

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 34 (1943)
Heft: 8

Artikel: Stossüberschlagsmessungen an Stabfunkenstrecken
Autor: Wanger, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057718>

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: 24.01.2026

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:

Secrétariat de l'Association Suisse des Electriciens
Zurich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zurich, Stauffacherquai 36 ♦ Téléphone 5 17 42
Chèques postaux VIII 8481

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXXIV^e Année

N° 8

Mercredi, 21 Avril 1943

Stossüberschlagsmessungen an Stabfunkentstrecken

Bericht aus den Arbeiten des Fachkollegiums 28 des CES, Koordination der Isolationen,
von W. Wanger, Baden

621.317.333.8

Der Vorsitzende des Fachkollegiums 28 des CES berichtet über umfangreiche Stossüberschlagsmessungen, die auf Veranlassung dieser Kommission von 8 schweizerischen Firmen und Institutionen durchgeführt wurden, um die Streuungsverhältnisse bei Stabfunkentstrecken abzuklären. Diese Untersuchungen zeigen, dass die Streuung der Stossüberschlagsspannung bedeutend grösser ist als man bisher allgemein annahm. Wenn man bei der Koordination der Isolationen zwei Ueberschlagstrecken gegeneinander abstuft, muss man daher in Kauf nehmen, dass sich die beiden Streubänder teilweise überdecken. Eine Abstufung von «absoluter Sicherheit» ist also nicht möglich, nur eine solche mit genügend kleiner «Versager-Wahrscheinlichkeit». Ein Teil der festgestellten Streuung kann dadurch eliminiert werden, dass man zwei Ueberschlagstrecken, die gegeneinander abgestuft werden sollen, gleichzeitig dem Stossversuch unterzieht. Das lässt sich am besten durchführen, wenn man in sich koordiniertes Hochspannungsmaterial verwendet.

Allen Firmen, die sich an den beschriebenen Versuchen beteiligt haben, sei auch an dieser Stelle der beste Dank ausgesprochen.

Rapport du président du Comité Technique 28 du CES sur les mesures de contournement par choc exécutées sur une vaste échelle, à la demande de cette commission, par huit entreprises et institutions suisses, dans le but de rechercher la cause de la dispersion constatée lors des mesures faites avec des éclateurs à tiges. Ces recherches montrent que la dispersion est plus considérable qu'on ne le pensait. Lorsque l'on échelonne deux éclateurs, en vue d'une coordination des isolations, il faut donc s'attendre à ce que les deux bandes de dispersion se recouvrent partiellement. Un échelonnement qui assurerait une sécurité absolue n'est par conséquent pas possible, et l'on doit se borner à atteindre un minimum de défauts de fonctionnement. Une partie de la dispersion constatée peut toutefois être éliminée en soumettant ensemble à l'essai de choc deux éclateurs destinés à être échelonnés l'un par rapport à l'autre. Les meilleurs résultats s'obtiennent en utilisant du matériel pour haute tension coordonné en lui-même.

Le rapporteur présente ici ses chaleureux remerciements à toutes les entreprises qui ont participé à ces essais.

Eine wichtige Massnahme bei der Koordination der Isolationen besteht darin, die Isolationsfestigkeit verschiedener Anlageteile bei Stossbeanspruchung derart gegeneinander abzustufen, dass unvermeidliche Ueberschläge nur an bestimmten Stellen auftreten können. Die Ueberschlagsspannungen dieser vorgesehenen Stellen müssen also tiefer sein als die Ueberschlag- und Durchschlagsspannungen der übrigen Anlageteile.

Nun ist aber die Ueberschlagsspannung einer bestimmten Stelle kein eindeutiger Wert, sondern sie ist einer gewissen Streuung unterworfen. Die gewollte Abstufung zwischen zwei Ueberschlagstellen mit ähnlicher Stosscharakteristik ist daher nur dann vorhanden, wenn das ganze Streuband der Ueberschlagsspannung der einen Stelle tiefer liegt als das entsprechende Streuband der andern.

Das Fachkollegium des Schweizerischen Elektrotechnischen Komitees (CES) für die Koordination der Isolationen (FK 28), das eine solche Isolationsabstufung ins Auge fasste, musste sich daher über die Streuung der Stoss-Ueberschlagsspannung Klarheit verschaffen. In der Literatur war bereits eini-

ges zu finden¹⁾. Es handelt sich durchweg um Messungen von Stosscharakteristiken (Ueberschlagsspannung in Funktion des Ueberschlagverzuges). Bei der Aufnahme einer solchen Kurve benötigt man bereits eine grössere Zahl von Kathodenstrahl-Oszillogrammen, wenn man bei jeder Spannung nur eine einzige Messung ausführt. Man erhält aber über die Streuung erst dadurch Aufschluss, dass man bei jeder Spannung eine grosse Anzahl Messungen durchführt. Das ist natürlich sehr umständlich; man wird sich daher praktisch mit einigen wenigen Oszillogrammen bei jedem Spannungswert begnügen und erhält damit nur relativ ungenaue Unterlagen über die Streuung.

Das Fachkollegium 28 hat es daher als zweckmässig erachtet, solche Streuungsmessungen auch noch nach andern Methoden auf möglichst breiter

¹⁾ Z. B. P. L. Bellaschi und W. L. Teague: Impulse and 60 Cycle Strength of Air. El. Engg. 1934, S. 1638.

P. L. Bellaschi und W. L. Teague: Characteristics of Short Rod Gaps. Electric J. 1935, S. 56.

P. L. Bellaschi: Impulse Voltages Chopped in Front. El. Engg. 1936, S. 985.

J. Rebhan: Die Sicherheit elektrischer Anlagen gegenüber Stoßspannungen. ETZ 1937/II, S. 1177.

A. Mathias: Stosskennlinien von Hochspannungs-Isolatoren verschiedener Bauart. El. Wirtschaft 1936, S. 103.

Basis durchzuführen, bevor es sich daran machte, Regeln für die Koordination der Isolationen auszuarbeiten. Die Fragestellung bei diesen Versuchen lautete: Welches ist für eine bestimmte Ueberschlaganordnung der Spannungsbereich, innerhalb dessen manchmal ein Ueberschlag auftritt, manchmal dagegen nicht?

Man entschloss sich, die Messungen an Stabfunkentesten durchzuführen, da für diese leicht Normen aufgestellt werden können, die dafür sorgen, dass die *wesentlichen* Teile auch bei Herstellung in verschiedenen Fabriken gleich sind. Im weitern konnten diese Messungen gleichzeitig darüber Aufschluss geben, ob es möglich sei, Funkentesten vorgeschriebener Konstruktion in dem Sinn als Koordinations-Funkentesten zu verwenden, dass man sie irgendwo in einer Anlage einbaut und nach einer zum voraus aufgestellten Eichtabelle auf eine bestimmte Schlagweite einstellt, um einen gewünschten Wert der Stoss-Ueberschlagsspannung zu erhalten.

Für die zu untersuchenden Stabfunkentesten wurde ein Aufbau nach Fig. 1 festgelegt. Die vorgeschriebenen Hauptabmessungen sind in Tabelle I zusammengestellt. Die beiden Stäbe, die die Elektroden darstellen, wurden aus Vierkanteisen hergestellt und an den Enden, an denen die Ueberschläge erfolgen, senkrecht zur Axe abgefräst. Die Kanten wurden leicht gebrochen, um allfällige Gräte zu entfernen, jedoch nicht abgerundet.

