g_0) tritt beim Wert U_0 der Ueberschlag ein. Erfolgt der Spannungsanstieg rascher (g_1), so tritt der Ueberschlag erst bei U_1 ein. Die zum Durchbruch erforderliche Spannung U_1 ist höher als die statische Funkenspannung $U_{st} = U_0$. Nach Erreichen der statischen Ueberschlagsspannung U_0 längs g_1 verstreicht noch die zusätzliche Zeit Δt_1 bis zum Durchschlag; diese Zeit nennt man die *Funkenverzögerung.*

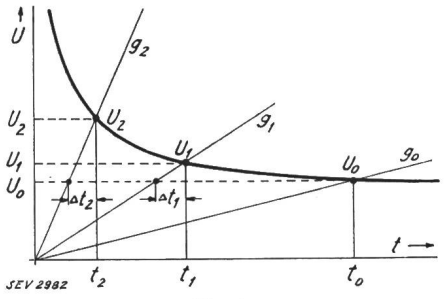


Fig. 4.
Stossüberschlag in der Spannungsfront.

Wie in Fig. 4 angedeutet ist, wächst im allgemeinen mit rascherm Spannungsanstieg (g_2) die Ueberhöhung der Durchschlagsspannung über die statische Funkenspannung U_2/U_0. Die Funkenverzögerung für den Spannungsanstieg längs g_2 ist in Fig. 4 durch den Abschnitt Δt_2 gegeben.

Die Erscheinung einer Funkenverzögerung ist nicht an einen *gleichmässigen* und unbegrenzten Spannungsanstieg gebunden. Es kann z. B. nach Fig. 5 auch eine Spannung begrenzter Höhe *plötzlich* angelegt werden, d. h. eine Welle konstanter Höhe, aber mit sehr steiler Stirne. Eine Welle mit der Höhe U_0 = der statischen Funkenspannung U_{st} führt erst nach einer gegenüber der Frontdauer der Welle sehr langen Zeit zum Durchbruch der Funkenstrecke, d. h. erst nach sehr vielen Mikrosekunden (μs), wobei die Frontdauer weniger als 1 μs betragen kann. Eine steile Spannungswelle von

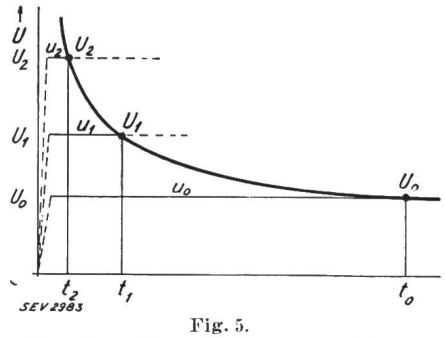


Fig. 5.
Stossüberschlag im Spannungsrücken.

der grössern Höhe U_1 bewirkt den Ueberschlag nach kürzerer Zeit. Eine steile Spannung noch grösserer Höhe U_2 bewirkt den Ueberschlag in noch kürzerer Zeit, usw. Die Punkte U_1, U_2 . . . liegen in Fig. 4 und 5 auf einer hyperbelähnlichen Kurve. Sinkt eine Spannungswelle vor dem Erreichen dieser Kurve rasch wieder auf Null, so tritt kein Durchschlag ein.

Man bezeichnet den Durchschlag nach Fig. 4 *als Durchschlag in der Spannungsfront*, den nach Fig. 5 als *Durchschlag im Spannungsrücken*. In der Form des Spannungsrückens bestehen wieder viele Möglichkeiten, z. B. allmählich abfallende oder schwingende Spannung. Aus Fig. 5 ist vielleicht die etwas einseitige Bezeichnung «Funkenverzögerung» deutlicher erfassbar als aus Fig. 4, weil in Fig. 5 bei *konstanter* Spannung, z. B. bei u_1, eine gewisse Zeit verstreicht, bis der Ueberschlag erfolgt. Allgemein halten alle Luft-, und insbesondere Oelisolationen kurzzeitig grössere Spannungen aus als langdauernd. Wieviel der Unterschied ausmacht, ist für verschiedene Arten Funkenstrecken sehr verschieden. Jeder Isolator, d. h. jede Funkenstrecke, besitzt für eine bestimmte Form der beanspruchenden Spannungslinie g (Fig. 4) resp. u (Fig. 5) eine charakteristische Kurve U_0, U_1, U_2 . . ., die sein Verhalten gegenüber Stoßspannungen bestimmter Form bestimmt. Zur Fixierung der Vorstellung mag gesagt sein, dass der Anstieg dieser Kurve im allgemeinen in nach landläufigen Begriffen sehr kurzen Zeiten erfolgt. Damit z. B. $U_2/U_0 = 2$ wird, muss der Durchschlag nach Fig. 4 oder 5 von normalen Isolatoren in wenigen μs erzwungen werden, bei Kugelfunkenstrecken im allgemeinen in weniger als 1 μs.

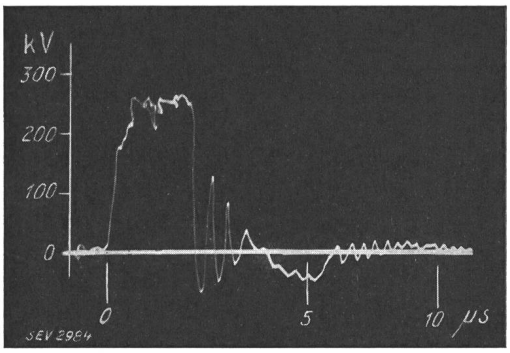


Fig. 6.
Beispiel der Ueberschlagsverzögerung einer Porzellandurchführung.

Fig. 6 bis 8 zeigen wenige Beispiele von Oszillogrammen der Ueberschlagsverzögerung technischer Isolatoren. Die beanspruchende Spannung entsteht durch eine Wanderwellenschwingung auf einer 616 m langen Leitung. In Fig. 6 erfolgt der Ueberschlag bereits im ersten Wellenrücken. Bei Durchführungen, die zu Gleitfunken neigen, zeigt sich, dass der Ueberschlag vorwiegend kurz nach irgend einer Spannungsfront entsteht (Fig. 7 und 8), seltener während einem Einzelrücken der Schwingung. Fig. 8 zeigt z. B. einen Ueberschlag bei einem viel kleinern Momentanwert der Spannung, als er vorher ausgehalten wurde. Diese oszillographische Beobachtung ist eine Bestätigung der Töplerschen Gleitfunkenanschauung, wonach der Ueberschlag solcher Isolatoren durch Gleitfunken, d. h. durch die Ladeströme der Elementarkapazitäten eingeleitet wird [1]).

Die Erscheinung der Funkenverzögerung kann erwünscht sein für solche Isolatoren, an denen ein Ueberschlag nicht auftreten soll; sie ist andererseits sehr unerwünscht an allen Schutzfunkenstrecken, an denen ein Ueberschlag bei Ueberspannung ausschliesslich vorkommen soll. Auf alle Fälle müssen Schutzfunkenstrecken eine tiefere Ueberschlagsverzögerungskurve aufweisen als die zu schützenden Isolationen [2]).

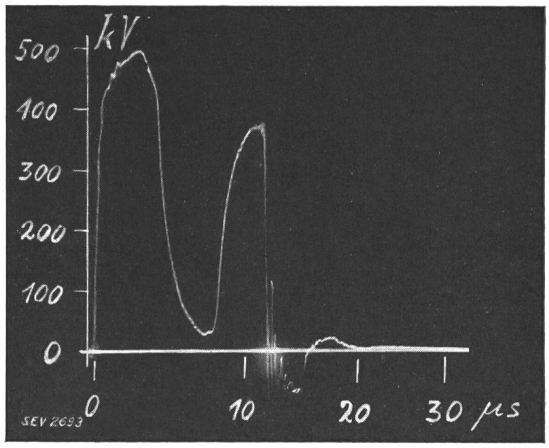


Fig. 7.
Ueberschlagsverzögerung einer Durchführung.

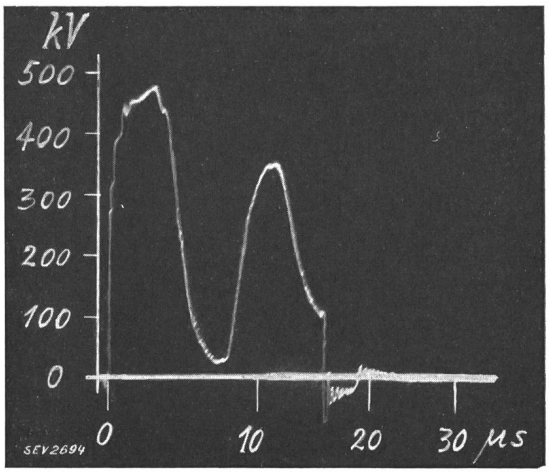


Fig. 8.
Ueberschlagsverzögerung einer Durchführung.

3. Versuchsanordnung.

Aus dem Vorhergehenden erhellt die *grosse Bedeutung der Wahl der Form der Spannungskurve*, die solchen Untersuchungen zugrunde gelegt wird. Die in modernen Hochspannungsanlagen allein wichtigen atmosphärischen Ueberspannungen besitzen die Form von Spannungsstössen mit relativ

[1]) M. Töpler: Handwörterbuch der Naturwissenschaften, Bd. 4, 1913, S. 418.

