Archivexemplar

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

Sonder-Abdruck aus dem Bulletin des SEV, Jahrgang 1953, Nr. 8

Experimentelle Untersuchung über die Streuung der Überschlag- und Ansprechspannungen von Isolatoren, Funkenstrecken und Ableitern unter hohen Stoßspannungen

Von *K. Berger*, Zürich

621.315.62 : 621.317.32.015.52

Der Autor beschreibt und diskutiert die Resultate von mehrjährigen Messungen der Streuung von Überschlag- und Ansprechspannungen verschiedener Isolatoren, Funkenstrecken und Überspannungsableiter unter Stossbeanspruchung. Bei den Isolatoren und Funkenstrecken liegen die Werte der Überschlagspannung innert einem Streuband mässiger Breite. Bei den Kugelfunkenstrecken zeigen sich anomal hohe und sehr stark streuende Ansprechspannungen, insbesondere bei negativem Stoss, welche solche Funkenstrecken zur Messung einzelner Stoßspannungen als ungeeignet erscheinen lassen. Bei den Ableitern werden bei geeigneter Konstruktion die kleinsten Streuungen erreicht, dies jedoch nur bei ausserordentlich sorgfältigem Abschluss von jeglicher Luftfeuchtigkeit.

Die Auswirkungen der Streuung auf das von der Koordination von Isolation und Ableitern zu verlangende Spannungsintervall zwischen Schutzniveau und Luftniveau werden besprochen, wobei auch auf den Unterschied der Überschlagspannungen einzelner Isolatoren und ganzer Anlagen hingewiesen wird.

Description et discussion des résultats de mesures, exécutées durant plusieurs années, de la dispersion des tensions de contournement et d'amorçage d'isolateurs, éclateurs et parafoudres soumis à de fortes tensions de choc. Dans le cas des isolateurs et des éclateurs, les valeurs de la tension de contournement ne présentent qu'une bande de dispersion de largeur modérée. Toutefois, les tensions d'amorçage des éclateurs à sphères sont anormalement élevées et présentent une très forte dispersion, surtout pour les chocs négatifs, à tel point que ces éclateurs ne paraissent pas convenir à la mesure de tensions de choc individuelles. Dans le cas des parafoudres de construction appropriée, la dispersion est la plus faible, mais uniquement lorsqu'ils sont très soigneusement protégés contre toute pénétration d'humidité.

Discussion des effets de la dispersion sur l'intervalle de tension exigé par la coordination de l'isolement et des parafoudres, entre le niveau de protection et le niveau d'isolement dans l'air, compte tenu de la différence des tensions de contournement d'isolateurs individuels et d'installations complètes.

1. Allgemeines

Aus der Anregung, Funkenstrecken oder Ableiter als Messinstrumente für den Scheitelwert stossartiger Überspannungen in Hochspannungsanlagen zu benützen, entstand die Frage, wie genau der Zusammenhang zwischen den Einzelwerten der Ansprechspannung unter Stoßspannung und der eingestellten Schlagweite von Funkenstrecken oder Ableitern ist. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage der Streuung der Einzelwerte der Überschlagspannung von technischen Isolatoren bei Stoss.

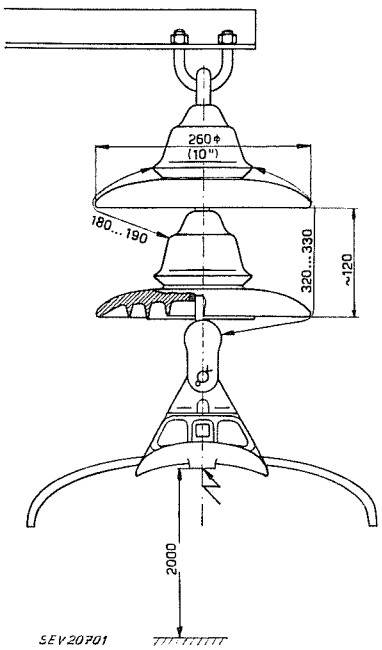


Fig. 1
Maßskizze der Hängekette

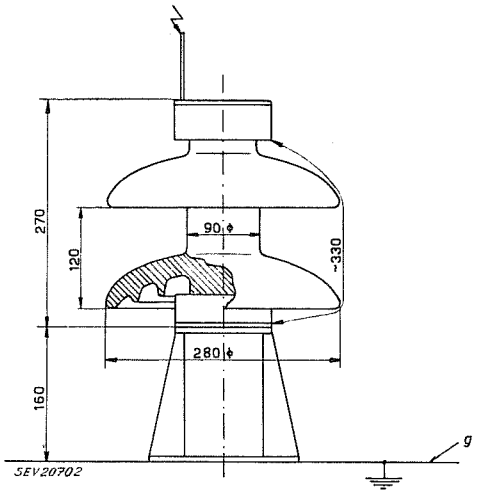


Fig. 2
Maßskizze des Vollkern-Stützers
g Gitter

2. Prüfobjekte

Zur Beantwortung des gestellten Problems wurden von der Forschungskommission des SEV und

VSE für Hochspannungsfragen (FKH) zwei Dauerversuche durchgeführt, nämlich:

1. Dauerversuch vom Dezember 1945 bis Februar 1948;
2. Dauerversuch vom April 1949 bis August 1951.

Bei diesen Dauerversuchen wurde die Ansprech- bzw. Überschlagspannung von Ableitern, Funken-

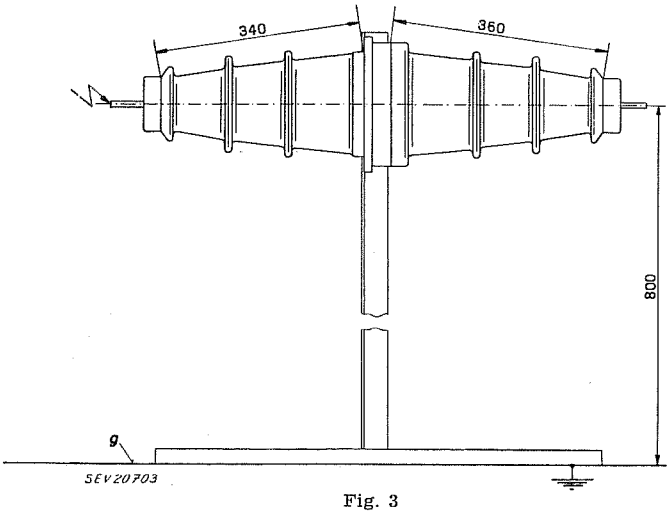


Fig. 3
Maßskizze der Innenraum-Durchführung
g Gitter

strecken und Isolatoren periodisch gemessen. Die untersuchten Isolatoren, Funkenstrecken und Ableiter der 1. Serie zeigen die Fig. 1...6. Es handelt sich um folgendes Material:

Isolatoren
(1. Dauerversuch)

A) Hängekette aus zwei Kappen-Bolzen-Elementen (Fig. 1);
B) Vollkernstützer, Fabrikat Norden (Fig. 2);
C) Porzellandurchführung für Innenmontage (Fig. 3).

Funkenstrecken
(1. Dauerversuch)

A) Vertikalachsige Kugelfunkenstrecke, Kugeldurchmesser 250 mm, Schlagweite 60 mm (Fig. 4), Kugeln verchromt, vor jeder Messung gereinigt;

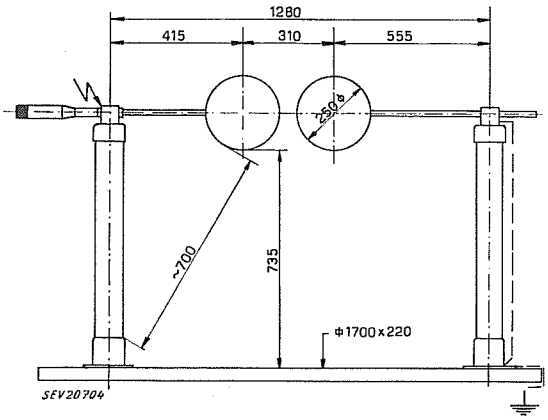


Fig. 4
Maßskizze der Kugelfunkenstrecke
mit Kugeln von 250 mm Durchmesser

B) Vertikalachsige Kugelfunkenstrecke, Kugeldurchmesser 125 mm, Schlagweite 60 mm (Fig. 5), Kugeln verchromt, nicht gereinigt über Messperiode;

C) Horizontalachsige Kugelfunkenstrecke, Kugeldurchmesser 125 mm, Schlagweite 60 mm (Fig. 5), Kugeln verchromt, vor jeder Messung gereinigt;

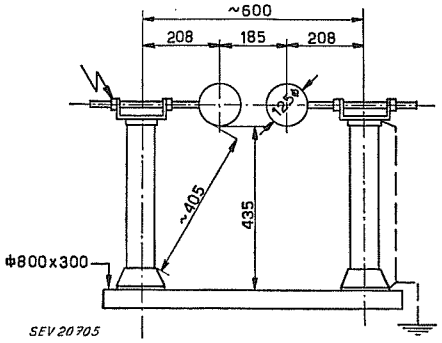


Fig. 5
Maßskizze der Kugelfunkenstrecke
mit Kugeln von 125 mm Durchmesser

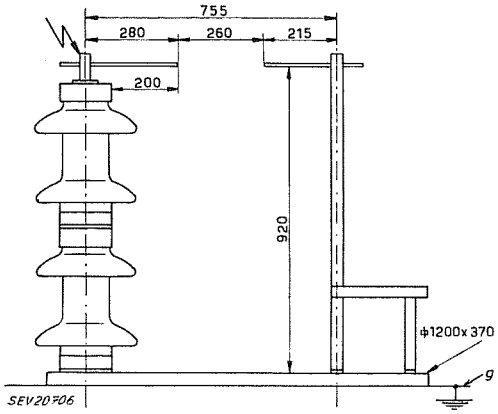


Fig. 6
Maßskizze der Stabfunkenstrecke
(Koordinations-Funkenstrecke)
g Gitter

D) Koordinations-Stabfunkenstrecke aus 10×10 mm Vierkanteisen, Schlagweite 260 mm (Fig. 6).

Ableiter
(2. Dauerversuch)

Da die Resultate der ersten Dauerversuche an Ableitern nicht voll befriedigten, wurde ein zweiter Dauerversuch mit neuem Material durchgeführt. Es handelt sich um folgende Auswahl:

A) 4 normale Überspannungsableiter, 45 kV Nennspannung, 10 000 A Ableitvermögen, Fabrikat A;
1 Spezial-Überspannungsableiter, 45 kV Nennspannung, 10 000 A Ableitvermögen, Fabrikat A;
B) 4 normale Überspannungsableiter, 45 kV Nennspannung, 4000 A Ableitvermögen, Fabrikat B;
1 spezieller Überspannungsableiter, 45 kV Nennspannung, 4000 A Ableitvermögen, Fabrikat B;
C) 4 normale Überspannungsableiter, 45 kV Nennspannung, 10 000 A Ableitvermögen, Fabrikat C;
1 spezieller Überspannungsableiter, 45 kV Nennspannung, 10 000 A Ableitvermögen, Fabrikat C.

Alle drei Fabrikate sind schweizerischen Ursprungs. Die «Spezial-Ableiter» waren von den Herstellerfirmen zur Verfügung gestellt, um Neuerungen im Dauerbetrieb zu untersuchen.

Von den vier normalen Ableitern jeden Fabrikates wurden zwei dauernd unter Wechselspannung von ca. 45 kV gegen Erde gehalten. Die übrigen

zwei wurden in freier Luft spannungslos aufbewahrt und im übrigen den gleichen Messungen unterworfen, wie die zwei unter Spannung stehenden Ableiter.

3. Messanordnung und Methode

Die Untersuchung der Streuung von Überschlagspannungen bedingt die oft wiederholte Messung der Überschlagspannung bei vielen einzelnen Stössen. Aus diesem Grunde scheidet die 50-%-Überschlagspannung als Kriterium zum vorneherein aus, da sie bereits einen Mittelwert, keinen Einzelmesswert darstellt. Somit ergab sich folgende Messmethode: Jeder zu prüfende Isolator und jede Funkenstrecke wird einer möglichst gleichmässig ansteigenden Stoßspannung (Frontsteilheit ca. 80 kV/µs) unterworfen und der Überschlagswert oder Ansprechwert mit einem Kathodenstrahloszillographen (KO) bestimmt. Um die betriebsmässige Beanspruchung zu reproduzieren und einen allfälligen Einfluss der Dauerspannung zu erfassen, wurden die Prüfobjekte grundsätzlich dauernd einer Wechselspannung von 50 Hz unterworfen, welcher die zur Messung dienende Prüfstoßspannung in einem wählbaren Phasenmoment überlagert werden konnte. Dieser Phasenmoment wurde auf Grund von Versuchen festgelegt und dann bei allen Messungen beibehalten, um in dieser Beziehung eindeutige Verhältnisse zu schaffen.

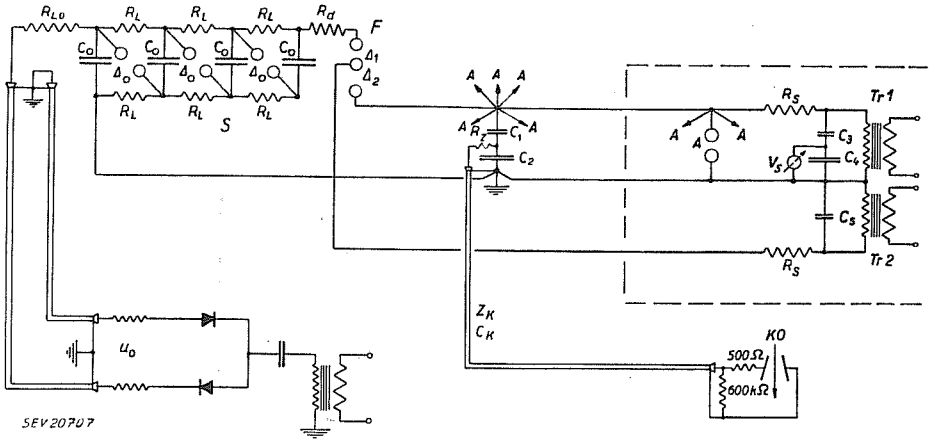


Fig. 7
Schema der Stoss- und Messanlage

A	Zu prüfender Ableiter und Funkenstrecken (Innenraum und Freiluft) mit Ansprechspannung u_a
C_0	Stufenkapazität des Stossgenerators S mit Ladespannung u_0 und n Stufen
C_1, C_2	kapazitiver Spannungsteiler für den Kathodenstrahl-Oszillograph
C_3, C_4	kapazitiver Spannungsteiler für Voltmeter
C_s	Schutzkapazität
CK	Kabelkapazität
Δ_1, Δ_2	Schlagweiten der Auslösefunkenstrecke F
F	Auslöse- und Synchronisierfunkenstrecke des Stossgenerators S
KO	Kathodenstrahloszillograph
R_d	Dämpfungswiderstand des Stosskreises, zur Einstellung der Frontsteilheit
RL, RLO	Ladewiderstände
R_s	Schutzwiderstände zu den Prüftransformatoren
RZ	Abgleichwiderstand
S	Stossgenerator
Tr_1, Tr_2	Prüftransformatoren für 45 kV
u_0	Ladespannung
V_s	Voltmeter
ZK	Wellenwiderstand des Messkabels

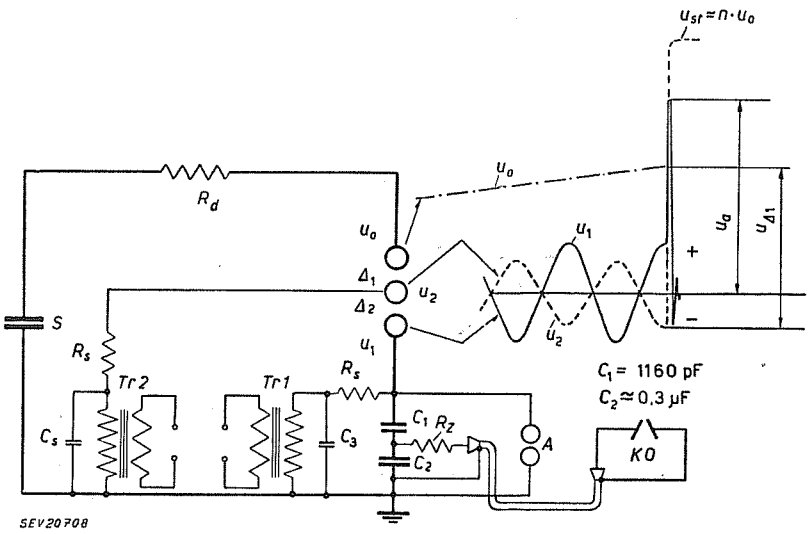


Fig. 8
Wirkungsweise der Stoßschaltung nach Fig. 7

A	Zu prüfender Ableiter und Funkenstrecken mit Ansprechspannung u
C_1, C_2	kapazitiver Spannungsteiler für den Kathodenstrahloszillograph
C_3, C_s	Schutzkapazitäten zu den Prüftransformatoren Tr_1, Tr_2
Δ_1, Δ_2	Schlagweiten der Auslösefunkenstrecke
KO	Kathodenstrahloszillograph
n	Anzahl Stufen des Stossgenerators
Rd	Dämpfungswiderstand
R_s	Schutzwiderstände zu den Prüftransformatoren Tr_1, Tr_2
RZ	Abgleichwiderstand
S	Stossgenerator
Tr_1	Transformator für die dauernde Speisung des Prüfobjektes mit Wechselspannung u_1 (50 Hz)
Tr_2	Transformator für die Synchronisierung des Stosses mit einem wählbaren Phasenmoment der Wechselspannung, gegeben durch die Phasenlage der Spannung u_2
u_0	Ladespannung des Stossgenerators S
u_1	Am Prüfobjekt dauernd vorhandene Wechselspannung
u_2	Wechselspannung für die Synchronisierung des Stosses
u_a	Ansprechspannung des Prüfobjektes A
u_{Δ_1}	Spannung, die an Δ_1 zum Durchschlag und damit zur Auslösung des Stosses führt
u_{st}	Stoßspannung

Das Schema der Messanordnung zeigt Fig. 7. Die Wirkungsweise der Schaltung geht aus Fig. 8 hervor.

Die Speisung des *Tr. 2* mit Spannungen u_2 verschiedener Phasenlage erlaubt die Wahl des passenden Zündmoments bezüglich der Spannung u_1. Die Zündung an der Doppelfunkenstrecke *F* erfolgt stets dann, wenn die Differenz u_0–u_2 maximal wird, d. h. bei entgegengesetzter Polarität der Lade-Gleichspannung u_0 und Wechselspannung u_2. Wird u_2 z. B. gegenphasig zu u_1 gewählt, so wird der Stoss dann erfolgen, wenn der Spannungsscheitelwert der Wechselspannung u_1 gleicher Polarität ist, wie jene der Ladespannung u_0 bzw. der Stoßspannung nu_0. Die Schlagweite Δ_2 ist so gross gewählt, dass sie erst durch das Ansprechen von Δ_1 zum Überschlag kommt.

Die im folgenden beschriebenen Versuche wurden stets mit jener Überlagerung des Stosses durchgeführt, bei welcher der Stoss beim Scheitelwert der Wechselspannung gleicher Polarität erfolgt. Die Präzision der Synchronisierung ist bei dieser Schaltung nicht sehr gross, genügt aber vollkommen für den vorliegenden Zweck, da es sich nur darum handelt, die sonst spürbare Streuung der Ansprechspannungen infolge verschiedener Phasenlagen zu vermeiden.