Hauptabmessungen der untersuchten Stabfunkentesten
Tabelle I

Nennspg. kV	H mm	C mm	L mm	B mm	D*) mm	a mm	S mm
20	380	85	500	380	380	12	145 170
60	700	225	1200	700	700	12	420 450
150	1800	575	3000	1800	1800	18	1000 1150

*) D = Mindestabstand gegen Fremdkörper in allen Richtungen.

Durch Vorversuche war bereits abgeklärt worden, wie gross die Abmessungen der Grundplatte und der Abstand von Fremdkörpern mindestens sein müssen, damit die Aufstellungsart keinen Einfluss auf die Höhe der Ueberschlagsspannung ausübt. Man wusste, dass bei den gewählten Abmessungen ein wesentlicher Einfluss vorhanden war, musste das aber in Kauf nehmen, weil sonst die Abmessungen bedeutend grösser geworden wären, als mit Rücksicht auf die Einbaumöglichkeit in übliche Zellen zulässig war.

Wie Tabelle I zeigt, wurden 3 Funkentesten, die für den Einbau in Anlagen von 3 verschiedenen Nennspannungen vorgesehen waren, durchgemessen. Für jede Funkentest war 2 bestimmte Werte der Schlagweite festgelegt worden, damit in den verschiedenen Laboratorien möglichst vergleichbare Messungen durchgeführt wurden. Bei jeder Schlagweite war die positive und negative Ueberschlag-

spannung zu messen, so dass an jeder Funkentest mit jeder Methode je 4 Versuche durchzuführen waren.

Dabei kamen die folgenden 3 Messmethoden zur Anwendung:

Methode A

Bei einer bestimmten Einstellung des Stossgenerators werden mindestens 50 Stösse²⁾ der normalen Form $1/50 \mu s$ auf die Stabfunkentest gegeben und dabei der Prozentsatz der Ueberschläge festgestellt. Hierauf wird die Stabfunkentest ausgeschwenkt (vgl. Fig. 1) und in üblicher Weise mit Hilfe einer

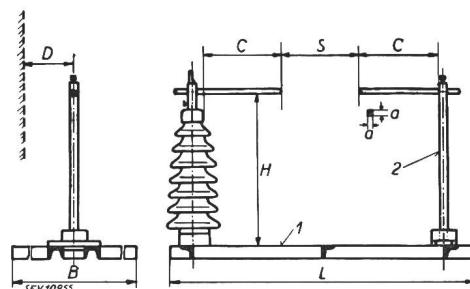


Fig. 1.
Aufbau der untersuchten Stabfunkentesten
1 Blechplatte oder Gitter. 2 Schwenkbare Stütze.

Kugelfunkentest die Höhe der Spannung gemessen. Nachher wird die Stabfunkentest zurückgeschwenkt, so dass die Schlagweite genau gleich ist wie vorher, und es werden wieder Spannungsstösse normaler Form, aber mit anderem Scheitelwert darauf geleitet. Auf diese Art ermittelt man den Prozentsatz der Ueberschläge in Funktion der Spannung. Dabei interessieren nur die Spannungswerte, bei denen ein Teil der Stösse, aber nicht alle, zum Ueberschlag führen, sowie die unmittelbar anschliessenden Spannungsbereiche ohne Ueberschläge und mit lauter Ueberschlägen.

Die Messungen werden bei dieser Methode im wesentlichen gleich durchgeführt wie bei der üblichen Messung einer 50 %-Ueberschlagstoßspannung mit Kugelfunkentesten³⁾, mit dem Unterschied, dass man nicht nur die Spannung misst, bei der ca. 50 % der Stösse am Prüfobjekt zum Ueberschlag führen, sondern eine ganze Anzahl Spannungswerte, bei denen verschiedene grosse Prozentsätze der Stösse den Prüfling überschlagen. Die Methode erlaubt — im Gegensatz zu den beiden andern Methoden — in relativ kurzer Zeit sehr viele Messpunkte aufzunehmen.

In einem Laboratorium wurde eine Abart dieser Methode angewendet, indem die Spannungshöhe der einzelnen Stösse mit dem Kathodenstrahlzosillographen gemessen wurde, statt dass man die Höhe

²⁾ Die Versuche einiger Firmen wurden durchweg mit 100 Stösse pro Messpunkt durchgeführt, und in vielen Fällen wurden sogar mehrere hundert Stösse gegeben, um möglichst genaue Resultate zu erhalten.

³⁾ Vgl. die «Regeln des SEV für Spannungsprüfungen» (zurzeit ist der Entwurf beim Sekretariat des SEV erhältlich).

der Gruppen von Stößen mit der Kugelfunkenstrecke feststellte.

Methode B

Es werden einzelne Stöße auf die Koordinations-Funkenstrecke gegeben, wobei man mit niedrigen Werten, die bestimmt nicht zum Ueberschlag führen, beginnt und die Spannungshöhe langsam steigert. Jeder Stoss wird mit dem Kathodenstrahl-Oszilloskop aufgenommen. Die sukzessive Steigerung der Spannung wird durchgeführt bis der erste Ueberschlag erfolgt. Man braucht für die Auswertung die auf dem Oszilloskop gemessene Spannungshöhe des letzten Stosses, der noch nicht zum Ueberschlag geführt hat und des ersten Stosses, der einen Ueberschlag verursacht hat. Nachdem ein Ueberschlag erfolgt ist, stellt man den Stossgenerator wieder auf kleinere Spannung ein und beginnt eine neue Versuchsreihe, wiederum bis ein Ueberschlag erfolgt.

Dieser Vorgang wird zehnmal wiederholt, worauf man die Spannungswerte, bei denen jeweils der erste Ueberschlag erfolgte, der Grösse nach ordnet. Für den grössten dieser Werte beträgt die Ueberschlags-Wahrscheinlichkeit 100 %, da ja bei allen Versuchsreihen diese Spannung genügte, um den Ueberschlag zu bewirken. Dem zweitgrössten Wert wird die Ueberschlags-Wahrscheinlichkeit 90 % zugeschrieben usw., dem kleinsten die Wahrscheinlichkeit 10 %. Schliesslich ist beim Spannungswert des Stosses, der dem kleinsten Stoss mit Ueberschlag unmittelbar vorangegangen ist, die Ueberschlags-Wahrscheinlichkeit 0 %. Auf diese Art erhält man (wie bei der Methode A) eine Kurve der Ueberschlags-Wahrscheinlichkeit in Funktion der Spannung.

Methode C

Man beginnt wieder mit Stößen kleiner Höhe und steigert die Spannung durch Regulierung des Stossgenerators allmählich, bis der erste Ueberschlag erfolgt. Mit der Einstellung des Stossgenerators, bei der dieser erste Ueberschlag stattgefunden hat, wird nun mit der Kugelfunkenstrecke die zugehörige Spannungshöhe gemessen. Zu diesem Zweck muss die Stabfunkenstrecke auseinandergezogen werden, damit dort kein Ueberschlag stattfindet. Dann wird die Kugelfunkenstrecke so eingestellt, dass 50 % der Stöße zum Ueberschlag führen. Aus den Eichtabellen wird die zugehörige Stoss-Ueberschlagsspannung abgelesen.