[2]) A. Matthias, Gewitterforschungen und Blitzschutz, Weltkraftkonferenz 1930.

steiler Front und langsam abfallendem Rücken nach Fig. 9. Die Dauer resp. Zeitkonstante der Front beträgt nach unseren sowie amerikanischen Gewitterspannungsmessungen mit Kathodenstrahloszillographen Bruchteile bis einige μs, sofern nur Ueberspannungswellen von ca. 100 kV an aufwärts betrachtet werden, die nach unseren Untersuchungen

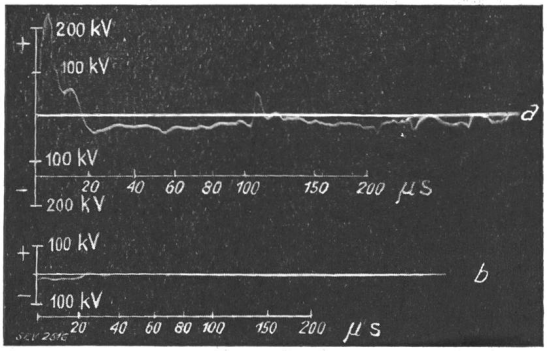


Fig. 9.
Oszillogrammbeispiel einer Blitzüberspannung.
a Spannung des direkt vom Blitz getroffenen Leitungsseils;
b Spannung eines ca. 100 m vom Blitz entfernten Leitungsseils.
(Aus Bull. SEV 1932, Nr. 12.)

ausschliesslich von direkten Blitzeinschlägen herrühren. Die Halbwertzeit resp. Zeitkonstante des Wellenrückens beträgt einige bis zu ca. 50 μs. Die absolute Steilheit der Front erreicht nach unsern Messungen des Jahres 1931 auf Höchstspannungsleitungen maximal ca. 1000 kV/μs an der Blitzeinschlagsstelle, nach amerikanischen Messungen sogar bis 10 000 kV/μs [3]; das Durchlaufen einiger km Leitung lässt aber diese Steilheit rasch abnehmen.

Bei steilen Wellen mit der Form nach Fig. 9 kann ein Ueberschlag von Isolatoren sehr wohl auch erst am Spannungsrücken erfolgen, sofern die Front genügend steil ist. Die Unsicherheit in der Wahl einer «Normal-Ueberspannungswelle» hat dazu geführt, die vorliegende Untersuchung sowohl mit steilsten Wellen begrenzter Höhe (Fig. 5), als auch mit Wellen flacherer Fronten (Fig. 4) durchzuführen. Auf diese Weise liessen sich sowohl Durchschläge im Spannungsrücken als auch in der Spannungsfront erzeugen. Sämtliche Messungen erfolgten mit dem Kathodenstrahloszillographen des SEV nach den folgenden Schaltungen:

A. Ueberschläge im Wellenrücken wurden erzeugt nach Schema Fig. 10. (Die räumliche Beschränkung machte die Benützung einer Wanderwellenleitung unmöglich). Der Glühkathodengleichrichter *G* ladet über hochohmigen Widerstand die Kapazität C_1 negativ bis zum Ansprechwert der Zündfunkenstrecke F_z. Die Entladung von C_1 geschieht darnach über den Entladewiderstand R_e, und, sofern die untersuchte Schutzfunkenstrecke F_s anspricht, über den Vorschaltwiderstand R_v als Dämpfungswiderstand nach Erde. Der Widerstand R_e dient zugleich als Spannungsteiler für den Kathodenstrahloszillographen. Die Zuleitung ermöglicht theoretisch die Ausbildung von Einschaltwellen zwischen C_1 und den Widerständen R_v und R_e. Durch äusserst gedrängten Zusammenbau wurde deren Dauer auf das kleinstmögliche Mass reduziert. Ein Dämpfungswiderstand vor der Kapazität C_1 wurde als unwesentlich bei den beschriebenen Versuchen wieder weggelassen, ebenso jegliche Verzögerungsleitung zum Oszillographen. Es

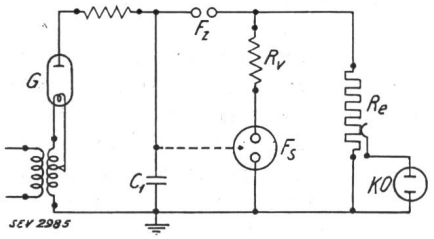


Fig. 10.
Schema zur Untersuchung der Funkenstrecke F_s bei steilen Wellen
(Ueberschläge von F_s im Spannungsrücken).

fehlt daher in den Oszillogrammen die erste halbe bis Viertel-μs. Für die vorliegende Untersuchung blieb dieser Mangel ohne allzugrosse Bedeutung, wie wir sehen werden.

Die Daten der Kapazitäten C_1, Widerstände R_v und R_e, sowie der Zeitkonstante des Wellenrückens $T_R = R_e \cdot C_1$ waren folgende:

Fall a): μF Ω Ω μs
$C_{1a} = 0{,}15$, $R_v = 63$, $R_{ea} = 3150$, $T_{Ra} = 483$
Fall b):
$C_{1b} = 0{,}15$, $R_v = 63$, $R_{eb} = 750$, $T_{Rb} = 112$
Fall c):
$C_{1c} = 0{,}04$, $R_v = 63$, $R_{ec} = 750$, $T_{Rc} = 30$

Der Spannungsverlauf am Widerstand $R_e = 3150\ \Omega$ und, solange F_s nicht anspricht, an der Funkenstrecke F_s ist z. B. durch Fig. 11 gegeben. Die Spannung u_a erreicht ihren Maximalwert in ca. $^1/_{30}$ μs, was eine Frontsteilheit der Grössenordnung einiger 100 kV/μs ergibt. Vom Moment des Ansprechens der Schutzfunkenstrecke F_s an kommt der aus R_e und R_v resultierende Entladewiderstand von ca. 60 Ohm zur Wirkung, wodurch die Spannung rascher zusammenbricht, und zwar mit einer Zeitkonstante von ca. 9 μs, wie z. B. in Fig. 12, resp. ca. 2,5 μs im Fall C.

B. Wellen mittlerer Frontsteilheit wurden erzeugt nach Schema der Fig. 13. Die Anordnung unterscheidet sich von derjenigen nach Fig. 10 lediglich durch den Zusatz der Kapazität C_2 und des Widerstandes R_1, welche den Anstieg der Spannung an R_3 verlangsamen, d. h. welche der Spannungsfront die gewünschten Steilheiten erteilen.

Die uns interessierenden Resultate der Berechnung des Strom- und Spannungsverlaufs sind nachstehend angeführt:

[3]) Pittmann and Torok: Lightning Investigation on a Wood Pole Transmission Line, Paper presented before the AIEE, January 1931; siehe Auszug daraus in Electrical Engng., Juli 1931, S. 490.

Solange die Schutzfunkenstrecke F_s nicht anspricht, gelten folgende Gleichungen für die Entladung der Kapazität C_1 über die Zündfunken-

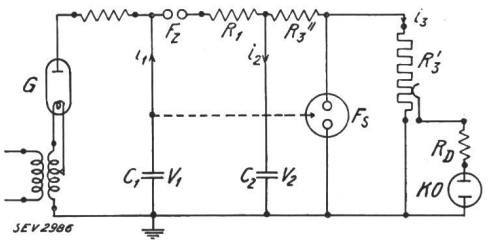


Fig. 13.
Schema zur Untersuchung der Funkenstrecke F_s bei flachen Wellen
(Ueberschläge von F_s in der Spannungsfront).

strecke F_Z und Frontdämpfungswiderstand R_1 auf die Kapazität C_2 und den als Spannungsteiler benutzten Widerstand R_3:

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= i_2 + i_3 = C_2 R_3 \cdot \frac{di_3}{dt} + i_3 \\ -\frac{i_1}{C_1} &- R_1 \cdot \frac{di_1}{dt} = R_3 \frac{di_3}{dt} \end{aligned}\right\} R_3 = R_3' + R_3''$$

$$i_3 = i_1 \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) + C_2 R_1 \frac{di_1}{dt}$$

daraus wird $i_1 = K_1 e^{\alpha_1 t} + K_2 e^{\alpha_2 t}$

$$i_3 = \frac{U_2}{R_3} = K_1 (1 + \frac{C_2}{C_1} + R_1 \cdot C_2 \alpha_1) \cdot e^{\alpha_1 t} + K_2 (1 + \frac{C_2}{C_1} + R_1 C_2 \alpha_2) e^{\alpha_2 t}$$

wobei $$\alpha_{1,2} = -\frac{1 + X + XY \pm \sqrt{W}}{2 XY T_1}$$

mit der Bedeutung

$$X = \frac{R_3}{R_1} = \frac{R_3' + R_3''}{R_1} \qquad Y = \frac{C_2}{C_1},$$

$$W = (1 + X + XY)^2 - 4XY$$

$$T_1 = R_1 C_1$$

Die Konstanten K_1 und K_2 bestimmen sich aus dem Anfangszustand beim Ansprechen der Zündfunkenstrecke F_Z. Es muss dann gelten:

für $\underline{t = 0}$ $\begin{cases} U_1 = U_{10} = U_{FZ} = \text{Zündspannung von } F_Z \\ U_2 = 0 \end{cases}$

womit $$K_1 = \frac{U_{10}}{2 R_1 \cdot \sqrt{W}} (X + XY - 1 + \sqrt{W})$$

$$K_2 = \frac{U_{10}}{2 R_1 \cdot \sqrt{W}} (1 - X - XY + \sqrt{W})$$

$$U_2 = U_{10} \cdot \frac{X}{\sqrt{W}} [e^{\alpha_2 t} - e^{\alpha_1 t}] = U_{10} \cdot \frac{X}{\sqrt{W}} [e^{-\frac{t}{T_R}} - e^{-\frac{t}{T_F}}]$$

mit der Bezeichnung der Zeitkonstanten

für die Front $$T_F = \frac{-1}{\alpha_1} = \frac{2 XY}{1 + X + XY + \sqrt{W}} \cdot T_1$$

für den Rücken $$T_R = \frac{-1}{\alpha_2} = \frac{2 XY}{1 + X + XY - \sqrt{W}} \cdot T_1$$