Um im geradlinigen Teil der Spannungsfront zu bleiben, wurde durchwegs eine überschiessende Stoßspannung von 500 kV gewählt. Die Spannungsmessung mit dem KO erfolgte stets mit einem sehr sorgfältig ausgebildeten kapazitiven Teiler. Seine Genauigkeit und Messfehler wurden vorgängig der Streuungsmessungen genau unter-

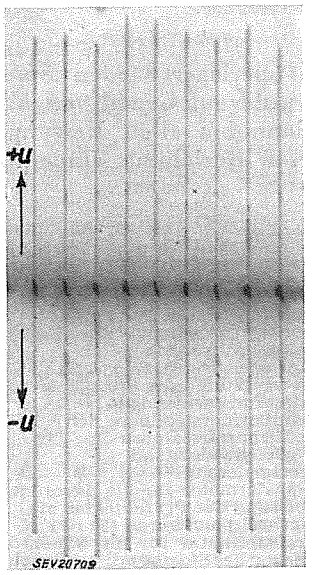


Fig. 9
Beispiel eines Oszillogrammes der Überschlagspannungen der Kette in Fig. 1
9 positive und 9 negative Stösse

sucht, samt den Fehlern des ca. 50 m langen Verzögerungskabels (Luftisolation mit Polystyrol-Perlen, Innenleiter Cu 5 mm Durchmesser, Aussenleiter Cu 18 mm Durchmesser, mit Bleimantel, Fabrikation Kabelwerke Brugg A.-G.). Der Teiler war während beider Dauerversuche genau derselbe.

Die Methode zur Bestimmung der Streuung jedes Prüfobjektes war nun folgende:

Die Prüfobjekte wurden, soweit es sich um Freiluft-Apparate handelte (Hänge- und Stützisolatoren, alle Ableiter und die Stabfunkenstrecke) in Freiluft aufgestellt, die Innenraumapparate (Durchführung, alle Kugelfunkenstrecken) in einer Garage der Prüfstation Gösgen der FKH. Ein Transformator hielt die Objekte dauernd unter einer Effektivspannung von ca. 45 kV gegen Erde. Für die Messung der Überschlagstoßspannung oder Ansprechspannung wurde ein Prüfobjekt nach dem andern mit einem Verbindungsdraht von 3...5 m Länge an den Spannungsteiler angeschlossen, gestossen und gemessen. Messungen wurden, wenn keine besondern Gründe für eine Abweichung vorlagen, alle 2...3 Wochen durchgeführt, und zwar wurde jedes Objekt 10mal mit positiver Spannung und 10mal mit negativer Spannung gestossen. Bei je einem Stoss wurde das Oszillogramm von Auge beobachtet und 9mal wurde es photographisch festgehalten. Eine solche Messreihe bezeichnen wir als *Mess-*

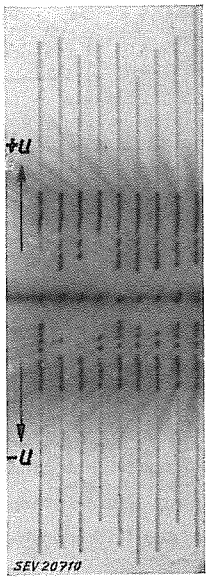


Fig. 10
Beispiel eines Oszillogrammes der Ansprechspannungen eines Ableiters
9 positive und 9 negative Stösse
Die dünneren Linien zeigen die Grösse der Ansprechspannungen, die dickeren die Grösse der Restspannungen

Serie. Um Photopapier zu sparen, wurde bald dazu übergegangen, diese Oszillogramme ohne Zeitablenkung aufzuzeichnen, d. h. nur mit der Ordinatenablenkung durch die zu bestimmende Spannung. Auf diese Art war es möglich, 9 positive und 9 negative Stossmessungen auf der Photopapierbreite des KO (150 mm) nebeneinander festzuhalten (Fig. 9). Jede der 9 Aufzeichnungen ist mittels einer festen Hilfsspannung einige mm gegenüber der vorangehenden versetzt. Die Amplituden der einzelnen Stösse erscheinen derart unmittelbar nebeneinander und lassen augenfällig die Einzelstreuung erkennen.

Dieses Verfahren ist zulässig, weil die Steilheit der Spannungsfront bei konstanter Ladespannung u_0 des Stossgenerators fast ausschliesslich durch die Kapazität des Spannungsteilers und den Dämpfungswiderstand gegeben ist, so dass sie für alle Objekte dieselbe ist und mit der Zeit nicht ändert.

Bei den Überspannungsableitern ist es ausserdem möglich, aus der verschieden starken Schwärzung des Oszillogrammstriches auch die Grösse der Restspannung zu erkennen. Ein Beispiel ist in Fig. 10 gegeben. Da nämlich die Ansprechspannung sehr rasch erreicht wird und die Spannung im Ableiter dann sofort auf die Restspannung zusammenbricht, wo sie wegen der ventilartigen Charakteristik des Widerstandes während der Dauer des Stoßstromes verbleibt, kommt die Restspannung als dunkler Strich zum Vorschein gegenüber der schwach geschriebenen Ansprechspannung. Diese Beobachtung liefert uns nebenbei eine wertvolle Kontrolle für die Konstanz der Spannungsteilung, weil die Restspannung bei gleichem Stoßstrom und gleicher Temperatur des Widerstandes erfahrungs-

gemäss sehr wenig ändert. Die Bilder zeigen denn auch deutlich die Variation der Ansprechspannung bei konstanter Restspannung bei unmittelbar aufeinanderfolgenden Stössen.

dieser Streuung ergibt sich z. B. aus dem Verlauf der maximalen und minimalen gemessenen Spannung einer Serie oder aus dem Verhältnis der beiden. Diese Streuung wollen wir hier als *Streuung pro Mess-Serie* bezeichnen und zwar für positive und negative Stösse.

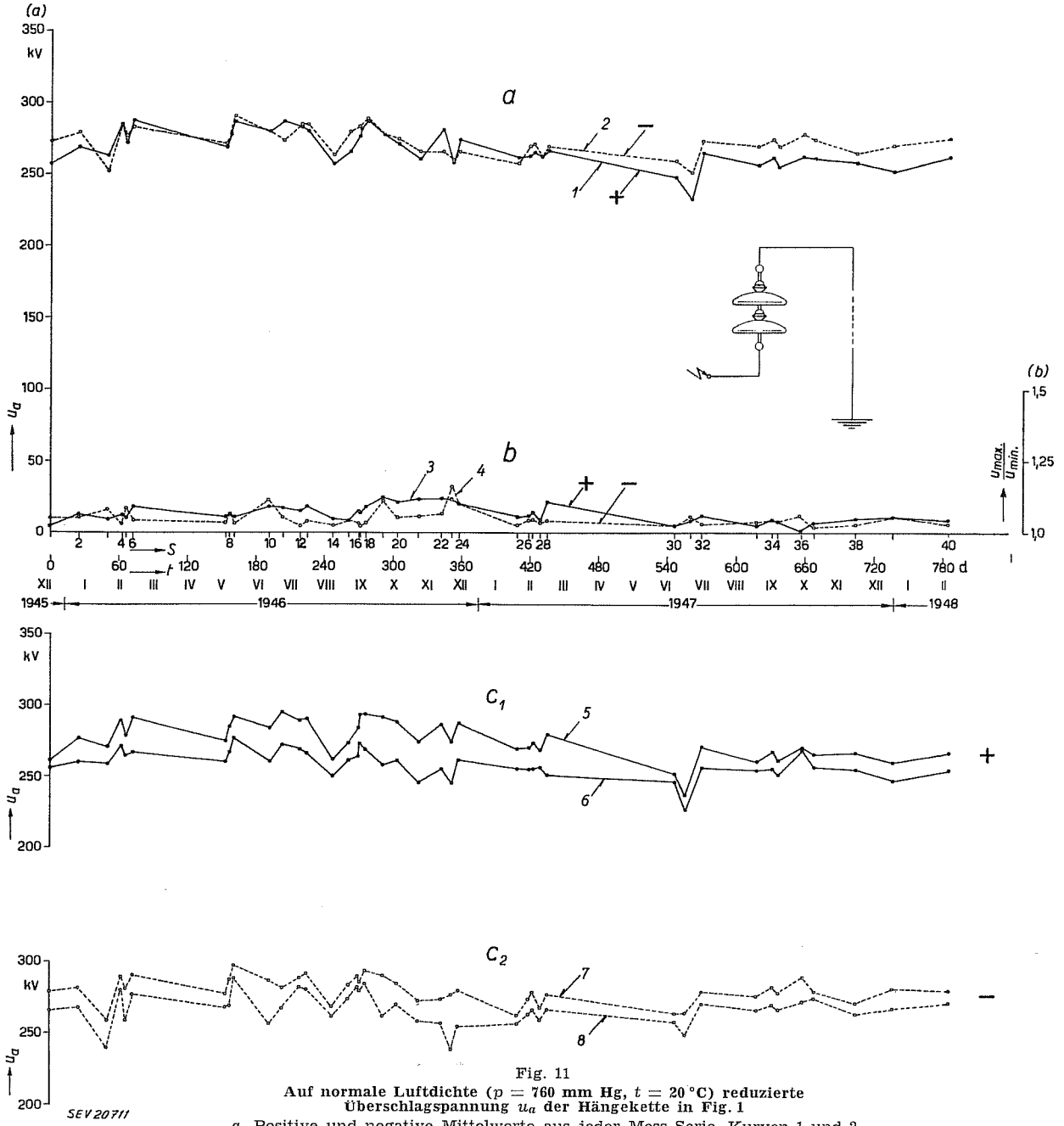


Fig. 11
Auf normale Luftdichte (p = 760 mm Hg, t = 20 °C) reduzierte Überschlagspannung u_a der Hängekette in Fig. 1

a Positive und negative Mittelwerte aus jeder Mess-Serie, Kurven 1 und 2
b Verhältnis Maximum zu Minimum jeder Mess-Serie, Kurven 3 und 4
c_1 positive Maxima und Minima jeder Mess-Serie, Kurven 5 und 6
c_2 negative Maxima und Minima jeder Mess-Serie, Kurven 7 und 8
S Nummer der Mess-Serie; *t* Zeit

4. Auswertung und Darstellung der Resultate

Für die Auswertung sind zunächst verschiedene Begriffe von Streuung zu definieren:

1. Die Abweichung der *einzelnen Messungen* einer bestimmten Polarität gegenüber dem *Mittelwert der Gesamtheit aller Messungen* eines Dauerversuches von zwei Jahren.

2. Die Abweichung der *einzelnen Messungen* ein und derselben Mess-Serie (eines und desselben Messtages) untereinander. Dazu stehen jeweils die Resultate von 9 positiven und 9 negativen Messungen zur Verfügung. Ein grobes Bild

3. Die Veränderung der *Mittelwerte der einzelnen Mess-Serien* über die Versuchsdauer von ca. 2 Jahren. Die Mittelwerte können dabei als arithmetische oder quadratische Mittelwerte berechnet werden, und zwar ebenfalls getrennt für die Messungen mit positiven und negativen Stoßspannungen.

Zunächst wollen wir die arithmetischen Mittelwerte aus je 9 Messungen einer Serie und Polarität benützen und bezeichnen die Abweichungen der Mittelwerte der einzelnen Serie im Vergleich zum Gesamtmittelwert als die Streuung der Mittelwerte im Verlauf von 2 Jahren. Bei dieser letztern Art Streuung sind die international anerkannten Korrekturen der Überschlagspannungen hinsichtlich der Luftdichte

(Barometerstand und Temperatur) berücksichtigt worden. Dagegen sind für die variable Luftfeuchtigkeit keine Korrekturen gemacht worden, weil die Grösse dieser Korrekturen nicht sicher bekannt ist.

Somit ergibt sich eine 1. Art der Darstellung unmittelbar aus folgenden Aufzeichnungen:

a) Der Verlauf der auf normale Luftdichte *reduzierten Mittelwerte der Mess-Serien* in Funktion der Versuchsdauer, für positive und negative Stoßspannungen;

b) Der Verlauf des *Verhältnisses von Maximalwert zu Minimalwert jeder einzelnen Mess-Serie* für positive und negative Stoßspannung, wie sie in c) dargestellt sind;

c) Der Verlauf der *maximalen und minimalen Werte der einzelnen Mess-Serien* für positive und negative Stoßspannungen in Funktion der Versuchsdauer (2 Jahre).

Diese drei für die Streuung der Mittelwerte (a) und für die Streuung pro Mess-Serie (b und c) massgebenden Werte finden sich in folgenden Figuren zusammengestellt:

Fig. 11...13 für die 3 untersuchten Isolatoren;

Fig. 14...17 für die untersuchten Stab- und Kugelfunkenstrecken;

Fig. 18...23 für die untersuchten 45-kV-Ableiter, wobei hier auf die Darstellung c) verzichtet und nur a) und b) dargestellt wurden.

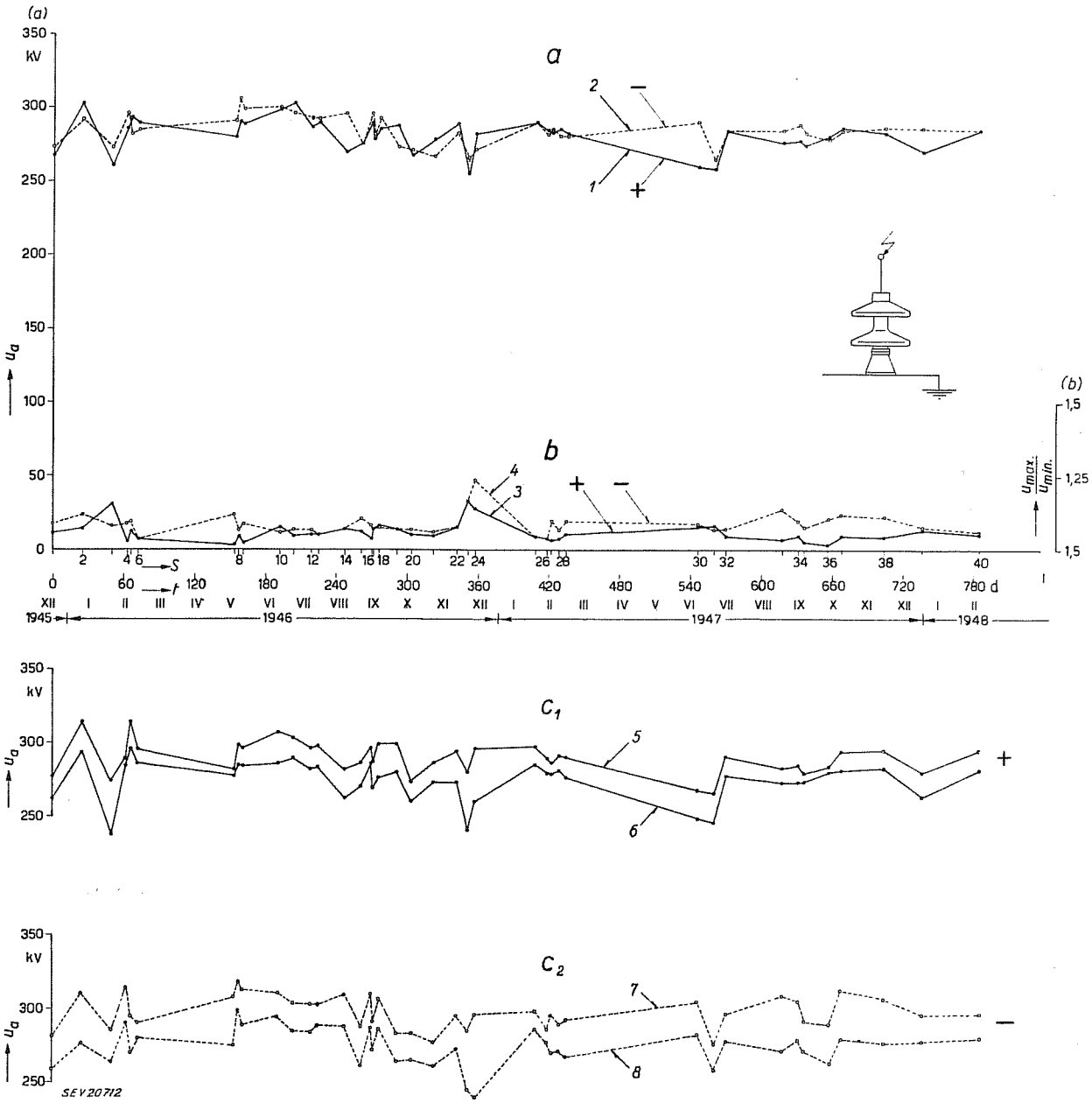


Fig. 12
Überschlagspannung des Stützers in Fig. 2
a, b, c wie in Fig. 11

5. Diskussion der Resultate

Aus den Fig. 11...23 ist zunächst vor allem ersichtlich, dass im Verlauf von zwei Jahren bei den mehr als 600 Oszillogrammen pro Messobjekt ganz beträchtliche Schwankungen der Überschlag- und Ansprechspannungen vorkommen. Für die Innenraum-

apparate kommt als Ursache einer Streuung zunächst die veränderliche Luftfeuchtigkeit in Frage, für Freiluftapparate ausserdem Regen, Schnee, Tau und Rauhreif.

Zur Feststellung eventueller Zusammenhänge mit dem Luftzustand sind in den Tabellen I und II Lufttemperatur und Barometerstand und der sich ergebende Korrekturfaktor k über die Zeit des ersten Dauerversuchs (Isolatoren und Funkenstrekken) aufgetragen, sowie die absolute und relative Luftfeuchtigkeit im Freien und im geschlossenen Messraum der Innenraum-Prüfobjekte. Wo 2 Werte angegeben sind, bezieht sich der erste auf den Luftzustand vor dem Beginn der Mess-Serie, der zweite nach Abschluss der Mess-Serie. Als Abszisse ist genau wie in den Fig. 11...23 das Datum der Messung und die Nummer der Mess-Serie gewählt. Schliesslich sind die für die Versuchsstation Gösgen gültigen Wetterdaten vor Beginn jeder Mess-Serie des ersten Dauerversuches in Tabelle III zusammengestellt.

Eine Untersuchung des Einflusses z. B. der Luftfeuchtigkeit auf die Überschlag- und Ansprechspannungen auf Grund der Korrelationstheorie wurde nicht durchgeführt. Die Betrachtung der Kurven lässt einen solchen Zusammenhang nicht erkennen.