Hierauf beginnt man von neuem mit kleinen Stößen und wiederholt den Vorgang zehnmal. Zur grössten der so gemessenen Ueberschlagsspannungen gehört auch hier eine Ueberschlags-Wahrscheinlichkeit von 100 %, zur zweitgrössten eine solche von 90 % usw. Zieht man vom kleinsten dieser Werte noch die Stufenhöhe ab, um die die Spannung von Messung zu Messung gesteigert wurde, so erhält man den Spannungswert mit der Ueberschlags-Wahrscheinlichkeit 0 %.

Während die Methoden A und B grundsätzlich verschieden sind, ist die Methode C ganz ähnlich wie B. Sie wurde nur eingeführt, damit auch die

Laboratorien, die über keinen Kathodenstrahl-Oszilloskop verfügen, eine Messung mit allmählicher Steigerung der Spannung durchführen konnten. Wenn jedoch ein Kathodenstrahl-Oszilloskop vorhanden ist, hat es keinen Wert, neben der Methode B auch noch die Methode C durchzuführen.

Die Messungen sollten in erster Linie zeigen, wie gross der Spannungsbereich ist, in dem ein Teil der Stösse $1/50 \mu s$, aber nicht alle, zum Ueberschlag führen, oder anders ausgedrückt: wie gross die Spannung mindestens sein muss, damit jedesmal ein Ueberschlag erfolgt, und wie gross sie höchstens sein darf, damit bestimmt kein Ueberschlag erfolgt. Bezeichnen wir diese Grenzwerte der Ueberschlagsspannung als 100 %- und 0 %-Ueberschlagsspannung, so sind es also diese, die uns hauptsächlich interessieren. Es kommt somit darauf an, die gemessenen Kurven möglichst genau bis zu den beiden Grenzen von 0 % und 100 % Ueberschlags-Wahrscheinlichkeit angeben zu können.

Zur Durchführung der vom Fachkollegium 28 vorgesehenen Messungen stellten sich in verdankenswerter Weise acht schweizerische Firmen und Institutionen zur Verfügung. So wurde es möglich, nicht nur sehr viel Material über den Streubereich zwischen der 0 %- und der 100 %-Ueberschlagsspannung zu sammeln, sondern sich gleichzeitig auch darüber Rechenschaft zu geben, wie gross die Streuung infolge Messung in verschiedenen Laboratorien ist.

Die einzelnen Firmen stellten die Funkenstrecken, an denen sie die Messungen durchführten, selbst her, wobei nur die in Fig. 1 und Tabelle I angegebenen Masse verbindlich waren, während alle Einzelheiten des Aufbaus den Firmen freistanden.

Tabelle II gibt eine Uebersicht über die durchgeföhrten Hauptversuche. Neben dem vollen Firmennamen ist noch eine Abkürzung beigefügt, damit man sich in der Folge mit der Angabe dieser Abkürzung begnügen kann. Wie bereits erwähnt, waren an jeder Funkenstrecke mit jeder Methode

Uebersicht über die Hauptversuche

Tabelle II.

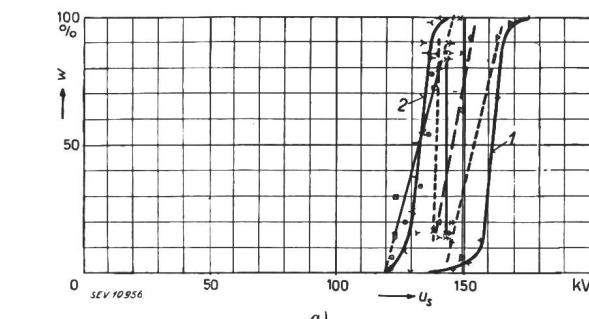
Laboratorien	Abkürzung	20-kV-Funkenstrecke			60-kV-Funkenstrecke			150-kV-Funkenstrecke			Total Anz. Vers.
		Methode A	B	C	Methode A	B	C	Methode A	B	C	
Sprecher & Schuh AG., Aarau	SSA	4	—	4	4	—	4	—	—	—	16
AG. Brown Boveri & Cie., Baden	BBC	4	4	4	4	4	4	4	4	4	36
Kabelwerke Brugg AG., Brugg	KWB	4	—	4	4	—	4	4	—	4	24
Sté. d'Expl. des câbles électriques Cotaliod . . .	Cort	4	—	4	4	—	4	—	—	3	19
Porzellanfabrik Langenthal	PFL	4	—	—	2	—	—	—	—	—	6
Forschungskom. für Hochspannungsfragen Zürich	FKH	4	—	—	4	—	—	—	—	—	8
Maschinenfabr. Oerlikon Zeh.	MFO	4	4	4	4	4	4	—	4	4	32
Schweiz. Elektrotechnischer Verein Zürich	SEV	4	—	1	4	—	1	4	—	—	14

Bemerkung: Die 2x4 Versuche der FKH sind nach der modifizierten Methode A durchgeführt worden, bei der die Höhe der Spannungsstöße mit dem Kathodenstrahl-Oszilloskop statt mit der Kugelfunkenstrecke gemessen wurde.

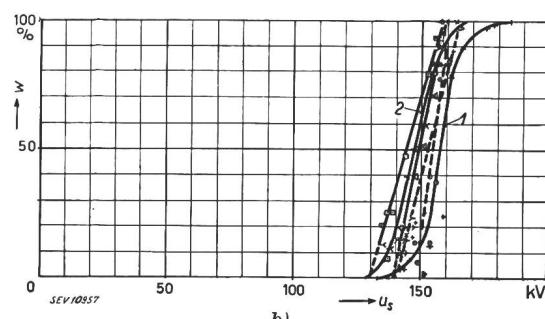
4 Versuche durchzuführen; wo in der Tabelle weniger als 4 Versuche angegeben sind, ist die Messung nur bei einer Schlagweite oder nur bei einer Polarität durchgeführt worden.

det wurden. Die relative Luftdichte lag bei allen Messungen zwischen 0,95 und 1,04.

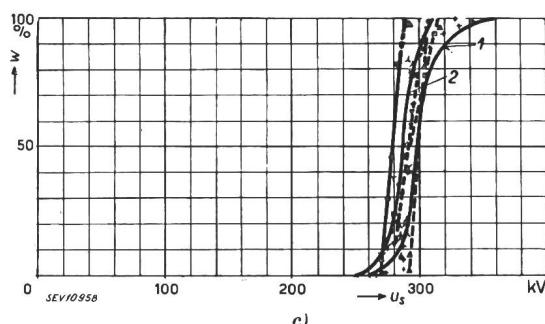
Ferner wurden die Messwerte auf normale Luftfeuchtigkeit, d. h. 11 g/m^3 reduziert. Die Reduktion



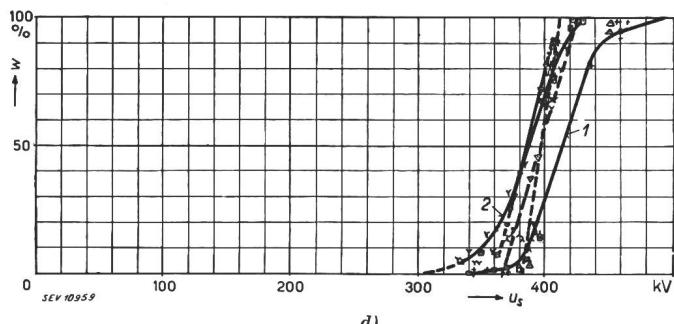
a)
20-kV-Funkenstrecke
170 mm Schlagweite. Positive Stöße 1/50 μs .