Insbesondere gilt für $Y = C_2/C_1 = 1$:

$$U_2 = U_{10} \cdot \frac{X}{\sqrt{1 + 4X^2}} [e^{-\frac{t}{T_R}} - e^{-\frac{t}{T_F}}]$$

Schliesslich ist die Spannung am Spannungsteiler

$$U_3 = \frac{R_3'}{R_3} \cdot U_2 = \frac{R_3'}{R_3} \cdot \frac{X}{\sqrt{1 + 4X_2}} [e^{-\frac{t}{T_R}} - e^{-\frac{t}{T_F}}] \cdot U_{10}$$

Dieser Spannungsverlauf gilt bis zum Ansprechen der Schutzfunkenstrecke F_s. Bei Ansprechen der letztern sinkt die Spannung an F_s rasch zusammen.

Der Oszillograph ist am Widerstandsspannungsteiler R'_3 mit kurzen verdrillten Drähten und über Dämpfungswiderstände R_D angeschlossen. Letztere, sowie R'_3 dürfen nicht zu hoch sein, um eine genügend kleine Zeitkonstante mit der Kapazität der Zuleitungen zum Oszillographen zu ergeben. Die Werte der Konstanten der Fig. 13 betrugen bei den hier angeführten Messungen:

$C_1 = 0{,}095\ \mu F$ bei 50 Per./s { Die Uebersetzung des Spannungsteilers R'_3 = 0,0926 resp. 1/10,8

$C_2 = 0{,}045\ \mu F$ bei 50 Per./s { Die Uebersetzung des gesamten Teilers R_3 = 0,0905 resp. 1/11,05

$R_3'' = 62{,}5$ Ohm
$R_3' = 3149{,}5$ Ohm
R_D pro Draht = 43 Ohm
$F_Z = 10$ mm
$F_s = 1{,}4; 2{,}1; 2{,}8$ mm
} Fall *a)* $R_1 = 346$ Ohm
Fall *b)* $R_1 = 837$ Ohm

Die Zeitkonstanten der Front und des Rückens der Stosswelle errechnen sich dazu aus Formel (2) zu

Fall a) $\begin{cases} T_F = 10\ \mu s \\ T_R = 457\ \mu s \end{cases}$ Fall b) $\begin{cases} T_F = 22{,}6\ \mu s \\ T_R = 505\ \mu s \end{cases}$

Das Spannungsmaximum an C_2 wird erreicht zur Zeit

$$t_m = \frac{T_R \cdot T_F \ln\left(\frac{T_R}{T_F}\right)}{T_R - T_F}, \text{ d. h. } \begin{cases} \text{im Fall a) bei } t_m = 39\ \mu s \\ \text{im Fall b) bei } t_m = 73{,}3\ \mu s \end{cases}$$

Aus der Einstellung der Funkenstrecke $F = 10$ mm ergibt sich die Zündspannung zu ca. 22,2 kV_{eff} = 31,5 kV_{max}. Das Spannungsmaximum an C_2 ergibt sich zu

Fall a):
$U_{2max} = 0{,}66 \cdot 0{,}77\ U_{10} = 0{,}475\ U_{10} = 14{,}9\ kV_{max}$
Fall b):
$U_{2max} = 0{,}63 \cdot 0{,}475\ U_{10} = 0{,}30\ U_{10} = 9{,}45\ kV_{max}$

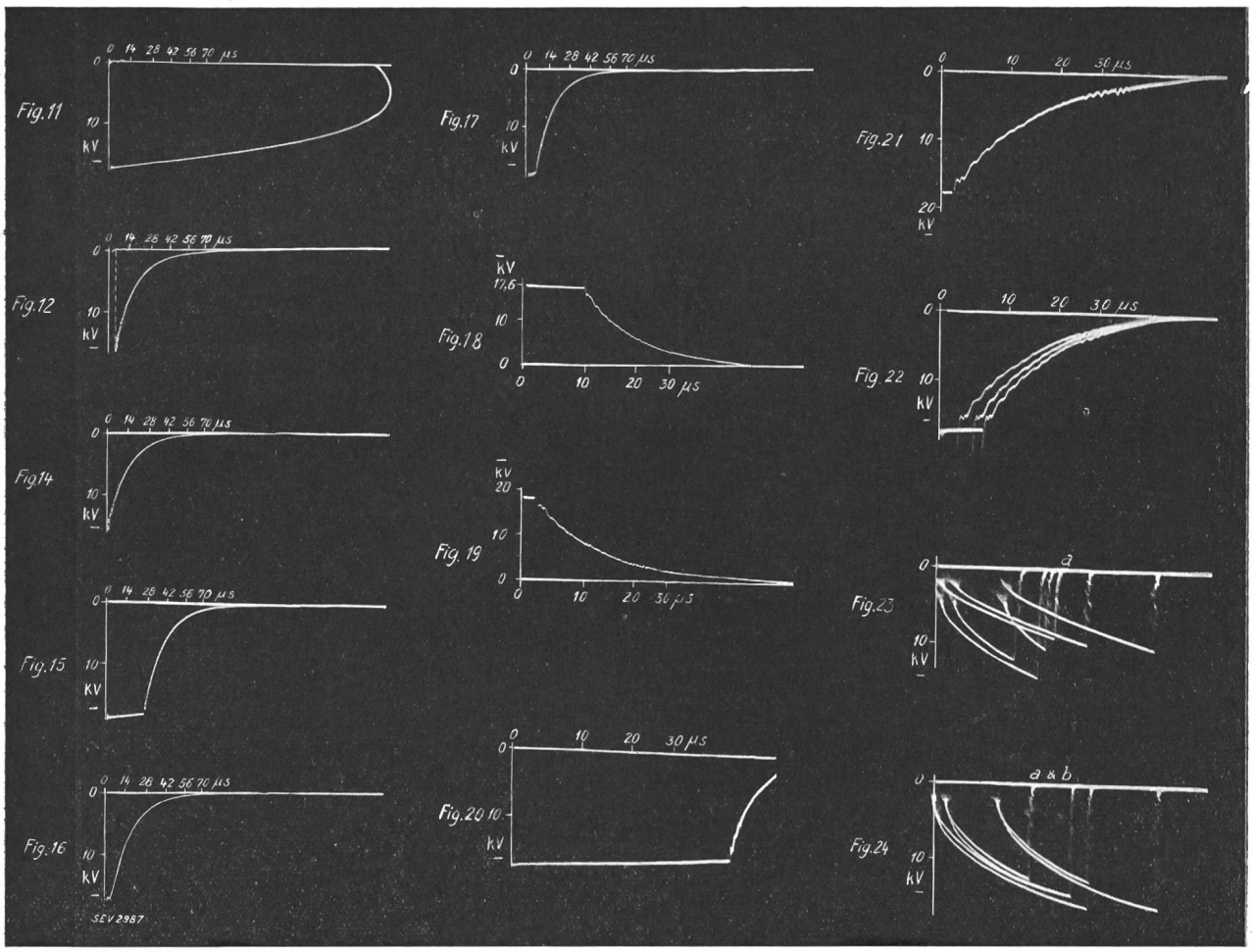


Fig. 11, 12 und 14 bis 22.
(Masstäbe *a* und *b* siehe in Bilderreihe rechts.)
Spannungsverlauf an F_s nach Schema Fig. 10 (steile Wellen, Ueberschlag im Wellenrücken).

Fig. 11.	Spannungsverlauf an F_s, ohne Ansprechen von F_s.								
» 12.	Glasgekapselte	Kugelfunkenstrecke,	Schlagweite	=	5,08	mm	~ 17,1	kV max	mit Ra-Ionisierung
» 14.	»	»	»	=	5,08	»	~ 17,1	»	» Spitzen-Ionisierung
» 15.	»	»	»	=	2,1	»	~ 8,4	»	ohne Ionisierung
» 16.	Offene	»	»	=	4,8	»	~ 16,5	»	» »
» 17.	Glasgekapselte	»	»	=	1,05	»	~ 4,8	»	» »
» 18.	»	Spitzenfunkenstrecke	»	=	11	»	~ 13,0	»	Spitzen-Ionisierung
» 19.	»	»	»	=	8,4	»	~ 9,9	»	» »
» 20.	»	»	»	=	11	»	~ 13,0	»	ohne Ionisierung
» 21.	Offene	»	»	=	11	»	~ 13,0	»	Spitzen-Ionisierung
» 22.	»	»	»	=	11	»	~ 13,0	»	ohne Ionisierung, 3 Oszillogramme

Fig. 23 und 24.
Spannungsverlauf an F_s nach Schema Fig. 13 (flachere Wellen, Ueberschlag in der Front).