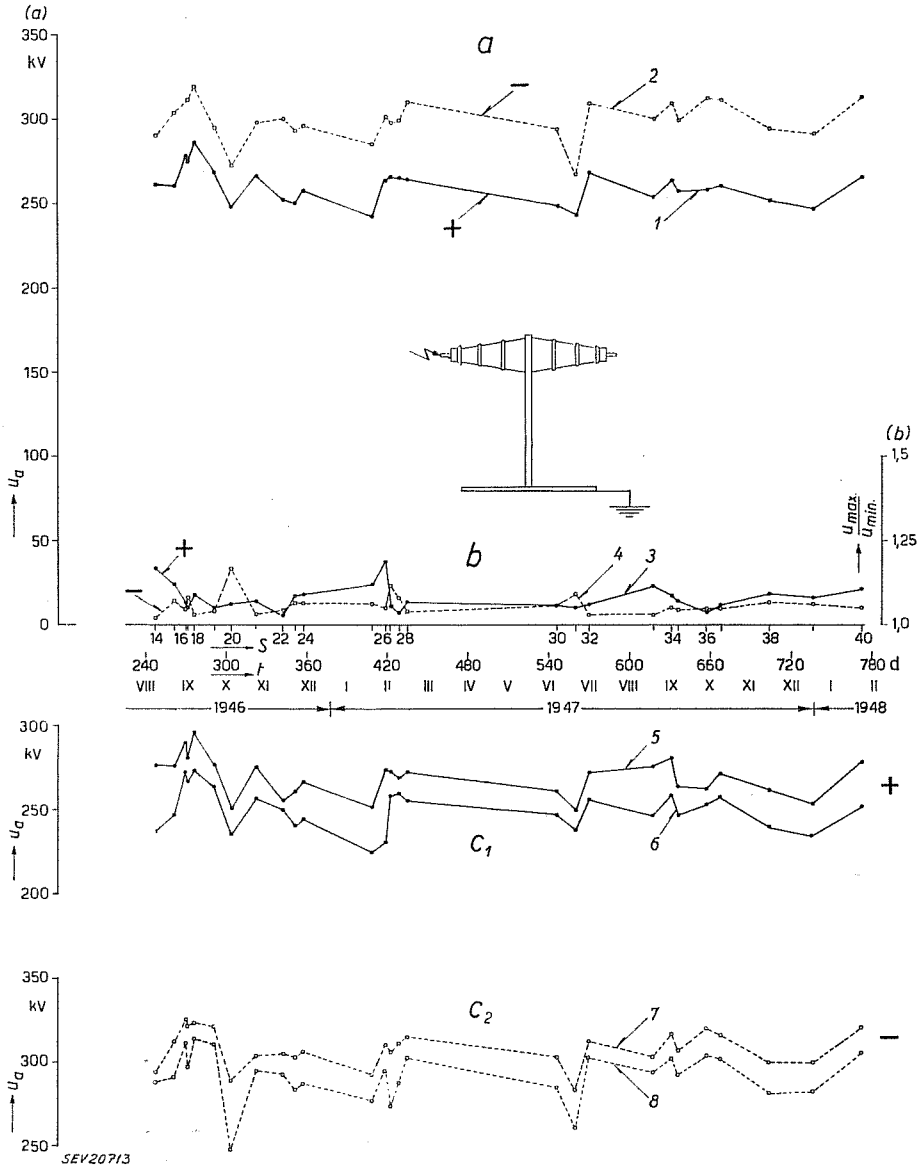


Fig. 13
Überschlagspannung der Durchführung in Fig. 3
a, b, c wie Fig. 11

Die Darstellung der Messwerte eines Objektes als Häufigkeitskurve drängt sich auf. Unter Häufigkeitskurve ist dabei zu verstehen die Darstellung der innert eines Spannungsintervalles von z. B. 2 kV festgestellten Anzahl Ansprechungen über der Spannung. In den Fig. 24...36 wurde die Anzahl Ansprechungen bzw. Überschläge in bestimmten Spannungsintervallen als Ordinate aufgetragen. So ergaben sich die Kurven folgender Figuren:

1) Fig. 24...26 für die 3 Isolatoren, Stützer, Hänger und Durchführung;
2) Fig. 27...30 für die Stab- und Kugelfunkenstrecken;
3) Fig. 31...36 für je 2 Ableiter eines jeden der 3 Fabrikate. In diesem Fall ist die Abszisse der Mittelwert M und die beiden Spannungspunkte 0,9 M und 1,1 M angegeben, um sofort ein Bild über die prozentuale Abweichung der Ansprechspannungen zu bekommen.

Aus den *Kurven* 1) und 2) ergibt sich folgendes:

Nach der Gaußschen Wahrscheinlichkeitstheorie ist als Häufigkeitskurve der verschiedenen Einzelwerte eine mathematisch genau definierte sog. *Glockenkurve* zu erwarten [1]). Diese Häufigkeitskurve ist festgelegt durch die Funktion

$$f(v) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}}\, e^{-\left(\frac{v-v_m}{\sqrt{2}\,s}\right)^2} \qquad (1)$$

Es zeigt sich nun, dass die Verteilungskurven (Häufigkeitskurven) der Messwerte unter 1) und 2) durchaus nicht der Gaußschen Verteilung entsprechen, d. h. aber, dass irgendwelche systematische äussere Einflüsse auf die Überschlag- oder Ansprechspannung einwirken, die wir bei den Versuchen nicht erfassen konnten.

[1]) vgl. *Morel, Ch.:* Mathematische Statistik und Tarifwesen II. Bull. SEV Bd. 39(1948), Nr. 6, S. 161...174.

Die Abweichung von der idealen Glockenkurve ist merkwürdigerweise bei den *Kugelfunkenstrecken* von *250 mm* Durchmesser und 60 mm Schlagweite bei negativer Stosspolarität am grössten. Schon die entsprechende Kurve als Zeitfunktion der Fig. 14 zeigt ganz ausserordentlich grosse Schwankungen der Ansprechspannung dieser Funkenstrecke, welche zunächst nur zeigt, dass eine solche Kugelfunkenstrecke, trotzdem sie bei der günstigsten Schlagweite arbeitet, für Stossmessungen durchaus unbrauchbar ist.

Auffällig ist ferner das breite Streugebiet der *Kugelfunkenstrecken* von *250 mm* und *125 mm* Durchmesser, 60 mm Schlagweite für negativen Stoss. Die horizontalachsige Funkenstrecke, deren Kugeln vor jeder Messung sorgfältig gereinigt wurden, zeigt ein wesentlich breiteres Streuband (Fig. 29) als die gleiche vertikalachsige Funkenstrecke, deren Kugeln nie gereinigt wurden (Fig. 28). Die grosse Streuung tritt ganz vorwiegend bei negativer Stoßspannung auf. Die Isolatoren wie auch die Stabfunkenstrecke zeigen den bekannten Polaritätsunterschied der Überschlagspannungen, aber im übrigen weniger Unregelmässigkeiten als die Kugeln. Nur beim Hängeisolator ist auch eine starke Einsattelung der positiven Häufigkeitskurve ersichtlich, die auf einen unerfassten Einfluss hinweist.

Aus den *Kurven* 3) ergibt sich zunächst ein nur kleiner Einfluss der Polarität auf die Ansprech-

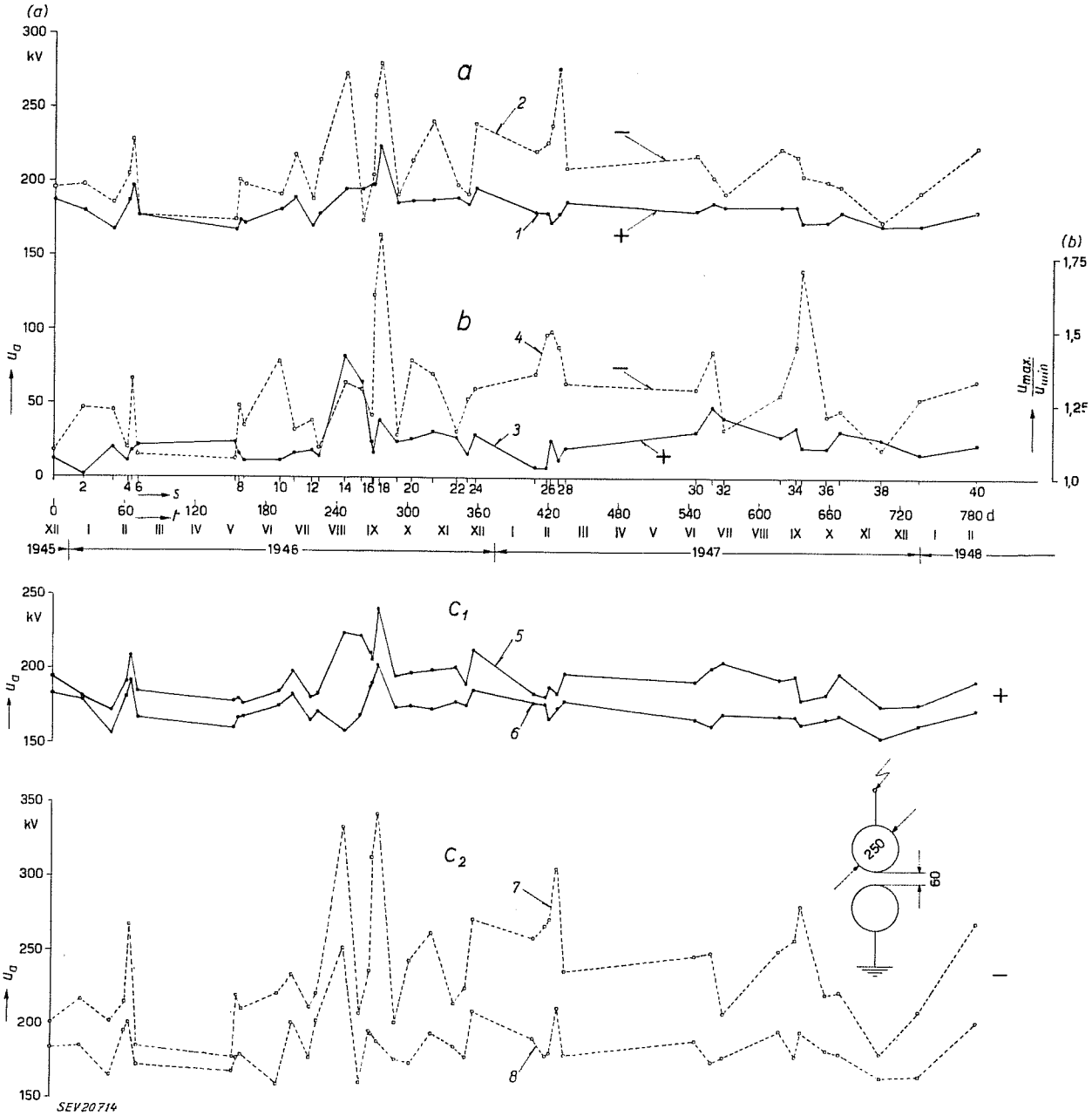


Fig. 14
Auf normale Luftdichte (760 mm Hg, 20 °C) reduzierte Ansprechspannung der Kugelfunkenstrecke von 250 mm Durchmesser in Fig. 4
a, b, c wie in Fig. 11

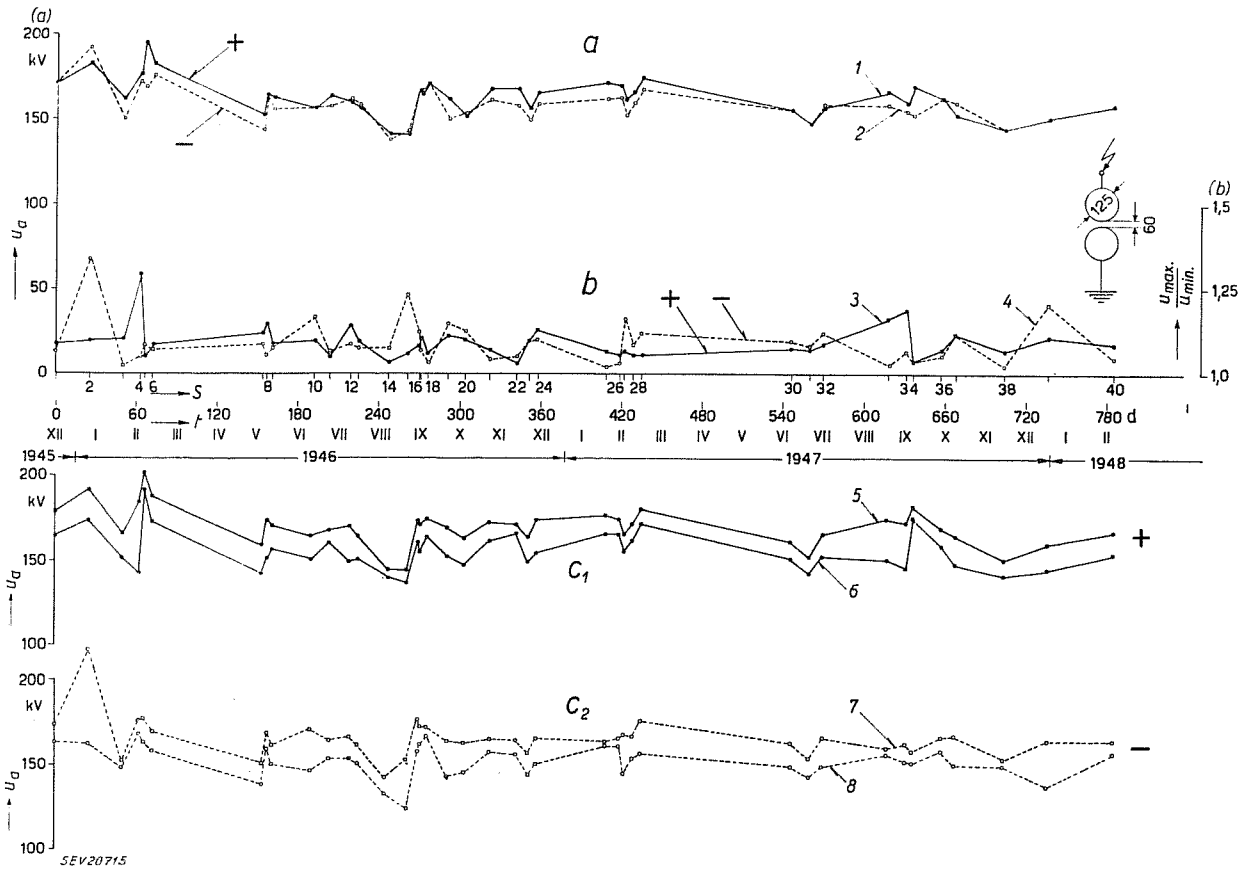


Fig. 15
Auf normale Luftdichte (760 mm Hg, 20 °C) reduzierte Ansprechspannung der vertikalachsigen Kugelfunkenstrecke von 125 mm Durchmesser in Fig. 5
a, b, c wie in Fig. 11

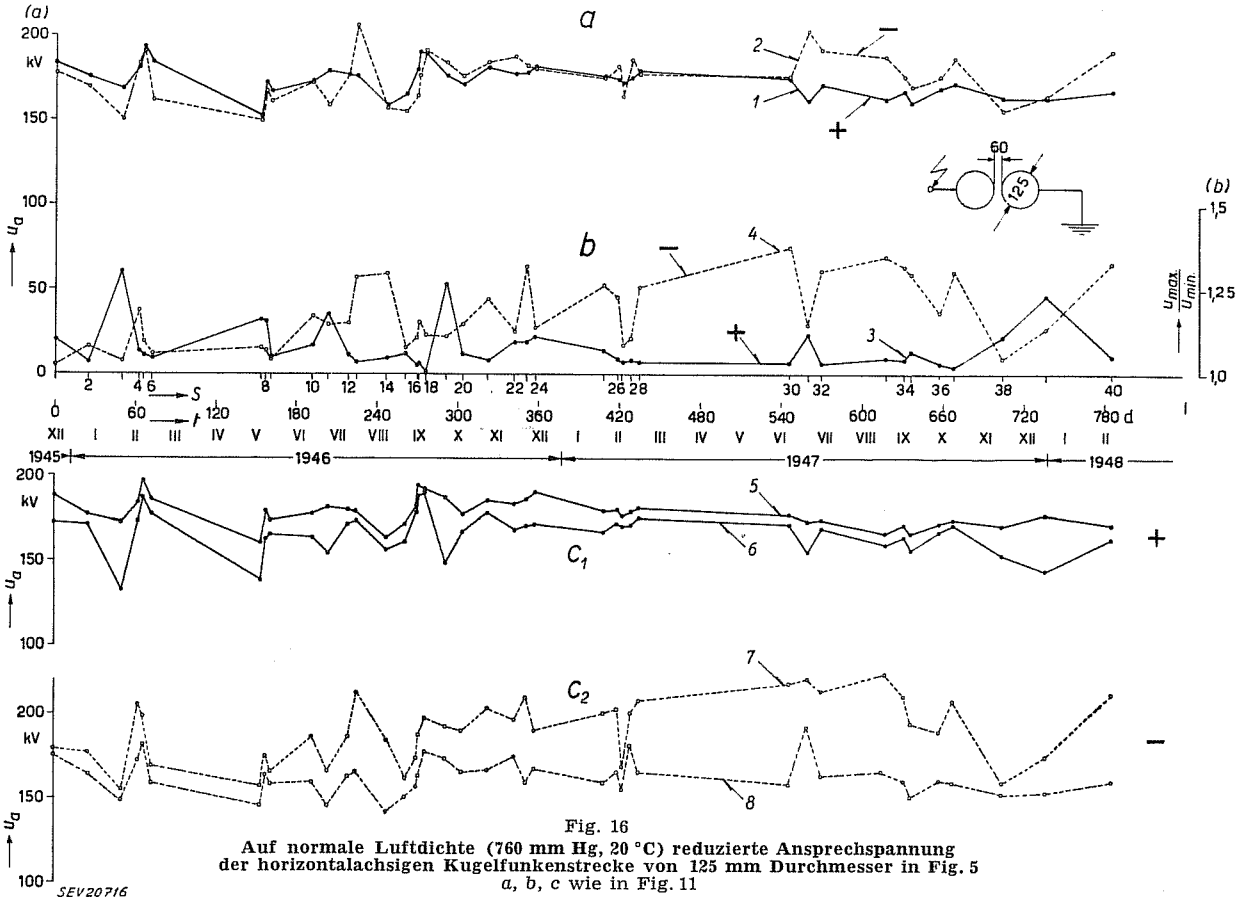


Fig. 16
Auf normale Luftdichte (760 mm Hg, 20 °C) reduzierte Ansprechspannung der horizontalachsigen Kugelfunkenstrecke von 125 mm Durchmesser in Fig. 5
a, b, c wie in Fig. 11

Witterungsverhältnisse während der Versuche. Druck und Feuchtigkeit der Luft. (Gültig für die in Freiluft aufgestellten Apparate) Tabelle I