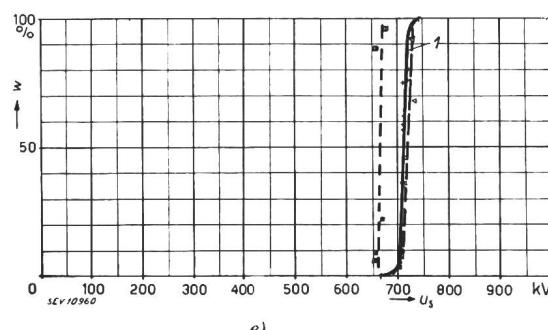
b)
20-kV-Funkenstrecke
170 mm Schlagweite. Negative Stöße 1/50 μs .



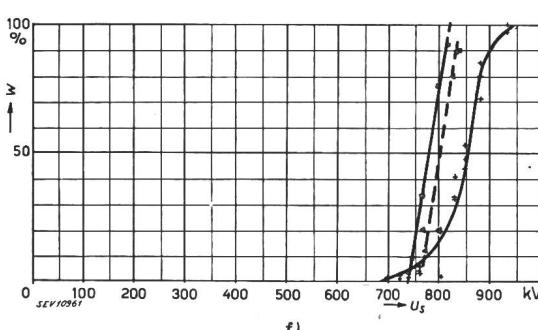
c)
60-kV-Funkenstrecke
450 mm Schlagweite. Positive Stöße 1/50 μs .



d)
60-kV-Funkenstrecke
450 mm Schlagweite. Negative Stöße 1/50 μs .



e)
150-kV-Funkenstrecke
1150 mm Schlagweite. Positive Stöße 1/50 μs .



f)
150-kV-Funkenstrecke
1150 mm Schlagweite. Negative Stöße 1/50 μs .

Fig. 2.

Ueberschlags-Wahrscheinlichkeit w in Funktion des Scheitelwertes der Ueberschlag-Stoßspannung U_s ,
gemessen nach Methode A

Alle gemessenen Ueberschlagsspannungen sind reduziert auf 760 mm Hg, 20°C und $11 \text{ g H}_2\text{O/m}^3$.
Die Messungen wurden in folgenden Laboratorien durchgeführt:

SSA \circ	Cort Δ	MFO \wedge
BBC + (Kurve 1)	PFL \times	SEV \square
KWB ∇	FKH γ (Kurve 2) *	

*) Bemerkung: Bei den Kurven der FKH wurden die Spannungen mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen gemessen.

Ueberall, wo mit Kugelfunkenstrecken gemessen wurde, sind die Eichtabellen der Regeln des SEV für Spannungsprüfungen³⁾ verwendet worden. Alle gemessenen Ueberschlagsspannungen sind auf normale Luftdichte, d. h. 760 mmHg und 20°C , reduziert worden, indem für die Stabfunkenstrecken die gleichen Korrekturen wie für Messfunkenstrecken (siehe Regeln für Spannungsprüfungen) angewen-

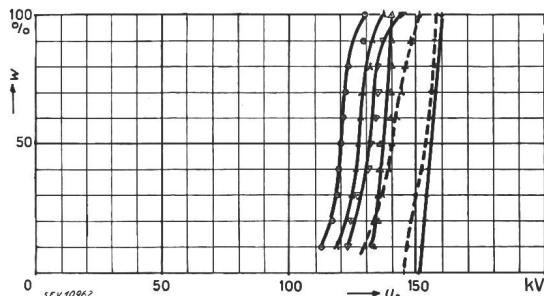
betragt nach Weicker⁴⁾ bei der positiven Normal-

⁴⁾ W. Weicker: Umrechnung der Ueberschlagsspannung von Hochspannungsisolatoren auf einheitliche Luftverhältnisse, insbesondere gleiche Luftfeuchtigkeit. Hescho-Mitt., Heft 74/75, 1936, speziell Abb. 19 auf S. 53. Die Angaben von Weicker basieren ihrerseits, soweit es sich um Stoßüberschläge handelt, hauptsächlich auf den Veröffentlichungen von F. D. Fielder im Electric J. vom Juli 1932, S. 348; Okt. 1932, S. 459 und Dez. 1935, S. 543.

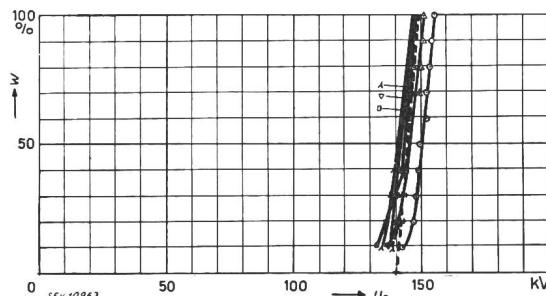
welle 1,09 % pro g/m^3 Feuchtigkeit, bei der negativen 0,83 % pro g/m^3 .

Die wichtigsten Resultate der Hauptversuche sind in Fig. 2 und 3 zusammengestellt. Wir haben uns

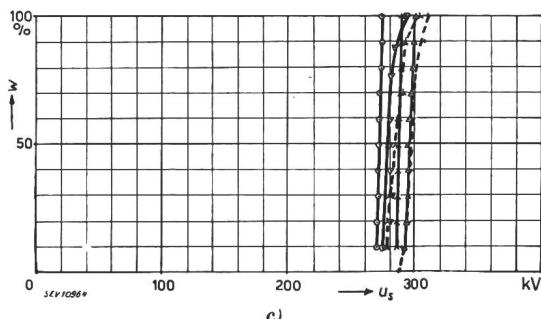
Streuung zwischen den einzelnen Kurven ist in den beiden Fällen ungefähr gleich gross, d. h. sie ist manchmal für den einen, manchmal für den andern Fall etwas grösser. Ferner liegen die Kurven



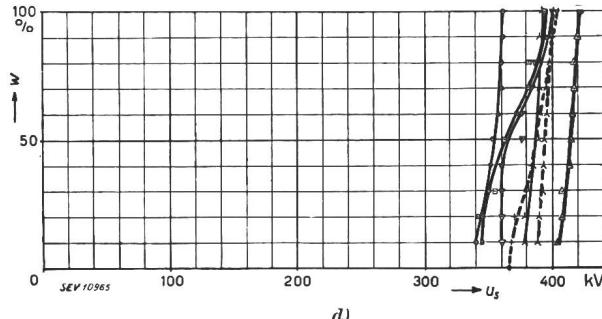
20-kV-Funkenstrecke
170 mm Schlagweite. Positive Stösse 1/50 μs .



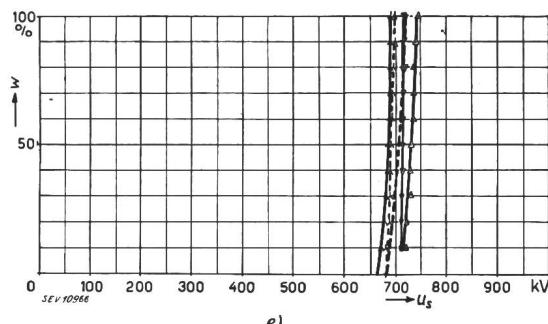
20-kV-Funkenstrecke
170 mm Schlagweite. Negative Stösse 1/50 μs .