Fig. 23.	Glasgekapselte	Kugelfunkenstrecke,	Schlagweite	=	1,4	mm	~ 6,1	kV max	ohne Ionisierung
» 24.	»	»	»	=	2,1	»	~ 8,4	»	» »

Interesse hat noch die absolute Steilheit dieser verflachten Stosswelle U_2. Die anfängliche maximale Steilheit S der Front beträgt:

$$S = \left(\frac{\partial U_2}{\partial t}\right)_{t=0} = U_{10}\frac{X}{\sqrt{W}}\left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_R}\right) = U_{10}\frac{X}{\sqrt{W}}\,\frac{T_R - T_F}{T_R \cdot T_F}$$

Fall a): $S = 0{,}66 \cdot \dfrac{1}{10{,}2} \cdot U_{10} = 2{,}03$ kV/μs

Fall b): $S = 0{,}63 \cdot \dfrac{1}{23{,}8} \cdot U_{10} = 0{,}83$ kV/μs

Den gerechneten Spannungsverlauf zeigt auch der Oszillograph, so lange die Schutzfunkenstrecke F_s nicht anspricht; das Spannungsteilverhältnis ist 1 : 0,0905. Fig. 23 bis 36 zeigen, dass die für die Ueberschlagsversuche wesentliche Front der Stossspannung $U_{2\max}$ und in kleinerm Mass auch die anfängliche Frontsteilheit stets etwas höher waren als die oben berechneten Werte. Als Ursache ergab sich die Veränderlichkeit der Kapazitätswerte der verwendeten Kondensatoren C_2. Diese bestanden aus Glasröhren und einem innern leitenden Belag aus eingestampftem Graphit. Diese nicht metallische Zuleitung bewirkt offenbar eine starke Hyste-

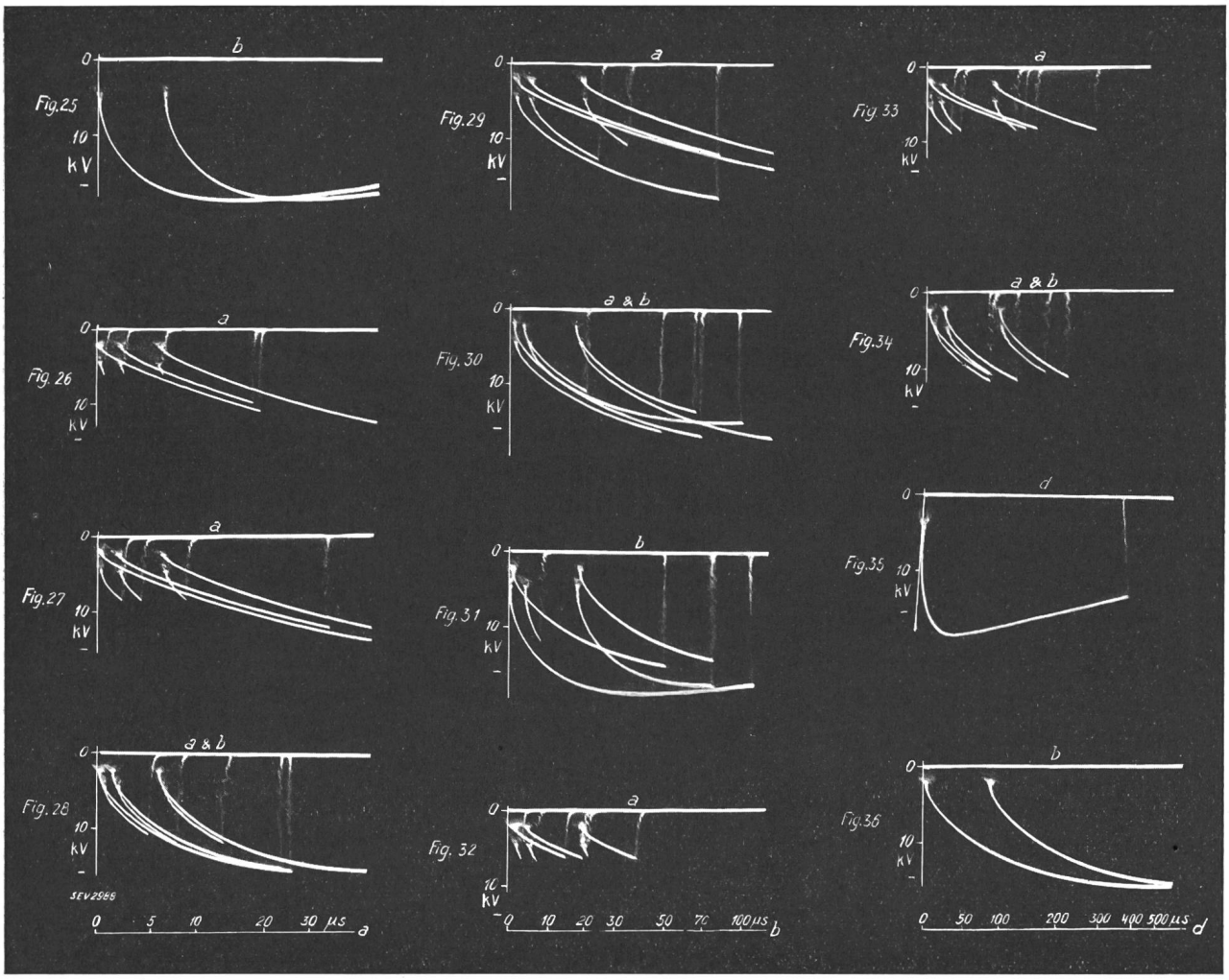


Fig. 25 bis 36.

[Bei den Oszillogrammen, denen 2 Masstäbe gegeben werden mussten (*a* und *b*, siehe Fig. 24, 28, 30 und 34), bezieht sich der Masstab *a* auf die drei weiter weg von der Abszissenachse, Masstab *b* auf die drei nahe an der Abszissenachse beginnenden Kurven.]

Spannungsverlauf an F_8 nach Schema Fig. 13 (flachere Wellen, Ueberschlag in der Front).

Fig.	25.	Glasgekapselte	Kugelfunkenstrecke,	Schlagweite	=	2,8	mm	~ 10,5	kV_{max}	ohne Ionisierung
»	26.	»	»	»	=	1,4	»	~ 5,9	»	mit Spitzen-Ionisierung
»	27.	»	»	»	=	2,1	»	~ 8,4	»	» » »
»	28.	»	»	»	=	2,8	»	~ 10,5	»	» » »
»	29.	»	»	»	=	1,4	»	~ 5,9	»	» Ra-Ionisierung
»	30.	»	»	»	=	2,1	»	~ 8,4	»	» » »
»	31.	»	»	»	=	2,8	»	~ 10,5	»	» » »
»	32.	Offene	»	»	=	1,4	»	~ 5,9	»	» Glimm-Ionisierung
»	33.	»	»	»	=	2,1	»	~ 8,4	»	» » »
»	34.	»	»	»	=	2,8	»	~ 10,5	»	» » »
»	35.	Gekapselte	Spitzenfunkenstrecke	»	=	11,2	»	~ 13,2	»	ohne Ionisierung
»	36.	»	Kugelfunkenstrecke	»	=	2,8	»	~ 10,5	»	» »

resis des Kondensators, so dass dessen Kapazität bei Stössen wesentlich kleiner war als bei der Messung mit 50 Per./s. Auch die Ueberschreitung des gerechneten Wertes der Steilheit durch den Versuch findet damit ihre Erklärung, sowie die Beobachtung, dass der oszillographisch gemessene Spannungsverlauf, insbesondere im rasch veränderlichen Teil der Front, nicht genau mit der berechneten Exponential-Kurve übereinstimmt.

Die Schaltung ist aber bei Verwendung möglichst frequenzunabhängiger Kondensatoren zur Nachahmung von Ueberspannungsstössen durchaus geeignet.

4. Resultate.

Die für den Fall B der flachern Wellen gewonnenen sämtlichen Resultate (siehe z. T. auch Tabellen V bis VIII) wurden in Fig. 37 und 38 ausserdem noch graphisch dargestellt. Fig. 37 zeigt die bei der zugrunde gelegten Spannungskurvenform gemessenen Impulsfaktoren der verschiedenen Funkenstrecken, Fig. 38 die zugehörigen Verzögerungen. Die Kurvenreihen I bis V gelten jeweils für die *grössere* Wellensteilheit (ca. 2 kV/µs), die Kurven VI bis X für die *kleinere* Steilheit (ca. 0,8 kV/µs). Als Abszisse ist die Schlagweite der

Funkenstrecke gewählt; die Messpunkte liegen bei 1,4; 2,1 und 2,8 mm. Bei der Betrachtung der Kurven ist stets zu beachten, dass die Steilheit der Spannungswellen während eines Spannungsstosses nicht durchwegs konstant bleibt, sondern allmählich abnimmt, entsprechend dem aus den Oszillogrammen ersichtlichen Spannungsverlauf. Die Abnahme der Impulsfaktoren bei grössern Schlagweiten der Funkenstrecke (2,8 mm), sowie die Zunahme der Verzögerungszeiten sind wohl in erster Linie auf diese Eigenschaft der Prüfspannungswellen zurückzuführen. Für eine weitere systematische Untersuchung wäre eine Prüfspannung mit konstanter Steilheit, wie z. B. in Fig. 4 gezeichnet, empfehlenswert.