Serie Nr.	Versuchsdatum	Zeit	Witterungsverhältnisse während der Versuche	Lufttemperatur °C	Barometerstand mm Hg	Korrekturfaktor k	Luftfeuchtigkeit g/m³	Luftfeuchtigkeit %	Bemerkungen
1	19. Dez. 45	16.10...18.00	Schön; dann Nebel. Schwacher Westwind	2,5	712	1,0	5,4	100	Gültig für:
2	14. Jan. 46	19.30...16.00	Regen; dann bedeckt. Starker Westwind	7	728	1,005	7,6	100	Ableiter
3	6. Febr. 46	18.20...21.05	Regen. Starker Südwestwind	4,8	729	1,015	6...6,5	95...100	Kette
4	19. Febr. 46	15.40...17.50	Bedeckt; dann Regen. Mittelstarker Südwestwind	6,6	729	1,005	5,4	75	Stützer
5	22. Febr. 46	09.55...12.00	Bedeckt. Mittelstarker Westwind	0...1,2	727,5	1,028...1,023	4,2...4,4	85...95	Stabfunkenstrecke
6	28. Febr. 46	14.30...17.20	Bewölkt. Schwacher Föhn	12,3	734	0,995	5,9	55	
7	21. Mai 46	11.00...14.30	Regen; dann bedeckt. Schwacher Ostwind	14,1...17,5	727	0,977...0,967	10,6...9,9	85...65	
8	24. Mai 46	13.50...16.20	Bedeckt. Schwacher Südwestwind. Gewitter	19,2 ...19,7	722...720	0,953...0,950	10...10,8	60...65	
9	28. Mai 46	17.20...19.30	Bewölkt. Schwacher Südwestwind	24,4...20	724...723	0,940...0,953	7...9,5	32...55	Erster Wert:
10	28. Juni 46	17.20...19.15	Schön. Schwacher Südwestwind	26,8...24	730	0,942...0,950	12,2...11,8	47...55	Am Anfang der Versuche
11	10. Juli 46	16.30...18.40	Sehr schön. Mittelstarke Bise	26,8...24,6	733	0,945...0,953	10...11	39...47	in «Freiluft»
12	25. Juli 46	10.40...12.20	Bedeckt. Mittelstarker Südwestwind	26...25	731	0,945	13,6...15,9	55...70	
13	31. Juli 46	15.20...17.15	Bewölkt. Mittelstarker Südwestwind	26,4...26	730	0,945	12,5...12,7	50...52	Zweiter Wert:
14	22. Aug. 46	15.25...17.50	Schön. Schwache Bise	15,5...15,7	732	0,975	7,9...7,6	60...56	Am Ende der Versuche in
15	5. Sept. 46	15.50...18.00	Bedeckt. Schwacher Südwestwind	17,8...16,2	725	0,963...0,968	13...12,9	85...90	«Freiluft»
16	14. Sept. 46	11.20...15.00	Schön. Schwache Bise	17,5...23,8	729...727	0,970...0,945	10,1...11,9	68...55	
17	15. Sept. 46	10.15...12.30	Bedeckt. Starker Südwestwind	14,5...16,2	729...730	0,980...0,975	9,6...8,9	75...65	
18	20. Sept. 46	15.10...17.35	Sehr schön. Mittelstarker Südwestwind	23...21	723...722	0,943...0,948	12...13,3	57...72	
19	5. Okt. 46	10.00...12.05	Bedeckt. Starker Südwestwind	12,3...14	728	0,985...0,980	8,9...9,4	82...78	
20	18. Okt. 46	10.25...12.20	Nebel. Schwache Bise	7,4...8,4	730	1,005...1,0	7,2	93...87	
21	5. Nov. 46	15.00...16.30	Bewölkt. Starke Bise	7,5...6,9	736	1,012...1,015	4,9...5	62...66	
22	25. Nov. 46	15.10...16.35	Bedeckt. Neblig. Schwacher Südostwind	8,8...6,1	725	1,0...1,003	5,9...5,7	77...80	
23	4. Dez. 46	15.35...18.40	Nebel. Sehr schwacher Ostwind	3,0	717,5	1,0	4,8...4,7	88...89	
24	11. Dez. 46	15.35...17.05	Leichter Nebel. Schwacher Südwestwind	3,8...3,2	725	1,010	5,3...5,0	88...90	
25	31. Jan. 47	15.35...17.00	Schön. Neblig. Schwache Bise	0,6...1,0	722	1,020	2,3...2,2	48...51	
26	10. Febr. 47	16.25...17.40	Bewölkt. Schwacher Südwestwind	5,9...4,2	717...718	0,993...1,0	4,8...5,0	69...82	
27	13. Febr. 47	16.00...17.15	Hochnebel. Schwacher Ostwind	0	721	1,020	3,9...4,0	85...87	
28	20. Febr. 47	15.50...17.05	Bewölkt. Neblig. Schwacher Westwind	—0,3...0	719	1,018	3	65	
29	26. Febr. 47	15.40...17.00	Sehr schön. Starke Bise. Tauwetter	1,0...0,2	723	1,020	2,9	60...63	
30	17. Juni 47	16.05...17.30	Sehr schön. Mittelstarke Bise	24,6...23	729	0,947...0,950	5,6...5,3	25	
31	1. Juli 47	10.10...11.40	Bedeckt; dann Regen. Mittelstarker Westwind	19,5	730	0,964	11,1...13,6	65...80	
32	11. Juli 47	16.15...18.00	Platzregen. Starker Südwind	17,5	726	0,965	12,6...11,5	84...77	
33	29. Aug. 47	15.50...18.05	Bewölkt. Mittelstarke Bise	25,8...24,6	729	0,943...0,948	7...7,6	29...34	
34	10. Sept. 47	15.15...17.30	Schön. Mittelstarker Südwestwind	28,5...26,2	731,5	0,936...0,945	9,4...10,2	35...41	
35	15. Sept. 47	15.10...17.20	Sehr schön. Mittelstarke Bise	31,1...29,7	730,5...729,5	0,927...0,932	8,7...9,0	27...30	
36	6. Okt. 47	15.50...18.10	Sehr schön. Schwache Bise	22,3...15	730	0,955...0,980	8,5...10,8	45...82	
37	17. Okt. 47	11.00...15.15	Bewölkt; dann bedeckt. Schwacher Südwestwind	16,4...15,7	733...732	0,978	7,7...7,8	55...57	
38	21. Nov. 47	11.30...15.50	Bedeckt; dann schön. Schwacher Westwind	9,8...11,1	738	1,008...1,0	8,2	89...82	
39	23. Dez. 47	11.20...15.30	Bedeckt. Mittelstarker Südwestwind	4,2...5,1	733	1,020...1,018	5,5...5,1	90...77	
40	10. Febr. 48	15.15...17.10	Bedeckt. Schwacher Südwestwind	10,4...9	730...729	0,995...1,0	4,7...5,3	45...60	

Witterungsverhältnisse während der Versuche. Druck und Feuchtigkeit der Luft. (Gültig für die in der Garage aufgestellten Apparate) Tabelle II

Serie Nr.	Versuchsdatum	Zeit	Witterungsverhältnisse während der Versuche	Lufttemperatur °C	Barometerstand mm Hg	Korrekturfaktor k	Luftfeuchtigkeit g/m³	Luftfeuchtigkeit %	Bemerkungen
1	19. Dez. 45	18.00...18.45	Nebel. Schwacher Westwind	4,7	712	1,0	5,8	90	Gültig für:
2	14. Jan. 46	10.30...14.00	Bedeckt. Schwache Bise	0,5...1,0	737	1,04	2,3	50	Kugelfunkenstrecken von
3	6. Febr. 46	17.25...18.10	Leichter Regen. Mittelstarker Südwestwind	7,2...7,3	729	1,005	6,5	85	250 und 125 mm Durch-
4	19. Febr. 46	14.10...15.00	Bedeckt. Schwacher Südwestwind	7,2	729	1,005	5,8	75	messer;
5	22. Febr. 46	15.10...14.20	Bedeckt. Mittelstarker Westwind	6	728	1,008	2,8	40	Versuchsdurchführung
6	28. Febr. 46	11.25...12.10	Bewölkt. Nebel. Schwacher Föhn	8,4	736	1,010	6,1	75	
7	21. Mai 46	09.00...09.50	Leichter Regen. Schwacher Ostwind	15,8...16,8	727	0,973...0,970	10,1	75...70	
8	24. Mai 46	11.25...12.10	Bewölkt. Schwacher Südwestwind	17,8...19,7	722	0,958...0,953	10	60...65	
9	28. Mai 46	16.10...16.50	Bewölkt. Schwacher Südwestwind	22,8...24,1	724	0,945...0,940	7,3...6,6	35...30	Erster Wert:
10	28. Juni 46	16.15...16.55	Bewölkt. Warm. Schwacher Südwestwind	25...25,5	730	0,945	13...11,5	55...50	Am Anfang der Versuche in
11	10. Juli 46	15.30...16.10	Sehr schön. Mittelstarke Bise	24,5	733	0,950	10	45	der «Garage»
12	25. Juli 46	09.30...10.15	Bewölkt. Schwacher Südwestwind	26...27,2	730	0,945...0,940	13,6	55	
13	31. Juli 46	14.15...14.55	Bewölkt. Mittelstarker Südwestwind	26...26,2	730	0,945	13...12,5	53...50	Zweiter Wert:
14	22. Aug. 46	14.10...15.10	Bedeckt. Schwache Bise	18	732	0,970	8,1	53	Am Ende der Versuche in
15	5. Sept. 46	14.45...15.40	Platzregen. Schwacher Südwestwind	18,8...19,8	724...725	0,960...0,957	13,2...13	80...75	der «Garage»
16	14. Sept. 46	10.10...11.05	Nebel; dann sehr schön. Schwacher Westwind	16,8...19	729	0,972...0,965	9,9...11,2	72...68	
17	15. Sept. 46	08.55...09.50	Bedeckt. Mittelstarker Südwestwind	18...18,2	728	0,965	10,2...9,6	65...60	
18	20. Sept. 46	13.55...14.50	Sehr schön. Mittelstarker Südwestwind	22,4...24,5	724	0,947...0,940	12,4...12,1	62...55	
19	5. Okt. 46	08.50...09.40	Bedeckt. Schwacher Südwestwind	16,2	728	0,972	8,9	63	
20	18. Okt. 46	09.25...10.05	Dichter Nebel. Sehr schwache Bise	10,2	730	0,995	7,1	75	
21	5. Nov. 46	14.00...14.50	Bewölkt. Mittelstarke Bise	10	736	1,005	5,4	58	
22	25. Nov. 46	14.05...15.00	Bedeckt. Schwacher Südwestwind	8,5	725	0,995	5,6	67	
23	4. Dez. 46	14.20...15.15	Nebel. Sehr schwacher Ostwind	5,9...5,2	716	0,990...0,995	5,1...4,9	73...74	
24	11. Dez. 46	14.20...15.10	Leichter Nebel. Schwacher Südwestwind	6,6...6,5	725	10	5,5...5,3	77...75	
25	31. Jan. 47	14.15...15.05	Schön. Neblig. Schwache Bise	0,4...1,0	722	1,02...1,015	2,2...2,1	47...43	
26	10. Febr. 47	15.20...16.10	Bewölkt. Sehr schwacher Südwestwind	6,8	717	0,990	4,7...4,8	62...64	
27	13. Febr. 47	14.35...15.35	Nebel und Reif	2,6...3	721	1,010	4,1...4	78...72	
28	20. Febr. 47	14.45...15.35	Bedeckt. Neblig. Schwache Bise	1,5...2,4	719	1,010	3...2,9	60...55	
29	26. Febr. 47	14.30...15.20	Sehr schön. Leichtes Tauwetter. Schwache Bise	1,8...2,8	723	1,015...1,010	2,9...2,7	57...50	
30	17. Juni 47	15.00...15.50	Sehr schön. Mittlere Bise	23,1...23,8	729	0,950...0,947	7,1...6,6	34...30	
31	1. Juli 47	09.00...09.55	Bedeckt. Mittelstarker Westwind	24	730	0,950	11,2	51	
32	11. Juli 47	15.05...15.55	Bedeckt. Einige Platzregen. Starker Südwind	19...20,5	725	0,960...0,955	11,1...10,5	67...58	
33	28. Aug. 47	14.45...15.35	Bewölkt. Mittelstarke Bise	23,8...25,4	729	0,948...0,943	7,2...6,9	34...30	
34	10. Sept. 47	14.10...15.00	Schön. Mittelstarker Südwestwind	23,8...27	731,5	0,950...0,940	10,1...9,1	46...35	
35	15. Sept. 47	14.05...14.55	Sehr schön. Schwache Bise	26,2...28,8	731	0,943...0,935	10...9	40...32	
36	6. Okt. 47	14.20...15.10	Sehr schön. Schwache Bise	19,6...21	730	0,965...0,960	9...8,5	52...45	
37	17. Okt. 47	10.45...11.35	Bewölkt. Sehr schwacher Westwind	14,2...15,5	733,5	0,985...0,983	8,3...8,1	67...60	
38	21. Nov. 47	10.15...11.05	Bedeckt. Leichter Nebel. Schwacher Westwind	10,9...12,1	738	1,003...1,0	8,1	82...76	
39	23. Dez. 47	10.10...11.00	Leichter Regen. Sehr starker Südwestwind	5,6...6,5	733,5	1,017...1,012	5,7...5,5	83...75	
40	10. Febr. 48	14.10...15.00	Bedeckt. Sehr schwacher Südwestwind	11...12,3	730	0,995...0,990	5	50...46	

Wetterverhältnisse vor Beginn der Mess-Serien

Tabelle III

Serie-Nr.	Atmosphärische Bedingungen vor den Versuchen
1, 2	(nicht notiert)
3	Starker Südwestwind, begleitet von Regen
4	Bedeckt, sehr schwacher Südwestwind
5	Abends 21.00 Uhr Schneefall, gemischt mit Regen. Im Laufe der Nacht, von 21.00 bis 22.00 Uhr, Fallen der Temperatur und Frost
6	Am Morgen bewölkt und neblig. Föhn
7	Regen während der Nacht und am Morgen schwacher Ostwind
8	(nicht notiert)
9	Am Morgen Nebel bis ca. 8.00 Uhr, dann bewölkt. Schwacher Südwestwind.
10	Am Morgen sehr schön. Am Nachmittag bewölkt. Schwacher Südwestwind
11	Während der Nacht Tau. Am Morgen sehr schön. Mässige Bise
12	Am Vortag und in der Nacht sehr schön. Am Morgen bewölkt. Sehr schwacher Südwestwind
13	Am Vortag und am Tag der Messung schön. Mittlerer Südwestwind
14	Am Vorabend und in der Nacht Regen. Am Morgen bedeckt. Schwacher Westwind
15	Am Vortag und in der Nacht Regen nachlassend. Am Morgen bedeckt. Mittlerer Südwestwind
16	Am Vortag schön. Im Laufe der Nacht und am Morgen sehr dichter Nebel. Dieser verschwindet kurz vor den Versuchen
17	Am Vortag schön. In der Nacht und am Morgen bedeckt. Mittelstarker Südwestwind
18	Am Vortag sehr starker Wind, begleitet von Regen. Morgens schön. Mittelstarker Südwestwind
19	Am Vortag und in der Nacht bedeckt. Schwacher Westwind
20	Am Vortag schön und schwacher Wind. Morgens sehr dichter Nebel
21	Am Vorabend und in der Nacht Nebel. Am Morgen bedeckt und schwache Bise
22	Am Vortag, in der Nacht und morgens bedeckt, schwacher Südostwind
23	Am Vortag starker Südwestwind, begleitet von Regen. In der Nacht und am Morgen ziemlich dichter Nebel und sehr schwacher Wind
24	In der Nacht bedeckt. Morgens Nebel und sehr schwacher Südwestwind
25	Am Vortag und morgens Nebel und schwache Bise
26	Am Vortag bewölkt und Tauwetter. Frost im Laufe der Nacht. Morgens ziemlich schön und sehr schwacher Südwind
27	Am Vortag sehr schön und sehr leichter Nebel,ruhiger Wind. Morgens Nebel (sehr dicht) und Reif
28	Bedeckt und neblig, schwache Bise
29	Am Vortag starker Schneefall und starke Bise. Frost im Laufe der Nacht. Morgens bewölkt, dann sehr schön, Tauwetter
30	Am Vortag schön. Nachts ziemlich kalt. Morgens schön und warm, mässige Bise
31	Am Vortag bewölkt und mittlerer Westwind
32	Am Vortag, nachts und morgens bedeckt mit nachlassenden Platzregen und starkem Südwind
33	Am Vortag, nachts und morgens bewölkt und mässige Bise
34	Am Vortag bedeckt und Südwind. Morgens schön und mässige Bise
35	Am Vortag und am Tag der Versuche sehr schön und mässige Bise
36	Am Vortag sehr schön. Morgens Nebel, dann sehr schön, schwache Bise
37	Am Vortag bewölkt. Nachts und morgens bis zum Beginn der Versuche sehr dichter Nebel
38	Durch Nebel bedeckt, sehr schwacher Westwind
39	Bedeckt und Nachlassen des Regens, starker Südwestwind
40	Morgens schön, sehr schwacher Südwestwind

spannung, und dann vor allem ein schmaleres Streuband der Einzelwerte. Die Figuren zeigen, dass praktisch alle Ansprechwerte innerhalb ca. ± 10 % des Mittelwertes derselben Polarität, bei einem Fabrikat sogar innerhalb ca. ± 7 % des Mittelwertes liegen.

Um dieses Verhalten und das eventuelle Vorhandensein von unerfassten Fremdeinflüssen besser zu erkennen, wurden die Resultate dieser Ableitermessungen weiter ausgewertet, indem nicht mehr die Häufigkeit p der Ansprechwerte innerhalb eines begrenzten Spannungsintervalls ausgerechnet wurde, sondern die Häufigkeit aller Ansprech- oder Überschlagspannungen bis zu einem bestimmten Spannungswert; das ist die sog. *Summenhäufigkeit* Σ. Diese Summenhäufigkeit wurde sodann auf sog. «Wahrscheinlichkeitspapier» aufgetragen. Dessen Koordinatennetz ist so gewählt, dass die Summenhäufigkeit einer Gaußschen Verteilung sich als gerade Linie darstellt. Dies bedingt einen bestimmten nicht linearen Häufigkeitsmaßstab (Abszisse), während der Spannungsmaßstab linear bleibt.

Die Fig. 37...42 zeigen die Summenhäufigkeit der Ansprechspannungen von je zwei Ableitern jedes Fabrikates auf diesem Wahrscheinlichkeitsnetz, während die Fig. 43...48 Summenhäufigkeiten über einem üblichen linearen Spannungs- und Häufigkeitsmaßstab darstellen, wobei im letzten Fall die Häufigkeit als Ordinate gezeichnet ist.

Der Punkt P ($\Sigma = 50$ %) der Fig. 41 bedeutet z. B., dass 50 % aller gemessenen negativen Ansprechspannungen unterhalb 170 kV liegen. Oder der Punk Q (160 kV), der eine Abszisse $\Sigma = 5$ % bei positiver Spannung liefert, bedeutet, dass bei dieser Spannung noch in 5 % aller angewendeten Stösse Ansprechungen auftreten («5-%-Ansprechspannung»). Die Kurven zeigen im ganzen recht gute Annäherung an die Gaußsche Verteilung, so dass offenbar keine wesentlichen unbekannten Einflüsse auf diese Ableiterfunkenstrecken mehr bestehen.

Als Resultat der zweijährigen Beobachtungen darf gesagt werden, dass *Ableiterfunkenstrecken*, insbesondere gewisser Bauformen, heute den der Eindeutigkeit am nächsten kommenden Zusammenhang zwischen Ansprechspannung und Schlagweite bzw. Konstruktion aufweisen. Als Messmittel für kurzdauernde Überspannungen eignen sie sich demgemäss unvergleichlich besser als z. B. Stabfunkenstrecken, und noch viel besser als Kugelfunkenstrecken.

Nur nebenbei sei darauf hingewiesen, dass sich Spuren von Feuchtigkeit in Ableiterfunkenstrecken durch eine ausserordentlich starke Zunahme der Streuung im Dauerbetrieb äussern.