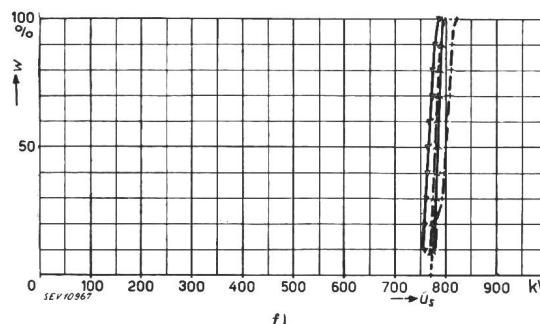
60-kV-Funkenstrecke
450 mm Schlagweite. Positive Stösse 1/50 μs .



60-kV-Funkenstrecke
450 mm Schlagweite. Negative Stösse 1/50 μs .



150-kV-Funkenstrecke
1150 mm Schlagweite. Positive Stösse 1/50 μs .



150-kV-Funkenstrecke
1150 mm Schlagweite. Negative Stösse 1/50 μs .

Fig. 3. Ueberschlags-Wahrscheinlichkeit w in Funktion des Scheitelwertes der Ueberschlag-Stoßspannung u_s , gemessen nach den Methoden B und C

Alle gemessenen Ueberschlagsspannungen sind reduziert auf 760 mm Hg, 20° C und 11 g $\text{H}_2\text{O}/\text{m}^3$.

Methode B: gestrichelte Kurven.

Methode C: ausgezogene Kurven.

Die Messungen wurden in folgenden Laboratorien durchgeführt:

SSA \circ KWB ∇ MFO \wedge

BBC $+$ Cort Δ SEV \square

damit begnügt, für jede Funkenstrecke nur die Kurven für die grössere der beiden untersuchten Schlagweiten zu reproduzieren. Die Kurven für die kleinere Schlagweite zeigen nämlich genau den gleichen Charakter und im Durchschnitt auch eine ungefähr gleich grosse Streuung.

Fig. 2 enthält die Messresultate der Methode A, Fig. 3 diejenigen der Methoden B und C. Die

im Mittel in beiden Fällen ungefähr bei den gleichen Spannungswerten; es sind jedenfalls keine grundsätzlichen Unterschiede festzustellen.

Das war nicht von vornherein selbstverständlich, zeigen doch gewisse Elektrodenanordnungen eine sogenannte «Zieherscheinung», die in folgendem besteht: Wenn man aufeinanderfolgende Spannungsstösse, deren Scheitelwert allmählich gesteigert

gert wird, auf die Elektroden leitet, so setzen die Ueberschläge erst bei relativ hohen Werten ein; vermindert man dann den Scheitelwert wieder, so setzen die Ueberschläge erst aus, nachdem die Spannung wesentlich kleiner geworden ist als der Wert, bei dem während der Erhöhung der Stösse der erste Ueberschlag erfolgte. Bei einer solchen Elektrodenanordnung müssten die mit den verschiedenen Methoden gemessenen Ueberschlagskurven stark gegeneinander verschoben sein. Die untersuchten Stabfunkentrecken zeigten jedoch diese Zieherscheinung nicht.

Damit in Uebereinstimmung steht die Tatsache, dass der Prozentsatz der Ueberschläge bei einer bestimmten Spannung (Methode A) nicht davon abhängt, wie gross das Zeitintervall zwischen je 2 aufeinanderfolgenden Stössen ist. So ergab beispielsweise eine Serie von 1000 Stössen von $1/50 \mu s$ und einem Scheitelwert von 160 kV bei der Stabfunkentrecke von 20 kV Nennspannung mit 170 mm Schlagweite 91,5 % Ueberschläge bei einer Stossfolge von 1 s und 91,9 % Ueberschläge bei einer Stossfolge von 3 s, also praktisch gleich viel. Bei diesen Eigenschaften der Stabfunkentrecken ist es verständlich, dass die 3 Methoden praktisch die gleichen Resultate liefern.

In den Fig. 2a...f haben nur je zwei Kurven eine typische S-Form. Das kommt daher, dass man ursprünglich glaubte, es genüge, von jeder Kurve etwa 2...3 Punkte aufzunehmen. Die S-Form, d. h. die Abbiegung der Kurven in der Nähe von 0 und 100 % Ueberschlägen zeigt sich aber erst, wenn man sehr viele Messungen bei den äussersten Spannungswerten durchführt. Die Versuche wurden dann nur noch in 2 Laboratorien in dieser Art ergänzt. Bei den entsprechenden Kurven zeigen sich in gleicher Weise abgebogene Enden, gleichgültig, ob mit Kugelfunkentrecke oder Kathodenstrahl- oszillograph gemessen wurde.

Die Kurven der Fig. 3a...f scheinen an den Enden weniger stark abzubiegen. Das kommt aber nur daher, dass diesen Kurven viel weniger Messpunkte zugrunde liegen als den Kurven 1 und 2 der Fig. 2a...f. Wenn man bei der Methode B mehr Punkte aufnimmt, wenn man z. B. 50mal statt nur 10mal die Spannung bis zum Ueberschlag steigert, so wird das Abbiegen der Kurvenenden wesentlich ausgeprägter, was durch einen Sonderversuch nachgewiesen wurde. Damit dürfte der S-Charakter der Ueberschlagskurven einwandfrei festliegen.

Man hat nun 2 Arten der Streuung zu unterscheiden: einerseits das Streuband zwischen der 0 % und 100 % Ueberschlagstoßspannung, anderseits die Unterschiede der mittleren, d. h. 50 %igen Ueberschlagsspannung bei Versuchen mit verschiedenen Funkentrecken und in verschiedenen Laboratorien.

Die erste Art der Streuung lässt sich am genauesten aus den Kurven 1 und 2 der Fig. 2a...f entnehmen. Sie beträgt im Mittel etwa $\pm 13 \%$, im

Maximum $\pm 19 \%$ ⁵⁾. Sie ist ganz bedeutend grösser als man nach früheren Veröffentlichungen¹⁾ erwarten konnte.

Die zweite Art der Streuung beträgt im Mittel etwa $\pm 7 \%$, im Maximum $\pm 14 \%$. Dabei handelt es sich um die Mittel- und Maximalwerte aller Messungen, unter Einschluss der nicht veröffentlichten Kurven⁶⁾.

Interessant ist noch die Grösse der totalen Streuung, die aus der Streuung zwischen der 0 %- und 100 %-Ueberschlagsspannung einerseits und der Streuung der 50 %-Ueberschlagsspannung bei Messung in verschiedenen Laboratorien anderseits resultiert. Die beiden äussersten gemessenen Werte der Ueberschlagsspannung weichen häufig um ± 15 bis 20 % vom Mittelwert ab; die grösste Abweichung beträgt $\pm 26 \%$.

Um abzuklären, ob die grosse Streuung zweiter Art hauptsächlich von der Messung in verschiedenen Laboratorien herrührt oder ob die verschiedenen Funkentrecken trotz gleicher Konstruktion und Schlagweite so sehr voneinander abweichende Ueberschlagswerte besitzen, wurde zunächst die gleiche Funkentrecke an verschiedenen Orten gemessen. Einige der Resultate sind in Fig. 4 niedergelegt. Vergleicht man die Kurvenscharen dieser Figuren und einiger weiterer, nicht reproduzierter Messungen mit denen der Hauptversuche (Fig. 2...3), so stellt man fest, dass die Streuung zwischen den Messungen verschiedener Laboratorien praktisch gleich gross ist, ob man die gleiche oder verschiedene Funkentrecken misst. Diese Streuung ist also nicht oder nur zu einem kleinen Teil durch Verschiedenheiten der einzelnen Funkentrecken bedingt.