In den Oszillogrammen mit zwei Zeitmaßstäben (Fig. 24, 28, 30 und 34) gilt jeweils der Maßstab des kürzeren Zeitintervalls für jene Kurve, deren Anfang weiter von der Aszissenaxe wegliegt, der Maßstab des grösseren Zeitintervalls für die Kurven, deren Anfang näher bei der Abszissenaxe liegt. Während ungefähr der ersten μs nach dem Ansprechen der Zündfunkenstrecke F_Z oder der Schutzfunkenstrecke F_s tritt ohne besondere Vorsichtsmassnahmen stets eine Beeinflussung der Zeitaxenablenkung des Kathodenstrahles auf. Diese Störung ist eine Folge der raschen Kondensatorentladung über Erde; sie verschwindet bei symmetrischen Schaltungen gegenüber Erde. Da es sich bei den vorliegenden Messungen um zu messende Zeiten von mindestens einer oder mehreren μs handelte, konnte auf die Unterdrückung dieser Beeinflussung verzichtet werden; sie bildet lediglich einen Schönheitsfehler der Oszillogramme. Die

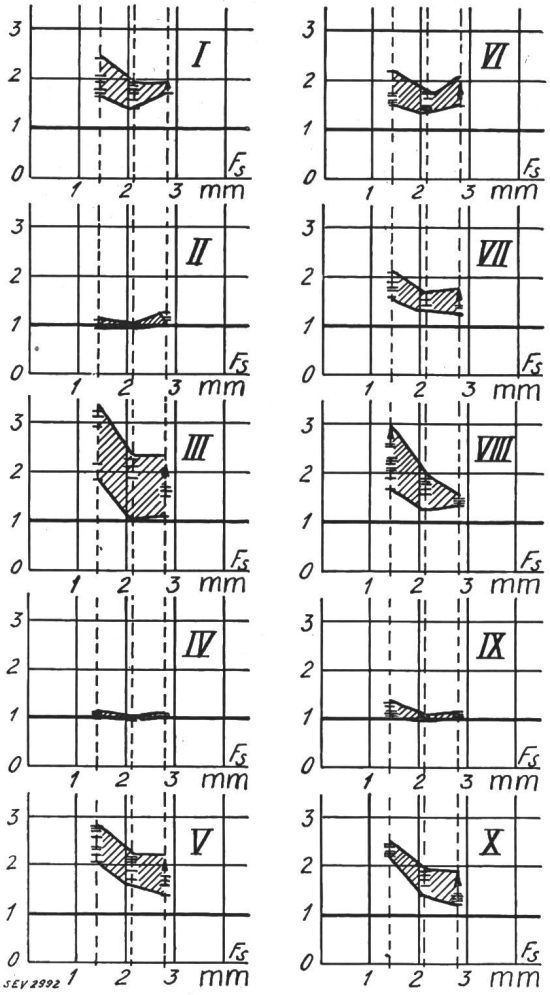


Fig. 37.
Impulsfaktoren beim Ansprechen verschiedener Funkenstrecken.

Kurven I bis V: Bei ca. 2 kV/μs anfänglicher Wellensteilheit.
» VI » X: » » » 0,8 » » »
Kurven I und VI: Glasgekapselte Kugelfunkenstrecke ohne Ionisierung.
» II und VII: Glasgekapselte Kugelfunkenstrecke mit Glimmspitzenionisierung.
» III und VIII: Glasgekapselte Kugelfunkenstrecke mit Ra-Ionisierung.
» IV und IX: Offene Kugelfunkenstrecke mit Glimmionisierung.
» V und X: Glasgekapselte Spitzenfunkenstrecke.

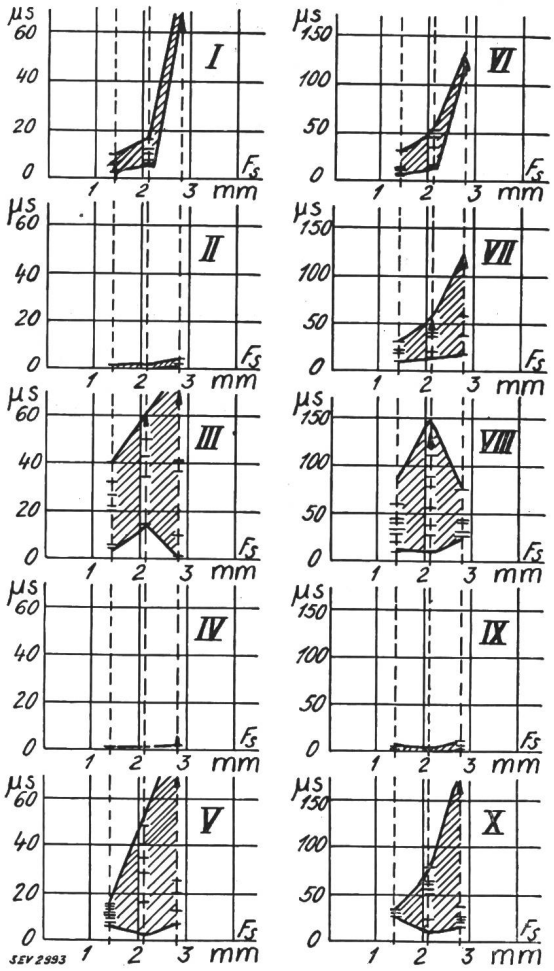


Fig. 38.
Verzögerungszeiten des Ansprechens verschiedener Funkenstrecken.

Kurven I bis V: Bei ca. 2 kV/μs anfänglicher Wellensteilheit.
» VI » X: » » » 0,8 » » »
Kurven I und VI: Glasgekapselte Kugelfunkenstrecke ohne Ionisierung.
II und VII: Glasgekapselte Kugelfunkenstrecke mit Glimmspitzenionisierung.
III und VIII: Glasgekapselte Kugelfunkenstrecke mit Ra-Ionisierung.
IV und IX: Offene Kugelfunkenstrecke mit Glimmionisierung.
V und X: Glasgekapselte Spitzenfunkenstrecke.

Fall A. Steilste Front. Ueberschläge im Spannungsrücken.
Schema Fig. 10.

Tabellen I bis IV

Einstellung der Zündfunkenstrecke F_Z		Schutzfunkenstrecke F_s Einstellung		Art	Jonisierung	Beobachtungen des Ansprechens von F_s	Impulsfaktor[1]
mm	kV_{max}	mm	kV_{max} bei 50 Per./s				
Schutzfunkenstrecke F_s mit Kugelelektroden.							
Fall a: $C_l = 0{,}15\ \mu F$, $R_e = 3150\ \Omega$, $T_R = 483\ \mu s$							Tabelle I
5,1	17,3	5,05	17,1	gekapselt	Mit Ra	Regelmässig, ohne messbare Verzögerung, Fig. 12	1,01
5,1	17,3	5,08	17,1	„	Mit Spitze	Dito, Fig. 14	1,01
5,1	17,3	5,08	17,1	„	Ohne	Nie, Fig. 11	> 1.01
5,1	17,3	2,8	10,5	„	„	Nie	> 1,65
5,1	17,3	2,45	9,5	„	„	Sehr selten	> 1,82
5,1	17,3	2,1	8,4	„	„	Zum Teil unregelmässig, zum Teil mit grösserer Verzögerung, z. B. Fig. 15	z. T. 2,07
5,1	17,3	1,05	4,8	„	„	Immer	< 3,6
5,1	17,3	5,0	17,0	offen	Mit Spitze	Immer	1,01
5,1	17,3	5,0	17,0	„	Ohne	Sehr selten	> 1,01
5,1	17,3	4,8	16,5	„	„	Unregelmässig, zum Teil mit kleiner Verzögerung, Fig. 16	z. T. 1,04
5,1	17,3	4,0	14,1	„	„	Meistens	z. T. 1,22
Fall b: $C_l = 0{,}15\ \mu F$, $R_e = 750\ \Omega$, $T_R = 112\ \mu s$							Tabelle II
5,1	17.3	5,00	17,0	gekapselt	Mit Ra	Ca. ½mal, ohne Verzögerung	1,02
5,1	17,3	4,6	15,7	„	„ „	Immer, ohne Verzögerung	< 1,1
5,1	17,3	5,0	17,0	„	Mit Spitze	Immer, ohne Verzögerung	< 1 02
5,1	17,3	5,0	17,0	„	Ohne	Nie	> 1,02
5,1	17,3	2,0	8,1	„	„	Aeusserst selten	> 2,15
5,1	17 3	1,4	5,9	„	„	Unregelmässig, z. Teil mit Verzögerung	z.T. ≥ 2,9
5,1	17,3	1,05	4,8	„	„	Unregelmässig, zum Teil mit Verzögerung, Fig. 17	≥ 3,6
5,1	17.3	5,0	17,0	offen	Mit Spitze	Immer, ohne Verzögerung	< 1,02
5,1	17.3	5,0	17,0	„	Ohne	Nie	> 1,02
5,1	17,3	4,5	15.5	„	„	Sehr selten	> 1,1
5,1	17,3	3	11,2	„	„	Meistens	≥ 1,55
Fall c: $C_l = 0{,}04\ \mu F$, $R_e = 750\ \Omega$, $T_R = 30\ \mu s$							Tabelle III
5,1	17,3	5.0	17 0	gekapselt	Mit Ra	Ca. ½mal	1,02
5.1	17,3	4,6	15,7	„	„ „	Immer, ohne Verzögerung	< 1,10
5,1	17,3	5,0	17,0	„	Mit Spitze	Immer, ohne Verzögerung	< 1,02
5,1	17,3	5.0	17,0	„	Ohne	Nie	> 1,02
5,1	17,3	2,1	8,4	„	„	Nie	> 2.06
5,1	17,3	1,75	7.1	„	„	Selten	z.T.> 2,45
5,1	17,3	1,4	5,9	„	„	Selten	z.T.> 2,9
5.1	17,3	5 0	17,0	offen	Mit Spitze	Immer, ohne Verzögerung	< 1.02
5,1	17.3	5.0	17,0	„	Ohne	Nie	> 1,02
5.1	17,3	4.0	14,1	„	„	Unregelmässig	z.T.> 1,22
5,1	17,3	3,0	11,2	„	„	Fast immer	z.T.> 1,55
Schutzfunkenstrecke F_s mit Spitzenelektroden.							
Fall a: $C_l = 0{,}15\ \mu F$, $R_e = 3150\ \Omega$, $T_R = 483\ \mu s$							Tabelle IV
5,0	17,0	14	16,3	gekapselt	Mit Spitze	Nie	> 1,04
5,0	17,0	11	13,0	„	„ „	Unregelmässig, mit grosser Verzögerung, Fig. 18	z.T.> 1,3
5,0	17.0	8,4	9,9	„	„ „	Immer, zum Teil Verzögerung, Fig. 19	z.T.> 1,7
5,0	17,0	14	16 3	„	Ohne	Nie	> 1,04
5,0	17,0	11	13,0	„	„	Meistens, mit grossem Verzug, Fig. 20	z.T.> 1,3
5,0	17,0	7	8,5	„	„	Immer, Verzug selten	≤ 2,0
5 0	17.0	14	16,3	offen	Mit Spitze	Nie	> 1,04
5,0	17,0	11	13.0	„	„ „	Immer, mit Verzug, Fig. 21	z.T.> 1,3
5,0	17,0	7	8,5	„	„ „	Immer, ohne Verzug	≤ 2,0
5,0	17,0	14	16,3	„	Ohne	Nie	> 1,04
5,0	17,0	11	13.0	„	„	Meistens, mit Verzug, Fig. 22	z.T.> 1,3
5,0	17,0	7	8,5	„	„	Immer, Verzug selten	≤ 2,0