In Tabelle IV sind die *Spannungen*, die mit einer bestimmten Ansprech- oder Überschlaghäufigkeit verbunden sind, in Tabelle V ihre *prozentuale Abweichung* vom Mittelwert aller Spannungen für verschiedene Prüfobjekte zusammengestellt. Als Einheiten sind dabei die heute in der Hochspannungstechnik und Wahrscheinlichkeitstheorie üblichen Begriffe benützt, nämlich:

Summenhäufigkeit ($\Sigma\%$) der Überschlag- bzw. Ansprechspannung (U) in kV (Scheitelwert) Tabelle IV

Objekt	Polarität	Mittelwert	$\Sigma\%$ = Teil der Ansprechungen, die bei Spannungen kleiner oder gleich dem Tabellenwert erfolgen, ausgedrückt in % aller Beanspruchungen										
			Kleinster Messwert	1%	5%	10%	16%	50%	84%	90%	95%	99%	Grösster Messwert
Prozentuale Abweichung		kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV
Stützisolator	+	280,0	238	238	258	263	268	283	288	293	303	308	313
	—	283,0	238	248	263	268	268	283	293	303	303	313	318
2gliedrige Hängekette	+	260,0	223	228	248	253	253	263	278	288	288	293	293
	—	272,0	238	243	253	258	263	273	283	283	288	288	298
Durchführungsisolator	+	257,5	223	233	238	243	248	258	268	273	278	288	293
	—	296,0	248	258	268	283	283	293	308	308	313	318	318
Stabfunkenstrecke 260 mm	+	247,5	203	213	223	228	238	248	258	263	268	268	273
	—	290,0	258	263	268	273	273	288	303	308	318	328	333
Kugelfunkenstrecke 250 mm ⌀ sauber	+	182,0	153	158	168	168	173	178	193	198	203	223	238
	—	210,3	158	163	173	173	178	203	238	258	268	313	338
Kugelfunkenstrecke 125 mm ⌀ sauber	+	162,0	133	138	143	148	148	163	173	173	183	198	203
	—	163,3	123	133	138	143	148	168	168	173	173	198	203
Kugelfunkenstrecke 125 mm ⌀ staubig	+	172,5	133	143	158	163	163	173	183	183	188	193	198
	—	176,4	143	148	148	158	158	173	193	193	203	218	223
Ableiter FKH-Nr. 1	+	153,7	145	—	146,5	147,0	148,0	152,5	157,5	159,5	160,0	—	168
Fabrikat A Nr. 1	—	157,4	141	—	147,5	149,3	150,6	157,0	160,0	161,5	164,5	—	171
Ableiter FKH-Nr. 2	+	163,5	152	—	157,0	157,5	158,6	162,0	166,5	167,7	169,5	—	183
Fabrikat A Nr. 2	—	165,6	149	—	155,5	157,5	160,0	165,0	170,0	171	172,5	—	177
Ableiter FKH-Nr. 6	+	162,5	120	—	149,0	152,5	154,5	162,5	168,3	170,3	172,3	—	179
Fabrikat B Nr. 1	—	164,0	112	—	141,0	149,0	155,5	165,5	172,0	175,7	177,7	—	187
Ableiter FKH-Nr. 7	+	165,2	129	—	152,5	157,5	159,0	165,0	170,0	171,5	174,0	—	179
Fabrikat B Nr. 2	—	166,8	119	—	147,0	151,5	156,5	167,5	175,0	177	180,5	—	186
Ableiter FKH-Nr. 11	+	173,8	148	—	160,5	163,3	166,5	173,0	180,0	182	184,0	—	194
Fabrikat C Nr. 1	—	170,0	146	—	155,5	158,4	162,0	170,0	176,0	177,5	180,3	—	190
Ableiter FKH-Nr. 12	+	186,4	158	—	167,0	170,0	173,0	186,5	196,5	199,5	203,0	—	214
Fabrikat C Nr. 2	—	184,2	164	—	170,0	173,0	175,0	183,0	191,0	194	197,5	—	206

Prozentuale Abweichung ($\Delta\%$) der Überschlag- bzw. Ansprechspannung (U) vom Mittelwert U_{med} aller Messungen innert 2 Jahren

$$\Delta\% = \frac{U - U_{med}}{U_{med}} 100\%$$

Tabelle V

Objekt	Polarität	Mittelwert $\hat{U}_{med}$	$\Sigma\%$ = Teil der Ansprechungen, die bei Spannungen kleiner oder gleich dem Tabellenwert erfolgen, ausgedrückt in % aller Beanspruchungen										
			Kleinster Messwert	1%	5%	10%	16%	50%	84%	90%	95%	99%	Grösster Messwert
Ansprechspannung		kV	—%	—%	—%	—%	—%	%	+%	+%	+%	+%	+%
Stützisolator	+	280,0	15	15,0	7,85	6,1	4,65	+1,07	2,85	4,65	8,25	10,0	11,8
	—	283,0	16	12,3	7,07	5,3	5,30	0	3,53	7,06	7,06	10,6	12,4
2gliedrige Hängekette	+	260,0	14,2	12,3	4,61	2,69	2,69	+1,15	6,82	10,76	10,76	12,7	12,7
	—	272,0	12,5	11,65	7,0	5,14	3,31	+0,37	4,04	4,04	5,51	5,51	9,55
Durchführungsisolator	+	257,5	13,4	9,55	7,56	5,62	3,69	+0,2	3,69	6,0	7,95	11,5	13,8
	—	296,0	16,2	12,83	9,45	4,4	4,4	—1,01	4,05	4,05	5,75	7,4	7,4
Stabfunkenstrecke 260 mm	+	247,5	18	13,9	9,9	7,87	3,84	+0,22	4,24	6,25	8,3	8,3	10,3
	—	290,0	11	9,3	7,42	5,87	5,87	—0,69	4,48	6,21	9,65	13,1	15,2
Kugelfunkenstrecke 250 mm ⌀ sauber	+	182,0	16,1	13,2	7,8	7,8	4,95	—2,3	5,83	8,67	11,5	22,5	30,8
	—	210,3	24,9	22,5	17,75	17,75	15,35	—3,47	13,15	22,6	27,6	49,0	61,0
Kugelfunkenstrecke 125 mm ⌀ sauber	+	162,0	17,9	14,8	11,7	9,26	9,26	+0,62	6,80	6,80	13,0	22,2	25,3
	—	163,3	24,7	18,4	15,5	12,42	9,37	+2,88	2,88	5,95	5,95	21,3	24,3
Kugelfunkenstrecke 125 mm ⌀ staubig	+	172,5	22,9	17,1	8,4	5,5	5,5	+0,29	6,08	6,08	9,0	11,8	14,8
	—	176,4	18,9	16,1	16,1	10,44	10,44	—1,93	9,42	9,42	15,1	23,6	26,4
Ableiter FKH-Nr. 1	+	153,7	5,5	—	4,7	4,4	3,7	—0,78	2,5	3,8	4,1	—	9,3
Fabrikat A Nr. 1	—	157,4	10,4	—	6,3	5,1	4,3	—0,25	1,65	2,6	4,5	—	8,65
Ableiter FKH-Nr. 2	+	163,5	7,04	—	4,0	3,7	3,0	—0,9	1,85	2,6	3,7	—	11,9
Fabrikat A Nr. 2	—	165,6	9,96	—	6,1	4,9	3,4	—0,36	2,65	3,25	4,15	—	6,85
Ableiter FKH-Nr. 6	+	162,5	26,1	—	8,3	6,1	4,9	0	3,5	4,8	6,0	—	10,1
Fabrikat B Nr. 1	—	164,0	31,6	—	14,0	9,15	5,2	+0,92	4,9	7,15	8,35	—	14,0
Ableiter FKH-Nr. 7	+	165,2	21,9	—	7,7	4,7	3,8	—0,1	2,9	3,8	5,3	—	8,35
Fabrikat B Nr. 2	—	166,8	28,7	—	11,9	9,2	6,2	+0,4	4,9	6,1	8,2	—	11,5
Ableiter FKH-Nr. 11	+	173,8	14,85	—	7,65	6,05	4,2	—0,46	3,5	4,7	5,9	—	11,6
Fabrikat C Nr. 1	—	170,0	14,1	—	8,5	6,8	4,7	0	3,5	4,4	6,06	—	11,75
Ableiter FKH-Nr. 12	+	186,4	15,2	—	10,5	8,8	7,2	+0,05	5,4	7,02	8,85	—	14,8
Fabrikat C Nr. 2	—	184,2	10,85	—	7,7	6,1	5,0	—0,65	3,85	5,3	7,2	—	11,85

a) die *95-%- und die 5-%-Überschlagspannungen bzw. Ansprechspannungen u* bzw. ihre prozentuale Abweichung Δ gegenüber dem Mittelwert (bei symmetrischen Kurven dem 50-%-Wert),

b) die *90-%- und 10-%-Überschlag- bzw. Ansprechspannungen u* bzw. ihre prozentuale Abweichung Δ gegenüber dem Mittelwert (bei symmetrischen Kurven dem 50-%-Wert),

c) für die Ableiter die *84-%- und 16-%-Ansprechspannungen* und ihre Abweichungen gegen den Mittelwert. Diese Werte decken sich mit dem Streuwert σ einer Gaußschen Verteilung (Gl. 1), sofern die Verteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz als gerade Linie erscheint, d. h. sofern die gemessene Verteilung einer Gaußschen Verteilung entspricht. Die mittlere quadratische Abweichung σ der Messwerte x_i vom Mittelwert x_m ist wie folgt definiert:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - x_m)^2 \qquad n \text{ Anzahl Messwerte} \tag{2}$$

Der Wert σ einer Gaußschen Verteilung lässt sich im Wahrscheinlichkeitsnetz sehr einfach bestimmen aus den Spannungen, welche die schräge Gerade bei den Summenhäufigkeiten 16 % und 84 % anzeigt.

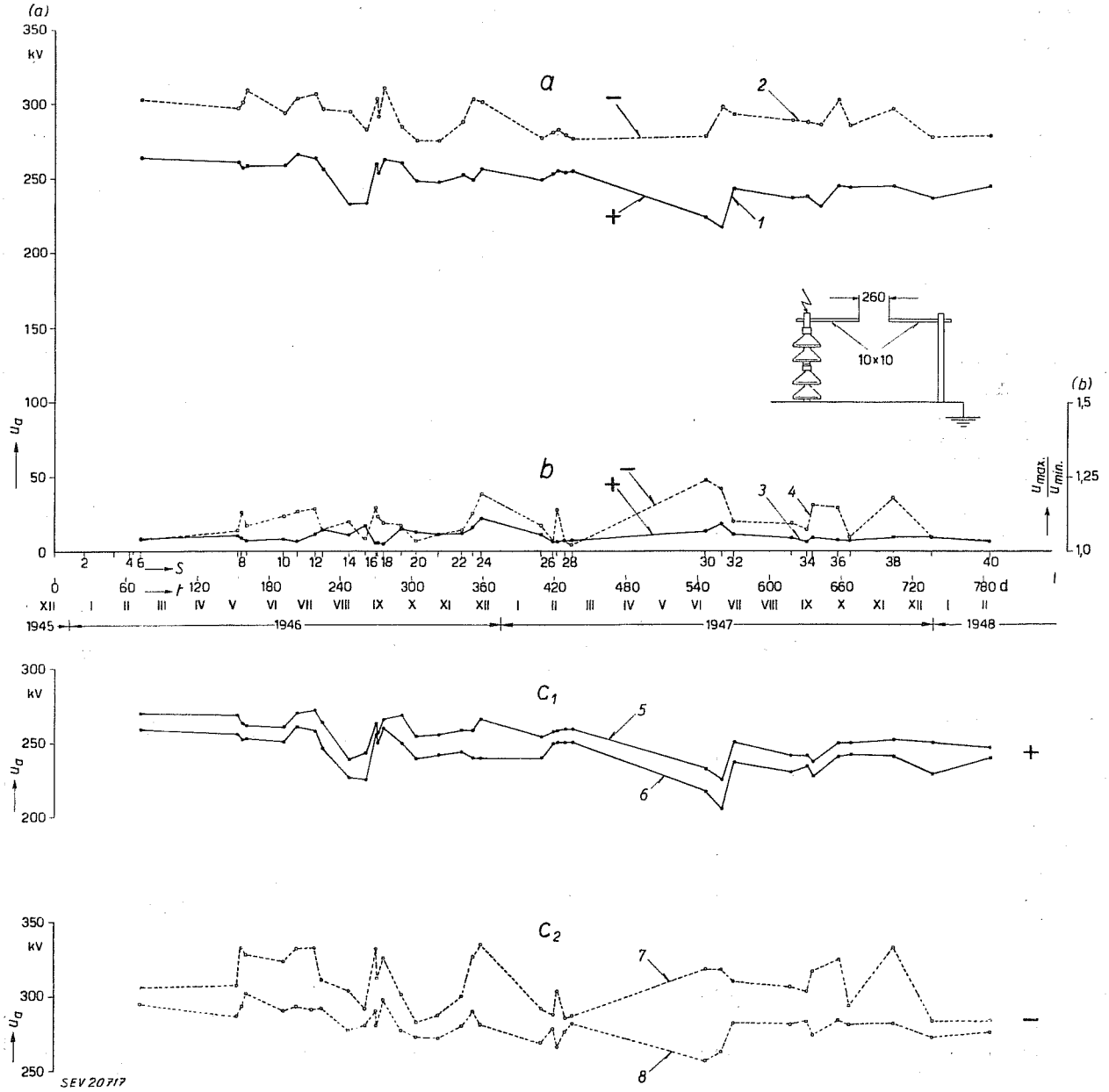


Fig. 17
Auf normale Luftdichte (760 mm Hg, 20 °C) reduzierte Ansprechspannung der Stabfunkenstrecke in Fig. 6
a, b, c wie in Fig. 11

Die 95-%-, 90-%- bzw. 84-%-Spannungen können als *Näherungen* für die Begriffe der *100-%-Überschlag- bzw. Ansprechspannung* gelten.

Die 5-%-, 10-%- bzw. 16-%-Spannungen *nähern sich* der «*Null-%-Spannung*», d. h. der Spannung, bei der überhaupt nie mehr ein Überschlag auftritt, selbst bei sehr grosser Stosszahl. Dieser Grenzwert der Spannung ist theoretisch nur dann definiert,

wenn die restliche, für ihn noch gültige kleine Überschlagzahl angegeben wird. Die Werte der 1-%- und 1-‰-Spannungen sind noch wesentlich verschieden voneinander. Es ist deshalb theoretisch schwierig, von einer sog. «Haltespannung», oder «Null-%-Spannung» zu reden, bei der auch bei beliebig grosser Stosszahl kein einziger Überschlag entstehen darf, denn da es sich um einen Asymptotwert der Spannung handelt, liegt er theoretisch nicht fest. Technisch wird unter dem Begriff der «Haltespannung» eine solche Spannung verstanden, bei welcher ein bestimmter kleiner Prozentsatz Überschläge noch zugelassen ist, z. B. die 1-%-, 5-%- oder 10-%-Spannung. Es wäre demgemäss klarer, nicht von «Haltespannung», sondern von der X-%-Spannung zu sprechen, für welche der Begriff gemeint ist.

Die gleiche Überlegung gilt natürlich auch für den obern Grenzwert der Ansprechwahrscheinlichkeit, d. h. für die sog. «100-%-Spannung». Sie ist in Wirklichkeit eine 90-%-, 95-%- oder 99-%-Spannung, und es ist theoretisch unrichtig, sie als 100-%-

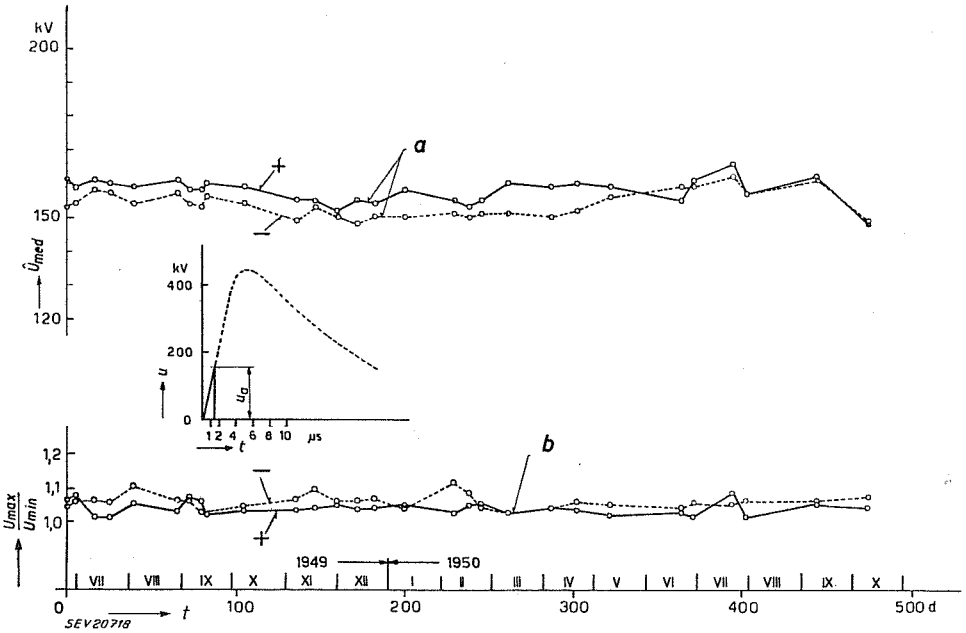


Fig. 18

Gemessene, nicht reduzierte Ansprechspannung des Ableiters Nr. 1, Fabrikat A

a positive und negative Mittelwerte aus jeder Mess-Serie — *b* Verhältnis Maximum zu Minimum zu jeder Mess-Serie

u	Spannung	$\frac{U_{max}}{U_{min}}$	Verhältnis Maximum zu Minimum jeder Mess-Serie
t	Zeit	U_{med}	Mittelwert der Ansprechspannung pro Mess-Serie
u_a	Ansprechspannung		

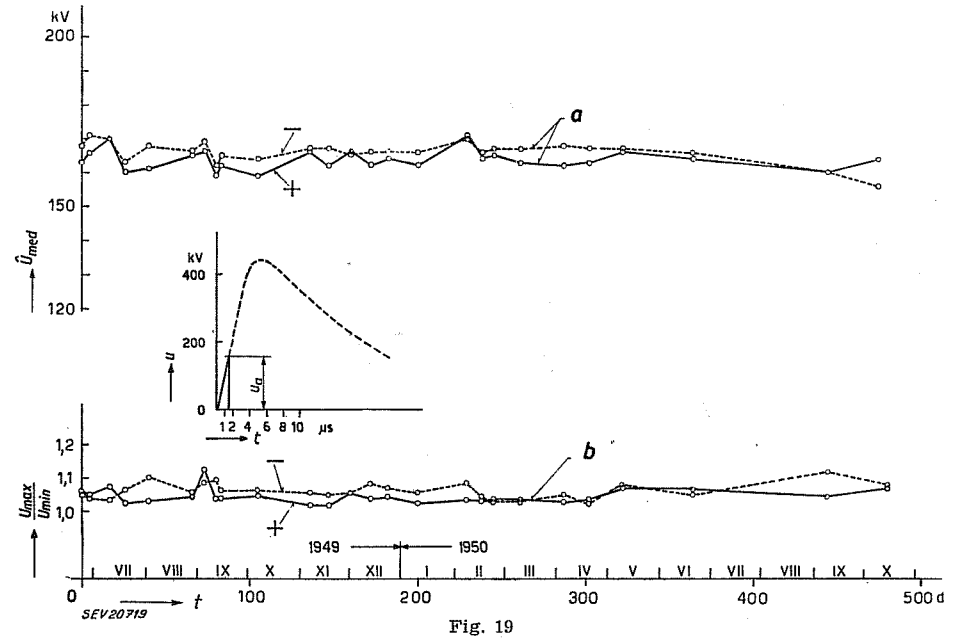


Fig. 19

Gemessene, nicht reduzierte Ansprechspannung des Ableiters Nr. 2, Fabrikat A
Bezeichnungen siehe Fig. 18

Spannung zu bezeichnen, da der prozentual nur noch sehr kleine Schritt in der Häufigkeit bis 100 % Überschläge in der Spannung einen theoretisch noch grossen Schritt bedeutet.