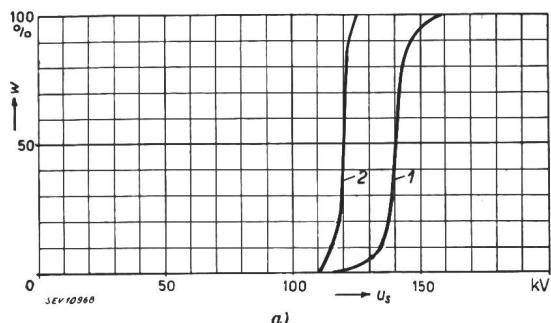
Es wurde auch noch besonders untersucht, ob Details bei der Ausführung der Funkentrecken einen Einfluss auf die Ueberschlagsspannung haben, indem man Messungen mit blanken und oxyderten, scharfkantigen und abgerundeten Elektroden

⁵⁾ Die 50 %-Ueberschlagsspannung liegt nicht immer genau in der Mitte zwischen den Grenzwerten der 0 %- und 100 %-Ueberschlagsspannung.

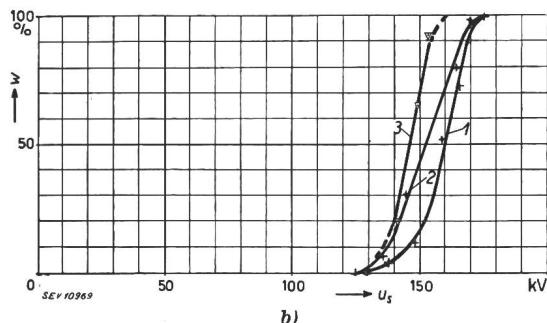
⁶⁾ 50 %-Ueberschlag-Stoßspannungen an Stabfunkentrecken sind auch früher schon in verschiedenen Laboratorien gemessen und miteinander verglichen worden, siehe z. B. den Bericht des «AIEE Lightning and Insulator Subcommittee» über «Flashover Voltages of Insulators and Gaps» im Electrical Engineering Juni 1934, S. 882, und den Aufsatz von P. Jacotet über «Stossüberschlagsversuche an Stabfunkentrecken» in ETZ 1937/I, S. 628. In der ersten Arbeit sind die Messungen von 4 amerikanischen Laboratorien miteinander verglichen, die zweite behandelt hauptsächlich Messungen von 5 deutschen Laboratorien. In diesen beiden Aufsätzen werden Abweichungen der einzelnen Messwerte von den Mittelkurven bis zu $\pm 7...8 \%$ festgestellt. Unsere Messungen in 8 schweizerischen Laboratorien weisen mit maximalen Abweichungen von $\pm 14 \%$ eine merklich grössere Streuung auf. Dabei sind alle bei den früheren Versuchen angewendeten Vorsichtsmassnahmen (genaue Wellenform, keine überlagernden Schwingungen usw.) auch bei unseren Versuchen peinlich beobachtet worden. Dass die grössere Streuung nicht einfach durch Messfehler der einzelnen Laboratorien bedingt ist, geht übrigens auch daraus hervor, dass sich bei wiederholten Messungen im gleichen Labor und mit der gleichen Versuchsanordnung ebenfalls eine sehr grosse Streuung ergab (siehe unten). Über derartige Versuche wird in den beiden andern Veröffentlichungen nichts berichtet.

durchführte. Die Kurven der Fig. 5 sowie einige weitere, nicht veröffentlichte Kurven zeigen aber

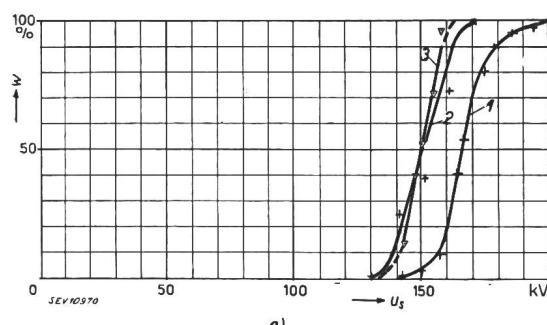
bestimmten Funkenstrecke sogar im gleichen Laboratorium, aber zu verschiedenen Zeiten, ebenso grosse



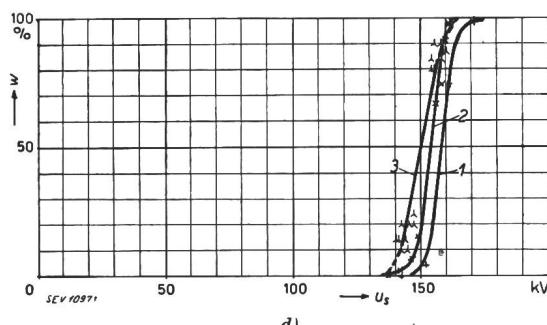
BBC-Funkenstrecke
145 mm Schlagweite. Positive Stöße 1/50 μ s.
Messung der Kurven:
1 im Laboratorium BBC.
2 im Laboratorium MFO.



KWB-Funkenstrecke
170 mm Schlagweite. Positive Stöße 1/50 μ s.
Messung der Kurven:
1 im Laboratorium BBC.
2 im Laboratorium BBC *.
3 im Laboratorium KWB.



KWB-Funkenstrecke
170 mm Schlagweite. Negative Stöße 1/50 μ s.
Messung der Kurven:
1 im Laboratorium BBC *.
2 im Laboratorium BBC *.
3 im Laboratorium KWB.



MFO-Funkenstrecke
170 mm Schlagweite. Positive Stöße 1/50 μ s.
Messung der Kurven:
1 im Laboratorium BBC.
2 im Laboratorium PFL.
3 im Laboratorium MFO.

Fig. 4. Ueberschlags-Wahrscheinlichkeit w der 20-kV-Funkenstrecken in Funktion des Scheitelwertes der Ueberschlag-Stoßspannung U_s , gemessen nach Methode A

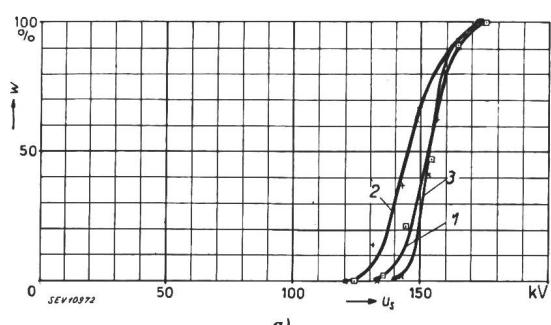
Legende für die Zeichen der Messpunkte siehe Fig. 2.
*) Messungen zu verschiedenen Zeiten.

durchaus keine systematische Abhängigkeit; die Streuung ist relativ klein.