[1]) Impulsfaktor = Verhältnis der grössten Spannung an der Schutzfunkenstrecke F_s bei Stoss zur Ansprechspannung bei 50 Per./s.

Fall B. Flache Wellen verschiedener Steilheit, Ueberschläge in Spannungsfront. Schema Fig. 13.
Impulsfaktoren. Tabellen V und VI.

Maximale Steilheit und Spannung an F_s	Funkenstrecke F_s Art	Ionisierung	Impulsfaktoren [1]			Oszillogramm Beispiele Fig.
			F_s = 1,4 mm = 6,1 kV_{max}	F_s = 2,1 mm = 8,5 kV_{max}	F_s = 2,8 mm = 10,8 kV_{max}	Tabelle V
			Kugelfunkenstrecke			
$s_{max} \sim$ 2 kV/ μs	gekapselt	Ohne	1,65; 1.7; 1,5; 1,8; 1,95; 2,05; 2,4	1,4; 1,5; 1,55; 1,65; 1,75; 1,83; 1,9; 1,95	1,7	23; 24; 25
$U_{max, gemessen}$ = 18,2 kV_{max}	„	Spitzen	0,98; 1; 1; 1; 1	0,97; 1; 1; 1; 1	1; 1,02; 1,05; 1,07; 1,1; 1,15; 1,24	26; 27; 28
entspricht	„	Ra	1,85; 2,15; 2,9; 3,0; 3,1; 3,2	1,0; 1,9; 2,0; 2,1; 2,25; 2,25	1,1; 1,5; 1,7; 1,7	29; 30; 31
$F_s \sim$ 5,2 mm	offen	Spitzen	1 0; 1,03; 1,06; 1,12	0,98; 1,0; 1,02	1,0; 1,03; 1,08	32; 33; 34
			Spitzenfunkenstrecke			
	gekapselt	Ohne	2,0; 2,3; 2,35 [2] 2,6; 2,7; 2,75	1,6; 1,65; 1.7 [2]; 1,9; 2; 2,05	1,4; 1,7; 1,7 [2]	35
	„	Spitzen	2,05; 2,2; 2,55; 2,8	2,1; 2,15; 2,2	1,6; 1,7	—
			F_s = 1,4 mm = 6,1 kV_{max}	F_s = 2,1 mm = 8,5 kV_{max}	F_s = 2,8 mm = 10,8 kV_{max}	Tabelle VI
			Kugelfunkenstrecke			
$s_{max} \sim$ 0,8 kV/ μs	gekapselt	Ohne	1.5; 1.6; 1,7; 1,75; 2,2	1,35; 1,4; 1,45; 1,5: 1,65; 1,75; 1,8	1,5	23; 24; 36
$U_{max} \sim$ 16,2 kV_{max}	„	Spitzen	1,6; 1,75; 1,8; 1,9; 2,0; 2.1;	1,32; 1,43; 1,65; 1,7; 1,8	1,4; 1,45; 1,5	26; 27; 28
entspricht	„	Ra	1,7; 1,9; 2,05; 2,1; 2,2; 2,3; 2,6; 2,6	1 25; 1,6; 1,7; 1,8; 1,85	1,4; 1,45; 1,5	29; 30; 31
$F_s \sim$ 4,5 mm	offen	Spitzen	1,04; 1 06; 1,12; 1,15; 1,25; 1,37	0,98; 1,0; 1,02; 1,04; 1,05	1,03; 1,05; 1,07 1,1; 1,19	32; 33; 34
			Spitzenfunkenstrecke			
	gekapselt	Ohne	2.2; 2,25; 2,3 [2]	1,75; 1,8 [2]	1,33; 1,4 [2]	—
	„	Spitzen	2,25; 2,3; 2,4; 2,45	1,4; 1,6; 1,8; 1,9	1,25; 1,3; 1,4; 1,45; 1,5	—

[1]) Impulsfaktor = Verhältnis der grössten Spannung an der Schutzfunkenstrecke F_s bei Stoss zur Ansprechspannung
[2]) Die Schlagweiten der Spitzenfunkenstrecke wurden so gewählt, dass sie bei 50 Per./s gleiche Zündspannung ergaben, wie die darüber notierten Kugelfunkenstrecken.

Oszillogramme 23 bis 34 enthalten stets mehr als eine Aufnahme, um die Streuung der Resultate anschaulich zu machen. Um die einzelnen Kurven auseinander zu halten, wurde der Nullpunkt der Zeitaxe jeweils durch eine konstante Hilfsspannung um ein kleines Stück verschoben. Dies ist bei der Ausmessung der Zeitstrecken zu berücksichtigen. Die beigegebenen Oszillogramme sind bei negativen Spannungsstössen aufgenommen aus rein praktischen Gründen. Einige Stichproben bei positiven Stössen ergaben im Prinzip stets dasselbe Verhalten der Funkenstrecken, sowohl bei steilsten als auch bei flachern Spannungsstössen.

5. Diskussion der Resultate.

a) Offene Funkenstrecken.

Die Untersuchung der offenen Funkenstrecken mit Kugel- und Spitzenelektroden hat gegenüber den heutigen Anschauungen und Kenntnissen keine neuen Gesichtspunkte zutage gefördert [4]). Die offene *Kugelfunkenstrecke* zeigt, wenn sie nicht ionisiert ist, insbesondere bei kleinen Schlagweiten eine deutliche Verzögerungserscheinung, die aber durch Ionisierung in praktisch ausreichendem Mass unterdrückt werden kann. Die ionisierte offene Kugelfunkenstrecke ist ein relativ genaues, sehr einfaches Messinstrument für die Messung auch kürzester Spannungsspitzen, wie schon von Burawoy gezeigt wurde [5]). Als Ursache der Verzögerungs-

[4]) W. O. Schumann, Elektr. Durchbruchfeldstärke von Gasen. Verlag J. Springer. M. Viehmann, A. f. E., Bd. 25, Heft 4.

E. Marx, Lichtbogen-Stromrichter, Springer 1932. Dieses Buch enthält eine gedrängte, äusserst anschauliche Darstellung der Funkenbildung auf Grund insbesondere der Erkenntnisse der letzten Jahre.

[5]) Burawoy, Diss., Dresden.

Ueber die Anwendung von Messfunkenstrecken für Steilheits- und Stromspitzenmessungen siehe L. Binder, Wanderwellenvorgänge auf exp. Grundlage, Springer 1928.

O. Zdralek, Diss., Dresden. A. f. E. 1927, Bd. 18, Heft 1.

Fall B. Flache Wellen verschiedener Steilheit, Ueberschläge in Spannungsfront. Schema Fig. 13.
Ansprechverzögerungen. Tabellen VII und VIII.