Wo die Verteilungskurven sich der Gaußschen Verteilung stark nähern, was am einfachsten daraus ersichtlich wird, dass sich die Verteilungskurve auf dem Wahrscheinlichkeitsnetz einer geraden Linie

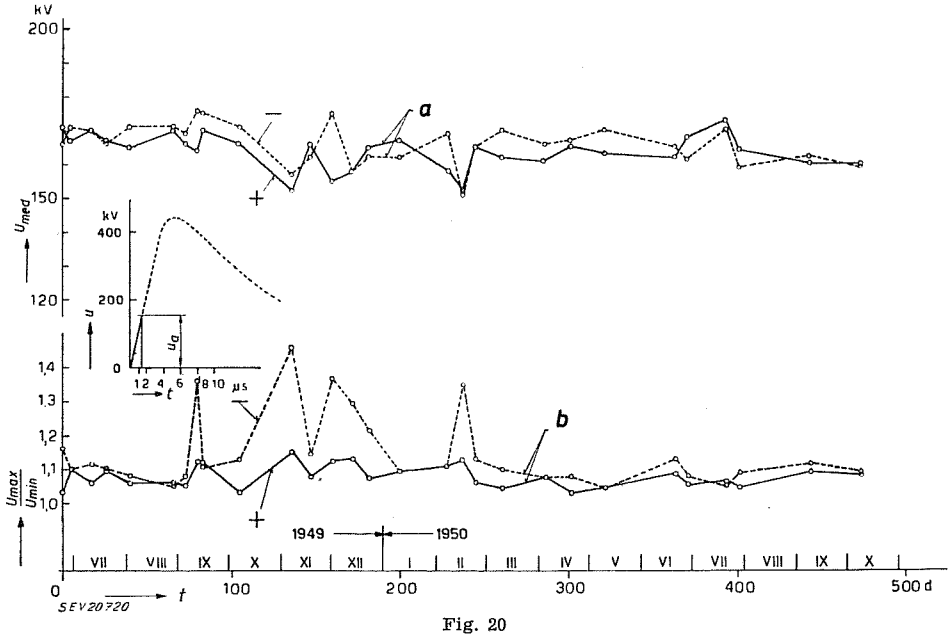


Fig. 20
Gemessene, nicht reduzierte Ansprechspannung des Ableiters Nr. 6, Fabrikat B
Bezeichnungen siehe Fig. 18

Mathematisch wird der Begriff der Streuung eindeutig definiert als die mittlere quadratische Abweichung σ. Diese entspricht der $\pm$-Abweichung der 84-%- und 16-%-Spannungen vom Mittelwert.

Es ist aus der Gaußschen Kurve sofort ersichtlich, dass z. B. die Abweichung der 5-%- und

nähert, sind die Abweichungen der einzelnen Messwerte vom Mittelwert nach Gauss rein zufällig bedingt. Dies heisst technisch: Es ist keine unbeachtete Variable in den Beobachtungen enthalten. Wo jedoch die Verteilungskurve im Wahrscheinlichkeitsnetz sich nicht als gerade Linie zeigt, bestehen

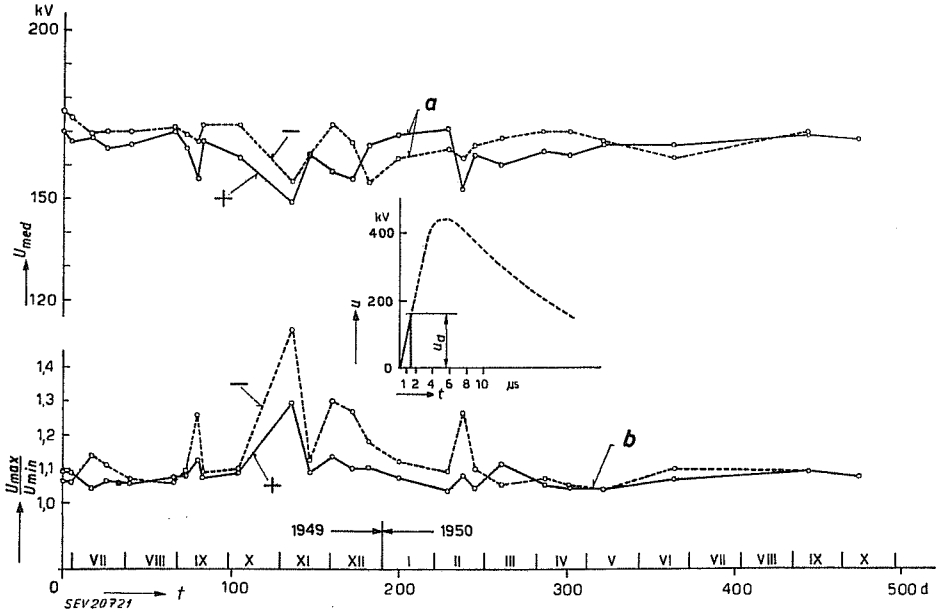


Fig. 21
Gemessene, nicht reduzierte Ansprechspannung des Ableiters Nr. 7, Fabrikat B
Bezeichnungen siehe Fig. 18

95-%-Werte vom Mittelwert rund zweimal grösser ist als das Streumass σ (genau 1,965mal).

Über die *Ursache der Streuung* ist folgendes zu bemerken:

systematische Einflüsse einer nicht kontrollierten Variabeln auf den Messwert, die sich über die Beobachtungsdauer ändern. Ein solcher Einfluss ist z. B. die Luftfeuchtigkeit, die deshalb nicht korri-

giert wurde, weil die Grösse des Einflusses insbesondere bei Überschlägen in der Front von Stoßspannungen nicht feststeht und sicher viel kleiner ist als bei voller Stoßspannung. Er kann somit nur Fehler von wenigen Prozenten ausmachen. Der Vergleich mit den Wetterdaten, die ausführlich notiert und in den Tabellen I...III zusammengestellt wurden, hat keine Klärung gebracht, weder für die Innenraum- noch für die Freiluft-Prüfobjekte. Ein Einfluss des Regens scheint zwar bei den Serien Nr. 3 und 31 offenbar vorhanden zu sein, indem die Mittelwerte dieser Mess-Serie ausgesprochen tiefer liegen. Doch ist interessant, dass auch die Überschlagspannung der trockenen, im geschlossenen Prüfraum montierten Innenraumdurchführungen an diesem Tag tief ist. Auch die Stabfunkenstrecke zeigt an diesem Tag einen tiefen positiven Mittelwert der Serie 31, trotzdem hier kein nasser Kriechweg entstehen kann. Die negative Spannung lässt jedoch keinen solchen Einfluss erkennen. Wenn ein kleiner Einfluss des Regens auf die Überschlagspannung der Isolatoren vorhanden ist, so ist er doch technisch für die hier untersuchten Prüfobjekte bedeutungslos. Die Tatsache, dass bei den Ableiterfunkenstrecken die Streuung um so kleiner wird, je besser vakuumdicht abgeschlossen sie sind, deutet anderseits doch darauf hin, dass irgendwelche Witterungseinflüsse auf die offenen Funkenstrecken und

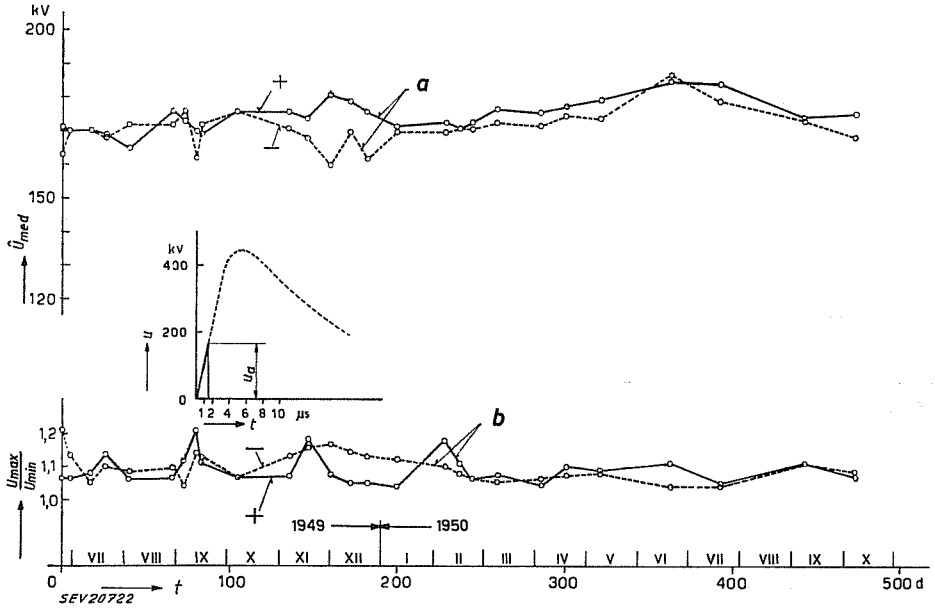


Fig. 22
Gemessene, nicht reduzierte Ansprechspannung des Ableiters Nr. 11, Fabrikat C
Bezeichnungen siehe Fig. 18

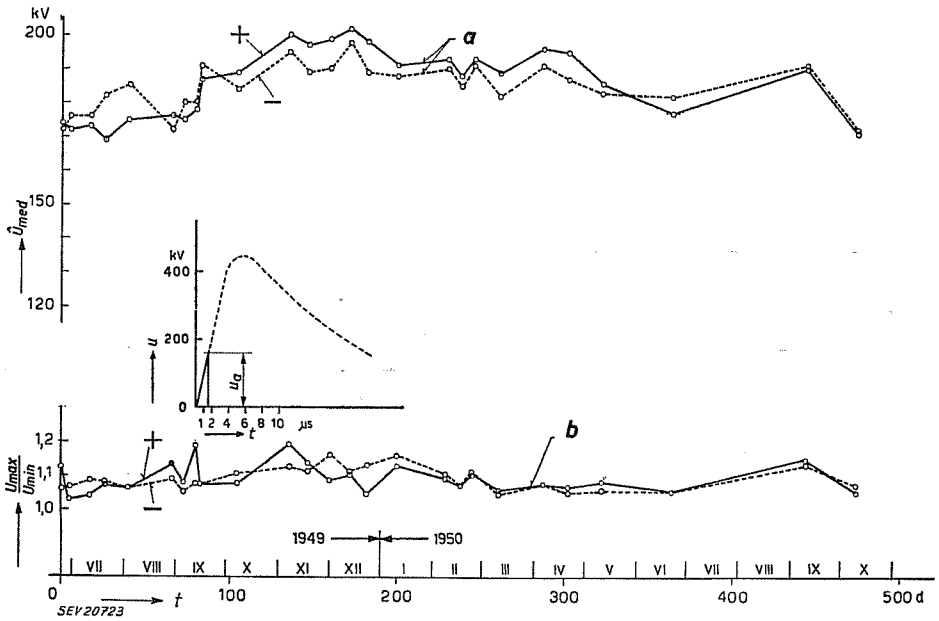


Fig. 23
Gemessene, nicht reduzierte Ansprechspannung des Ableiters Nr. 12, Fabrikat C
Bezeichnungen siehe Fig. 18

Schlagweiten bestehen. Welcher Art diese sind, ist uns aber heute unbekannt.

Die Kurven der Fig. 49 betreffen den Stützisolator, die Stabfunkenstrecke (260 mm Schlagweite)

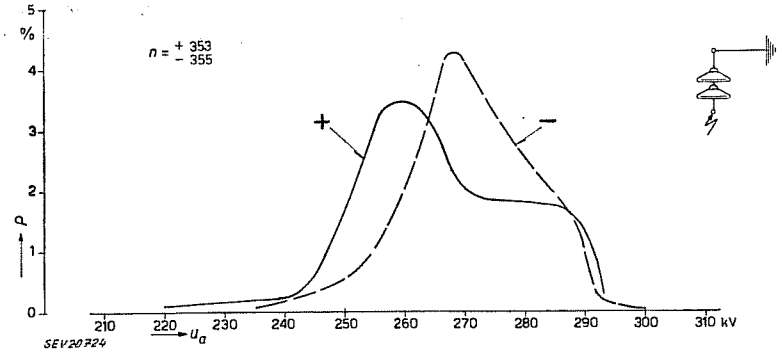


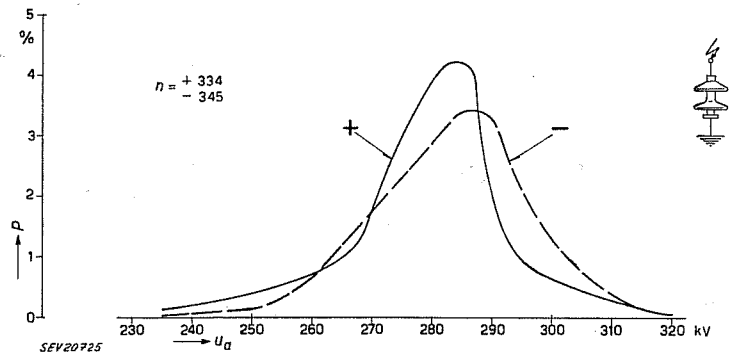
Fig. 24
Häufigkeitskurve der Überschlagspannung der Hängekette in Fig. 1
n Anzahl der Messungen; u_a Ansprechspannung; p Häufigkeit in % pro kV Spannungsintervall

6. Einfluss der Steilheit der Stoßspannung auf die Überschlag- und Ansprechspannungen

Um den eventuell vorhandenen Einfluss der Steilheit der Stoßspannung auf die Höhe der Überschlag- und Ansprechspannungen festzustellen, wurden die Prüfobjekte Stoßspannungen von verschiedener Frontsteilheit unterworfen. Dabei wurde auch Wert gelegt auf relativ flache Fronten von der Grössenordnung von wenigen kV/µs. Die Resultate dieser Messungen sind in den Fig. 49...53 zusammengefasst.

und schliesslich eine den Dauerversuchen nicht unterworfene symmetrierte Spitze–Platte-Funkenstrecke, bei der durch Antiparallelschalten zweier gleicher Anordnungen gleiche Spannung für beide Stoßpolaritäten erreicht werden sollte. Für positive Stösse lässt sich eine Kurve relativ gut zeichnen und es erscheint die bekannte Zunahme der Überschlagspannung mit grösserer Steilheit. Für negative Stösse streuen die Messpunkte der nicht symmetrischen Anordnungen derart, dass sich keine Kurve zeichnen lässt.

Fig. 25
Häufigkeitskurve der Überschlagspannung des Stützers in Fig. 2
Bezeichnungen siehe Fig. 24



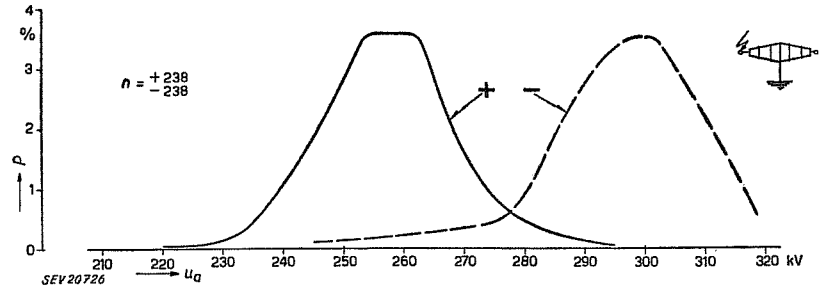


Fig. 26
Häufigkeitskurve der Überschlagspannung der Durchführung in Fig. 3
Bezeichnungen siehe Fig. 24

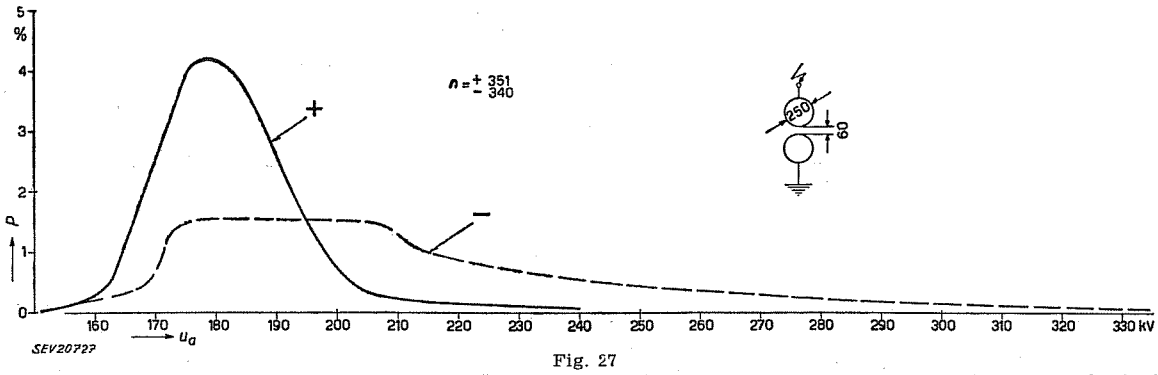


Fig. 27
Häufigkeitskurve der Ansprechspannung der Kugelfunkenstrecke von 250 mm Durchmesser nach Fig. 4
Bezeichnungen siehe Fig. 24

Die Kurven der Fig. 50 zeigen den viel kleineren Steilheitseinfluss der Kugelfunkenstrecke. Während die Werte für die 125-mm-Kugeln wenig streuen, kann bei den 250-mm-Kugeln nur der Bereich der

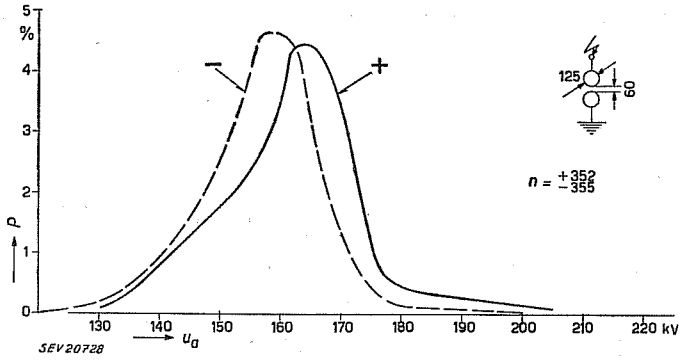


Fig. 28
Häufigkeitskurve der Ansprechspannung der vertikalachsigen (nicht gereinigten) Kugelfunkenstrecke von 125 mm Durchmesser nach Fig. 5
Bezeichnungen siehe Fig. 24

Streuung angegeben werden. Die Resultate decken sich mit jenen der Dauerversuche, wenn auch bei dieser einzelnen Mess-Serie nicht so hohe Extremwerte festgestellt wurden, wie im Dauerversuch. Die Figuren 51...53 zeigen schliesslich für die drei untersuchten Ableiter-Fabrikate den Einfluss der Steilheit der

7. Bedeutung der Messungen für die Koordination der Isolation mit dem Überspannungschutz

Es ist klar, dass von der Seite des Betriebes von Hochspannungsanlagen die Forderung gestellt wer-