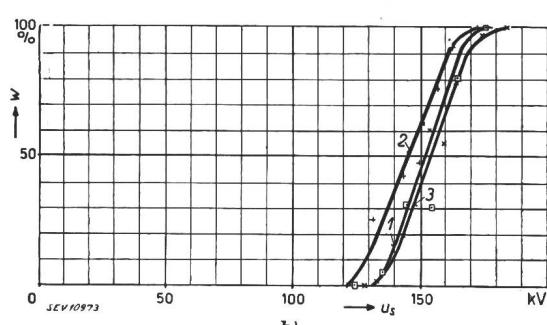
Im weitern ersieht man aus den Kurven 1 und 2 der Fig. 4b und c, dass Messungen an einer be-

Unterschiede aufweisen können, wie Messungen in verschiedenen Laboratorien.

Später wurden dann noch verschiedene Funkenstrecken im gleichen Laboratorium gemessen.



PFL-Funkenstrecke
170 mm Schlagweite. Positive Stöße 1/50 μ s.



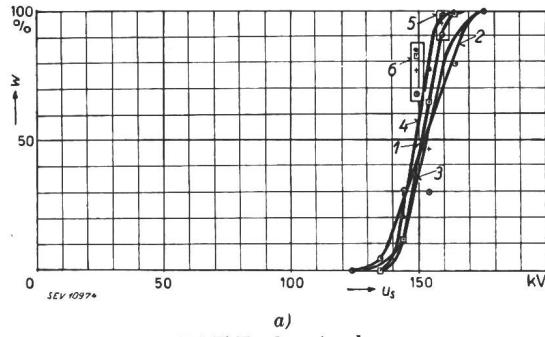
KWB-Funkenstrecke
170 mm Schlagweite. Positive Stöße 1/50 μ s.

Fig. 5. Ueberschlags-Wahrscheinlichkeit w der 20-kV-Funkenstrecken in Funktion des Scheitelwertes der Ueberschlag-Stoßspannung U_s , gemessen nach Methode A

Alle Messungen wurden im Laboratorium BBC durchgeführt.
Kurve 1 (□) oxydierte, scharfkantige Elektroden.
Kurve 2 (+) blanke, scharfkantige Elektroden.
Kurve 3 (×) blanke Elektroden mit gebrochenen Kanten.

Einige typische Resultate sind in der Fig. 6 niedergelegt. Diese Messungen wurden nicht nur am gleichen Ort, sondern auch zu gleicher Zeit durchgeführt, und zwar so, dass jeweils bei einer bestimmten Spannung alle vier Funkenstrecken unmittelbar hintereinander gemessen wurden (Ver-

einer festeingestellten Stabfunkenstrecke noch von andern Faktoren als der Luftdichte und -feuchtigkeit abzuhängen. Man könnte z. B. an den Ionisationszustand der Luft denken. Tatsächlich lassen die Kurven der Fig. 7 einen solchen Einfluss erkennen. Aus diesen paar Kurven kann aber selbstverständ-



20-kV-Funkenstrecken

170 mm Schlagweite. Positive Stöße 1/50 μ s.

Ueberschlags-Wahrscheinlichkeit w in Funktion des Scheitelwertes der Ueberschlag-Stoßspannung u_s
gemessen nach Methode A

Alle Messungen wurden im Laboratorium BBC durchgeführt.

Kurve 1 (■) Funkenstrecke BBC.

Kurve 2 (○) Funkenstrecke KWB.

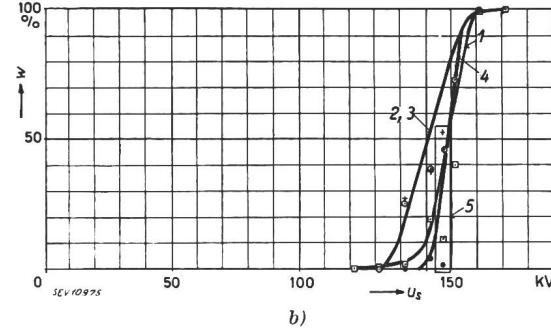
Die Punkte 5 und 6 (je für alle 4 Funkenstrecken) wurden unmittelbar nach Aufnahme der Kurven 1—4 gemessen.

suchsdauer ca. $1/2$ h); hierauf folgte eine etwas grössere Spannung usw. Die Streuung dieser 4 Kurven ist wesentlich kleiner als die, welche bei Messungen in verschiedenen Laboratorien zu verschiedenen Zeiten erhalten wurde.

Die Messpunkte 5 und 6 dieser Figuren wurden unmittelbar nach Aufnahme der vollständigen Kurven 1...4 gemessen. Man sieht daraus, dass sich die Ueberschlagswerte nach relativ kurzer Zeit schon merklich verändert haben.

Alle diese Messungen zeigen, dass die festgestellten Unterschiede der 50 %-Ueberschlagsspannung nicht, oder wenigstens nicht ausschliesslich, von systematischen Messfehlern in den einzelnen Laboratorien herrühren, sondern dass die Ueberschlagsspannung tatsächlich zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Orten verschieden gross ist. Wenn man zwei Ueberschlagstrecken derart gegeneinander abstufen will, dass die eine zuerst überschlägt und dadurch die andere schützt, so lässt sich zum mindesten ein Teil der erwähnten Streuung dadurch eliminieren, das man die beiden Ueberschlagstrecken unmittelbar nacheinander im gleichen Laboratorium misst, oder noch besser dadurch, dass man die Spannungsstöße gleichzeitig auf die beiden Ueberschlagstrecken leitet und so die gewünschte Abstufung durchführt.

Die Ursache der erwähnten Streuung dürfte teilweise in der Art der Aufstellung zu suchen sein. Man weiss ja (aus Vorversuchen), dass die Ueberschlagsspannung sich wesentlich ändert, wenn man den Abstand von Fremdkörpern ändert oder wenn man die Funkenstrecke einmal auf einer grossen, gut geerdeten Fläche und ein andermal auf einem Gestell in grösserem Abstand vom Boden aufstellt. Im weiteren scheint die 50 %-Ueberschlagsspannung



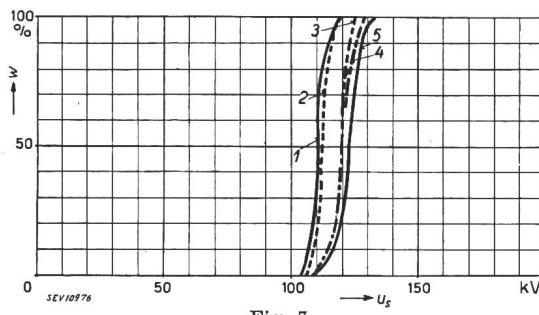
20-kV-Funkenstrecken

170 mm Schlagweite. Negative Stöße 1/50 μ s.

Fig. 6.

lich kein endgültiger Schluss gezogen werden, und bestimmt sind noch andere Umstände als nur der Ionisationsgrad der Luft für die Streuung der 50 %-Ueberschlagsspannung verantwortlich.

Auch die andere Art Streuung — der Unterschied zwischen der 0 %- und 100 %-Ueberschlagsspannung — ist noch lange nicht restlos geklärt. Man könnte vermuten, dass bei einer bestimmten Einstellung des Stoßgenerators die einzelnen Span-



20-kV-Funkenstrecken

145 mm Schlagweite. Positive Stöße 1/50 μ s.
Ueberschlags-Wahrscheinlichkeit von zwei 20-kV-Funkenstrecken in Funktion des Scheitelwertes der Ueberschlag-Stoßspannung u_s , gemessen nach Methode A

Alle Messungen wurden im Laboratorium MFO durchgeführt.

Kurve 1: Funkenstrecke MFO, mit Quarzlampe bestrahlt

Kurve 2: Funkenstrecke BBC, mit Quarzlampe bestrahlt

Kurve 3: Funkenstrecke MFO, unbestrahlt, nachts gemessen

Kurve 4: Funkenstrecke BBC, unbestrahlt, nachts gemessen

Kurve 5: Funkenstrecke MFO, unbestrahlt, tags gemessen

Bemerkung: Auch die Messungen am Tag wurden bei künstlicher Beleuchtung durchgeführt, so dass keine wesentlich anderen Resultate als bei den Messungen während der Nacht zu erwarten sind.

nungsstöße verschieden gross seien und dass die grösseren davon das Prüfobjekt überschlagen, die kleineren dagegen nicht. Fig. 8 zeigt aber, dass wohl der erste Teil, jedoch nicht der zweite Teil

der Vermutung zutrifft. Auch die allerniedrigsten Stösse führen manchmal zum Ueberschlag, die höchsten dagegen nicht immer. Die Stösse ohne Ueberschlag verteilen sich ziemlich gleichmässig auf die hohen und tiefen Spannungswerte, im oberen Teil der Figur umfassen sie sogar vorwiegend die höhern Werte. Die Streuung des Stossgenerators kann also nicht als Erklärung für die Streuung der Ueberschlagsanordnung dienen; die Ursache liegt in der Funkenstrecke selber oder in ihrer Umgebung.

Fig. 8 gibt gleichzeitig darüber Aufschluss, welche Streuung bei einem normalen Stossgenerator zu erwarten ist. Bei weiteren Versuchen zeigten sich auch einzelne Ausreisser, die bis 4% vom

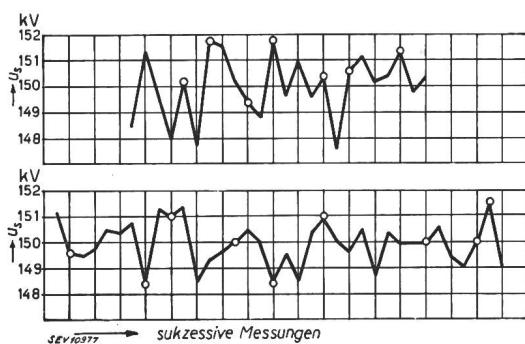


Fig. 8.

Streuung der Ueberschlagsspannung eines Prüfobjektes, das mit vielen Stösse bei gleicher Einstellung des Stossgenerators beansprucht wird.

Aufnahmen mit Kathodenstrahlzosillograph im Laboratorium BBC.

Oben: Kugelfunkenstrecke 250 mm Ⓢ, 52 mm Schlagweite, positive Stösse 1/50 μ s.
Unten: Innenraum-Stützisolator für 20 kV, positive Stösse 1/50 μ s. o kein Ueberschlag.

Mittelwert abwichen. In einem andern Laboratorium wurden sogar noch etwas grössere Werte festgestellt. Die Streuung kann aber auf sehr einfache Art verkleinert werden. Wenn man nämlich diejenige Funkenstrecke des Stossgenerators, die zuerst anspricht, in ein weites Isolierrohr steckte, so wichen die Scheitelwerte der einzelnen Stösse bei einer bestimmten Einstellung des Generators in keinem Fall um mehr als 1,5% vom mittleren Scheitelwert ab.

Zum Schluss sei noch auf eine Literaturstelle verwiesen, die dem Verfasser erst nach Abschluss der vorliegenden Untersuchungen zu Gesicht kam⁷⁾. Es wird dort über Stossversuche berichtet, die nach unserer Methode A durchgeführt wurden. Da die Versuche nur in einem Laboratorium und nicht wiederholt durchgeführt worden sind, geben sie nur über die eine Art der Streuung Aufschluss. Hierin stimmen sie aber vollständig mit unseren Versuchen überein. Unter anderem wurde eine Stabfunkenstrecke bei einer 50%-Ueberschlagstoßspannung von ca. 200 und ca. 100 kV Scheitelwert durchge-

messen und dabei zwischen der 0%- und 100%-Ueberschlagsspannung eine Streuung von $\pm 9\%$ resp. $\pm 15\%$ festgestellt, was mit dem Mittelwert von $\pm 13\%$ bei unsrern Messungen ausgezeichnet übereinstimmt.

Ferner zeigen alle Kurven der italienischen Veröffentlichung die typische S-Form, die wir auch bei unsrern Versuchen festgestellt haben. Drei Messungen an Kugelfunkenstrecken ergaben eine Streuung von nur ca. $\pm 2\%$ im Mittel, zwei Messungen an einer 5teiligen Hängeisolatorenkette mit Schutzzringen zeigten beide eine Streuung von ca. $\pm 6\%$. Dass Kugelfunkenstrecken eine viel kleinere Streuung haben als Stabfunkenstrecken, dürfte feststehen; dagegen kann aus den 2 Messungen an einem Isolator natürlich noch nicht mit Sicherheit geschlossen werden, dass Isolatoren weniger streuen als Stabfunkenstrecken.

Schlussfolgerungen

1. Die Streuung der Stossüberschlagsspannung von Stabfunkenstrecken ist wesentlich grösser als man erwartet hatte. Ausserdem ist die Ueberschlagsspannung bei den üblichen Zellenabmessungen unserer Anlagen noch weitgehend von der Aufstellungsart abhängig. Aus diesen Gründen ist die Verwendung von «normalen» Stabfunkenstrecken, die nach einer Eichtabelle auf eine gewünschte Ueberschlagsspannung eingestellt würden, nicht möglich.

2. Ein Teil der Streuung kann eliminiert werden, indem man verschiedene Ueberschlagstrecken, deren Stossüberschlagsspannungen gegeneinander abgestuft werden sollen, gleichzeitig misst. Es empfiehlt sich daher, die Abstufung zwischen dem mittleren und höchsten Isolationsniveau so durchzuführen, dass man das Hochspannungsmaterial in sich koordiniert und als Ganzes prüft oder dass man nicht koordiniertes Material mit den Funkenstrecken, die in der Anlage damit zusammengebaut werden sollen, gemeinsam prüft.

3. Wegen der ausserordentlich grossen totalen Streuung der Stossüberschlagsspannung ist es im allgemeinen nicht möglich, zwei verschiedene Isolationsniveaus so weit auseinander zu legen, dass sich die beiden Streubänder nicht überschneiden. Mit anderen Worten: eine absolut sichere Isolationsabstufung lässt sich nicht durchführen. Es schadet aber durchaus nichts, dass man die Idee der absoluten Sicherheit, die ja doch nur eine Illusion wäre, fallen lassen muss. An ihre Stelle tritt nun der Begriff der Versager-Wahrscheinlichkeit. Man kann also nicht vollständig verhindern, dass von 2 gegenüberliegenden abgestuften Isolationsniveaus das unrichtige überschlägt; aber die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten dieses Ereignisses soll sehr klein sein. Tatsächlich ist es möglich, die Versager-Wahrscheinlichkeit genügend klein zu halten, ohne dass die Stufenhöhe zwischen zwei Niveaus unwirtschaftlich gross gewählt werden muss. Diese Wahrscheinlichkeits-Untersuchungen werden demnächst in einem besonderen Artikel veröffentlicht werden.

7) L. de Seras: La probabilità di scarica degli impulsi di tensione a fronte ripido. Elettrotecnica 1940, S. 10.