Maximale Steilheit und Spannung an F_s	Funkenstrecke F_s Art	Ionisierung	Ansprechverzögerungen μs			Oszillogramm Beispiele Fig.
			F_s = 1,4 mm = 6,1 kV_{max}	F_s = 2,1 mm = 8,5 kV_{max}	F_s = 2,8 mm = 10,8 kV_{max}	Tabelle VII
			Kugelfunkenstrecke			
$s_{max} \sim$ 2 kV/ μs	gekapselt	Ohne	2; 2; 2,5, 2,5 5; 2; 5,9; 6; 3	16; 6; 16; 12; 7,5; 10; 10; 5; 4,5	100; 150; 50	23; 24; 25
$U_{max, gemessen}$ = 18,2 kV_{max}	„	Spitzen	ca. 1	ca. 1	2,5; 1; 0,4; 1,2; 4,4; 1,2; 0; 1,5; 1,5	26; 27; 28
entspricht $F_s \sim$ 5,2 mm	„	Ra	25; 40; 22; 20; 22; 32; 6; 4; 27	25; 20; 50; 43; 50; 0; 6,35; 50	105; 1,5; 40; 41; 10; 37; 40; 90; 100	29; 30; 31
	offen	Spitzen	ca. 1	ca. 1	ca. 1,5; 1	32; 33; 34
			Spitzenfunkenstrecke			
	gekapselt	Ohne	9,5; 13; 8; 12; 13[1]); 5,5; 15	6; 7; 17; 36; 8; 28[1])	300; 385	35
	„	Spitzen	11,5; 6; 7; 16; 11	40; 35; 26; 34; 33; ca. 48	20; 100; 25; 7; 26; ca. 150; 13; 150	
			F_s = 1,4 mm = 6,1 kV_{max}	F_s = 2,1 mm = 8,5 kV_{max}	F_s = 2,8 mm = 10,8 kV_{max}	Tabelle VIII
			Kugelfunkenstrecke			
$s_{max} \sim$ 0,8 kV/ μs	gekapselt	Ohne	7,5; 10; 12,5; 7; 6; 30	11; 15; 11; 30; 45; 51; 14; 35; 17	100	23; 24; 36
$U_{max} \sim$ 16,2 kV_{max}	„	Spitzen	19; 25; 16; 10; 15; 30; 9; 9; 18	35; 40; 13; ca. 45; 20; 45; 35; 45	57; 43; 100; 57; 100; 15; 100	26; 27; 28
entspricht $F_s \sim$ 4,5 mm	„	Ra	60; 20; 35; 12; 79; 40; ca. 45; 27; 16	77; 110; 100; 27 38; 56; 9; 88; 28	46; 30; 42; 75; 35; 26	29; 30; 31
	offen	Spitzen	0; ca. 1; ca. 1; a; 4,5; ca. 1; 1,5; 0	2; ca. 1; 1; 0	ca. 1; 12; 16; 1; 2; 4; 0; 3	32; 33; 34
			Spitzenfunkenstrecke			
	gekapselt	Ohne	34; 35; 31; 28; 33	ca. 120; 100; 58; 76; 56; 60	300; 28	—
	„	Spitzen	27; 26; 32; 35[1]); 33	11; 65; 12; 10[1]); 22; 50; 66; 60	25; 37; 15; 30[1]); 18; 150; 15; 150	—

[1]) Die Schlagweiten der Spitzenfunkenstrecke wurden so gewählt, dass sie bei 50 Per./s gleiche Zündspannung ergaben, wie die darüber notierten Kugelfunkenstrecken.

erscheinung von offenen Kugelfunkenstrecken muss der Mangel an freien Raumladungen im Durchschlagsraum gelten.

Die offene *Spitzenfunkenstrecke* zeigt gegenüber der Kugelfunkenstrecke eine wesentlich stärkere Verzögerungserscheinung, die durch künstliche Ionisierung nicht beseitigt werden kann. Impulsfaktoren bis zum Wert von ca. 3 wurden bei kurzen, steilen Stössen bestätigt[6]). Die Ursache der Verzögerung liegt bei Spitzenelektroden in der Art des Vorwachsens des positiven Funkenbüschels begründet. Künstliche Ionisierung hat deswegen weniger Einfluss als bei Kugelelektroden, so dass die Spitzenfunkenstrecke der ionisierten Kugelfunkenstrecke als Schutzfunkenstrecke unterlegen ist.

b) Gekapselte Einfach-Funkenstrecken.

Die Kapselung der einfachen *Kugelfunkenstrecke* ergibt, wie die Tabellen I bis III zeigen, eine wesentliche Verschlechterung der Verzögerungserscheinungen, sofern die Funkenstrecke nicht künstlich ionisiert wird. Impulsfaktoren bis ca. 3,6 treten in Erscheinung. Die Verzögerungszeiten erreichen ungewohnt hohe Werte, oft vieler μs. Die Resultate blieben dieselben, ob die Funkenstrecke im Dunkelraum oder im direkten Sonnenlicht gemessen wurde.

Die künstliche Ionisierung (mit Ra nach Fig. 2, mit glimmenden Spitzen nach Fig. 3, oder mit einer Quecksilberglimmlampe usw.) *hat ausserordentlich gute Wirkung bei den Versuchsreihen der Tabellen I bis III, das heisst bei sehr steilen Spannungsstössen an der Funkenstrecke.* Insbesondere die mit glimmenden Spitzen ionisierte Funkenstrecke wies höchstens noch wenige Prozent höhere Durchschlagsspannung auf als bei 50 Per./s. Der Unterschied ist hier sehr einfach nachzuweisen: Durch blosses Anbringen des glimmenden Drahtes nach Fig. 3 oder durch dessen Weglassung spricht die

[6]) H. Müller, Hescho-Mittg., Heft 53/54, 1930.

Funkenstrecke im ersten Fall an, im zweiten nicht. Es wurden auch zwei Funkenstrecken nach Fig. 1 und 3 parallel geschaltet, wobei die nicht ionisierte eine wesentlich kleinere Schlagweite besass als die ionisierte. In diesem Fall sprach stets die ionisierte Funkenstrecke mit der grössern Schlagweite an.

Die Erklärung dieser ausserordentlich deutlichen Erscheinung ist vermutlich die bereits gegebene: Sie liegt offenbar im Mangel an freien Elektroden und Ionen in der Glaskapsel. Durch die Kapselung, das heisst den vollständigen oder teilweisen Luftabschluss des Entladeraumes werden die natürlichen Raumladungen der Atmosphäre von der Funkenstrecke ferngehalten. Auch die Neubildung von Ladungen innerhalb der Kapsel ist erschwert, weil ultraviolettes Licht die dicke Glaswandung nicht durchdringt. Durch die künstliche Ionisierung des Innern der Glaskapsel wird dieser Elektronenmangel beseitigt; die Funkenstrecke verhält sich dann bei steilen Spannungsstössen ebenso günstig wie eine ionisierte offene Funkenstrecke und ist als solche für Schutzfunkenstrecken geeignet.

Gegenüber diesem auf Grund bisheriger Anschauung verständlichen Verhalten der ionisierten und gekapselten Kugelfunkenstrecken zeigte sich eine anormale Erscheinung bei Spannungsstössen mit relativ kleiner Steilheit von der Grössenordnung weniger kV/μs oder weniger Zehntel kV/μs. Die Tabellen V bis VIII zeigen, dass hierbei eine andere Erscheinung auftritt, die als *anormale Verzögerung* bezeichnet werden muss, weil die Impulsfaktoren bei Steilheiten von ca. 0,8 kV/μs grösser ausfallen als bei der grössern Steilheit von ca. 2 kV/μs. Die Fig. 26, 27 und 28 sind Beispiele dazu. Der normale Entladeverzug zeigt gerade umgekehrtes Verhalten. Die Art der Ionisierung hat nicht sehr wesentlich Einfluss auf diese Beobachtung. Radiumionisierung zeigte die anormale Erscheinung etwas weniger deutlich als Glimmionisierung (Fig. 29, 30 und 31).

Es muss erwähnt sein, dass auch Versuche mit einer Wellensteilheit von ca. 10 kV/μs durchgeführt wurden. Die beschriebene anormale Verzögerung trat dabei noch kaum auf, jedenfalls viel weniger ausgeprägt als bei Steilheiten von der Grössenordnung 1 kV/μs. Die praktische Bedeutung der anormalen Verzögerung ist aus diesem Grund vielleicht nicht allzugross, weil die gefährlich hohen atmosphärischen Ueberspannungswellen Steilheiten mindestens der Grössenordnung 10 kV/μs aufweisen.

Dagegen hat die Erscheinung Interesse vom theoretischen Standpunkt aus. Die Beobachtung, dass die anormale Verzögerung durch Entfernen der Glaskapselung stets verschwindet, zeigt, dass die Ursache in der Kapselung selber liegen muss. Man vergleiche zum Beispiel die Fig. 32, 33 und 34 mit den oben genannten 26 bis 31. Die Beobachtung, dass die Durchschlagspannung bei flachern Wellen höher liegt als bei steilern, deutet darauf hin, dass die Störung des Ansprechens eine gewisse Zeit (Grössenordnung 1 μs) zu ihrer Ausbildung benötigt. Als Ursache kommt aus diesen zwei Gründen die Aufladung der innern Glaswandung durch die künstlich erzeugten Raumladungen (Elektroden und Ionen) in Betracht. Mit dem Beginn des Spannungsstosses an der Funkenstrecke beginnen die vorhandenen Elektronen und Ionen in Feldrichtung zu wandern. Bekanntlich beträgt die Beweglichkeit der unbeschwerten Elektronen in einem Feld von 1 V/cm einige 100 cm/s, die Geschwindigkeit der positiven Ionen im gleichen Feld ca. 1 bis 2 cm/s. Infolge des rasch entstehenden Feldes in der Glaskapsel werden sich zunächst die Elektronen in Bewegung setzen, später auch die positiven Ionen. Zwischen den Kugelelektroden entsteht auf diese Weise die bekannte teilweise Selbstreinigung der Funkenstrecke von den anfänglich vorhandenen Elektronen. Weiter abliegende Elektronen stossen dagegen zum Teil auf die Glaswandung auf, bleiben dort sitzen und bewirken durch die entstehende Flächenladung eine Feldänderung, die das Feld zwischen den Kugelelektroden stört. Eine Erhöhung der Durchbruchsspannung auf das 2- bis 3fache des Normalwertes ist dabei denkbar. Nach längerer Zeit ist derselbe Vorgang auch für die entgegengesetzt wandernden Träger positiver Ladung zu erwarten. Diese wandern ungefähr längs der Feldlinie neben und hinter die negative Elektrode und schwächen auch ihrerseits durch die Glasaufladung das primäre Feld der Kugelelektroden. Die kleine Leitfähigkeit des Glases lässt dieses störende Feld erst nach längerer Zeit verschwinden, so dass auch für relativ langdauernde Stoßspannungen mehrerer 100 μs Dauer die anormale Verzögerung in Erscheinung treten kann. Der Erklärungsversuch lässt erwarten, dass eine Metallisierung der innern Glaswandlung die Erscheinung unterdrücken würde, oder dass in Entladeräumen aus Metall die Erscheinung nicht auftritt. Ferner ist zu erwarten, dass die anormale Verzögerung beziehungsweise der Impulsfaktor ein Maximum aufweist bei einer gewissen Steilheit der Stoßspannung, die im Zusammenhang steht mit den Abmessungen der glasgekapselten Funkenstrecke und der Stärke der Ionisierung. Bei den Versuchen scheint dieses Maximum bei Steilheiten von der Grössenordnung 1 kV/μs zu liegen. Ungünstige Einwirkungen von benachbarten Isolierflächen auf das Ansprechen von Funkenstrecken sind übrigens schon öfters beobachtet worden [7]). Der restlosen Aufklärung des beschriebenen anormalen Verzuges mit Hilfe des Kathodenstrahloszillographen steht heute nichts mehr im Wege. Es fragt sich insbesondere, wie ausgeprägt die Erscheinung bei grössern Schlagweiten von gekapselten Funkenstrecken zu beobachten ist.

Die vergleichsweise Kapselung der *Spitzenfunkenstrecke* ergab gegenüber der offenen Spitzenfunkenstrecke nichts Neues. Im Gegensatz zu den Kugelfunkenstrecken lässt sich bei der Spitzenfunkenstrecke die Verzögerung durch keine Ionisierung vermeiden. Mit Impulsfaktoren von 2 bis

[7]) Siehe z. B. bei W. O. Schumann, l. c.

2,5 muss meistens gerechnet werden. Die anormale Verzögerungserscheinung (*grössere* Impulsfaktoren der gekapselten Funkenstrecke bei *flachern* Wellen) innert einem gewissen Steilheitsgebiet konnte hier nicht beobachtet werden, weil sie offenbar vom normalen, bei der Spitzenfunkenstrecke viel grössern Verzug überdeckt wird.

c) Vergleich mit andern Messungen.

Die Resultate der offenen Funkenstrecken stehen im Einklang mit den genannten frühern Messungen und Erfahrungen [4] [5] [6]. Die Nichtbeachtung des Einflusses glimmender Leiter ist vermutlich die Ursache für die sich zum Teil widersprechenden Veröffentlichungen über Funkenverzögerungen. Insbesondere bei Messungen in Versuchlaboratorien bei sehr hoher Spannung hat die Luft stets als reichlich ionisiert zu gelten. Der grosse Einfluss der Ionisierung liess sich sehr deutlich nachweisen, wenn zwischen die Ionisierungsquelle (Ra, Glimmspitze oder Quecksilberglimmlampe usw.) ein dünnes Glimmerblatt oder ein Holzbrett gehalten wurde. Bei knapper Einstellung der Funkenstrecke wird das Ansprechen derselben dadurch immer unsicher oder verschwindet ganz.

Es gelang in keinem Fall, durch die Bestrahlung resp. Ionisierung der Kugelfunkenstrecke ihre Ansprechspannung *unter* den statischen, beziehungsweise normalfrequenten Wert herabzudrücken. Auch bei gleichzeitiger Bestrahlung durch 0,5 mg Ra und ultraviolettem Licht einer Quarzglimmlampe und durch Glimmspitzenionisierung gelang es nicht, den normalfrequenten Ansprechwert zu unterschreiten. Die in den Tabellen ersichtlichen Werte des Impulsfaktors von 0,98 sind Messfehler, deren Grösse bei den Versuchen 3 bis 4 % erreichen kann.

Festgestellt sei ferner in Uebereinstimmung mit M. Viehmann [4], dass die Ansprechspannung der Funkenstrecken bei kurzen Spannungsstössen sich nicht als absolut feststehender Wert angeben lässt. Eine gewisse Streuung der Werte scheint sich nicht vermeiden zu lassen, immerhin wird die Grösse des Streubereichs durch Ionisierung ganz wesentlich verkleinert.

Mit den Messungen von Torok [8]) können die vorliegenden nicht ohne weiteres verglichen werden, weil Torok stets Schlagweiten untersuchte, die grösser sind als der Kugeldurchmesser. Bei uns war umgekehrt stets die Schlagweite klein gegenüber dem Kugeldurchmesser. Nach Torok wären dafür unbedeutend kurze Verzögerungen zu erwarten. Während dies in offener ionisierter Luft zutrifft, ist es in gekapselten Funkenstrecken anders, indem dann die beschriebene anormale Verzögerung auftritt.

[8]) J. Torok, Surge Characteristics of Insulators and Gaps, JAIEE 1930.

Ein elektrisches Messinstrument mit vorgezeichnetem Steuerdiagramm.

Mitteilung aus dem Laboratorium der Firma Trüb, Täuber & Co., Zürich.

Von *Paul Fehr*, Ingenieur, Zürich.

621.317.7—52+621.398.2+654.4

Es wird ein Registriervoltmeter beschrieben, das zusammen mit einem Leitungsabbild in der Transformatorenstation Innertkirchen der Kraftwerke Oberhasli A.-G. Signallampen betätigt, sobald die Spannung am Ende der 100 km langen Kraftübertragung ein im voraus festgelegtes Programm nicht befolgt. Die obere und untere Spannungsgrenze des Programmes werden mit Bleistift- oder Tuschlinien auf dem Registrierstreifen aufgezeichnet. Diese Linien haben eine gewisse Leitfähigkeit. Zwischen den beiden Begrenzungslinien schleift der Voltmeterzeiger. Sinkt oder steigt die Spannung am Ende der Leitung, so berührt der Zeiger die eine oder andere Begrenzungslinie und schliesst damit den Gitterstromkreis einer Elektronenröhre, deren Anodenstrom ein Relais betätigt, das seinerseits die Signallampe einschaltet. — Es wird die praktische Ausführung dieser Anlage beschrieben und auf die guten Betriebsergebnisse hingewiesen. Ferner wird gezeigt, wie diese Anordnung zur automatischen Regulierung nach vorausbestimmtem Programm verwendet werden kann.

L'auteur décrit un voltmètre enregistreur qui, en connexion avec un schéma de ligne, actionne dans la station de transformation des centrales de l'Oberhasli des lampes témoins dès que la tension à l'extrémité de la ligne de transport longue de 100 km déroge à un programme fixé à l'avance. Les limites supérieures et inférieures de la tension fixée par le programme sont dessinée au crayon ou à l'encre de chine sur la bande de l'instrument enregistreur. Ces traits possèdent une certaine conductibilité. L'aiguille du voltmètre effleure la bande entre les deux traits. Lorsque la tension monte ou baisse à l'extrémité de la ligne, l'aiguille vient à toucher un des traits, fermant ainsi le circuit de grille d'un tube électronique dont le courant anodique actionne un relais qui, à son tour, enclenche une lampe témoin.

L'auteur expose l'exécution pratique de cette installation et signale les résultats favorables obtenus en exploitation. Il montre en outre comment cette installation peut être utilisée pour le réglage automatique suivant un programme déterminé à l'avance.

1. Prinzip.

Die Kraftwerke Oberhasli, Innertkirchen, stellten vor ca. 2 Jahren der Firma Trüb, Täuber & Co. die Aufgabe, ein Voltmeter auszubilden, welches bei Ueber- oder Unterschreitung eines vorgezeichneten Steuerdiagramms einen Signalstromkreis zu schliessen hätte.

Am Ende der Kraftübertragungsleitung Innertkirchen-Bickigen (73 km) bzw. Innertkirchen-Pieterlen (100 km) sollte dabei die Spannung je nach Belastungsverhältnissen im Verlaufe eines Tages auf veränderliche, aber vorgeschriebene Höhe einreguliert werden. Dies hatte in Innertkirchen zu geschehen. Es war somit die am Leitungsende