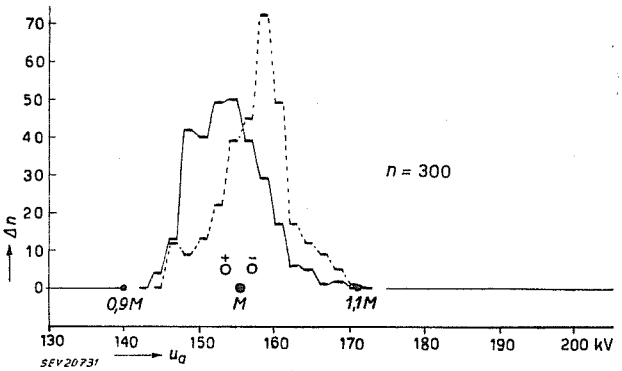
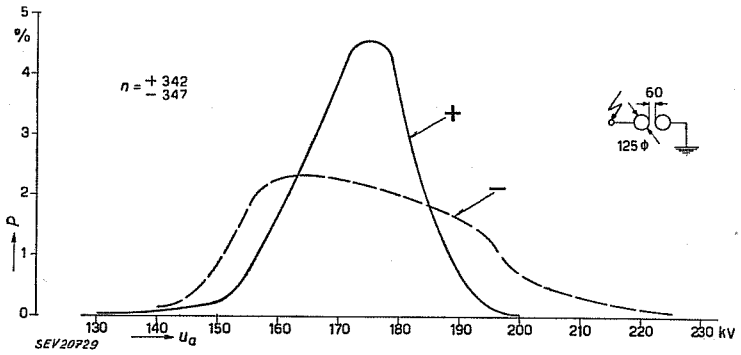


Fig. 31
Häufigkeitskurve der Ansprechspannung des Ableiters Nr. 1, Fabrikat A

u_a Ansprechspannung; Δn Anzahl Messungen pro Spannungsstufe (2 kV); n Anzahl Messungen total
——— positive Stösse
------ negative Stösse
+ − positiver und negativer Mittelwert der
o o Ansprechspannung
● Gesamt-Mittelwert der Ansprechspannung
M

den muss, dass der Überspannungschutz *jederzeit* wirksam sein soll. Das bedingt ohne weiteres eine Abstufung der Ansprechspannungen der Ableiter mit den Überschlagspannungen der Isolation, die

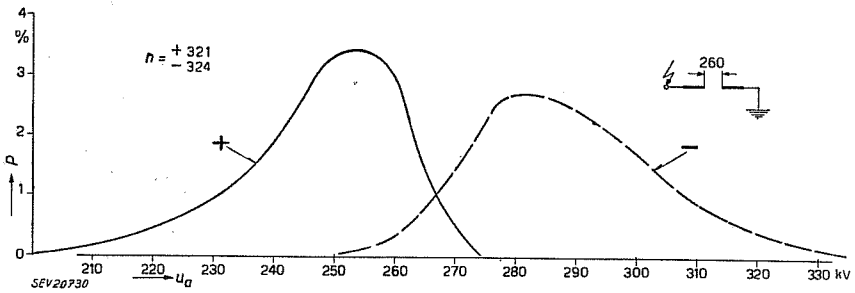
Fig. 29
Häufigkeitskurve der Ansprechspannung der horizontalachsigen (gereinigten) Kugelfunkenstrecke von 125 mm Durchmesser nach Fig. 5
Bezeichnungen siehe Fig. 24



Stoßspannung auf die Ansprechspannung. Der Einfluss ist ähnlicher Grösse, wie bei der Kugelfunkenstrecke; er bleibt eher noch kleiner. Bedenkt man, dass bei den Dauerversuchen die Steilheit nur sehr wenig ändert, und zwar zwischen den einzelnen

jederzeit vorhanden sein muss. Es erhebt sich somit die Frage nach der *Differenz* dieser beiden Spannungen im Verlauf der Zeit. Wäre die Lage z. B. so, dass die Ansprechspannungen der Ableiter in genau gleicher Art und Grösse mit der Zeit änderten wie

Fig. 30
Häufigkeitskurve der Ansprechspannung der Stabfunkenstrecke nach Fig. 6
Bezeichnungen siehe Fig. 24



Stössen als auch zwischen den Mess-Serien, so ist ersichtlich, dass die Streuung der Steilheit keine Erklärung für die grosse Streuung der Messwerte bei den Dauerversuchen abgeben kann.

die Überschlagspannungen der zu schützenden Isolatoren, so wäre die Streuung der Mittelwerte ohne praktische Bedeutung und es müsste nur die in irgendeinem Zeitpunkt messbare Streuung inner-

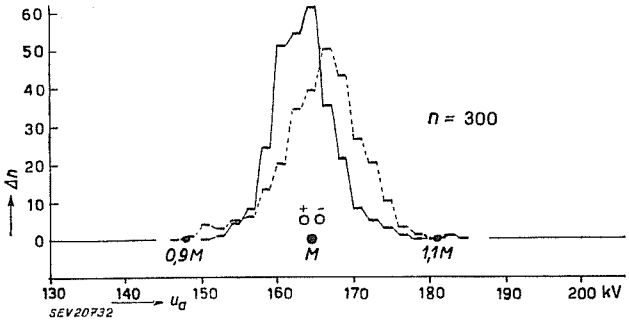


Fig. 32
Häufigkeitskurve der Ansprechspannung des Ableiters Nr. 2, Fabrikat A
Bezeichnungen siehe Fig. 31

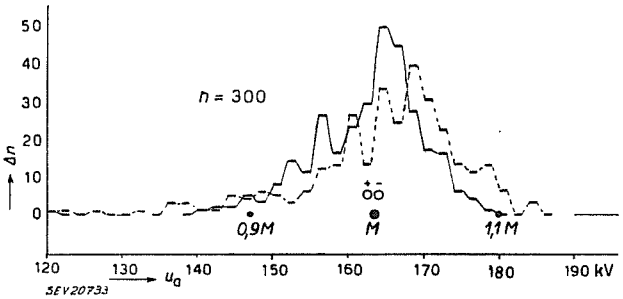


Fig. 33
Häufigkeitskurve der Ansprechspannung des Ableiters Nr. 6, Fabrikat B
Bezeichnungen siehe Fig. 31

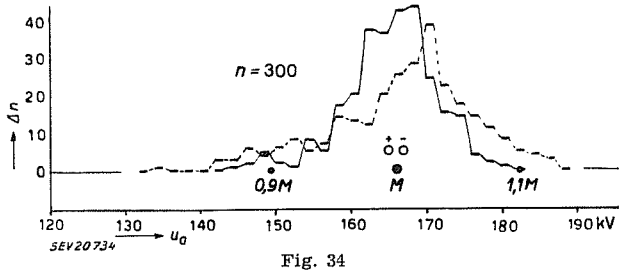


Fig. 34
Häufigkeitskurve der Ansprechspannung des Ableiters Nr. 7, Fabrikat B
Bezeichnungen siehe Fig. 31

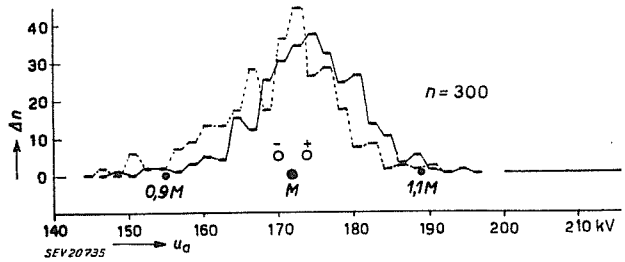


Fig. 35
Häufigkeitskurve der Ansprechspannung des Ableiters Nr. 11, Fabrikat C
Bezeichnungen siehe Fig. 31

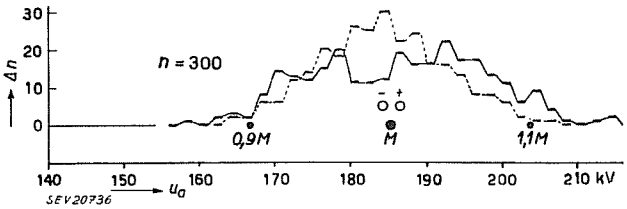


Fig. 36
Häufigkeitskurve der Ansprechspannung des Ableiters Nr. 12, Fabrikat C
Bezeichnungen siehe Fig. 31

halb dieser Serien für die Abstufung berücksichtigt werden. Leider liegt das Problem aber nicht so: Aus den Figuren ergibt sich, dass schon der Verlauf der Mittelwerte der verschiedenen Isolatoren nicht der gleiche ist. Bei den Ableitern ist im weitern heute praktisch nur noch mit luftdicht gekapselten Funkenstrecken zu rechnen. Ihre Streuung scheint vom Wetter sehr wenig abhängig zu sein. Wird auch die zeitliche konstante Restspannung der Ableiter in die Betrachtung einbezogen, so ist sofort ersicht-

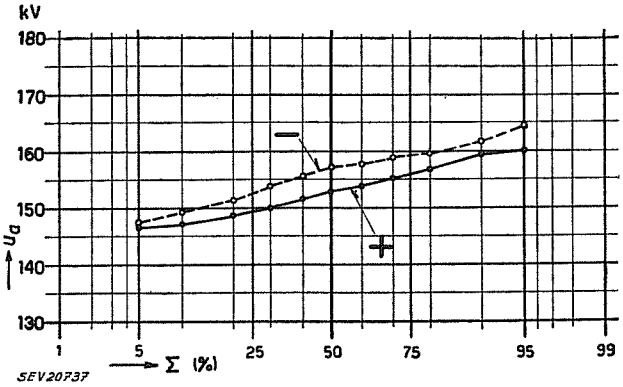


Fig. 37
Summenhäufigkeit der Ansprechspannungen von Ableiter Nr. 1, Fabrikat A, auf Wahrscheinlichkeitsnetz gezeichnet
Σ prozentuale Summenhäufigkeit des Ansprechens bei Spannungen unterhalb des Ordinatenwertes; u_a Ansprechspannungen

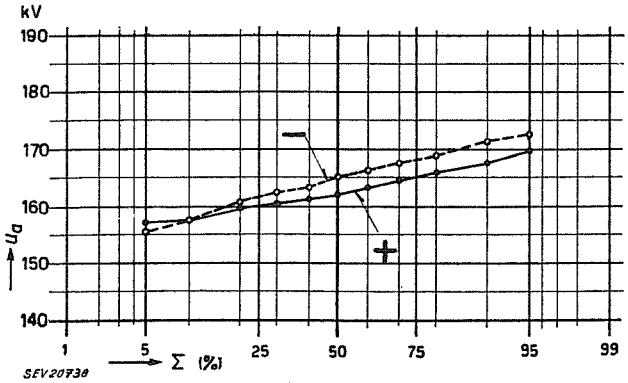


Fig. 38
Summenhäufigkeit der Ansprechspannungen von Ableiter Nr. 2, Fabrikat A, auf Wahrscheinlichkeitsnetz gezeichnet
Bezeichnungen siehe Fig. 37

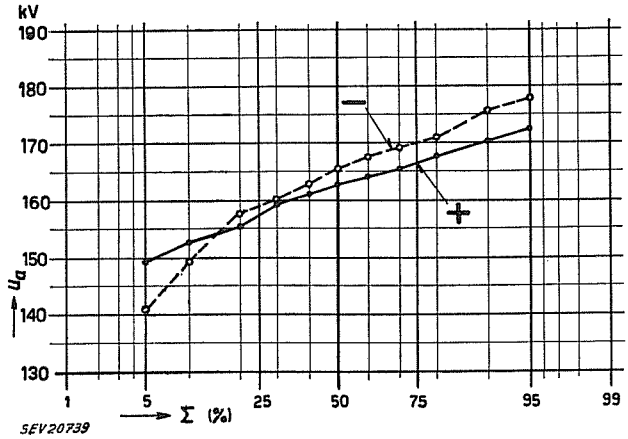


Fig. 39
Summenhäufigkeit der Ansprechspannungen von Ableiter Nr. 6, Fabrikat B, auf Wahrscheinlichkeitsnetz gezeichnet
Bezeichnungen siehe Fig. 37

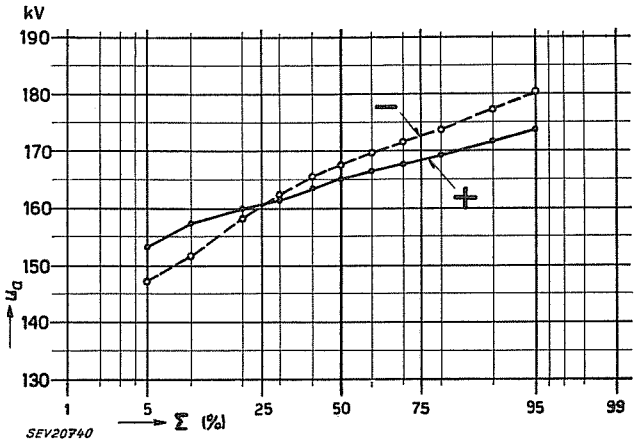


Fig. 40
Summenhäufigkeit der Ansprechspannungen von Ableiter Nr. 7, Fabrikat B, auf Wahrscheinlichkeitsnetz gezeichnet
Bezeichnungen siehe Fig. 37

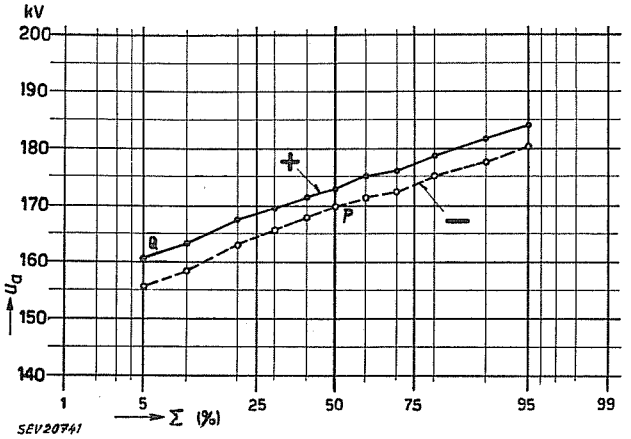


Fig. 41
Summenhäufigkeit der Ansprechspannungen von Ableiter Nr. 11, Fabrikat C, auf Wahrscheinlichkeitsnetz gezeichnet
P 50 %-Ansprechspannung bei negativen Stössen
Q 5 %-Ansprechspannung bei positiven Stössen
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 37

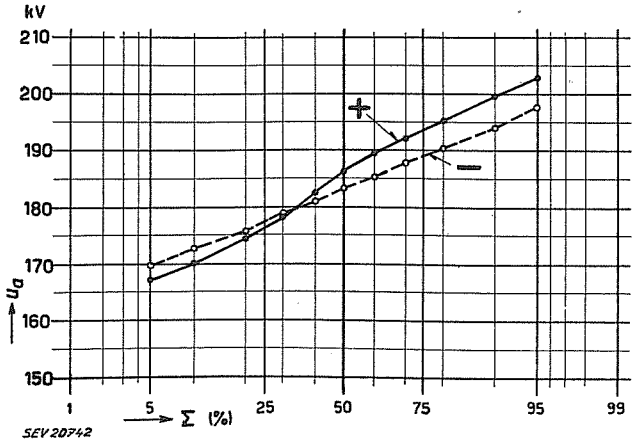


Fig. 42
Summenhäufigkeit der Ansprechspannungen von Ableiter Nr. 12, Fabrikat C, auf Wahrscheinlichkeitsnetz gezeichnet
Bezeichnungen siehe Fig. 37

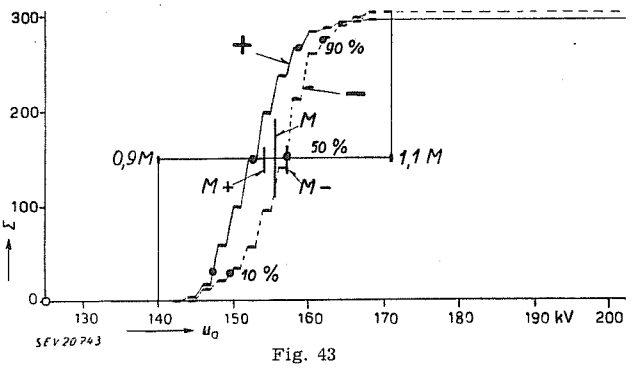


Fig. 43
Summenhäufigkeit der Ansprechspannungen von Ableiter Nr. 1, Fabrikat A, in linearer Koordinatendarstellung
u_a Ansprechspannung; Σ Summenhäufigkeit des Ansprechens bei Spannungen unterhalb des Abzissenwertes
M+ positiver Mittelwert der Ansprechspannung
M— negativer Mittelwert der Ansprechspannung
M Gesamt-Mittelwert der Ansprechspannung

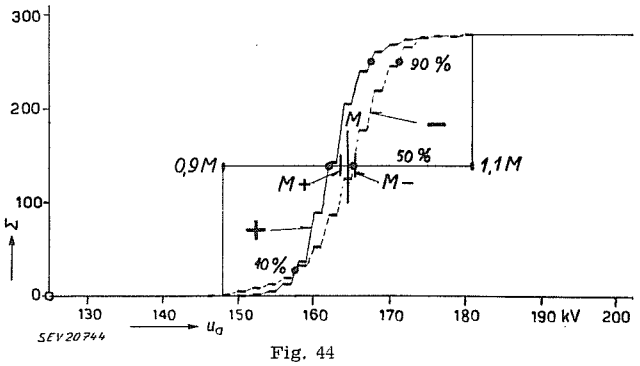


Fig. 44
Summenhäufigkeit der Ansprechspannungen von Ableiter Nr. 2, Fabrikat A, in linearer Koordinatendarstellung
Bezeichnungen siehe Fig. 43

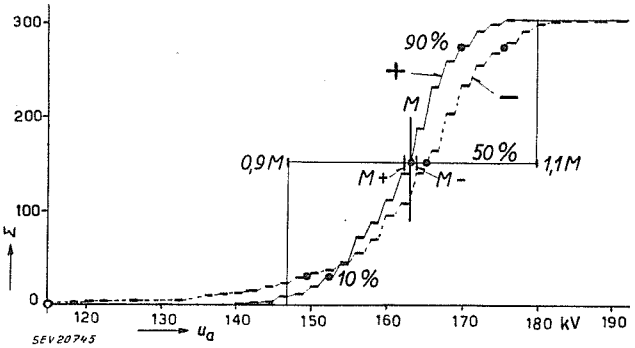


Fig. 45
Summenhäufigkeit der Ansprechspannungen von Ableiter Nr. 6, Fabrikat B, in linearer Koordinatendarstellung
Bezeichnungen siehe Fig. 43

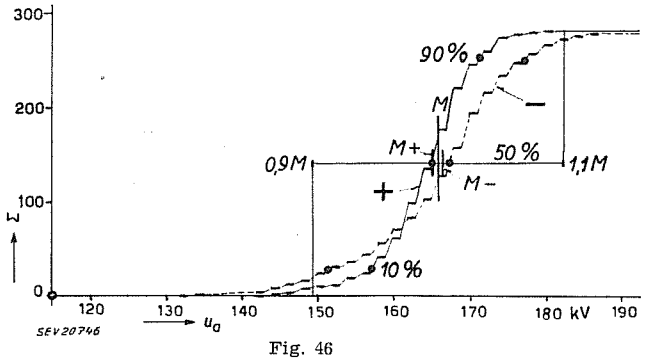


Fig. 46
Summenhäufigkeit der Ansprechspannungen von Ableiter Nr. 7, Fabrikat B, in linearer Koordinatendarstellung
Bezeichnungen siehe Fig. 43

lich, dass bei der Bemessung der Abstufung die volle, d. h. die unter variabler Luftdichte entstehende Streuung der Isolator-Überschlagspannungen zu berücksichtigen ist. In den Kurven der Isolatoren und offenen Funkenstrecken sind demgegenüber stets die reduzierten Werte dargestellt.

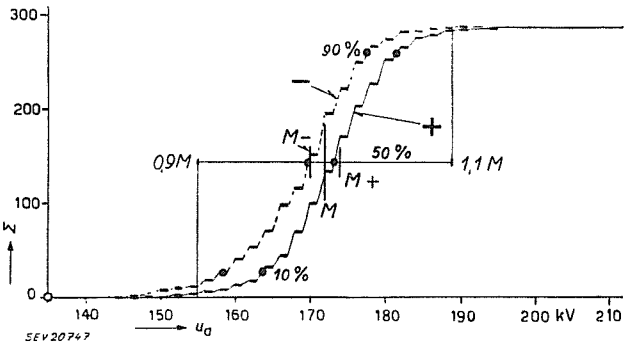


Fig. 47
Summenhäufigkeit der Ansprechspannungen von Ableiter Nr. 11, Fabrikat C, in linearer Koordinatendarstellung
Bezeichnungen siehe Fig. 43

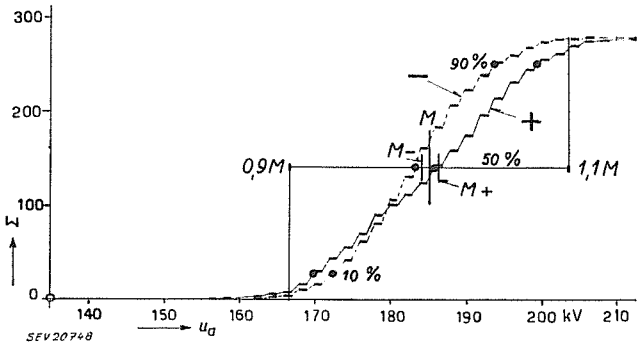


Fig. 48
Summenhäufigkeit der Ansprechspannungen von Ableiter Nr. 12, Fabrikat C, in linearer Koordinatendarstellung
Bezeichnungen siehe Fig. 43

Dabei liegt im Ausdruck «voll bemessen» immer noch die Möglichkeit, sich mit einem wirtschaftlich gerechtfertigten Prozentsatz von Versagern abzufinden, d. h. die Abstufung nicht vollkommen, sondern wirtschaftlich optimal zu machen.

Bei der Betrachtung des Überspannungsschutzes einer Hochspannungsanlage erhebt sich die weitere Frage, wie sich ein *grosser Komplex von Isolatoren* aller Art im Laufe der Zeit verhält. Zunächst ist bei Stossversuchen in Anlagen festgestellt worden, dass die 50-%-Überschlagspannung einer Vielzahl von *n* unter sich genau gleichen Isolatoren 10...15 % tiefer liegt als die 50-%-Überschlagspannung eines einzelnen solchen Isolators.

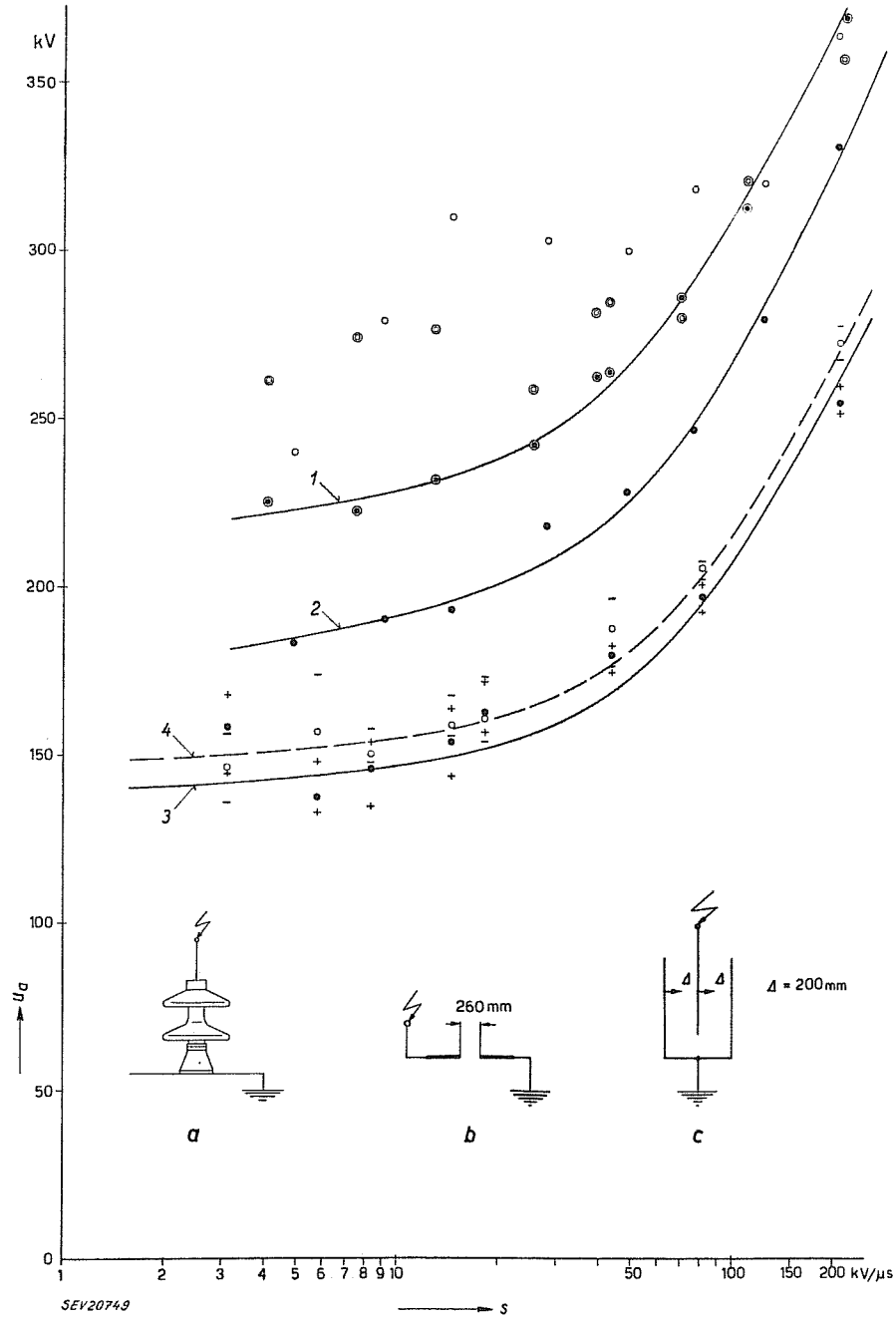


Fig. 49
Überschlagspannung des Stützisolators und zweier Stabfunkenstrecken in Funktion der Steilheit der Stoßspannung
u_a Ansprechspannung
s Steilheit der Stoßspannung
a) Stützilosator nach Fig. 2
Messpunkte bei positivem Stoss (Kurve 1)
◉ Messpunkte bei negativem Stoss
b) Stabfunkenstrecke nach Fig. 6
• Messpunkte bei positivem Stoss (Kurve 2)
○ Messpunkte bei negativem Stoss
c) symmetrierte Stabfunkenstrecke
• Messpunkte bei positivem Stoss (Kurve 3)
○ Messpunkte bei negativem Stoss (Kurve 4)

Dieses Resultat ist sofort verständlich, wenn das Problem wahrscheinlichkeitstheoretisch betrachtet wird. Dies ist nötig, stellt doch bereits der Begriff der 50-%-Spannung einen Wahrscheinlichkeitsbegriff dar, in welchem zum Ausdruck kommt, dass die Überschlagspannung streut, und dass je nach deren Höhe prozentual mehr oder weniger Überschläge entstehen, von 0 % bis zu 100 %. Werden z. B. zwei parallele Isolatoren mit einer Spannung gestossen, die an einem der beiden Isolatoren, wenn er allein wäre, 50 % Überschläge und 50 % Nichtüberschläge ergäbe, so heisst diese Spannung die 50-%-Überschlagspannung *eines* Isolators. Werden beide Isolatoren zugleich gestossen, so wird einer der beiden bei 50 % der Stösse zum Überschlag kommen. Bei den restlichen 50 % der Stösse besteht jetzt jedoch die Möglichkeit, dass der zweite Isolator überschlägt. Es werden nur 25 % aller Stösse zu keinem Überschlag, weder am ersten noch am zweiten Isolator führen. Die 50-%-Spannung eines Isolators ist also die 75-%-Überschlagspannung von zwei Isolatoren. Es lässt sich so zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit p_n des Überschlages an irgendeinem Isolator in einer Parallelschaltung von n Isolatoren sich wie folgt berechnet [2]):

$$p_n = 1 - (1 - p_1)^n \qquad (3)$$

wo p_1 Wahrscheinlichkeit des Überschlages beim Stossen eines einzelnen Isolators

p_n Wahrscheinlichkeit des Überschlages beim gleichzeitigen Stossen von n Isolatoren

n Anzahl zugleich gestossene Isolatoren

p_n ist stets grösser als p_1. Wenn z. B. $n = 100$ $p_1 = 50$ %, so ist z. B.

$$p_n = 1 - 0{,}5^{100} \approx 1 - 10^{-30} \approx 1{,}0$$

Es wird somit praktisch bei jedem Stoss ein Überschlag auftreten. Umgekehrt lässt sich die Wahrscheinlichkeit p_1 des Überschlages eines einzelnen gestossenen Isolators aus der Wahrscheinlichkeit p_n des Überschlages an einer *Vielzahl* von n Isolatoren berechnen aus:

$$1 - p_1 = \sqrt[n]{1 - p_n} \quad \text{oder} \quad p_1 = 1 - \sqrt[n]{1 - p_n} \qquad (4)$$

Wenn z. B. $n = 100$ und $p_n = 50$ % ist, so ist

$$p_1 = 1 - \sqrt[100]{0{,}5} = 1 - 0{,}993 \approx 0{,}007$$

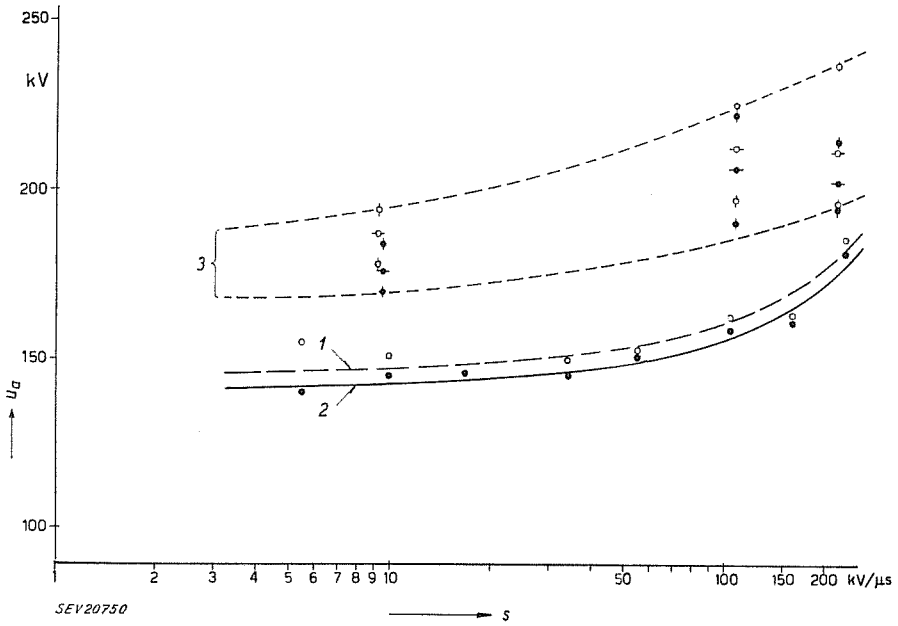


Fig. 50
Ansprechspannung zweier Kugelfunkenstrecken in Funktion der Steilheit der Stoßspannung

u_a Ansprechspannung
s Steilheit der Stoßspannung
a Kugelfunkenstrecke von 125 mm ϕ nach Fig. 5
● Messpunkte bei positivem Stoss (Kurve 2)
○ Messpunkte bei negativem Stoss (Kurve 1)
b Kugelfunkenstrecke von 250 mm ϕ nach Fig. 4
Messpunkte bei positivem Stoss
Messpunkte bei negativem Stoss
3 Streubereich

Zur *50-%-Spannung der Anlage* gehört somit hier die *0,7-%-Spannung eines Isolators.* Das heisst praktisch: Die 50-%-Spannung einer Anlage erzeugt bei der Prüfung eines Einzelisolators weniger als 1 % Überschläge an diesem; sie wäre technisch schon mit dem ungenauen Ausdruck «Haltespannung» zu bezeichnen.

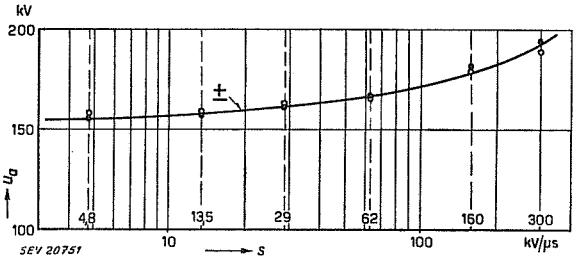


Fig. 51
Ansprechspannung u_a des Ableiters Nr. 2, Fabrikat A, in Funktion der Steilheit s der Stoßspannung

Betrachten wir nun andererseits die *Streuung* der Überschlagspannung einer Vielzahl gleicher Isolatoren, d. h. einer «Anlage», dann lässt sich physikalisch vermuten, dass ausgehend z. B. von der 50-%-Spannung der Anlage bei steigender Stoßspannung die Wahrscheinlichkeit eines Überschlages an irgendeinem der vielen (n) parallelen Isolatoren sofort gross wird, d. h. die Streuung vom 50-%-Wert bis zum 100-%-Wert ist offenbar kleiner als beim einzelnen Isolator. Wird umgekehrt die Stoßspannung reduziert, so sinkt die Wahrscheinlichkeit irgendeines Überschlages zunächst ebenfalls rasch,

[2]) siehe CIGRE-Bericht 1952, Nr. 322 von *H. Rohrer.*

doch lässt sich nicht ohne weiteres einsehen, was weiter passiert. Die Darstellung der nach den vorstehenden Gleichungen berechneten Wahrscheinlichkeitskurven, wie sie im erwähnten CIGRE-Bericht dargestellt wurden, ergibt interessanterweise für $n > 1$ im Wahrscheinlichkeitsnetz keine Gerade mehr, wenn auch für $n = 1$ eine solche Gerade entsprechend der Gaußschen Verteilung besteht. Entsprechend obiger Überlegung zeigen die Kurven jenes Berichts, dass der Unterschied der 95-%- oder 99-%-Spannungen grösser ist als der Unterschied der 5-%- oder 1-%-Spannungen, wenn ein Isolator und viele parallele Isolatoren verglichen werden. Da es sich bei der Koordination darum handelt, Überschläge an den Isolatoren zu vermeiden, ist die Haltespannung der Isolatoren in erster Linie interessant. Gerade für diese lässt sich aber leider nicht ohne weiteres angeben, ob ihre Streuung kleiner wird als beim Einzelisolator.

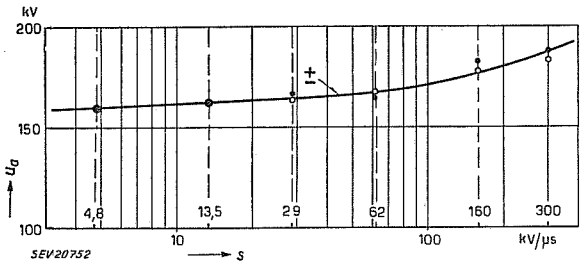


Fig. 52
Ansprechspannung u_a des Ableiters Nr. 7, Fabrikat B, in Funktion der Steilheit s der Stoßspannung

Es ist hier nicht der Ort, diese theoretisch interessanten Fragen zu diskutieren. Festgehalten zu werden verdient hier nur die praktische Konsequenz, dass in der Anlage die Überschlagspannung merklich kleiner wird als beim Einzelisolator, dass aber anderseits die Streuung der Anlage theoretisch nicht grösser wird als beim Einzelisolator. Es wäre ohne Zweifel wertvoll und interessant, Streuversuche statt an Einzelisolatoren direkt an einer Vielzahl gleicher Isolatoren durchzuführen. Die vorstehenden Versuche lassen das Resultat abschätzen, wie bereits dargelegt wurde.

Aus den Versuchen geht jedenfalls erneut hervor, wie wichtig es ist, das Spannungsintervall zwischen Schutzniveau der Ableiter und Isolationsniveau der Schlagweiten in Luft genügend gross zu dimensionieren, um eine Koordination in den *Anlagen* durchzuführen, und wieviel einfacher es ist, lediglich z. B. einen Transformator mit einem angebauten Ableiter gegen Überspannungen zu schützen.

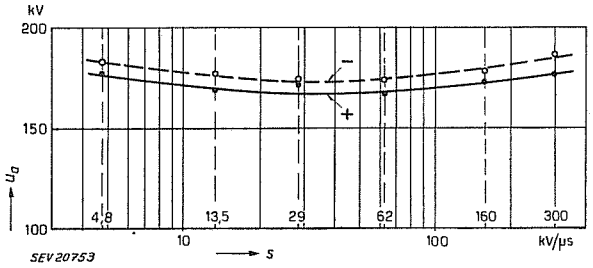


Fig. 53
Ansprechspannung u_a des Ableiters Nr. 12, Fabrikat C, in Funktion der Steilheit s der Stoßspannung

Das in den heutigen Koordinationsregeln des SEV festgelegte Spannungsintervall von 25 % zwischen 50-%-Spannungen des Schutzniveaus und des Luftisolationsniveaus trägt weder der Absenkung der Überschlagspannung infolge der Vielzahl paralleler Isolatoren, noch der zeitlichen Streuung der Mittelwerte Rechnung, da zur Zeit der Herausgabe der Regeln diese Erscheinungen noch gar nicht bekannt waren. Die neue Erkenntnis entstand beim Stossen ganzer Anlagen mit der fahrbaren Anlage der FKH, welches Vorgehen sich als ausserordentlich fruchtbar erwiesen hat zur Verwirklichung der praktischen Koordination in bestehenden Anlagen, unter den während dieser Messung vorhandenen atmosphärischen Bedingungen, wobei automatisch alle Einflüsse der Entfernungen und Dispositionen der Anlageteile berücksichtigt werden.

Die besprochenen Messungen wurden in der Versuchsstation Gösgen der Forschungskommission für Hochspannungsfragen des SEV und VSE von *E. Seylaz* und *H. Péter* ausgeführt und zum grossen Teil ausgewertet, wofür ihnen auch an dieser Stelle herzlich gedankt sei.

Adresse des Autors:
Prof. Dr. sc. techn. *K. Berger*, Versuchsleiter der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH), Seefeldstrasse 301, Zürich 8.

Fachschriften Druck ZÜRICH
AG. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei