Für die 6. Sitzung der KOK.

Oszillographische Untersuchung von Ueberspannungsschutzapparaten für Hochspannungsanlagen.

(von Dr. K. Berger, Ing. des SEV)

Generalsekretariat
des SEV & VSE
26. September 1932.

Oszillographische Untersuchung von Ueberspannungsschutzapparaten für Hochspannungsanlagen.

Von Dr. K. Berger, Ing. des SEV.

Zusammenfassung: Mit Hilfe eines Stossgenerators (Blitzgenerators) wurden in den Jahren 1930 und 1931 im Unterwerk Puidoux der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) eine Reihe moderner Ueberspannungsschutz-Apparate (Ableiter und Kondensatoren) auf ihre Schutzwirkung und Betriebssicherheit hin untersucht. Die in ihrer Dauer den atmosphärischen Ueberspannungen nachgeahmten Ueberspannungswellen wurden von der Stossquelle anfänglich über ein kurzes Stück der 132 kV-Leitung der SBB, später jedoch über ein besonderes Versuchs-Seil auf dem Gestänge derselben Leitung gegen das Unterwerk Puidoux geschickt. Um die untersuchten Apparate in betriebsmässiger Schaltung beobachten zu können, wurde das Versuchsseil von einem grossen Transformator im Unterwerk Puidoux unter Betriebsspannung (17 kV resp. 66 kV gegen Erde) gehalten.

Als Messgeräte dienten für Spannungs-und Strommessung die damals zur Verfügung stehenden zwei Kathodenstrahl-Oszillographen (KO) des SEV, sowie zur Kontrolle Kugelfunkenstrecken. Die Resultate werden durch Oszillogramm-Beispiele und Kurven deutlich gemacht. Auf die modernen Möglichkeiten und auf den heutigen Stand der Ueberspannungsschutz-Fragen wird im Zusammenhang mit den Gewittermessungen der letzten Jahre kurz hingewiesen.

Inhaltsverzeichnis:

I. Zweck der Versuche.
II. Versuchsanordnung.
III. Messgenauigkeit und Korrekturen.
IV. Art der Ueberspannungsbeanspruchung.
V. Untersuchte Typen von Ueberspannungsschutzapparaten.
VI. Verhalten der Apparate auf Grund der Oszillogramme.
VII. Schutzwert und Stromaufnahme.
VIII. Ansprechspannung und Ansprechverzug.
IX. Löschfähigkeit und Betriebssicherheit.
X. Möglichkeiten und Aussichten des modernen Ueberspannungsschutzes.

I. Zweck der Versuche.

Die letzten Jahre haben die Erkenntnis der Ueberspannungen in elektrischen Anlagen in ungeahntem Mass gefördert. Klydonographen ("Surge Recorders") und transportable KO haben es ermöglicht, die in den elektrischen Anlagen selber vorkommenden Ueberspannungen vom Laboratorium in die elektrische Netze hinaus zu tragen. [1]

---

1) Siehe z. B. Bull. SEV 1929, No. 11 und 20; 1930, No. 3 und 23; 1931, No. 17; 1932, No. 12.

Während die Klydonographen ein billiges, nicht allzu genaues Tastorgan für Ueberspannungen darstellen, gestatten die KO die Höhe und Dauer und den gesamten zeitlichen Verlauf von Ueberspannungen in den elektrischen Anlagen mit aller wünschenswerten Genauigkeit kennen zu lernen. Es steht bereits fest, dass für moderne, nach neuern Grundsätzen genügend isolierte Hochspannungsanlagen im allgemeinen nur die atmosphärischen Ueberspannungen eine unbedingt gefährliche Höhe erreichen können. Dieser Erkenntnis entsprechend werden seit einigen Jahren neue Typen von Ueberspannungsschutz-Apparaten gebaut, die insbesondere atmosphärische Ueberspannungen unschädlich machen sollen.

Die vorliegende Untersuchung hat den Zweck, die wichtigsten der modernen, sowie auch einige ältere, immer noch gebräuchliche Typen von Schutzapparaten einer Probe bezüglich ihrer zahlenmässigen Schutzwirkung und ihrer Betriebssicherheit zu unterwerfen, um sich damit Rechenschaft geben zu können über die neuen Möglichkeiten und die veränderte Lage in der modernen Ueberspannungsschutzfrage.

II. Versuchsanordnung.

Die Versuchsanordnung soll die durch Blitzschläge auf Hochspannungsleitungen verursachten Ueberspannungen auf den Leiterseilen möglichst naturgetreu nachahmen, um die Schutzapparate möglichst denselben Beanspruchungen auszusetzen, wie sie bei atmosphärischer Einwirkung entstehen. Demgemäss war in erster Linie die genaue Kenntnis des Verlaufes der natürlichen Blitzüberspannungen auf Hochspannungsleitungen erforderlich. Auf Grund der Gewittermessungen hat sich ergeben, dass die Nachahmung mit Hilfe richtig bemessener Stossgeneratoren ("Blitz-Generatoren", nach einem in Amerika schon seit Jahren gebräuchlichen Ausdruck) möglich ist.

Das Schema der Versuchseinrichtung ist aus Fig. 1 ersichtlich. Der Stossgenerator wurde bei Mast 209 aufgebaut.* Er besteht aus 2 nach der von Marx[2)] angegebenen Schaltung zusammengebauten Spezial-Kabeln für je 200 kV Gleichspannung, die in liebenswürdiger Weise von den Kabelwerken Brugg zur Verfügung gestellt wurden, wofür ihnen auch hier verbindlichst gedankt sei. Die resultierende Kapazität des Stossgenerators beträgt 0,18 μF.

Die Kabel werden über 2 Glüh-Ventile langsam auf eine maximale Spannung von je ca 170 kV aufgeladen. Sobald die an der Schaltfunkenstrecke F_1 eingestellte Spannung erreicht ist, spricht jene an, wodurch die beiden Kabel in Serie geschattet und durch das sofortige Ansprechen der Summenfunkenstrecke F_2 die Kabel Kapazitäten auf das angeschlossene Leiterseil vom Mast 209 zum Unterwerk Puidoux entladen werden. Bei dem ersten Versuch war dieses Seil eines der Phasen-Seile der 132 kV-Leitung Vernayaz-Puidoux der SBB. Später wurde ein besonderes Stahl-Aluminium-Seil mit 190 mm^2 Querschnitt und 616 m Länge unterhalb der 132 kV-Seile montiert. Am Ende Puidoux (P) der Versuchsleitung wurde der zu untersuchende Apparat A, die gesamte Messeinrichtung und für gewisse Versuche noch ein Leistungstransformator T angeschlossen. Dieser erlaubte, die Versuchsseile gegenüber Erde dauernd auf einer 16 2/3 periodigen Betriebsspannung von 17 kV oder 66 kV zu halten.

---

2) E. Marx, DRP 455 933.

* Fig. 2 gibt eine Ansicht davon.

Die Versuche wurden jeweils so durchgeführt, dass zunächst die Schutzapparate nur mit der vom Stossgenerator auf die Leitung geschickten Ueberspannungswelle beansprucht wurden, wobei der Transformator T ausgeschaltet war. Damit war vorerst die Feststellung der Schutzwirkung der Apparate bezüglich Verminderung der Ueberspannungshöhe und Steilheit möglich. Nicht weniger wichtig ist bei den Schutzapparaten die Frage der Betriebssicherheit. Ableiter müssen im Stande sein, den einmal eingeleiteten Stromdurchgang nach kurzer Zeit einwandfrei zu unterbrechen. Diese Fähigkeit wurde in betriebsmässiger Schaltung ermittelt, indem der Transformator T hierbei das Versuchsseil dauernd unter fester Betriebspannung gegen Erde hielt. Dadurch, dass als Transformator eine Type für 132 kV Oberspannung gewählt wurde, der aber für die Versuche nur mit ca. 1/4 normaler Spannung erregt war, konnte eine schädliche Beanspruchung desselben vermieden werden. Die Mitte (Sternpunkt) der 132 kV-Wicklung ist betriebsmässig starr geerdet; sie war es auch bei den Versuchen. Die betriebsmässige Prüfung der Apparate entspricht daher unmittelbar deren Beanspruchung im Fahrleitungsnetz der SBB (bei dem ein Pol starr mit den Fahrschienen verbunden und geerdet ist) oder in Netzen mit starrer Nullpunktserdung (wie z.B. in der im 132 kV-Netz der SBB verwendeten Schaltung).

Die Daten des Stossgenerators sind folgende:
2 Kabel zu je 750 m Länge und 5,5 t Gewicht, je 0,36 µF Kapazität, je 220 kV Gleichspannung. Resultierende Kapazität 0,18 µF, theoretische Spannungsgrenze 400 kV.
Schaltfunkenstrecke: Kugeldurchmesser = 125 mm
Summenfunkenstrecke: " = 500 mm
Ventil-Röhren von Müller, Hamburg, für 200 kV Sperrspannung.
Spannungstransformator 220/150 000 V, von der Firma BBC leihweise zur Verfügung gestellt, wofür dieser Firma auch hier gedankt sei.
Die Heiztransformatoren sind normale 80 kV-Stromwandler der SBB.

Daten des Leistungstransformators T:

Leistung 9000 kVA dauernd, Frequenz 16 2/3.
Oberspannung = 2 x 66 kV. (Mitte der Wickung ausgeführt und starr geerdet)
Unterspannung = 66 kV (Mitte der Wicklung ausgeführt, über hohen Widerstand geerdet)
Bei den Versuchen Speisung der Unterspannung mit ca 16 kV über einen Fahrleitungs-Speisepunkt-Schalter.
Oberspannung im Leerlauf ca 2 x 17 kV.
Bei Kurzschluss infolge Versagen von Apparaten löste der Transformatorenschalter momentan durch Ueberstrom aus, wodurch die vollständige Zerstörung der geprüften Apparate zum Teil vermieden wurde.

Die Erdung der Leitungsmasten ist mit Erdungsbändern durchgeführt. Die Leitung besitzt überdies ein Erdseil, das nach frühern Gesichtspunkten nicht mit der Stations-Erde verbunden sondern am letzten Leitungsmast abgespannt ist. Der Vergleich von Messungen mit und ohne Verbindung des Erdseiles mit dem Eisengerüst der Station ergab keinen wesentlichen Unterschied der Oszillogramme.

Die Funkenstrecke F_3 am Ende der Versuchsleitung gestattet die direkte Messung der dort auftretenden Spannungsmaxima, bei

angeschlossenen oder nicht angeschlossenen Schutzapparaten. Der Vorschaltwiderstand R_3 von ca 10'000 Ohm war nötig wegen der Strombegrenzung bei Leistungsversuchen. Die Kapazität der Messkugeln samt Aufhängung beträgt höchstens ca. 50 cm, die Auflade-Zeitkonstante derselben somit ca. 0,5 µs. Kürzer als 1 bis 2 µs dauernde Spannungsspitzen werden somit von der Funkenstrecke nicht voll gemessen, was bei der Auswertung zu berücksichtigen ist. Der Messwagen mit den beiden KO zur Aufnahme von Strom und Spannung befand sich ca 100 m von dem zu untersuchenden Apparat und der Hochspannung entfernt. Zur Spannungsmessung diente die auch bei den Gewittermessungen stets benützte Spannungsteiler-Schaltung nach Gabor[3], die sich für die Messung an im Betriebe befindlichen Hochspannungs-Leitungen gut bewährt hat. Sie besteht hier aus einem 25 m langen, beidseitig angeschlossenen Kabelstück als Hochspannungskapazität C_1, dem Widerstand R_1 = 11'000 Ohm aus Mannitlösung in Porzellanrohren, dem Verzögerungskabel Z_m mit 40 Ohm Wellen-Widerstand und entsprechender Teilkapazität C_2 (ca. 2 µF) und Widerstand R_2 = 40 Ohm. Beide Kapazitäten bilden für sich das gleiche Spannungsteilverhältnis wie die beiden Widerstände. Das Verzögerungskabel (300 m Spezialkabel) ist reichlich lang, weil dies bei den Gewittermessungen erwünscht war. An (R_2 + C_2) sind die Ablenkplatten des Oszillographen für die Spannungsmessung angeschlossen (KOU).

Für die Strommessung wurde die Schaltung nach Fig. 3 benützt. Sie besteht aus einem Shuntwiderstand R_4 und dem angeschlossenen Verzögerungskabel Z_m, das mit dem Widerstand R_5 = Z_m reflexionsfrei gemacht ist. An den Klemmen von R_5 liegen die Ablenkplatten des Oszillographen für die Strommessung (KOI). Der Widerstand R_4 betrug je nach der erwarteten Grösse der zu messenden Ströme 1 bis 3 Ohm. Der für die Strommessung massgebende resultierende Shuntwiderstand errechnet sich aus der Parallelschaltung von R_4 und Z_m.

Als Erdungspunkt gilt für Spannung- und Strommessung stets die beim untersuchten Apparat in der Hochspannungsanlage befindliche Erdungsstelle der gesamten Stationserdung. Ihr Widerstand beträgt weniger als 1 Ohm. Der Messwagen war nur über die Metallmäntel der beiden Messkabel für Spannung und Strom mit der genannten Erdungsstelle verbunden.

Der Anstoss resp. die Ingangsetzung der Schreibtätigkeit des KO (Auslösung der Zeitbewegung und Freigabe der Strahlsperrung) geschah automatisch durch die ankommende Ueberspannungswelle mit Hilfe einer Mehrfachfunkenstrecke, die mit dem Versuchsseil kapazitiv gekoppelt war.

Für die vielseitige Unterstützung und wertvolle Hilfe bei den Versuchen fühle ich mich verpflichtet, der Abteilung für Elektrifizierung der SBB, insbesondere Herrn Sektionschef H. Habich der Betriebssektion 2, und Herrn Ing. G. Tresch, sowie dem Personal des Unterwerkes Puidoux und dessen Chef, Monsieur R. Chevalley, den wärmsten Dank auszusprechen. Die Durchführung der Versuche wäre ohne Mithilfe, z.B. bei der Aufstellung und Bedienung des Stossgenerators und ohne die Zurverfügungstellung des Leistungstransformators T mit der erforderlichen Energie, wie auch einiger Ableiter der SBB nicht im gewünschten Ausmass möglich gewesen. Ferner danke ich der Westinghouse El. & Man. Co. in Pittsburgh für die leihweise Ueberlassung von zwei neuesten 20 kV-SV-Autovalves, der Vertretung der Westinghouse

3) D. Gabor, Forschungshefte der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen, 1927, No. 1.

El. & Man. Co. nämlich Herrn W. Schutz in Lausanne für die leihweise Ueberlassung von drei neuen 20 kV-LV-Autovalves, der AEG Berlin für die leihweise Ueberlassung eines 15 kV-Ozelit-Ableiters, der Elektrizitäts- A.-G. Wädenswil in Zürich für die leihweise Ueberlassung von verschiedenen Bendmann-Ableitern, sowie den Firmen Soc. Gen. des Cond. Electr. Fribourg, und Emil Pfiffner, Hirschthal, für die leihweise Ueberlassung von Kondensatoren und Schwingungsbegrenzern.

III. Messgenauigkeit und Korrekturen.

Die KO selber, wenigstens der für die Spannungsmessung benützte, weisen sehr kleine Messfehler auf; beim maximalen Ausschlag dürfte der Fehler kleiner als 1% sein. Messfehler sind zum grössten Teil begründet in der nicht restlosen Konstanz des Mannitwiderstandes R_1 bei veränderlichen Raumtemperaturen. Die Kontaktflächen mit der Mannitlösung mussten aus diesem Grunde versilbert werden. Ein zweiter Grund für ungleiche Angaben besteht in der Veränderlichkeit der Gebrauchsspannung, aus der die Strahlspannung gewonnen wird. Die Spannungsteilung für sich besitzt mit den Konstanten der Fig. 1 einen maximalen Fehler von ca. 3%. Der gesamte Messfehler der oszillographischen Spannungsmessung kann deshalb den ziemlich hohen Wert Wert von 6 bis 7% erreichen.

Auch die Grenzen, wo Spannungs- und Stromänderungen zeitlich noch trägheitslos richtig von den KO aufgezeichnet werden, ist nicht in den KO selber, sondern in der Spannungsteilung begründet. Dadurch, dass als Kapazität C_1 der Gaborschen Spannungsteilung nicht eine konzentrierte Kapazität, sondern ein 25 m langes, doppelseitig angeschlossenes Kabelstück benützt wurde, ist es zum vorneherein unmöglich, innert 1/6 µs sich abspielende Veränderungen richtig zu erfassen. Statt einer gleichmässigen Front würde sich z.B. eine Treppenkurve mit 1/6 µs Stufendauer aufzeichnen. Annähernd derselben Grösse ist auch die Abflachung einer steilen Welle beim Durchlaufen des langen Verzögerungskabels zwischen C_1 und R_2. Eine teilweise Kontrolle der Spannungsteilung ist möglich durch Aufnahme der Kurve des Spannungs-KO, wenn das Leitungsende in Puidoux geerdet ist. (siehe Fig. 4). Die Abweichungen von der Nullinie sind Messfehler. Abgesehen von einer ca 1/5 µs langen Spannungsspitze in der ersten Wellenfront, deren Ursache bei den Fehlerquellen der Messfunkenstrecke F_3 noch besprochen wird, ist die Spannung sehr angenähert gleich Null.

Für die Strommessung liegt die minimale Dauer, innert welcher Veränderungen nicht mehr richtig aufgezeichnet werden, jedenfalls tiefer als bei der Spannungsmessung. Die Aufzeichnung muss bis auf die Verflachung der Welle beim Durchlaufen des Verzögerungskabels richtig sein. Als kleinstes zulässiges Zeitelement darf demnach in allen Oszillogrammen 1/4 bis 1/2 µs gelten. Für den technischen Zweck der vorliegenden Untersuchung ist dieser Wert hinreichend klein.

Die Messfunkenstrecke F_3 mit ihrem Strombegrenzungswiderstand R_3 besitzt infolge der Zeitkonstanten $R_3 \times C_3 \simeq 0{,}5$ µs ziemlich viel Trägheit. Spannungswerte von 1,5 µs Dauer werden mit 5% Fehler angezeigt, länger dauernde Spannungen genauer. Da es sich bei den Funkenstreckenmessungen nur um eine Kontrolle handelt, schien dieser Wert genügend. Erst bei den Messungen kam eine viel wichtigere Fehlerquelle zum Vorschein,

nämlich infolge elektromagnetischer Induktion durch die starken und rasch veränderlichen Ableiterströme. Die induzierten Spannungen erreichten eine solche Höhe, dass die Funkenstreckenangaben mit angeschlossenem Ableiter dadurch bis 20'000 V gegenüber den oszillographischen Angaben erhöht wurden. Wir werden bei der Auswertung noch auf diese Beobachtung zurückkommen, denn sie hat nicht nur messtechnische Bedeutung.

Als Korrektur der Messungen kommt die Stromaufnahme des Spannungsteil-Widerstandes R_1 = 11'000 Ohm in Betracht. Gegenüber dem Wellenwiderstand von ca. 450 Ohm des Versuchsseiles bedingt dies am Leitungsende in Puidoux eine Reflexion der zulaufenden Welle auf den $\frac{2R}{R+Z} \simeq$ 1,92-fachen Betrag der Wellenhöhe, anstelle des doppelten Betrages bei der Reflexion am vollständig offenen Leitungsende. Daraus ergibt sich für die Berechnung der zulaufenden Wellenhöhe eine Korrektur von 4%, wenn kein Ableiter angeschlossen ist. Sofern ein Ableiter angeschlossen ist, verschwindet die Stromaufnahme in R_1 umsomehr, je besser der Ableiter ist, d.h. je mehr Wellenstrom er aufnimmt. Die Korrektur ist praktisch nur bei den Messungen an der offenen Leitung nötig, wenn kein Ableiter angeschlossen war.

Durch das Zuschalten des Transformators T ist eine Verflachung der Wellenfront infolge seiner Eingangskapazität gegenüber den Messungen ohne Transformator T zu erwarten. Die Oszillogramme lassen einen Unterschied nicht erkennen. Dies ist auch rechnerisch zu erwarten, indem sich bei einer angenommenen Eingangskapazität von 300 cm, eine Frontzeitkonstante von nur ca. 1/6 µs ergibt. Dagegen ist die bei Erdschlusswellen bekannte rasche Wellenverflachung nach mehrmaligem Durchlaufen der Leitung sehr ausgeprägt (Fig. 8a und 8b.).

IV. Die Art der Ueberspannungsbeanspruchung bei den Versuchen.

Beim Ansprechen der Funkenstrecken F_1 und F_2 des Stossgenerators läuft eine Spannungswelle über das Versuchsseil gegen Puidoux. Wären anstelle der Kabel konzentrierte Kapazitäten vorhanden, so würde sich die Höhe der Spannungswelle einfach aus der Summe der Spannungen beider aufgeladenen Kapazitäten im Moment des Ansprechens der Funkenstrecke ergeben. Beim Kabelstossgenerator ist aber die Kapazität nicht konzentriert, sondern längs der Kabel verteilt. Die Stosswelle entsteht auf Grund des Schemas Fig. 5 resp. nach dem Ersatzschema Fig. 6. Für zwei Kabelstufen ergibt sich die Wellenhöhe zu: $\frac{Z}{Z + 2Z_k} \cdot (U_1 + U_2)$,

resp. bei n Stufen eines Kabelstossgenerators zu: $\frac{Z}{Z + nZ_k} \cdot (n \cdot U_1)$,

wobei U_1 = Ladespannung pro Stufe
Z = Wellenwiderstand der Freileitung
Z_k = Wellenwiderstand eines Kabels bedeutet.

Der Spannungswirkungsgrad des Kabelstossgenerators beträgt

in unserm Fall mit

$$\left.\begin{array}{l} \underline{Z} = 450 \text{ Ohm} \\ \underline{Z}_k = 1/2 \times 30 \text{ Ohm (beide Kabelenden parallel)} \end{array}\right\} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z} + 2\underline{Z}_k} \simeq 0{,}94.$$

Der Spannungsverlust infolge der Wellenwiderstände der Kabel macht

$$\underline{d} = 1 - \frac{\underline{Z}}{\underline{Z} + 2\underline{Z}_k} = 6\% \text{ aus.}$$

Man erkennt daraus, dass die Kabelwellenwiderstände wie innere Widerstände des Stossgenerators wirken. Ein solcher ist daher im Gegensatz zur Marx-Schaltung mit konzentrierten Kapazitäten nur mit wenigen Stufen ohne allzugrossen Spannungsverlust brauchbar.

Zum Unterschied von der stetig absinkenden Spannung einer sich entladenden Kapazität bleibt nun beim Kabelstossgenerator die Stosspannung während der Laufzeit über die Kabellänge (bei uns ca. 5 µs) konstant. Nach halber Laufzeit begegnen sich in der Kabelmitte die von beiden Kabelenden herkommenden Entladewellen und heben, von der Mitte ausgehend, den Kabelstrom vollständig auf, indem sie zugleich den Spannungsabfall verdoppeln. Nach einfacher Laufzeit sind die ganzen Kabel stromlos. Sie haben dabei den doppelten Abfall ($2\underline{d}$) an Spannung eingebüsst. Die weitere Entsendung der Ladewelle auf die Leitung $\underline{Z}$ bedingt eine neue Entladewelle im Kabel, welche die Kabelspannung ($1 - 2\underline{d}$) wieder um $\underline{d}$% absenkt.

Während die Kabelentladung nach Potenzen von ($1 - 2\underline{d}$) fortschreitet, liegt die Klemmenspannung und damit die Stosspannung jedesmal um den Spannungabafall $\underline{d}$% tiefer. Sie folgt daher dem Gesetz $(1 - 2\underline{d})^{\underline{n}} \cdot (1 - \underline{d})$, wenn mit $\underline{n}$ die Ordnungszahl der Wellen im Kabel resp. die Ordnungszahl der Stufen der Entladewelle bezeichnet wird. Die Fig. 7 zeigt den zu erwartenden Spannungsverlauf an den Kabelklemmen, resp. die Form der Stosswelle des Kabelstossgenerators.

Die Verschleifung der Wellenfront im Kabel bewirkt, dass die Treppe nach einigen Stufen ihre scharfen Ecken einbüsst, womit die Kurve in eine Exponentialkurve mit der Zeitkonstante $\underline{C} \times \underline{Z}$ übergeht. Damit verschwindet der Unterschied zwischen Stossgenerator mit konzentrierten Kapazitäten oder mit Kabeln.

Damit dieser Entladevorgang für beliebig lange Zeit gilt, muss allerdings vorausgesetzt werden, dass keine Welle von der gestossenen Leitung her zurückkehrt, d.h. obige Beschreibung gilt für den Anstoss einer unendlich langen Leitung. Bei endlicher Leitungslänge kommt die reflektierte Ladewelle nach ihrem Hin- und Zurücklauf über die Leitung wieder zum Stossgenerator zurück. Das trifft in unserm Fall mit ca. 616 m Leitungslänge nach etwas mehr als 4 µs ein. Die Aufnahme der reflektierten Welle vom Stossgenerator geschieht, wie die Abgabe der Ladewelle, unter Bildung eines Spannungsabfalles im Kabelwellenwiderstand. Dadurch entstehen auch in den Kabelwellen wieder kleine Treppenstufen, die sich ihrerseits wieder in den auf die Leitung ausgeschickten Ladewellen bemerkbar machen. Die auf der Versuchsleitung sich ausbildende Schwingung erhält dadurch kleine treppenförmige Stufen, von denen aber abgesehen werden kann, da es sich stets nur um Spannungsabfälle von wenigen Prozenten handelt. Der Einschaltvorgang bei Verwendung des Kabelstossgenerators und der oben erwähnten Leitung ist somit ganz

analog demjenigen bei Verwendung einer konzentrierten Stosskapazität. Der am offenen Leitungsende Puidoux ohne angeschlossenen Ableiter gemessene Spannungsverlauf ist in Fig. 8 a für positive und für Fig. 8 b für negative Spannungsstösse und ferner mit kleinerem Zeitmasstab z.B. in den Fig. 11, 15, 23, 31 und 44 aufgezeichnet.

Die Schwingung entspricht dem Einschalten des kurzen Versuchsseiles von der grossen Stosskapazität aus. Es tritt deshalb anfänglich sehr annähernd Spannungsverdoppelung auf gegenüber dem Endwert der Spannung. Wenn der Transformator T nicht benützt wurde, war durch die Einfügung eines Entladewiderstandes von ca. 1 Megohm dafür gesorgt, dass sich die Leitung wieder langsam entlud. In vielen Oszillogrammen (z.B. Fig. 11, 23, 31) ist bei der rückläufigen Bewegung des Kathodenstrahls die Entladung der Leitung sichtbar. Eine raschere Entladung findet beim Ansprechen der Messfunkenstrecke F_3 statt, und ist das Ausprechen auch in den Oszillogrammen erkennbar.

Die Steilheit der Ueberspannungswelle ist die maximal mögliche, da absichtlich alle Mittel zur künstlichen Verflachung weggelassen wurden. Die Grösse der Steilheit ist nur durch den Funkenüberschlag an F_1 und F_2, sowie durch das Durchlaufen des Versuchsseiles bestimmt.

Aus den Oszillogrammen der Fig. 8a und 8b folgt eine Steilheit von ca. 3000 kV/µs im steilsten Anstieg, oder eine Frontlänge von ca. 0,1 µs resp. 30 m Lichtweg. Da für diese kurze Zeit die Spannungsteilung nicht mehr mit Sicherheit richtig teilt, können wir die Grösse der Steilheit nur abschätzen. Unter Berücksichtigung der Wellenverflachung im Versuchsseil und im Verzögerungskabel stimmt die Messung gut mit den Messungen von Wellensteilheiten der Technischen Hochschule Dresden überein [4].

Nachdem von der Gewitterforschung natürliche Wellensteilheiten von mehr als 1000 kV/µs in Nähe der Blitzeinschlagstellen nachgewiesen sind [5], lag kein Grund vor, die Steilheit von Prüfwellen für den Zweck der Ableiterprüfung absichtlich zu verkleinern.

Es war zunächst beabsichtigt, die sich auf den Versuchsseilen ausbildende Schwingung nach Fig. 8a und 8b durch einen dem Wellenwiderstand gleichgemachten Dämpfungswiderstand beim Stossgenerator zu unterdrücken. Damit wäre das Bild einer aus weiter Entfernung über die Leitung zulaufenden Ueberspannungswelle nachgeahmt worden. Um die ganze Stossenergie des Blitzgenerators auszunützen, wurde aber von diesem Begrenzungswiderstand abgesehen, da sonst die für diese Versuche notwendige Spannung von 500 kV nicht hätte erreicht werden können. Anstelle der stossartigen Spannung in Puidoux entsteht deshalb eine Schwingung, wie sie auch bei nahen Blitzeinschlägen in schlecht geerdete Maste entstehen kann. Diese Schwingung würde natürlich bei genügend grosser Entfernung zwischen Stossgenerator und Leitungsende (Puidoux) entsprechend langsamer, sodass schliesslich in einer einzigen Periode derselben der Stossgenerator bereits entladen wäre. Die gegenüber bisherigen Versuchen hier benützte kleinere Entfernung von ca. 600 m wurde aber absichtlich aus

4) L. Binder, Die Wanderwellenvorgänge auf experimenteller Grundlage, Verlag Springer 1928 und ETZ 1931, S. 735.

5) R. Pittman and J. Torok, Lightning Investigation on a Wood Pole Transmission Line, Paper New York, Jan. 1931.

folgenden Gründen gewählt:

Aus den dreijährigen Beobachtungen im gleichen 132 kV-Netz der SBB hat sich einmal mit aller nur wünschenswerten Deutlichkeit ergeben, dass die Reichweite der Ueberspannungsgefahr bei Blitzeinschlägen nicht sehr viele km beträgt. Dies gilt allgemein für Höchstspannungsleitungen mit gut geerdeten Eisenmasten. Die Gefährdung von Stationen durch Blitzüberspannungen nimmt mit abnehmender Entfernung der Blitzeinschlagstelle von der Station rasch zu. Wir haben deshalb besonderes Interesse daran, das Verhalten von Ableitern bei nahen Blitzeinschlägen kennen zu lernen und nicht bei solchen, die vielleicht auch ohne Ableiter gefahrlos für die Station verlaufen würden.

In zweiter Linie bleibt bei der oszillographischen Verfolgung des Verhaltens der Ueberspannungsschutzapparate stets die Möglichkeit des Rückschlusses auf das Verhalten bei weiter entfernten Stossquellen, aber nicht umgekehrt. Bekanntlich ergibt sich bei kleiner Entfernung zwischen Stosstelle und einem niederohmigen Ableiter ein treppenweises Aufschauckeln des anfänglichen reinen Wellenstromes.[6] Dieses Stromaufschauckeln tritt naturgemäss noch stärker auf, wenn das Ende der Versuchsleitung direkt oder über einen kleinen Widerstand an Erde gelegt wird (siehe z.B. Fig. 9). Da aber im Oszillogramm jede Stufe für sich messbar ist, lässt sich aus der ersten Stufe das Verhalten und der **Schutzwert** gegenüber Wellen aus sehr grosser Entfernung und aus dem maximalen Wert des aufgeschauckelten Stromes die Schluckfähigkeit des Ableiters ersehen, die für die Beurteilung des erreichbaren Blitzschutzes eine grosse Rolle spielt.

Der dritte Grund waren rein praktische Erwägungen, nämlich leichte Möglichkeit der Aufstellung und der Fernbetätigung des Stossgenerators beim Mast 209. Auch hatte die Betriebsleitung besonderes Interesse an diesem Mast, weil derselbe im Frühjahr 1930 einen direkten Blitzeinschlag erlitten hatte, bei dem auch eine Durchführung im ca. 600 m entfernten Unterwerk Puidoux beschädigt wurde.

Dem Prinzip entsprechend, dass Schutzapparate mindestens so scharf geprüft werden müssen, wie sie nachher im Betrieb beansprucht werden, war ausser der Steilheit und Dauer der Welle auch deren Höhe gewählt. Dazu wurde zuerst die Stossüberschlagsspannung der meisten Fahrleitungsisolatoren gemessen. Für Fahrleitungsschutzapparate wurde als Prüfwelle jene gewählt, die vom stärksten Isolatortyp noch knapp ertragen wird, oder ihn gerade zum Ueberschlag bringt. Das waren Wellen von rund 250 kV Amplitude. Am offenen, ungeschützten Fahrleitungsende können somit theoretisch Spannungen bis 500 kV Scheitelwert entstehen, ein ganz beträchtlicher Betrag, entsprechend der ausgezeichneten Isolation der Fahrleitungen der SBB. Diesen Betrag von 500 kV_{max} auf eine ungefährliche Höhe zu reduzieren, ist die Aufgabe des Ueberspannungsschutzes, der für dieses Netz in Betracht kommen kann.

V. Untersuchte Typen von Ueberspannungsschutzapparaten.

Mit einer einzigen Ausnahme wurden Ableiter-Typen für die Spannung des Fahrleitungsnetzes der SBB gewählt. Entsprechend

6) Dr. R. Willheim: Der Einfluss der Versuchsanordnung auf die Schutzwertbestimmung von Ueberspannungsableitern. A.E.G. Berlin.

der starken Schwankungen im Bahnbetrieb muss mit einem Maximalwert der Spannung zwischen Fahrdraht und Erde von ca. 17 kV_{eff} gerechnet werden. Die von den Lieferfirmen als zweckmässig erachteten, zur Untersuchung gekommenen Schutzapparate waren dementsprechend folgende:

A.) Ableiter mit konstantem (spannungsunabhängigem) Widerstand und Seriefunkenstrecke:

a) Bendmann-Ableiter 24 kV, 750, 500 und 240 Ohm
b) Bendmann-Ableiter 66 kV, 2200 und 500 Ohm

B.) Ventilartige Ableiter (spannungsabhängigem Widerstand) mit Seriefunkenstrecke:

a) Autovalve, ältere Type, Kathodenfallprinzip, 18 kV.
b) Autovalve, neuere Type, Porous-Block-Prinzip, SV 20 kV.
c) " , " " " " " , LV 20 kV.
d) Ozelit-Ableiter 15 kV,
e) Bendmann-Ableiter 17 kV, mit keramischem Widerstand.
f) sog. Schwingungs-Begrenzer 20 kV mit Silit- resp. Quarzilit-Widerstand.

C.) Kondensatoren mit Oelpapierisolation.

a) Kapazität ca. 0,008 µF, 20 kV.
b) " " 0,002 µF, 66 kV.

VI. Das Verhalten der Apparate auf Grund der Oszillogramme.

A. Ableiter mit konstantem Widerstand und Seriefunkenstrecke.

Hieher gehören vor allem die altbekannten Hörnerableiter mit Flüssigkeitwiderständen (Wasserwiderständen) oder mit Metallwiderständen in Oel, aber auch die für grössere Ströme gebauten Bendmann-Ableiter mit Metallwiderständen. Nach dem Bendmann-Verfahren können bekanntlich fast beliebig grosse Ströme des Ableiters automatisch unterbrochen werden, und zwar mit Hilfe einer Schaltvorrichtung unter Oel, welche die Funkenstrecke rasch kurzschliesst, dadurch den Funken löscht, und nachher den Strom unter Oel unterbricht. Die gebräuchlichen Fabrikate der EMAG Frankfurt, AEG Berlin und EAG Wädenswil sind für höhere Spannungen so gebaut, dass sie gewöhnlich bei Nennspannung 20 bis 30 A aufnehmen, während bei Hörnerableitern Ströme von mehr als 10 A am Horn kaum mehr abreissen. Untersucht wurden Apparate der EAG Wädenswil, die für 30 bis 130 A Stromaufnahme bei Nennspannung bemessen waren. Das Schema dieser Apparate ist aus Fig. 10 ersichtlich (einem Prospekte dieser Firma entnommen).

Die Fig. 11 und 12 zeigen den Spannungsverlauf in Puidoux ohne und mit angeschlossenem 24 kV-Ableiter mit 750 Ohm Hauptwiderstand und 500 Ohm Shuntwiderstand in Silit.

Die Fig. 13 und 14 geben den Spannungsverlauf in Puidoux ohne und mit einem äusserlich gleichen 24 kV-Ableiter mit 240 Ohm Hauptwiderstand und 62 Ohm Shuntwiderstand. Letztere Oszillogramme

sind an der 132 kV-Leitung Vernayaz-Puidoux aufgenommen worden, wobei die Energie statt vom Transformator T durch eine Maschinengruppe in Vernayaz geliefert wurde.

Die Fig. 15 und 16 zeigen das Verhalten desselben Ableiters bei Messung am besonderen Versuchsseil und bei Beanspruchung des Ableiters mit der höchsten, von ihm gerade noch ausgehaltenen Spannung. Bei etwas höherer Spannung trat bereits ein Ueberschlag der Eingangsklemme auf (siehe Fig. 17). Die Spannungsabsenkung ist aus den Oszillogrammen deutlich zu ersehen, in Fig. 17 erkennt man ausserdem den Entladeverzug der Durchführung.

Die Spannungsabsenkung infolge eines Bendmann-Ableiters von 66 kV mit 500 Ohm Hauptwiderstand und 17,5 Ohm Shuntwiderstand zeigt Fig. 18. Dieser Ableiter besass nicht wie die vorhergehenden eine Kugelfunkenstrecke, sondern eine solche aus ziemlich kleinen Kalotten. Im ersten Spannungsrücken zeigt sich eine anfängliche Spitze. Um ihre Ursache zu erfahren, wurde die Funkenstrecke kurzgeschlossen, Fig. 19 zeigt das Verhalten des Widerstandes allein. Die Spitze ist demnach von der Funkenstrecke verursacht. Ein Apparat mit vorjonisierter Funkenstrecke dieser Firma zeigte diese Spitze nur in unbedeutendem Mass (Fig. 20 & 21). Zum Vergleich ist nochmals eine Aufnahme mit kurzgeschlossener Funkenstrecke sofort anschliessend gemacht worden. (Fig. 22).

Schliesslich sei noch ein Ableiter mit 2200 Ohm Hauptwiderstand angeführt; die Fig. 23 und 24 geben die Spannung ohne und mit angeschlossenem Apparat. Die Absenkung ist bei diesem hohen Widerstand nicht mehr wesentlich. Der Ableiter ist bezüglich der Ableitung atmosphärischer Ueberspannungswellen praktisch wertlos.

Dasselbe Verhalten wie die angeführten Bendmann-Ableiter haben, wie bereits erwähnt, die Hörnerableiter mit konstanten Widerständen und trägheitsloser Funkenstrecke. Es geht aus dem Obigen mit aller Deutlichkeit hevor, dass Hörnerableiter mit mehr als 200 bis 500 Ohm Widerstand gegenüber atmosphärischen Ueberspannungen ungenügende Schutzwirkung haben. Wir werden darauf zurückkommen.

B.) Ventilartige Ableiter mit Seriefunkenstrecke.

Die meisten modernen Ableiter gehören dieser Klasse an. Bezüglich der Vollständigkeit der untersuchten Apparate ist folgendes zu bemerken: Der Kathodenfallableiter der Siemens-Schuckert-Werke (SSW) ist eine Abart der ältern Autovalves der Westinghouse El. & Manufact. Co. Auf die Untersuchung des SSW-Fabrikates glaubten wir deshalb in Anbetracht des reichhaltigen Programmes vorderhand verzichten zu können. Ferner ist der Thyrite-Ableiter der General Electric Co. dem Ozelit-Ableiter der AEG Berlin prinzipiell ähnlich, indem ein Unterschied nur in der Grösse der Spannungsabhängigkeit des Widerstandsmaterials und in der Ausführung der Funkenstrecke besteht. Auf die Untersuchung des Thyrite-Ableiters musste vorläufig verzichtet werden.

a) Autovalves nach dem Kathodenfallprinzip, Type LV 18 kV.

Die Konstruktion dieser Apparate ist aus Fig. 25 ersichtlich, die dem Prospekte Effective Lightning Protection No. C - 1737 - D der Westinghouse El. & Man. Co. entnommen ist. Der "Widerstand" bezw. der strombegrenzende Teil des Apparates besteht aus vielen Scheiben

eines karborundartigen Materials, die durch feine Glimmerringe (Mica-Washers) distanziert sind. Der Stromdurchgang erfolgt deshalb als flächenhafte Glimmentladung, wobei sich in den dünnen Luft-Schichten kein Lichtbogen, sondern ein annähernd konstanter Kathodenfall ausbilden soll. Mit der Grösse des Stromes wächst die Fläche des Stromdurchtritts, der Spannungsabfall aber nur unwesentlich. Dem Ganzen ist eine Seriefunkenstrecke zwischen Kalotten vorgeschaltet. Bei einer mittelhohen Ueberspannungswelle nach Fig. 26 zeigen die Fig. 27 a und 27 b den Spannungs- und Stromverlauf mit einem solchen Ueberspannungsventil für 18 kV Typen-Spannung.

Die Fig. 28 a und 28 b zeigen dasselbe für eine grössere Ueberspannungswelle, die ohne Ableiter den Spannungsverlauf nach Fig. 23 in Puidoux ergab.

Aus dem Vergleich ist zu ersehen, dass die Ueberspannung mit angeschlossenem Ableiter trotz stark erhöhter Ueberspannungswelle nur wenig grösser ist. Drei verschiedene Stücke der gleichen Type verhielten sich annähernd gleich. Die Parallelschaltung von 2 oder 3 gleichen Apparaten ergab nur unwesentliche Verminderung der Ueberspannungshöhe gegenüber nur einem angeschlossenen Apparat, was mit der ventilartigen Wirkung in Einklang steht. Bemerkenwert ist der Stromverlauf im Ableiter. Das Verschlucken der ankommenden Ueberspannungswelle bedingt die Ableitung eines konstanten Wellenstromes, der sich während der Zeit des Hin- und Rücklaufes der Welle über das Versuchsseil nur unwesentlich ändert. Der starken Spannungsabsenkung entsprechend steigt dann plötzlich der Ableiterstrom an, sofern eine hohe Ueberspannung aufgedrückt wurde. Die Höhe dieser zweiten Stufe bleibt während eines weiteren Hin- und Rücklaufes der Welle zum Stossgenerator erhalten, worauf sich das Aufschauckeln je nach der Höhe und Dauer der Welle noch fortsetzen kann. Der Stromverlauf hat Aehnlichkeit mit demjenigen bei geerdeter Versuchsleitung am Leitungsende Puidoux (Fig. 9). In der Tat stellt ein Ventil für die über der Ventilspannung liegenden Spannungen einen Kurzschluss dar. Auch die fortschreitende Abrundung der Treppenkanten ist sehr deutlich ersichtlich, womit der anfängliche Wanderwellenvorgang in den quasistationären übergeht.

Aus der ersten Stufe lässt sich, wie in Kapitel IV bereits auseinandergesetzt wurde, die Schutzwirkung des Apparates gegenüber den aus grosser Entfernung zufliessenden Ueberspannungswellen ermitteln, bei denen diese erste Stufe so lang wird, dass die Ueberspannungsursache (Stossgeneratorladung oder Blitz) die Dauer der ersten Stufen nicht übertrifft. Das treppenweise Ansteigen des Stromes bei unsern Versuchsbedingungen lässt dagegen erkennen, wieviel Strom der Ableiter bei nahen Einschlägen stossweise schlucken muss, ohne Schaden zu nehmen. Entsprechend dem nicht linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Strom im Ableiter tritt das Aufschauckeln bei kleinen Ueberspannungswellen nicht auf, sondern nur bei grossen, und zwar umsomehr, je höher die beanspruchende Welle ist.

b & c). Autovalves nach dem Porous-Block-Prinzip.

Die Konstruktion dieser neuern Apparate ist in Fig. 29 schematisch dargestellt. Die Figur ist dem Circular 1933 über Westinghouse-Surge Protection dieser Firma entnommen. Der Strom- und

spannungsbegrenzende Teil besteht bei diesen Apparaten aus einer Aufschichtung von ca. 1 Zoll dicken Blöcken eines porösen, porzellanähnlichen Materials (Porous-Blocks). Für Hochspannungsableiter ist immer eine Funkenstrecke vorgeschaltet, die sich bei kleinern Typen im gleichen Porzellangehäuse, bei grössern Typen in einem besondern Gehäuse aufgesetzt befindet. Gegenüber dem frühern Kathodenfall-Autovalve (a) soll hier die maximale Klemmenspannung (Ventilspannung) von ca. 3,5 mal Typenspannung auf ca. 2,5 mal Typenspannung herabgesetzt worden sein, womit der Schutzwert wesentlich verbessert ist. Wie schon beim Fabrikat a) werden auch hier zwei verschiedene Typen hergestellt, die sich hauptsächlich durch den Querschnitt des Widerstandsmaterials (Porous-Block) unterscheiden: Eine billigere Leitungstype (Line-Valve LV) und eine teurere Stationstype (Station Valve SV) mit ca. 5-fachem (bei der Kathodenfall-Type 4-fachen) Querschnitt und entsprechend höherem Stromschluckvermögen.

Die Fig. 30 a und 30 b gelten für Type SV, 20 kV "maximal Dynamic Voltage", bei einer 10% höheren Ueberspannung als nach Fig. 26.

Für eine beträchtlich höhere Wellenspannung nach Fig. 31 gelten für Type LV 20 kV die Fig. 32 a und 32 b, für Type SV 20 kV die Fig. 33 a und 33 b. Vergleichshalber seien in den Fig. 34 a und 34 b die unter genau denselben Umständen aufgenommenen Oszillogramme der älteren Type (a) angeführt.

Die Ableiterströme erreichen hohe Werte, die wegen des zu hohen Shuntwiderstandes nicht überall erfasst wurden. Während ca. 12 µs werden mehr als 1500 A_{max} vom Ableiter verschluckt. Zum Vergleich seien hier auch einige Bilder angeführt, bei denen der Transformator T zugleich die Betriebspannung 17 kV am Versuchsseil anfrecht hielt.

Fig. 35 zeigt die in Puidoux gemessene Spannung ohne Ableiter; Fig. 36 mit LV 20 kV (Porous-Block); Fig. 37 mit SV 20 kV (Porous-Block); Fig. 38 mit LV 18 kV (Kathodenfall-Ableiter, siehe a).

Ein wesentlicher Unterschied in der Spannung gegenüber der Messung ohne Betriebspannung am Versuchsseil ist nicht vorhanden. Die Unterbrechung des Ableiterstromes geschah bei der SV-Type stets einwandfrei. Die neuern LV gingen jedoch nach einigen hohen Ueberspannungsstössen zu Grunde, und zwar auch ohne Betriebspannung, nur als Folge der zu hohen Beanspruchung durch den Stosstrom der Ueberspannungswelle. Zu erwähnen ist, dass bei diesen modernen Autovalves eine Spannungszunahme am Ableiter bei dem stufenweise ansteigenden Strom nicht merklich ist. Die Spannung ist sehr weitgehend unabhängig vom Strom; der Ableiter hat sehr ausgeprägte Ventileigenschaften. Zum Teil mag allerdings letztere Beobachtung auch mit der schleifenförmigen Strom-Spannungs-Charakteristik dieser Apparate zusammenhängen (siehe Broschüre 1933), wonach die Klemmenspannung am Ableiter nicht eindeutig durch den Strom bestimmt ist, sondern bei konstantem Strom nach kurzer Zeit etwas absinkt.

Eine Spannungsspitze ist in allen Oszillogrammen am Anfang der Spannungskurve ersichtlich, insbesondere bei den neuern Autovalves. Zur genauen Ausmessung derselben ist die benützte Spannungsteilung nicht hinreichend. Die praktische Bedeutung dieser kurzen Spitzen ist nicht gross, weil ihre Dauer zu kurz ist, um unterdessen Ueberschläge an Isolatoren entstehen zu lassen.

d.) Ozelitableiter.

Der untersuchte Apparat ist in Fig. 39 skizziert. Er besteht aus einem Ozelitstab in Serie mit einer Vielfachkunkenstrecke. Beide sind in ein Hartpapierrohr eingebaut. Das Ozelit ist ein sehr hartes, poröses, porzellanartiges Material, das stark spannungsabhängigen Widerstand besitzen soll. Damit lassen sich ventilartige Wirkungen erreichen.

Die spannungsabsenkende Wirkung dieses Ableiters ist aus den folgenden Oszillogrammen ersichtlich. Für die relativ kleine Ueberspannung nach Fig. 40 zeigen die Fig. 41 a und 41 b die vom Ableiter abgesenkte Spannung und den dabei absorbierten Strom.

Für die hohe Ueberspannungswelle nach Fig. 42 (ohne Ableiter) wurde mit angeschlossenem Ableiter die Spannung nach Fig. 43 a und der Strom nach Fig. 43 b gemessen. Auch hier ist das treppenförmige Aufschaukeln des Ableiterstromes im Verlauf des Wellenspiels zwischen Stossgenerator und Ableiter deutlich zu erkennen. Bei höherer als der gezeigten Beanspruchung entstanden an diesem Ableiter Ueberschläge, die zu Kurzschlüssen führten. Interessanterweise wurde dabei der Ozelitstab nicht beschädigt. Das Stromschluckvermögen ist auf ca. 1000 A begrenzt. Die Spannungsabsenkung durch den Ableiter ist deutlich ersichtlich. Sie ist bei hohen Ueberspannungswellen weniger stark als bei der vorhergehend beschriebenen Ventiltype. Durch Parallelschaltung von zwei oder drei gleichen Apparaten konnte eine Reduktion der Klemmenspannung von etwa 15 bis 25 % erreicht werden.

e.) Bendmann- Ableiter mit keramischen Widerständen.

Die von der Lieferfirma zur Verfügung gestellten Apparate bestanden aus den gleichen Bendmann-Schaltern unter Oel, wie bei den Apparaten mit konstanten Widerständen. Anstelle letzterer waren hier keramische Widerstände aufgebaut, die als stark spannungsabhängig gelten. Der Apparat besass 8 parallel geschaltete Widerstandstäbe, mit einer seriegeschalteten Kugelfunkenstrecke nach dem gleichen Schema wie in Fig. 10, Typenspannung 17 kV.

Fig. 44 zeigt die grösstmögliche Ueberspannung in Puidoux, ohne Ableiter gemessen, Fig. 45 a dieselbe Ueberspannungswelle mit Ableiter und Fig. 45 b dessen Stromverlauf. Dabei bestand keine Betriebsspannung auf dem Versuchsseil. Schliesslich zeigen die Fig. 46 a und 46 b die Spannung und den Strom mit Ableiter bei einer ca. 15% kleinern Ueberspannungswelle, wobei gleichzeitig eine Betriebsspannung von 17 kV auf dem Versuchsseil bestand.

Der Strom erreicht entsprechend der starken Spannungsabsenkung hohe Werte von annähernd 2000 A während ca. 8 µs. Das Verhalten der Apparate ist ähnlich demjenigen der andern ventilartigen Ableiter, wenn auch der Ventilcharakter nicht so stark ausgeprägt ist, wie bei den Autovalves, sodass kleinere Ueberspannungen hier noch tiefer abgesenkt werden, als bei jenen. Der Bendmann-Schalter hat auf die Spannungsabsenkung keinen Einfluss.

f.) Schwingungsbegrenzer.

Diese Apparate bestehen, ähnlich wie die Ozelit-Ableiter nach Fig. 39, aus einem spannungsäbhängigen Widerstandsmaterial, Silit oder Quarzilit, und einer Funkenstrecke aus sehr vielen

Einzelfunkenstrecken mit Aluminiumelektroden. Dadurch soll einerseits die Löschfähigkeit verbessert werden; anderseits wird damit der Charakter des Kathodenfallableiters erstrebt, indem pro Funkenstrecke eine Spannung verbraucht werden soll, die nicht viel höher ist als der normale Kathodenfall in Luft. Bei den geprüften Apparaten war die Konstanz des Widerstandsmaterials nicht einwandfrei, indem sich der Widerstand jedes Quarzilitstabes nach jedem Ueberspannungsstoss erhöhte. Die Versuchsresultate waren nicht eindeutig reproduzierbar.

Fig. 47 zeigt bei einer Versuchsreihe die Spannung in Puidoux ohne Ableiter, Fig. 48 a die Spannung mit Ableiter und Fig. 48 b dessen Strom. Die Wirkung des Apparates beginnt, wie aus dem Oszillogramm ersichtlich ist, erst nach ca. 2 µs. Das ungeeignete Widerstandsmaterial ist vermutlich auch schuld daran, dass diese Ableiter nicht immer im Stande waren, nach einer stattgehabten Ansprechung den nachfolgenden Betriebsstrom wieder zu unterbrechen, sodass der geprüfte Apparate jeweils durch Kurzschluss zerstört wurde.

Aehnliche Resultate wurden auch im Vorjahr mit Schwingungsbegrenzern für dieselbe Spannung (20 kV) erhalten, wobei damals eine andere Prüfmethode angewendet worden war (siehe folgenden Abschnitt C). Auch dort erwies sich das Silit- resp. Quarzilit- Material für Ableiterzwecke als unbrauchbar, weil es in bekannter Weise 7) bei grossen Stromstössen zum Sprühen neigt, wodurch Kurzschluss und Zerstörung der Ableiter entstand.

C) Kondensatoren mit Oelpapierisolation.

Versuche über den Schutzwert von Kondensatoren wurden im Jahre 1930 nach eine andern Schaltung vorgenommen, die in Fig. 49 skizziert ist.

Bei Mast No. 201 derselben Leitung Vernayaz-Puidoux in 2,4 km Entfernung vom Unterwerk und Leitungsende Puidoux, wurde eine Phase der Uebertragungsleitung geöffnet und auf der Seite des Kraftwerkes Vernayaz ein 110 m langes Kabelstück mit verbundenen Enden angeschlossen. Die beiden Seilenden der geöffneten Leitungsphase wurden dann zu einer Kugelfunkenstrecke F geführt und der Bleimantel des Kabels an das Masteisen geerdet. Die Erzeugung einer Ueberspannung in Puidoux geschah dann auf folgende Weise: Durch Auffahren der Maschinenspannung im Kraftwerk Vernayaz wurde das Ansprechen der Funkenstrecke F bewirkt. In diesem Augenblick beginnt eine Ladewelle in das 2,4 km lange Leitungsstück nach Puidoux einzuziehen. Die Welle wird in Puidoux reflektiert, sodass dort die Spannung solange erhöht erscheint, bis das Kabel auf einen bestimmten Endwert entladen ist, nämlich soweit, dass die Zufuhr von Ladungen aus der nach Vernayaz rücklaufenden Welle gleich der Abfuhr der Ladungen vom Kabel gegen Puidoux wird. Wäre anstelle des Kabels eine konzentrierte Kapazität vorhanden, so entstände anfänglich eine Ladewelle gegen Puidoux von der Höhe der an der Funkenstrecke F eingestellten Spannung. Infolge der verteilten Kapazität des Kabels liegt dieser Wert, wie sich schon anhand der Fig. 5 und 6 ergab, ca. 6% tiefer. In Puidoux tritt infolge der Wellenreflexion anfänglich der doppelte Betrag dieser Welle auf. Setzen wir beiderseits des Kabels lange Leitungen voraus, so ist bei langsamer Spannungssteigerung vor dem Ansprechen von F der

---

7) K. Berger, Über das Verhalten der Stromwandler bei Hochfrequenz und der Schutzwert von Parallelwiderständen gegen Ueberspannungen. Bull. SEV 1927, No. 11, S. 657.

Spannungsendwert am Kabel schliesslich gleich gross, wie wenn gar kein Kabel vorhanden wäre, nämlich die Hälfte der Zündspannung. In Puidoux erscheint demzufolge schliesslich die Zündspannung als Endwert. Bei rascher Aufladung des Kabels, wenn zum Beispiel anstelle des langsamen Hochfahrens der Maschinenspannung einfach der Leitungsschalter eingelegt wird, bestehen auf der Leitung Vernayaz- Mast 201 noch Ladeströme im Moment des Ansprechens von F. In diesem Fall sinkt die Spannung in Puidoux weniger stark ab. Die Schaltung erlaubt im Gegensatz zum Blitzgenerator nicht, das Verhältnis von Ueberspannungshöhe zu Betriebspannung beliebig zu wählen, sondern im günstigsten Fall ist die Ueberspannung gleich der doppelten Betriebsspannung. Die Schaltung fand denn auch nur begrenzte Anwendung.

Fig. 50 a und 50 b zeigen als Beispiel den Spannungsverlauf in Puidoux für positive und negative Halbwelle beim Ansprechen der Funkenstrecke F des obigen Schemas, für den Fall, dass in Puidoux kein Ableiter angeschlossenen war.

Fig. 51 gibt den Spannungsverlauf am angeschlossenen Kondensator von 0,008 µs Kapazität, Fig. 52 dessen Stromaufnahme. Die Verflachung der Wellenstirn ist sehr deutlich. Ihre Dauer ist gerade so gross, dass die vom Kabel bedingte anfängliche Spannung in Puidoux absorbiert wird. Das ist im Hinblick auf das Grössenverhältnis beider Kapazitäten, nämlich 0,02 : 0,008 µF einleuchtend. Die Endspannung in Puidoux ist mit und ohne Kondensator dieselbe. Die Schutzwirkung jedes Kondensators dauert bekanntlich nur begrenzte Zeit, da er die Ueberspannungsenergie nicht in Wärme umsetzt, sondern sie aufspeichert und langsam wieder abgibt. Versuche an grösseren Kondensatoren sollen eventuell noch folgen.

VII. Schutzwert und Stromaufnahme der Ableiter.

Der Schutzwert der Ableiter ergibt sich in der untersuchten Anordnung jeweils aus der Höhe der am Leitungsende P auftretenden Spannung bei angeschlossenem und nicht angeschlossenem Ableiter. Die Spannungsmessungen in Puidoux wurden gleichzeitig mit dem KO und einer direkt an die Hochspannungsleitung angeschlossenen Messfunkenstrecke F_3 durchgeführt (siehe Fig. 1). Der Kugeldurchmesser betrug bei den ersten Versuchen 125 mm, später für alle Messungen 500 mm. Für die Eingrenzung der Spannung mit der Funkenstrecke F_3 wurden gewöhnlich 3 gleiche Stösse pro Funkenstreckeneinstellung gegeben. Die Resultate der Auswertung von mehr als 1200 Oszillogrammen, sowie der Funkenstreckenangaben sind in den Fig. 53 und 54 graphisch dargestellt. Nur die reproduzierbaren, mehrfach gemessenen Werte sind eingetragen; Apparate mit nicht eindeutigen Resultaten wurden darin weggelassen. Bei den Stromkurven sind überdies die Ableiter mit konstanten Widerständen weggelassen worden, weil sich ihre Stromwerte ohne weiteres aus der gemessenen Klemmenspannung mit Ableiter berechnen lassen.

a.) Die Spannungsabsenkung (siehe Fig. 53).

Zunächst zeigt sich mit aller Deutlichkeit, dass Ableiter mit konstanten Widerständen, z.B. mit Wasser- oder Metallwiderständen, weniger als 200 bis 500 Ohm Widerstand haben müssen, wenn sie eine nennenswerte praktische Schutzwirkung haben sollen. Hörner-Ableiter mit Wasser- oder Metallwiderständen mit grösserem Widerstand als den genannten sind als Schutz gegen atmosphärische Ueberspannungen zu verwerfen; ihre Schutzwirkung ist ungenügend. Sie können trotz ihres Ansprechens anderweitige Ueberschläge in der zu schützenden Anlage nicht sicher verhindern. Die genannte Grenze des Widerstandswertes kann sich noch entsprechend nach oben schieben, wenn mehrere Ableiter von der abzusenkenden Ueberspannung in derselben Station gleichzeitig zum Ansprechen gebracht werden. Bedenkt man, dass an Lichtbogenhörnern im allgemeinen ein Strom von ca. 10 A gerade noch von selber abreisst, so ergibt sich, dass Hörnerableiter ohne künstliche Lichtbogen-Löschung nur bis höchstens 2 ÷ 5 kV Betriebsspannung einen einigermassen wirksamen atmosphärischen Ueberspannungsschutz darstellen. Hörnerableiter für höhere Betriebsspannungen dürften endgültig aus modernen Anlagen verschwinden.

Um Missverständnisse zu vermeiden, muss erwähnt werden, dass früher Hörnerableiter auch als Mittel gegen die Entstehung der Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses angewendet wurden. Für diesen Zweck sind u.U. auch Widerstände mit grösseren Ohmwerten wirksam, als sie vorstehend zum Schutz gegen Blitzüberspannungen gefordert wurden. Für modern isolierte Netze, bei denen die Entstehung des aussetzenden Erdschlusses resp. dessen Ueberspannungen durch betriebssichere Mittel erreicht wird, ist ein Ableiterschutz gegen Erdschlussüberspannungen nicht mehr nötig. Hörnerableiter für hohe Spannungen können nur noch in veralteten, ungenügend isolierten Anlagen als Notbehelf bis zum Abbruch oder Umbau eine gewisse Berechtigung haben. Aber auch dort wird der Wert derselben oft überschätzt, sodass die Hörner mehr der Beruhigung

des Personals und allenfalls zur Anzeige der Häufigkeit von Ueberspannungen dienen als zum wirksamen Schutz gegen letztere.

Die Spannungsabsenkung und damit der Schutzwert von Ableitern mit konstanten Widerständen ist umso grösser, je kleiner der Ohmwert dieser Widerstände ist. Der in jedem Einzelfall zur Erreichung genügender Schutzwirkung maximal zulässige Wert richtet sich, wie sich aus Fig. 53 in anschaulicher Weise ergibt, nach der Höhe der maximal möglichen zulaufenden Wellenhöhe und der Höhe der Stossüberschlagsspannung der zu schützenden Anlage. Allgemeine Zahlen zu geben ist nicht möglich; doch sind Widerstände von mehr als 100 Ohm im allgemeinen nicht zu empfehlen.

Prinzipiell bessern Schutz gewähren nach Fig. 53 die Ableiter mit unkonstanten Widerständen ,d.h. mit solchen deren Widerstandwert von der Grösse der angelegten Spannung oder des durchfliessenden Stromes abhängt. Währenddem ein Ableiter mit konstantem Widerstand die ohne Ableiter gemessene Ueberspannung um einen bestimmten, konstanten Bruchteil herabsetzt (wenigstens solang nicht das Aufschaukeln der Wellen infolge sehr naher Einschläge vorkommt), wird mit unkonstanten Widerständen annähernd das Verhalten eines Ventils erreicht. Wie in Fig. 55 angedeutet ist, verschluckt der ideale Ventilableiter beliebig grosse Ströme, ohne seine Klemmenspannung über einen gewissen Maximalwert U_m hinaus anwachsen zu lassen. Im Gegensatz dazu erhöht der Ableiter mit konstantem Widerstand seine Klemmenspannung proportional dem abgeleiteten Strome (siehe Fig. 56). Der Einfachheit halber ist in den Figuren ein Ableiter ohne Funkenstrecke angenommen. Zum Vergleich ist auch die Betriebsspannung U_B eingezeichnet. Beim Ventilableiter wird dementsprechend das Verhältnis der Ableiterklemmenspannung zur ohne Ableiter gemessenen Ueberspannung bei grössern Wellen immer kleiner; es beträgt z.B. beim Bendmann-Ableiter nach e) bei 250 kV-Wellen noch knapp 1/9, entsprechend einem bei hohen Ueberspannungen wirksamen Ableiterwiderstand von weniger als 50 Ohm. Aehnlich ist es auch beim Porous-Block-Autovalve. Für Anlagen, die an Holzstangenleitungen angeschlossen sind, ist die Höhe der zulaufenden Ueberspannungs-Welle nicht durch die Isolatoren, sondern durch die Ueberschlagsspannung der Holzstangen begrenzt. Sie erreicht Werte von ca.10 Millionen Volt. In diesem schlimmsten Fall nützt es nichts, die in der Anlage auftretende Spannung z.B. auf 1/3 oder 1/4 des Wertes zu reduzieren, weil auch dieser Betrag noch zu Ueberschlägen und Störungen führen würde. Ein passender ventilartiger Ableiter dagegen, der den zugeführten Wellenstrom und eventl. bei nahen Blitzeinschlägen auch den aufgeschaukelten Strom abführt, ohne seine Klemmenspannung unzulässig zu erhöhen, vermag auch im Fall sehr hoher Ueberspannungswellen die Station vor Ueberschlägen zu schützen.

Die Resultate sind verschieden für die verschiedenen Fabrikate. Dem Verhalten des idealen Ventils kommen die sogenannten Autovalves der neuern Porous-Block-Type am nächsten. Bezüglich der Grösse der Spannungsabsenkung war ein untersuchter Bendmann-Ableiter noch etwas wirksamer, insbesondere für kleinere und mittlere Ueberspannungen. Auch Ozelit- und Kathodenfallableiter (ältere Autovalve-Type) nähern sich dem Verhalten eines Ventils, wenn auch ihre Spannung mit wachsendem Strom immer schwach weiter ansteigt.

Wesentlich ist das Verhältnis der maximalen Klemmenspannung U_m des Ableiters zur Betriebsspannung des geschützten Netzes U_B und zur Typenspannung des Apparates. Letztere muss mit der Betriebsspannung nicht identisch sein; ein Unterschied muss namentlich bei den neuern Autovalves je nach der Betriebsart des zu schützenden Netzes gemacht werden. Für die für die Fahrleitung der SBB als geeignet betrachteten Typen ergeben sich bei der maximal möglichen Wellenhöhe des untersuchten 15 kV-Netzes (ca. 250 kV max.) folgende Zahlen :

Porous-Block-Autovalve SV 20 kV, U_m = 65 kV max. U_m/U_B = 2,7.

Kathodenfall- " LV 18 kV, U_m =100 bis 110 kV max. U_m/U_B = ca. 4.

Bendmann-Ableiter
mit keramischem Widerstand 17kV, U_m = 60 kV max. U_m/U_B = 2,5.

Ozelitableiter 15kV, U_m =120 kV max. U_m/U_B = 5 .

Entsprechend dem ventilartigen Verhalten bleiben die Spannungswerte der ersten zwei Apparate wenig verändert, auch bei kleineren Ueberspannungen. Dagegen sinken die kV-Zahlen bei den letzten 2 Apparaten bei kleineren Ueberspannungen bis auf etwa den halben Betrag, d.h. bei letztern Apparaten sinkt auch das Spannungsverhältnis U_m/U_B bei kleinern Ueberspannungen. Je nach dem Verhältnis der Ueberschlagsspannungen von Leitung und Station einer zu schützenden Anlage kommt deshalb bei letztern 2 Apparaten ein anderes, meist kleineres Verhältnis U_m/U_B in Betracht. In kleinerm Mass gilt das auch vom Kathodenfall-Ableiter, da auch dieser kein reines Ventil ist (siehe Fig. 53). Bedenkt man, dass in den angeführten Fällen ohne Ableiter eine Spannung von ca. 500 kV auftritt, so wird der Fortschritt der letzten Jahre im Bau wirksamer Ableiter offensichtlich.

Bei den Ableitern, bei denen sich der Strom im Verlauf der Wellenschwingung stark aufschaukelt, war auch ein Ansteigen der Klemmenspannung, wenn auch in schwächerm Mass zu erwarten. Die beobachtete Erhöhung ist nur klein; sie ist aus Fig. 53 ersichtlich. Bei den Autovalves wurde die Erscheinung nicht beobachtet, wahrscheinlich aus dem bereits im letzten Kapitel bei der Oszillogramm-Besprechung angegebenen Grund der Schleifenbildung in der Stromspannungs-Charakteristik dieser Apparate.

Schliesslich ist zu erwähnen, dass das Vorhandensein der Betriebsspannung die Grösse der Ableiterklemmenspannung im Moment von Ueberspannungen nur unwesentlich beeinflusste. Die Streuung der Messwerte schien mit Betriebsspannung etwas grösser zu sein. Zur Bestimmung der Spannungsabsenkung genügt deshalb die Messung ohne Betriebsspannung, wenigstens bei den im Vergleich zur Betriebsspannung hohen Ueberspannungswellen. In Fig. 53 sind die mit der Funkenstrecke F_3 gemessenen Kurven gestrichelt eingezeichnet. Es zeigt sich bei den Ableitern mit starker Spannungsabsenkung ein wesentlicher Unterschied in der Höhe der mit Funkenstrecken und mit KO gemessenen Spannung. Die Funkenstreckenwerte liegen stets höher, im allgemeinen umsomehr, je

grösser der Ableiterstrom ist. Die Spannungsmessungen mit Funkenstrecke und KO stimmen dagegen gut überein in allen Fällen, wo kein Ableiter angeschlossen war oder wo dieser nur mässige Ströme aufnahm. Die Ursache der Erscheinung liegt wahrscheinlich in der von der raschen Stromänderung induzierten EMK in der Schleife zwischen Ableiter und Messfunkenstrecke F_3. Die Abschätzung der elektromagnetisch von einer Ableiterstromänderung von 1000 A/μs induzierten Spannung gibt in der Tat beträchtliche induzierte Spannungen von der Grössenordnung 20 kV, das sind Spannungen, wie sie bei den Versuchen als maximale Abweichungen von den oszillographischen Messungen konstatiert wurden. Die Folgen der Beobachtung sind zunächst rein messtechnische, nämlich die Erkenntnis, dass die Stromänderungen bei Stossversuchen Spannungen zu induzieren vermögen, die sogar die Hochspannungsmessung mit Funkenstrecken fälschen können. Zweitens ergibt sich als praktische Folgerung, dass zwischen der Klemmenspannung eines guten Ableiters und entfernten Punkten einer Schaltanlage infolge der elektro-magnetisch beim Ansprechen des Ableiters induzierten EMK beträchtliche, wenn auch nur kurzdauernde Spannungsunterschiede entstehen können. Diesem Punkt ist unseres Wissens bisher keine Beachtung geschenkt worden. Er bedingt eine vermehrte zu fordernde Sicherheit und den Einbau des Ableiters in möglichster Nähe des zu schützenden Objektes, weil demzufolge örtliche Spannungsunterschiede in einer geschützten Anlage nicht nur den bekannten Teilreflexionen, sondern auch den induzierten Spannungen zuzuschreiben sind.

b.) Die Stromaufnahme (Fig.54) der spannungsabhängigen Ableiter steigt viel rascher als ihre Klemmenspannung. In den Kurven sind zwei Werte eingezeichnet: Der Anfangswert I_o, der während des ersten Wellenhin- und Rücklaufs vom Ableiter zum Stossgenerator aufgenommen wird, und zweitens der im Verlaufe der Wellenschwingung erreichte Stromhöchstwert I_m im Ableiter.

Der Strom I_o entspricht dem aufgenommenen Wellenstrom infolge einer aus weiter Entfernung über die Leitung zufliessenden Ueberspannungswelle von der Höhe des Abszissenbetrages, das ist der Minimalwert des Stromes, den der Ableiter bei der betreffenden Ueberspannungshöhe bewältigen muss. Der Strom I_m ist vorwiegend durch die Versuchsanordnung bedingt: Je näher und kapazitätsreicher der Stossgenerator ist, auf umso höhere Werte I_m schaukelt sich der Ableiterstrom auf. Der entsprechende Fall der atmosphärischen Ueberspannung ist ein Blitzschlag in einen schlecht geerdeten Mast in 600 m Entfernung vor dem Unterwerk Puidoux, an dessen Erdung nach dem Leitungsüberschlag ein der Wellenhöhe gleicher Spannungsabfall infolge des Blitzschlages entsteht. Der Ableiterstrom I_m erreichte bei den Versuchen mit 250 kV-Wellen die Grösse von 2000 A max. bei einem anfänglichen Wellenstrom I_o von ca. 1000 A. Die neueren Porous-Block-LV-Autovalves änderten bei solchen Stössen ihre Eigenschaften und gingen zu Grunde. Der Ozelitableiter überschlug bei dieser Beanspruchung zum Teil. Die neueren Porous-Block-SV-Autovalves und der spannungsabhängige Bendmann-Apparat, sowie die ältere Kathodenfall-Autovalve-Type hielten dagegen 50 solcher kräftiger

Stromstösse bei 230 kV Wellenhöhe und einem zeitlichen Abstand von 1/2 bis 1 Minute max. zwischen je zwei Stössen ohne merkliche Veränderung ihres mit dem KO kontrollierten Verhaltens aus. Auch die Erwärmung der Apparate blieb in zulässigen Grenzen.

Bei den Kathodenfall-Autovalves für 18 kV-Typen-Spannung waren 4 Stück zum Versuch verfügbar. Einer davon war bereits während zwei Jahren in einem 16 kV-Netz eingebaut gewesen. Die für diese 4 gleichen Apparate gemessenen Stromwerte liegen innerhalb des in Fig.54 schraffierten Bereiches. Der Unterschied der Klemmenspannungen dieser gleichen Stücke ist kleiner; er liegt innerhalb der Grenzen der Messfehler. Als ein Hauptresultat geht aus den Strommessungen hervor, dass moderne Ableiter im Stande sind, kurzzeitige Stromspitzen von ca. 1000 ÷ 2000 A max. ohne Beschädigung auszuhalten.

c.) Veränderte Art des Einbaus von Ableitern, z.B. in einer Durchgangsstation statt in der Kopfstation, verändert auch die Schutzwirkung. Doch kann aus den Fig. 53 und 54 ebenfalls ein Urteil gewonnen werden. In einer reinen Durchgangsstation (nur 2 Leitungen gehen von denselben Sammelschienen aus) tritt ohne Ableiter anstelle der reflektierten Spannung von der doppelten Wellenhöhe nur die einfache Wellenspannung auf, wenn von Teilreflexionen in der Schaltanlage abgesehen wird. Diese 45°-Linie ist in der Fig.53 strichpunktiert eingetragen (Kurve 6). Der Ableiter selber wird durch die abgehende Leitung entsprechend ihrem Wellenwiderstand entlastet. Für schlechte Ableiter mit mehr als 500 Ohm wirksamem Widerstand,(bei Ueberspannung gemessen) macht dieser Parallelwiderstand von ca. 500 Ohm eine merkliche Hilfe aus. Für gute Ableiter mit weniger als 500 Ohm wirksamem Widerstand dagegen macht der parallel geschaltete Wellenwiderstand der Leitung mit ca. 500 Ohm sehr wenig aus, sodass die abgesenkte Spannung in Durchgangsstationen nur wenig tiefer liegt als in den Kurven der Fig.53 für die Kopfstation. Für die wirksamsten Ableiter konnte ein Unterschied überhaupt nicht festgestellt werden, auch nicht mit nur 240 Ohm Parallelwiderstand entsprechend 2 entlasteten Leitungen, wenn es sich um beträchtlich hohe Ueberspannungen handelte.

Der relative Schutzwert eines Ableiters (Spannung ohne Ableiter zu Spannung mit Ableiter) ist deshalb in einer Kopfstation am grössten. Die massgebende absolute Ueberspannung (maximale Klemmenspannung des Ableiters) erreicht in einer Kopfstation unter Umständen etwas höhere Werte als in einer an derselben Leitung mit denselben Isolatoren angeschlossenen Durchgangsstation. Der Unterschied ist umso grösser, je mehr sich das Verhalten des Ableiters von demjenigen eines Ventils entfernte, oder je höher der wirksame Ableiterwiderstand ist. Auch aus diesem Grunde scheint die Prüfanordnung am Leitungsende für die Praxis massgebend zu sein.

VIII. Ansprechspannung und Ansprechverzug.

a.) Im Gegensatz zu den Kondensatoren werden bei sämtlichen Ableitern für Hochspannungsanlagen vorgeschaltete Funkenstrecken

angewendet, die den Stromdurchgang während des überspannungsfreien Betriebes verhindern. Zwischen der Höhe der Ansprechspannung und dem Schutzwert eines Ableiters besteht kein direkter Zusammenhang, solange die Ansprechspannung tiefer liegt als der vom konstanten oder unkonstanten Widerstand des Ableiters bedingte Spannungsabfall während des Ableitens einer Ueberspannung. Es ist nicht etwa so, dass die Spannung am Ableiter von der Funkenstrecke nach oben begrenzt wird, in dem Sinne, dass diese nie höher sein könnte, als der an der Funkenstrecke eingestellte Wert. Denn nach dem Ansprechen der Funkenstrecke liegt praktisch die ganze Klemmenspannung des Ableiters am Widerstand. Sie erreicht dort Werte, die im vorigen Kapitel genannt wurden und die praktisch unabhängig sind von der Grösse der Funkenstrecken-Einstellung. Die Funkenstrecke bestimmt lediglich den Schwellenwert der Spannung, unterhalb dem der Ableiter überhaupt nicht zur Wirkung kommt.

Prinzipiell soll bei modernen Ableitern gegen Blitzüberspannungen die eingestellte Funkenstrecken-Ansprechspannung einerseits nicht zu niedrig sein. Wirksame Ableiter müssen, wie wir gesehen haben, bei Ueberspannungen einen sehr grossen Strom aufnehmen, der eine beträchtliche Wärmeerzeugung im Ableiter bedingt. Die Dauer der atmosphärischen Ueberspannung ist nun zwar so kurz, dass die Erwärmung während dieser Zeit keine praktische Rolle spielt. Dagegen bewirkt der bis zum Löschen des Ableiterstromes nachfliessende Betriebsstrom u.U. eine nach wenigen Sekunden bereits gefährliche Ueberhitzung des Widerstandsmaterials, die unter allen Umständen vermieden werden muss, wenn der Ableiter nicht zu Grunde gehen soll. Daraus folgt insbesondere, dass ein Ableiter atmosphärischer Ueberspannungen von den Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses im allgemeinen nicht zum Ansprechen gebracht werden darf. Nach einer sekunden- oder minutenlangen Dauer jener Ueberspannungen wäre eine thermische Ueberlastung und anschliessende Zerstörung des Apparates unvermeidlich, weil eben der Apparat fortwährend zünden, Strom führen und dabei überlastet würde. Davon überzeugt man sich sofort, wenn man bedenkt, dass z.B. der Ozelitableiter für 15 kV-Betriebsspannung bei dieser Spannung rund 100 kW aufnimmt, der untersuchte Bendmannableiter sogar rund 700 kW. Dieser sehr wichtige Punkt ist eine logische Folgerung aus der Erkenntnis der Anforderungen, die an wirksame Ableiter atmosphärischer Ueberspannung gestellt werden müssen. Einen Ausweg bietet nur der ideale Ventilableiter nach Fig. 55 der unterhalb der Ventilspannung überhaupt keinen Strom aufnimmt. Alle heutigen Ventilableiter sind aber noch so weit von diesem idealen Vorbild entfernt, dass obige Forderung heute allgemein gilt; d.h. mit andern Worten, dass ein Hochspannungsnetz, das so knapp isoliert ist, dass es den Beanspruchungen durch Erdschlussüberspannungen nicht gewachsen ist, überhaupt nicht mit wirksamen und zugleich betriebssicheren Ableitern gegen atmosphärische Ueberspannungen geschützt werden kann. Irgendwelcher Schutz gegen Erdschlussüberspannungen kann von modernen Ableitern atmosphärischer Ueberspannungen keinesfalls übernommen werden. Der Wirkungsbereich letzterer Apparate liegt nur in dem schmalen Bereich zwischen den höchsten, betriebsmässig vorkommenden, mindestens einige Sekunden

dauernden Ueberspannungen (praktisch meistens Erdschlussüberspannungen), und der Stossüberschlagsspannung der zu schützenden Station. Ist diese Bedingung der genügend reichlichen Isolation der Hochspannungsanlage nicht erfüllt, so scheinen nur zwei Auswege möglich:

1.) Entweder wird auf die Vermeidung von Ueberschlägen in den Stationen als Folge von atmosphärischen Ueberspannungen mit Hilfe moderner, wirksamer Ableiter verzichtet, (Verzicht auf Ueberspannungsschutz), oder

2.) Es muss mit hin- und wieder vorkommenden Ableiter-Defekten, hauptsächlich als Begleiterscheinung von langdauernden Erdschlüssen, in Netzen ohne starre Nullpunktserdung, gerechnet werden.[8]

Die Ansprechspannung atmosphärischer Ableiter muss demnach mindestens so hoch sein, wie die grösste während mehreren Sekunden nacheinander vorkommende Erdschlussüberspannung des zu schützenden Netzes. In Netzen mit starrer Nullpunktserdung kommen langdauernde Erdschluss-, oder Schaltüberspannungen nicht vor, weil die Erdschlüsse zu Kurzschlüssen und somit zur raschen Abschaltung des gestörten Netzteiles führen. Aus diesem Grund darf die Ansprechspannung der Funkenstrecke hier tiefer eingestellt werden, als in ungeerdeten Netzen. Aehnlich ist es in Anlagen mit starrer Polerdung, speziell in Fahrleitungsnetzen. Natürlich sprechen auch praktische Erwägungen mit, bei kleinen Schlagweiten z.B. die Veränderung der Ansprechspannung durch das Anbrennen der Elektroden u.s.w.

Bedenkt man nun andrerseits, dass bei Spannungen unterhalb der Ansprechspannung eine Schutzwirkung des Ableiters überhaupt nicht vorhanden ist, sodass die Einstellung jener unter allen Umständen tiefer liegen muss als die Ueberschlagsspannung der zu schützenden Station, so geht aus den obigen Ueberlegungen hervor, dass die Grenzen der richtigen Einstellung der Funkenstrecken von atmosphärischen Ableitern u.U. sehr eng sind, und zwar umso enger, je schlechter das zu schützende Netz isoliert ist.

Die meisten untersuchten Ableiter besassen festeingestellte Funkenstrecken. Die Ansprechspannung dieser Apparate betrug bei den Versuchen :

Für den 15 kV-Ozelitableiter ca. 30 kV_{eff} (ca. 2-fache Nennspannung),

" die 18 kV-Kathodenfall-Autovalves ca. 55 kV_{eff} (ca. 3-fache Typenspannung),

" die 20 kV-Porous-Block-SV ca. 55 kV_{eff} (ca.2,75-fache Typenspannung),

" die 20 kV- " " -LV mehr als 60 kV_{eff} (mehr als 3-fache Typenspannung).

8) Aus einer solchen Erwägung heraus entstand wohl die amerikanische Auffassung des Ableiters als "Versicherungsprämie" gegen Ueberspannungsschäden. Siehe C.L.Fortescue, The Electric Journal, June 1930.

Bei den 3 letztgenannten, amerikanischen Typen ist ausserdem zu berücksichtigen, dass die Typenspannung immer der höchsten vorübergehenden Betriebsspannung entspricht (Bezeichnung auf dem Apparateschild: Maximum Dynamic Voltage). Verglichen mit dem Nennwert der Betriebsspannung wird deshalb das Vielfache noch etwas höher werden, insbesondere in Netzen ohne starre Nullpunktserdung, wie auch aus den Prospekten der Lieferfirma hervorgeht.

Naturgemäss muss jede zu schützende Station alle Ueberspannungen bis zur Höhe der Ansprechspannung eines einzubauenden Ableiters anstandslos aushalten, sonst ist ein solcher Ableiter zum Voraus ungeeignet.

Nur die untersuchten Bendmann-Ableiter besassen einstellbare Funkenstrecken. Tiefere Einstellung, als den obigen Grundsätzen entspricht, führt auch hier bei wirksamen (niederohmigen) Apparaten notwendig zur Betriebsunsicherheit. Die vielleicht z.T. immer noch allzuhohe Einstellung der Funkenstrecke amerikanischer Apparate entspricht zum grossen Teil der Erkenntnis der Wichtigkeit ihrer Betriebssicherheit ("Selbstschutz der Ableiter"). In Europa herrscht im allgemeinen der Wunsch, die Ansprechspannung möglichst tief zu wählen, weil unterhalb derselben vom Ableiter keine Schutzwirkung zu erwarten ist. Auf Grund der vielen in den letzten Jahren durchgeführten Ueberspannungsmessungen in elektrischen Anlagen dürften heute die vernünftigen Mittelwerte fixiert sein.

b.) Unter Funkenverzug oder Funkenverzögerung versteht man bekanntlich die Zeit, die vom Erreichen der statischen Ansprechspannung bis zum Einsetzen des Funkens einer Funkenstrecke verstreicht. Bei den Versuchen wurde dieser Erscheinung nur soweit Beachtung geschenkt, als sie sich so stark erwies, dass ihr praktische Bedeutung zukam.

Das betraf einmal eine mit zu kleinen Kalotten ergänzte Hornfunkenstrecke eines bereits auf Seite 11 erwähnten Ableiters, und das andere Mal eine mit einer Glashohlkugel gekapselte Kugelfunkenstrecke.
Fig. 18 zeigte den Spannungsverlauf des betreffenden 66 kV-Bendmannableiters mit 500 Ohm Hauptwiderstand aus Metall in Oel und einer auf ca. 110 mm eingestellten Horn-Kalotten-Funkenstrecke. Die Ursache der anfänglichen Spannungsspitze war fraglich. Durch Kurzschliessen der Funkenstrecken ergab sich der Spannungsverlauf nach Fig. 19. Die Spitze ist verschwunden; sie war demgemäss von der Funkenstrecke verursacht. Eine Kugelfunkenstrecke, bestehend aus 125 mm-Kugeln mit 2 von der Lieferfirma vorgesehenen glimmenden Scheiben hinter den Elektroden, ergab bei gleicher statischer Ansprechspannung entsprechend 56 mm Schlagweite den Spannungsverlauf am Ableiter nach Fig. 21. Zum Vergleich gibt Fig. 22 noch den unmittelbar anschliessend gemessenen Verlauf mit kurzgeschlossener Funkenstrecke. Der unerwünschte Verzug mit der damit verbundenen anfänglichen Spannungserhöhung und Verminderung des Schutzwertes wird durch die Anwendung der zweiten Funkenstrecke mit Kugelelektroden vermieden.

Beim zweiten Fall war bei den für Freiluftaufstellung bestimmten Ableitern der SBB zum Abschluss gegen Regen, Schnee und Insekten die Kugelfunkenstrecke der 15 kV-Ueberspannungsschutzapparate, System Bendmann, in eine hohle Glaskugel gesetzt worden mit einem Aussendurchmesser von ca. 150 mm und einer Wandstärke von ca. 5 mm. An diesen Funkenstrecken zeigte sich eine abnormale Verzögerungserscheinung, die, weil sie praktisches Interesse bot, besonders untersucht wurde. Es würde aber zu weit führen, hier auf Einzelheiten einzugehen. Als Resultat sei hier genannt, dass sich bei sehr steilen, aber langen Wellen mit 480 bis 30 μs Rückenzeit konstante Werte des Impulsfaktors von 2,1 bis 3,6 als obere Grenze ergaben bei Schlagweiten der Kugelfunkenstrecke von wenigen mm. Diese abnormale Verzugserscheinung verschwand praktisch restlos, wenn die Luft in der Glaskugel ionisiert wurde. Dagegen trafen bei flachen Wellen, deren Steilheit in der Grössenordnung von 1 kV pro μs lag, immer noch Verzögerungserscheinungen auf, die durch keine der untersuchten Ionisierungsarten (Radium, Glimmspitzen, Quarzlampe) ganz unterdrückt werden konnten. Durch Entfernen der Glasumhüllung verschwand die abnormale Funkenverzögerung. In der Literatur wurde schon oft auf den ungünstigen Einfluss naher Isolierflächen auf die Genauigkeit von Messkugelfunkenstrecken hingewiesen. [9] Jedenfalls zeigte sich hier eine ausserordentlich starke Beeinflussung des Funkenverzuges durch die Glasumhüllung der Funkenstrecke. Eine Beschreibung dieser Versuche ist vielleicht später möglich.

IX. Löschfähigkeit und Betriebssicherheit moderner Ableiter.

Die Betriebssicherheit eines Ueberspannungsableiters, die bekanntlich als erste Forderung zu gelten hat, hängt in erster Linie von der Fähigkeit ab, den beim Ansprechen eingeleiteten Strom nach kurzer Zeit wieder zu unterbrechen. Beim Hörnerableiter wird dieses Unterbrechen durch das Hochsteigen des Lichtbogens bewirkt, indem sich dieser verlängert und schliesslich abreisst. Dazu sind einige Zehntel bis mehrere Sekunden erforderlich. Für wirksame Ableiter kann diese Zeit bereits zu lang sein; anderseits ist die Stromgrösse, die auf diese Weise noch unterbrochen werden kann, ziemlich klein.

Bei den untersuchten Apparaten sind zwei verschiedene Methoden der Unterbrechung des Ableiterstromes angewendet. Die erste meistgebräuchliche Methode besteht im Zusammenwirken eines ventilartigen, spannungsabhängigen Widerstandsmaterials mit einer Löschfunkenstrecke (Vielfachfunkenstrecke).

Sowohl beim Ozelit-Ableiter, wie bei den Autovalves der ältern und neuern Type ist dieses Prinzip angewendet.

9) Siehe z.B. Schumann: Die elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen, Verlag J. Springer, Berlin.

Es besteht darin, den Ableiterstrom im Nulldurchgang der stationären Betriebsspannung gegen Erde definitiv zu sperren, d.h. die neue Zündung der folgenden Wechselstromhalbwelle zu verhindern. Weil beim spannungsabhängigen Widerstand der Strom mit abnehmender Klemmenspannung viel rascher als linear abnimmt, ist die Bedingung für das Nicht-mehr-neu-Zünden des Funkens sehr günstig. Je mehr das Widerstandsmaterial das Verhalten eines Ventils zeigt, umso leichter und sicherer vermag die Seriefunkenstrecke den kleinen Reststrom noch definitiv zu unterbrechen. Bei den Autovalves ist man berechtigt, von einer beträchtlichen Gegen-EMK des Widerstandsmaterials zu sprechen. Beim Rückgang der Klemmenspannung auf die Betriebsspannung sinkt der Strom auf einen kleinen Endwert ab, der von der Vielfachfünkenstrecke definitiv unterbrochen wird. Ein ideales Ueberspannungsventil-Material hätte eine Funkenstrecke überhaupt nicht nötig. Ein entsprechender Ableiter liesse sich ohne weiters auch für Gleichstromanlagen verwenden. Das ist heute nicht der Fall, sondern der kleine Reststrom bei Betriebsspannung muss von einer Löschfunkenstrecke unterbrochen werden, indem sie den Stromnulldurchgang des Wechselstroms abwartet und darauf die neue Zündung verhindert. Abgesehen vom Fall, wo Ableiter mit zu hohen Wellenströmen beansprucht wurden, geschah die Löschung des Ableiterstromes bei den Versuchen einwandfrei.

Die zweite Methode zur Unterbrechung des Ableiterstromes ist jene der Bendmann-Ableiter. Diese besitzen eine besondere, elektromechanisch betätigte, mechanische Schaltvorrichtung zur Stromunterbrechung. Sie besteht nach Fig.10 darin, dass die Funkenstrecke nach ihrem Ansprechen rasch kurzgeschlossen, somit gelöscht, und der Kurzschlusschalter sodann unter Oel wieder geöffnet wird. Zur Betätigung dient eine Magnetspule, die parallel liegt zu einem Shunt, der vom Ableiterstrom durchflossen wird. Bei den Versuchen hat sich diese Art der Stromunterbrechung bei Strömen bis 130 A und 66 kV-Betriebsklemmenspannung bewährt. Das ist leicht zu verstehen, da die Abschaltung unter Oel einer rein Ohm'schen Belastung von einigen Hundert oder einigen Tausend kW keine Schwierigkeiten bietet. Bei Anwendung dieses Apparates in Netzen mit kleinem Erdschlusstrom, oder in fast restlos kompensierten Netzen, besteht eine gewisse Schwierigkeit darin, dass der Schaltmagnet u.U. bei sehr verschiedenen Strömen arbeiten muss. Spricht der Ableiter nämlich im erdschlussfreien Betrieb an, so hat der Schaltmagnet nur den Erdschlusstrom zur Verfügung. Spricht ein Ableiter dagegen während des Erdschlusses einer andern Phase an, so liegt am betreffenden Ableiter die ganze verkettete Spannung, und der Ableiterstrom erreicht entsprechende Werte, die das Vielfache des Erdschlusstromes sein können. Eine auffallende Erscheinung bei diesen Apparaten ist das gelegentlich auftretende sogenannte "Pumpen", nämlich das bei einer einmaligen Ueberspannung auftretende mehrmalige Ansprechen in Abständen von weniger als 1 Sekunde. Die Ursache dieser Erscheinung ist nicht bekannt. Ihrer Aufklärung kommt im Hinblick auf die Kürze der zulässigen Belastungsdauer praktische Bedeutung zu, weil das mehrmalige "Pumpen" notwendig zu einer Ueberlastung und event. Zerstörung des wirksamen Ableiters führt.

Während bei den Autovalves ein Löschen des Ableiterstromes als Folge des Aufhörens der Ueberspannungsursache erfolgt, nämlich dann, wenn die Spannung am Ableiter unter die Löschspannung desselben sinkt, unterbricht der Bendmann-Ableiter den Ableiterstrom ohne Rücksicht auf mehr oder weniger Betriebsspannung nach einer bestimmten Zeit. Diese Methode bietet gewisse Vorteile für Netze ohne starre Nullpunktserdung, wie aus folgendem hervorrgeht. Spricht ein Autovalve-Ableiter in einem ungeerdeten Netz an, zu einer Zeit, wo eine andere Phase Erdschluss hat, so ist die Unterbrechung des Ableiterstromes nicht mehr sicher möglich, denn die Spannung zwischen Ableiter und Erde ist infolge des Ueberschwingens der gesunden Phase beim Lichtbogenerdschluss grösser als die verkettete Betriebsspannung. Wird die Typenspannung (Maximum-Dynamic-Voltage) gleich der verketteten Betriebsspannung gewählt, was mit Rücksicht auf den erforderlichen Schutzwert dringend erwünscht ist, so übersteigt die während des Erdschlusses dem Ableiter aufgedrückte Netzspannung die Löschspannung dieses Apparates. In diesem Fall ist ein Defekt desselben zu erwarten. Dieses Risiko wird dadurch zu rechtfertigen gesucht, dass die Lieferfirma den Ableiter als Versicherungsprämie betrachtet. Je besser der Schutzwert, d.h. je tiefer die Typenspannung zum Schutz eines bestimmten Netzes gewählt wird, umsomehr Ableiterdefekte kommen vor, d.h. umso höher sind die Versicherungsprämien, die in diesem Fall dem Ableiterlieferanten bezahlt werden. Für Netze mit starrer Nullpunktserdung scheint die Löschung des Ableiterstromes resp. die Betriebssicherheit genügend gewährleistet. Für Netze ohne starre Nullpunktserdung ist diese Löschung nicht ganz befriedigend, weil der Kompromiss zwischen Schutzwert und Betriebssicherheit oft schwer zu lösen ist, insbesondere wieder in knapp isolierten Anlagen. Das Bendmann-Prinzip vermeidet diesen Kompromiss, indem es für die Stromunterbrechung einen besondern, vom spannungsbegrenzenden Teil unabhängigen Apparateteil vorsieht.

Bei neuern LV-Typen der Autovalves erfolgte z.T. keine betriebssichere Unterbrechung des Ableiterstromes, sondern es entstand Kurzschluss. Als Ursache ergab sich hier die Beschädigung der Apparate durch zu hohe Wellenströme von über 1000 A max., die im Porous-Block einen Kanal ausbrannten, auf den sich offenbar der gesamte Strom konzentrierte. Bei den SV-Typen war diese Erscheinung bei Strömen bis 2000 A max. nicht wahrzunehmen, was dem grössern Querschnitt dieser Type entspricht. Hier war die Stromunterbrechung der 20 kV-Type bei maximal 17 kV-Betriebsspannung stets einwandfrei.

Andere Ableiter mit Mehrfachfunkenstrecken, bei denen als Widerstandsmaterial Silit resp. Quarzilit verwendet war, erwiesen sich als nicht betriebssicher, indem die Stromunterbrechung nicht zuverlässig erfolgte. Die Oszillogramme und Besichtigung der Apparate ergaben, dass bei einem Fabrikat schon während der Dauer der Ueberspannung, bei einem andern kurz nachher das Silitmaterial überschlug, wodurch Kurzschluss entstand, der von der Vielfachfunkenstrecke mit ca. 60 Einzelstufen nicht gelöscht werden konnte, sodass der Transformator-Schalter jeweils auslöste. Von der Verwendung von Silit für Ableiter ist

abzuraten. Die Sprüh- und Ueberschlagsgefahr ist grösser als bei den Ueberbrückungswiderständen an Stromwandlern. Sie ist derart, dass solche Ableiter nicht als betriebssicher gelten können. Das Versuchsresultat steht in Einklang mit den Erfahrungen der Praxis, wonach solche Ableiter, wenn sie ansprechen, nicht selten zerstört werden.

Abgesehen von diesen Versuchsresultaten kann über die Betriebssicherheit der modernen Ableiter noch nicht viel ausgesagt werden, da sie noch zu neuen Datums sind, als dass bereits sichere Erfahrungen über das Verhalten im jahrelangen Betrieb möglich wären. Immerhin sind die Versuchsresultate so, dass sich die Verwendung der Apparate in der Praxis in bestimmten Fällen zu rechtfertigen scheint. Das endgültige Urteil über die Betriebssicherheit der Apparate muss dagegen, wie immer bei neuen Apparaten, der Betriebserfahrung selber vorbehalten bleiben.

X. Möglichkeiten und Aussichten des modernen Ueberspannungsschutzes.

a.) Der Zweck der Ableiter zum Schutz gegen atmosphärische Ueberspannungen kann nur der sein, in Kraft- und Unterwerken und andern Stationen Ueberschläge und Defekte als Folge vom atmosphärischen Ueberspannungen zu verhindern. In der vorliegenden Untersuchung sprechen wir ausschliesslich von Hochspannungsanlagen. Der Stationsschutz wird erreicht, wenn es gelingt, die Spannung der Phasen gegen Erde im Augenblick zulaufender Ueberspannungswellen auf einen bestimmten, höchstzulässigen Wert zu begrenzen. Nach den Erfahrungen der letzten Jahre mit Transformatoren schweizerischer Herkunft ist ein besonderer Schutz gegen die Wirkungen steiler Wellenfronten (Windungsschutz) nicht notwendig.

Die Frage des Ueberspannungsschutzes (Blitzschutes) von Leitungen ist von derjenigen des Schutzes von Stationen grundverschieden. Für den Schutz von Leitungen kommen die vorstehend untersuchten Ableiter nach unserer Auffassung keineswegs in Betracht, sondern der Blitzschutz der Leitungen ist eine Frage der Masterdung, der Erdseile und der durchschlags- und lichtbogensicheren Isolatoren. Davon soll hier nicht die Rede sein.

b.) Auf die Frage, wie weit ein Bedürfnis eines Blitzschutzes der Stationen vorhanden ist, kann hier nur kurz eingegangen werden. Die Häufigkeit atmosphärischer Ueberspannungen ist neben dem gewünschten Grad der Betriebssicherheit wohl der Hauptfaktor, der bei einem allfälligen Einbau eines Ueberspannungsschutzes berücksichtigt werden muss. Aus den Untersuchungen der letzten Jahre geht hervor, dass in unsern Gegenden atmosphärische Ueberspannungen an einer bestimmten Messtelle nach bisheriger Anschauung recht selten vorkommen, seltener als z.B. in einem grossen Teil der Vereinigten Staaten von Nordamerika. Das gilt besonders für Netze mit 50 kV-Betriebsspannung und mehr. [10] Das seltene Vorkommen von Ueberspannungen ist erst verständlich geworden durch die Erkenntnis, dass in Netzen mit mindestens 50 kV-Betriebsspannung

10) Vergleiche z.B. die Statistiken von Ph.Sporn im JAIEE 1928-1931 mit derjenigen der Schweiz.Bundesbahnen (Bull.SEV 1932,No.12).

nur direkte-Blitzeinschläge in die Leitungen zu Störungen führen, dagegen in 8 kV-Netzen auch indirekte Blitze noch Ueberschläge verursachen können. Die Anzahl gefährlich hoher Blitzüberspannungen, die ein bestimmter Transformator jährlich auszuhalten hat, kann im allgemeinen an den Fingern einer Hand abgezählt werden. Die frühere Anschauung, dass die Wicklungen von Transformatoren durch viele Ueberspannungen, die vom Betrieb gar nicht wahrgenommen werden, allmählich zermürbt würden, ist falsch. Man darf etwa so sagen: Nennenswerte atmosphärische Ueberspannungen werden vom Betriebe in den allermeisten Fällen als Erdschluss oder Kurzschluss wahrgenommen; während der Zeit, wo der Betrieb nichts derartiges spürt, sind auch keine gefährlichen Ueberspannungen vorhanden. Selbst bei Gewittern unmittelbar über den Leitungen entstehen oft keine wesentlichen Ueberspannungen. — Ferner hat sich gezeigt, dass bestimmte Gegenden speziell blitzschlaggefährdet sind, oft nur wenige Quadratkilometer, dass aber diese gefährdeten Flecken nicht jedes Jahr dieselben sind. Es besteht hier eine gewisse Aehnlichkeit mit den bekannten Hagelstrichen, ohne dass sich die Orte decken müssen. Die absolute Häufigkeit der Blitzüberspannungen eines bestimmten Ortes schwankt deshalb stark, sodass es kaum möglich ist, allgemeine Zahlen zu geben.

Die Anzahl der Ueberspannungsstörungen in Stationen nimmt bekanntlich mit steigender Betriebsspannung rasch ab, insbesondere in den Stationen, von deren Sammelschienen mehr als eine Leitung ausgeht (Durchgangsstationen). In Höchstspannungsanlagen besteht ein Bedürfnis eines Ueberspannungsschutzes gelegentlich dann, wenn eine Kopfstation im Verhältnis zur Leitung schwach isoliert ist. Auf Grund der amerikanischen und unserer Gewitteruntersuchung scheint die Möglichkeit zu bestehen, Höchstspannungsleitungen mit 2 Erdseilen und guter Masterdung überhaupt blitzfrei zu machen. Die Erfahrung muss noch beweisen, ob dies technisch und wirtschaftlich möglich ist. Damit würde jeder Ueberspannungsschutz von Höchstspannungs-Stationen- und Leitungen überflüssig.

In Stationen mittlerer und kleiner Hochspannung dagegen besteht an vielen Orten der durch die Betriebserfahrung erhärtete Wunsch der Verhinderung weiterer Ueberschläge in den Stationen, die heute als Folge atmosphärischer Ueberspannungen entstehen. Das Bedürfnis zeigt sich in erhöhtem Mass in Stationen, die an Holzstangenleitungen angeschlossen sind. Während bei gut geerdeten Eisenmastleitungen als Folge von Blitzen meistens Erdschlüsse konstatiert werden, entstehen auf Holzstangenleitungen fast ausnahmslos Kurzschlüsse zwischen den Phasen, die zur Leitungsabschaltung führen. Damit muss man sich wohl abfinden. Dem Schutz der Stationen gegen die zulaufenden Ueberspannungswellen kommt dagegen erhöhte Bedeutung zu in Holzstangennetzen. In Netzen mittlerer und kleiner Hochspannung ist die Gefahrenzone der Blitzwellen wegen der relativ zur Betriebsspannung höhern Glimmspannung ganz wesentlich grösser als in Höchstspannungsnetzen.[11] Anderseits rechtfertigen auch die kleinere Isola-

11) D.Müller-Hillebrand, ETZ 1931, Hefte 23 u.24, S.722 u.758.

tionshöhe und die Tatsache, dass es sich meistens um Holzstangenleitungen handelt, die Anwendung eines Schutzes gegen Ueberspannungen in vielen Fällen.

c.) Nach den Erfahrungen bei den Gewittermessungen erscheint es sehr zweckmässig, überhaupt alle an Freileitungen angeschlossene Stationen oder Schaltanlagen derart zu isolieren, dass deren Stützer, Durchführungen, Schalter, Strom- und Spannungswandler, Transformatoren und sämtliche andern Bestandteile einer minimalen Prüfspannung von ca. 50 kV bei Normalfrequenz standhalten. Die Verteuerung der Isolation ist bis zu dieser Spannungsgrenze nicht gross; dagegen wird die Zahl der Ueberspannungsstörungen und Defekte (Ueberschläge, Sicherungsdefekte usw.) durch diese Massnahme wesentlich vermindert. Ueberdies besteht, wie noch erläutert werden wird, in derart reichlich isolierten Stationen die Möglichkeit eines zuverlässigen Ableiterschutzes für jene Orte, in denen sonst erfahrungsgemäss noch Ueberspannungswirkungen, insbesondere infolge direkter Blitzschläge auftreten. Die heutigen Prüfspannungsnormen für Isolatoren nämlich $\underline{U}_P = 2\underline{U}_N + 10$ kV, und für Transformatoren, Maschinen und Apparate, nämlich $\underline{U}_P = 2\underline{U}_N + 1$ kV, ergaben für Anlagen niederer Hochspannung unbedingt zu kleine Betriebssicherheit. Mit Rücksicht auf die Häufigkeit der kleineren atmosphärischen Ueberspannungen rechtfertigt sich für die mit Freileitungen metallisch verbundenen Stationen oder Stationsteile die Erhöhung der konstanten Grundspannung auf ca. 50 kV. Als Prüfspannung für solche Anlagen sind vorgeschlagen:

Für Stationen bis 100 kV Betriebsspannung $\underline{U}_P = 2\underline{U}_N + 50$ kV; anderseits für Stationen mit mehr als 100 kV Betriebsspannung, die ohne starre Nullpunktserdung betrieben werden, $\underline{U}_P = 2{,}5\ \underline{U}_N$.

d.) <u>Können nun die untersuchten Ableiter-Ueberschläge und Defekte in den Stationen, die als Folge von atmosphärischen Ueberspannungen entstehen, zuverlässig verhindern ?</u>

Wir betrachten zuerst modern isolierte Anlagen; wobei wir für die Prüf- und Ueberschlagsspannungen die neuen Vorschriften des VDE über den elektrischen Sicherheitsgrad von Hochspannungsanlagen zugrunde legen. Die Höhe der Prüfspannung bei Normalfrequenz beträgt: $\underline{U}_P = (2{,}2\ \underline{U}_N + 20)$ kV, die minimale Ueberschlagsspannung $\underline{U}_Ü$ ist 10 % höher.
Für unsere gebräuchlichen Hochspannungen ergibt sich für Netze ohne Nullpunktserdung folgende Tabelle:

$\underline{U}_N$ =	8	15	30	50	64	87	110	150	220	kV_{eff}
$\underline{U}_P$ =	38	53	86	130	161	212	262	350	505	kV_{eff}
$\underline{U}_Ü$ =	42	58	95	143	177	233	288	385	555	kV_{eff}
$\underline{U}_Ü/\underline{U}_N$=	5,3	3,9	3,2	2,9	2,8	2,7	2,6	2,6	2,5	

Wenn wir die Erhöhung der Ueberschlagsspannung bei Stosspannung gegenüber jener bei Normalfrequenz, die je nach den Isolatorentypen ca. 10 bis 40 % ausmacht, als notwendige Reserve für örtliche Spannungserhöhungen in den Stationen behalten, so sind demnach in Höchstspannungsnetzen Ableiterklemmenspannungen von allerhöchstens 2,5-facher verketteter Betriebsspannung erforderlich, um Ueberschläge in der Station zu verhindern. Für 30 bis 50 kV-Stationen ist annähernd 3-fache Betriebsspannung als maximale Ableiter-Klemmenspannung kurzzeitig zulässig. Vergleichen wir diese Forderungen mit den Messresultaten, so zeigt sich, dass für modern isolierte Netze die besten, modernen Ableiter im Stande sind, Ueberschläge in den Stationen zu verhindern, sofern deren Typenspannung gleich der Nennspannung gewählt wird. Für veraltete Ableiter ist das Resultat zum Teil vernichtend. Die auf Grund früherer Betriebserfahrungen mit sog. "Ueberspannungsschutz" entstandene Vorsicht und Zurückhaltung vieler Werke im Einbau solcher Apparate war durchaus begründet. Erst durch moderne Ableiter ist der Schutz gegen Blitzüberspannungen in vielen Fällen möglich geworden, indem erst diese die erforderliche Spannungsbegrenzung resp. Spannungsabsenkung gewähren. Es darf konstatiert werden, dass für Netze mittlerer und kleiner Hochspannung die Vermeidung von Stationsüberschlägen als Folge atmosphärischer Ueberspannungen heute in vielen Fällen praktisch möglich ist, insbesondere in reichlich isolierten Stationen. In ältern Stationen wachsen die an Ableiter zu stellenden Anforderungen in dem Mass, wie die Stationen schlechter isoliert sind. Hier ist von Fall zu Fall die Möglichkeit des wirksamen Schutzes anhand der Fig.53 zu erwägen.

e.) Voraussetzung für die Betriebssicherheit dieser genannten Ableiter ist, dass die zulässigen Stromgrenzen im Ableiter nicht überschritten werden. Auf diesen Punkt muss noch kurz eingegangen werden. Auf Grund der Versuche liegt die zulässige Stromgrenze je nach der Ableitertype bei ca. 1000 bis 2000 A max.Stosstrom. Da ein guter Ableiter infolge der Stromreflexionen fast das Doppelte des zugeleiteten Wellenstroms aufnehmen muss, darf bei einem maximalen Ableiterstrom von 2000 A max.der Wellenstrom höchstens ca. 1200 A max.betragen. Bei 500 Ohm Wellenwiderstand der Leitung entspricht das einer Wellenhöhe von ca. 600 kV max.

Für Eisenmastleitungen entspricht die genannte Wellenhöhe annähernd der Isolation eines 150 kV-Netzes. Eine Ueberstromgefährdung des Ableiters ist demnach in allen Netzen bis 150 kV-Betriebsspannung nicht zu befürchten, wenn die Blitzeinschlagsstelle in die Leitung nicht in unmittelbarer Nähe der Station liegt. In letzterm Fall tritt nämlich unter Umständen das bei den Versuchen beobachtete Aufschaukeln des Ableiterstromes auf. Es existiert eine minimal kritische Entfernung der Einschlagstellen auf der Leitung von der Station, innerhalb welcher die Stromstärke im Ableiter den zulässigen Wert überschreitet. Ein Blitzschlag mit 10^5 A max.in die Leitung, 600 m vor der Station ergibt bei 3 Ohm Masterdung ca. 300 kV max.Spannungsabfall, somit ungefähr dieselbe Beanspruchung wie bei den Versuchen. Dabei schaukelte sich der Strom auf annähernd doppelten Anfangswert auf. Man sieht daraus, dass bei guter Masterdung ein Blitzschlag in die Leitung 600 m vor

dem Unterwerk vom Ableiter ohne Schaden bewältigt werden kann. Diese kritische Entfernung, innerhalb welcher ein Blitzschlag in die Leitung einen Ableiter beschädigen kann, wächst mit schlechter Masterdung und grösserm Mastabstand. Es empfiehlt sich deshalb, auf die Erdung der letzten Masten vor den Stationen besondere Sorgfalt zu verwenden. Der grösste Teil des Blitzstromes wird dann bei Einschlägen in die dem Werk benachbarten Spannweiten oder Masten von den Masterdungen aufgenommen, sodass die Strombeanspruchung von Ableitern in zulässigen Grenzen bleibt, und eine Beschädigung derselben höchstens noch möglich ist bei Blitzeinschlägen in die letzten wenigen Masten oder Spannweiten vor der Station.

Für Hochspannungsleitungen auf Holzstangen ist die Wellenhöhe der Blitzüberspannungen nur durch die Stossüberschlagsspannung der Holzstangen begrenzt. Sie erreicht im Grenzfall Werte bis zu ca. 10 Millionen Volt, und überschreitet damit die zulässige Grenze von der ungefähren Höhe von 600 kV max.wesentlich. Der entsprechende Wellenstrom liegt in der Grössenordnung von 20'000 A max. Keiner der untersuchten Ableiter ist dieser Beanspruchung in unmittelbarer Nähe des Einschlages gewachsen. Dagegen ist die Dämpfung solch hoher Spannungswellen ganz beträchtlich. Trotzdem ist die Ueberspannungsgefahr solcher Leitungen, die ausschliesslich auf Holzstangen ohne Zuganker oder andere Erdverbindungen montiert sind, eine ganz beträchtliche. Daraus erklärt sich die allgemeine Erfahrung, dass an gemischten Leitungen, bei denen zwischen den Holzstangen einzelne wenige Eisenmasten Verwendung finden, Isolatorenschäden bei Gewittern fast ausschliesslich an den Eisenmasten vorkommen, weil dort die Ueberspannung sich nach Erde ausgleicht. Diese Erfahrung führt wie die Theorie zur Forderung, bei Holzstangenleitungen die letzten paar Stützpunkte vor den Stationen aus Eisen statt Holz auszuführen, wobei jeder Mast für sich wie bei Eisenmastleitungen gut geerdet wird, oder es sollen wenigstens die Stützen der Isolatoren der letzten Holzstangen geerdet werden. Die Ueberschlagsspannung der Isolatoren dieser Blitzschutzstrecke vor den Stationen muss nicht kleiner sein als jene der übrigen Isolatoren. Diese darf sogar höher sein als jene. Zweck der Massnahme ist lediglich die Ausschaltung des für Stosspannungen und Wanderwellen isolierenden Holzes, dessen Ueberschlagsspannung grösser ist als jene der grössten Isolatoren. Die Höhe der zulaufenden Wellenspannung ist damit in gleicher Weise begrenzt wie auf Eisenmastleitungen. Derart mit Blitzschutzstrecke und Ableiter geschützte Stationen sind genau wie solche zwischen Eisenmastleitungen nur noch durch Blitzeinschläge in die wenigen letzten Spannweiten oder Masten gefährdet, indem nur in diesem Fall eine Stromüberlastung des Ableiters event. noch möglich ist. An den wenigen Masten kann auch der Lichtbogensicherheit der Isolatoren vermehrte Beachtung geschenkt werden, um zu erreichen, dass Lichtbogen dort nicht zu dauernden Isolatorenschäden führen. Auf diese Weise lässt sich der Forderung begrenzter Stromaufnahme der Ableiter selber auch bei Holzstangenleitungen in einfacher Weise Rechnung tragen.

f.) Die weitere Entwicklung des Ueberspannungsschutzes ist nach der lebhaften Entwicklungsperiode der letzten Jahre noch nicht als abgeschlossen zu betrachten. Für schweizerische Verhältnisse wirken sich die künftigen Erdungsvorschriften im Entwurf zum neuen

Starkstromgesetz günstig aus, indem die bisher oft getrennte Ableitererdung künftig mit der übrigen Betriebserdung an den Erdungsstellen zu verbinden ist. Das Potential der Stationserde spielt somit bei der Beurteilung des Schutzwertes von Ableitern keine Rolle mehr, weil bei starken Erdströmen das Potential des gesamten Erdungsnetzes gehoben wird. Ferner sollen in Zukunft Erdseile mit der Stationserdung verbunden werden. Erdungsspannungen übertragen sich somit von der Leitung auf die Stationserde. Auch mit Rücksicht auf diese Neuerung empfhielt sich die Anwendung besonderer Sorgfalt für die Erdung der letzten wenigen Masten vor den Stationen, welche bauliche Massnahme zum allgemeinen Gebrauch werden sollte, nicht nur bei Eisenmastleitungen, sondern auch bei Leitungen auf Holzstangen, und zwar ob Ableiter verwendet werden oder nicht.

Ein Hauptaugenmerk der weiteren Entwicklung verlangt die Betriebssicherheit wirksamer Ableiter für Netze ohne starre Nullpunktserdung, ferner die Vereinfachung und Verbilligung gewisser Apparate. Daneben verdient die Prüfung der Frage absichtlich geschaffener schwacher Stellen in Höchstspannungsnetzen nähere Beachtung.

Zürich, den 26. September 1932.
50 Ex.

Legenden zu den Oszillogrammen.

Fig.	4	Kontrolloszillogramm am geerdeten Leitungsseil (U=o).
"	8a u. 8b	Oszillogramme des Spannungsverlaufs am offenen Leitungsende in P, aufgenommen nach dem Schema Fig. 1. Für pos. u. neg. Spannungstösse.
"	9	Stromverlauf an der in P über 3,5 Ohm geerdeten Versuchsleitung nach dem Schema Fig. 1.
"	11 u. 12	Spannungverlauf in P, ohne und mit Ableiter 24 kV, 750 Ohm Hauptwiderstand + 500 Ohm Shuntwiderstand.
"	13 u. 14	Spannungsverlauf in P, ohne und mit Ableiter 24 kV, 240 Ohm Hauptwiderstand + 62 Ohm Shuntwiderstand.
"	15 u. 16	Wie Fig. 13 u. 14, aber an besonderem Versuchsseil gemessen statt an der Uebertragungsleitung P — V, und bei höherer Spannungswelle.
"	17	Ungenügende Spannungssenkung bei zu hoher Ueberspannung: Der Ableiter überschlägt an der Eingangsklemme.
"	18	Spannungsverlauf in P, mit Ableiter 66 kV, 500 Ohm Hauptwiderstand + 17,5 Ohm Shuntwiderstand, bei einer ohne Ableiter gemessenen Ueberspannung nach Fig. 15.
"	19	Wie Fig. 18, aber mit kurzgeschlossener Ableiterfunkenstrecke.
"	20 u. 21	Spannungsverlauf in P, ohne und mit demselben Ableiter wie in Fig. 18, aber anderer (besserer) Funkenstrecke.
"	22	Wie 21, aber mit kurzgeschlossener Ableiterfunkenstrecke.
"	23 u. 24	Spannungsverlauf in P, ohne und mit Ableiter 66 kV, 2200 Ohm Hauptwiderstand.
"	26	Spannungsverlauf in P ohne angeschlossenen Ableiter.
"	27a u. 27b	Spannungs- und Stromverlauf in P mit Kathodenfall-Autovalve 18 kV-LV; Beanspruchung nach Fig. 26.
"	28a u. 28b	Spannungs- und Stromverlauf in P mit demselben Ableiter wie in Fig. 27, aber bei der grösseren Ueberspannung nach Fig. 23.
"	30a u. 30b	Spannungs- und Stromverlauf in P mit Porous-Block-Autovalve 20 kV-SV. Die Spannung ohne Ableiter ist um 10 % höher als in Fig. 26.
"	31	Spannungsverlauf in P ohne Ableiter gemessen. Bei derselben Grösse der Ueberspannungswelle sind die Fig. 32 bis 34 gemessen.

Fig.	32a u. 32b	Spannungs- und Stromverlauf in P, mit Porous-Block Autovalve LV - 20 kV und Beanspruchung nach Fig. 31.
"	33a u. 33b	Wie 32, aber Porous-Block-Autovalve SV - 20 kV.
"	34a u. 34b	Wie 32, aber Kathodenfall Autovalve-LV - 18 kV.
"	35	Spannungsverlauf in P, ohne Ableiter gemessen. Bei derselben Grösse der Ueberspannung sind die Fig. 36 bis 38 gemessen.
"	36	Spannungsverlauf in P, mit Porous-Block-Autovalve LV - 20 kV, Beanspruchung nach Fig. 35.
"	37	Wie 36, aber Porous-Block-Autovalve SV-20 kV.
"	38	Wie 36, aber Kathodenfall-Autovalve-LV - 18 kV.
"	40	Spannungsverlauf in P ohne angeschlossenen Ozelitableiter.
"	41a u. 41b	Spannungs- und Stromverlauf in P, mit angeschlossenem Ozelitableiter; Beanspruchung nach Fig. 40.
"	42	wie Fig. 40 aber bei höherer Ueberspannungswelle.
"	43a u. 43b	wie Fig. 41a u. 41b, aber bei Beanspruchung nach Fig. 42 (max. zulässige Wellenhöhe).
"	44	Spannungsverlauf in P ohne angeschlossenen Bendmann-Ableiter.
"	45a u. 45b	Spannungs- und Stromverlauf in P, mit angeschlossenem Bendmann-Ableiter mit keramischem Widerstand; Beanspruchung nach Fig. 44.
"	46a u. 46b	Spannungs- und Stromverlauf in P, mit demselben Ableiter wie in Fig. 45, aber bei 15 % kleinerer Wellenhöhe als Fig. 44 und mit 17 kV Betriebsspannung auf dem Versuchsseil.
"	47	Spannungsverlauf in P ohne angeschlossenen Schwingungsbegrenzer.
"	48a u. 48b	Spannungs- und Stromverlauf in P, mit einem Schwingungsbegrenzer für 15 kV, Beanspruchung nach Fig. 47.
"	50a u. 50b	Spannungsverlauf am Leitungsende P beim Ansprechen der Funkenstrecke F nach Fig. 49. a) für positive, b) für negative Halbwelle.
"	51	Spannungsverlauf in P mit angeschlossenem Kondensator von 0,008 μF in P.
"	52	Vom Kondensator aufgenommener Strom zu Oszillogramm Fig. 51.

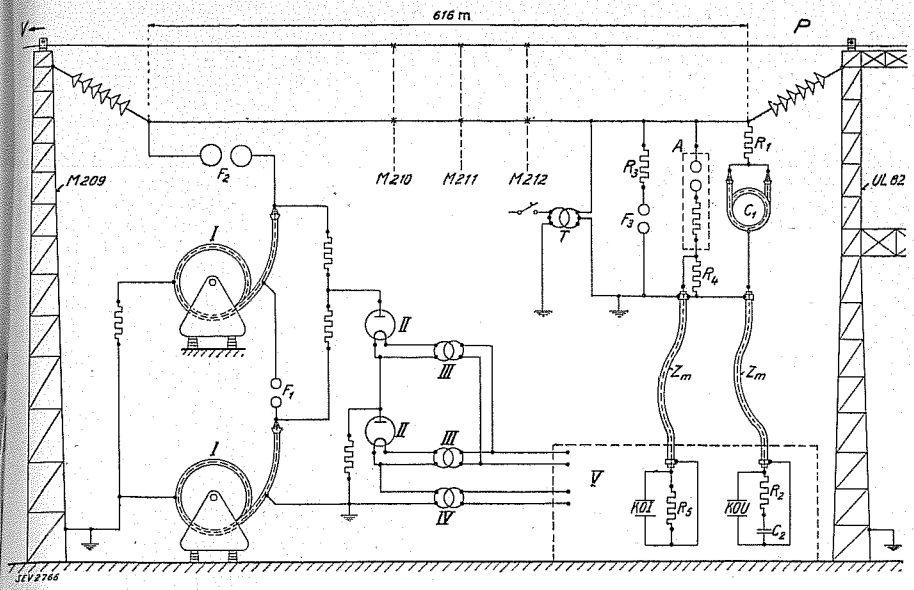


Fig. 1. Schema der Stossanlage in Puidoux (*P*).

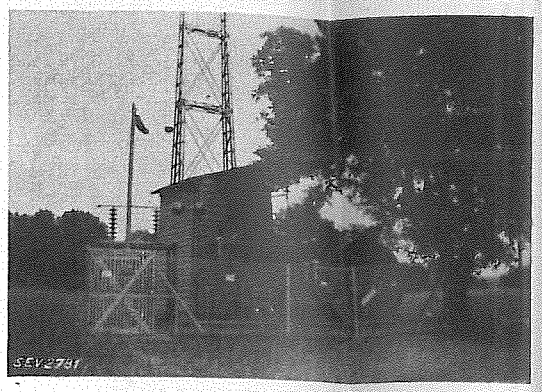


Fig. 2.
Ansicht des Stossgenerators in Puidoux.

I Kapazität je 0,36 μF, bestehend aus je 750 m Kabel.
II Ventilröhren.
III Heiztransformatoren.
IV Hochspannungstransformator.
V Messwagen.
M209-M212 Masten der 132-kV-Leitung Vernayaz (*V*)—Puidoux (*P*).
UL82 Abspannung in Puidoux.
F_1 Schaltfunkenstrecke.
F_2 Summenfunkenstrecke.
F_3 Messfunkenstrecke mit Strombegrenzungswiderstand R_3.
T Leistungstransformator.
A Versuchsobjekt (zu prüfender Ableiter).
R_1 R_2 Induktionsfreie Widerstände für die Spannungsmessung.
C_1 C_2 Kapazitäten für die Spannungsmessung.
KOU Ablenkplatten des Kathodenstrahl-Oszillographen für die Spannungsmessung.
KOI Ablenkplatten des Kathodenstrahl-Oszillographen für die Strommessung.
R_4 R_5 Induktionsfreie Widerstände für die Strommessung.

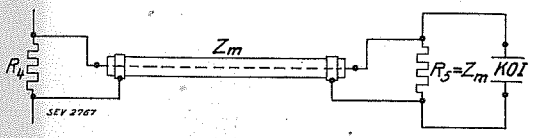


Fig. 3. Schema für die oszillographische Strommessung.

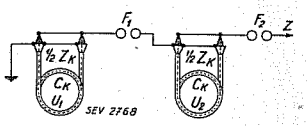


Fig. 5. Schema des Kabel-Stossgenerators.

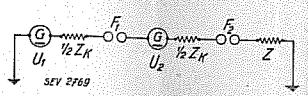


Fig. 6. Ersatzschema des Kabel-Stossgenerators.

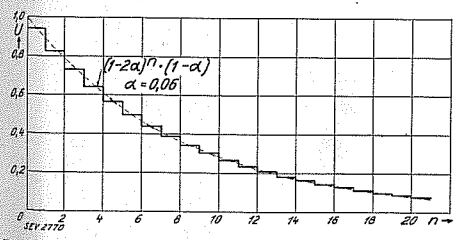


Fig. 7. Wellenform auf einer unendlich langen Leitung beim Anstoss durch einen Kabel-Stossgenerator.

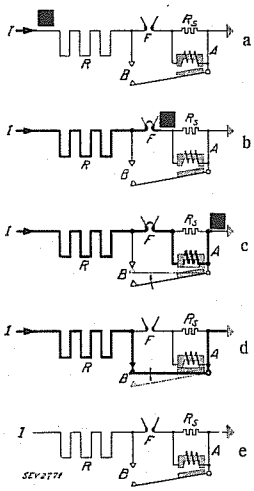


Fig. 10. Prinzip des Bendmann-Ableiters (aus einem Prospekt der EAG Wädenswil).

a Eintritt der Ueberspannung mit nachfolgendem Erdstrom *I*. Reflexionsfreies Durchlaufen des der Leitung angepassten Widerstandes *R*.

b Ueberschlag an der Kalotten-Funkenstrecke *F* und Einleitung des durch den Strom *I* gespiesenen Lichtbogens.

c Die hochfrequente Ueberspannung geht auf direktem Weg über den kleinen Shunt-Widerstand R_s an Erde, während der Strom *I* zum grössten Teil über die Spule *A* fliesst und den Magnet erregt. Der Kontakt *B* wird geschlossen.

d Der Strom *I* fliesst über den Kontakt *B* direkt nach Erde; Spule *A* wird stromlos; Kontakt *B* öffnet (unter Oel). Erdstrom *I* verschwindet.

e Apparat befindet sich im Normalzustand.

Zeit für den ganzen Vorgang a–e ca. $^1/_{10}$ s.

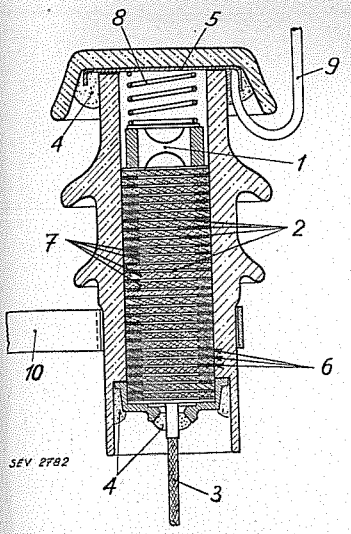


Fig. 25. Prinzip des Kathodenfall-Ableiters (aus dem Prospekt C. 1737-D der Westinghouse Electric & Manufacturing Company.

1 Hauptfunkenstrecke.
2 Kathodenfall-Funkenstrecken.
3 Erdleitung.
4 Compound-Verguss.
5 Metallkappe.
6 Dünne Glimmer-Distanzringe.
7 Widerstands-Scheiben.
8 Feder.
9 Zuführungsleitung.
10 Tragarm.

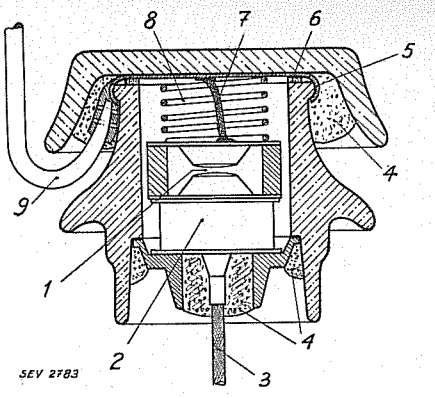


Fig. 29. Prinzip des Porous-Block-Autovalve (aus dem Circular 1933 der Westinghouse Electric & Manufacturing Company).

1 Funkenstrecke.
2 Porous-Block-Element.
3 Erdleitung.
4 Compound-Verguss.
5 Metallkappe.
6 Korkring.
7 Shunt.
8 Feder.
9 Zuführungsleitung.

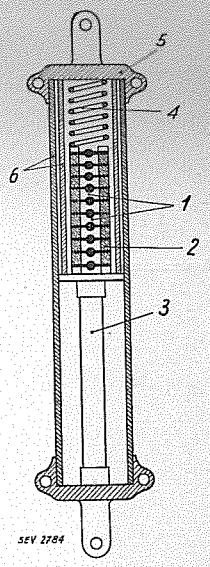


Fig. 39. Skizze des Ozelit-Ableiters (aus den AEG-Mitteilungen 1929, Heft No. 3).

1 Vielfach-Funkenstrecke.
2 Geaxringe.
3 Ozelit-Widerstandsstab.
4 Feder.
5 Verschlusskappe.
6 Geaxrohre.

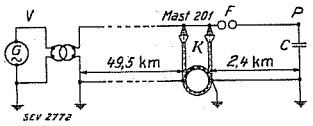
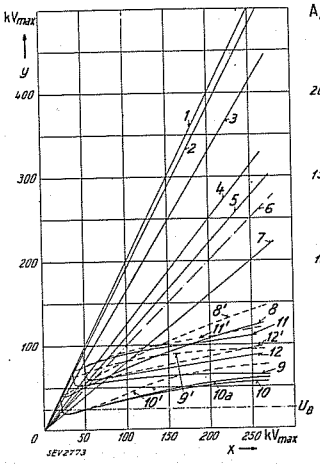


Fig. 49. Schema zur Erzeugung von Schalt-Ueberspannungswellen zwischen Kabel K und Leitungsende P.

Fig. 53. Auftretende Ueberspannung (y) in der Kopfstation P in Funktion der Höhe der zulaufenden Ueberspannungswelle (x), ohne und mit Verwendung verschiedener Ableiter.

1 Theoretische Spannung in P ohne Ableiter
2 Gemessene Spannung in P ohne Ableiter, aber mit 11000 Ω Widerstand für die KO-Spannungsteilung.
3 Spannung in P mit 2200 Ω-Ableiter (Metallwiderstand).
4 Spannung in P mit 750 Ω-Ableiter (Metallwiderstand).
5 Spannung in P mit 500 Ω-Ableiter (Metallwiderstand).
6 Theoretische Ueberspannung in Durchgangsstation mit 2 Leitungen an der Sammelschiene, ohne Ableiter.
7 Spannung in P mit 240 Ω-Ableiter (Metallwiderstand).
8 Spannung in P mit Ozelit-Ableiter nach KO-Messung.
8' Spannung in P mit Ozelit-Ableiter nach Funkenstrecken-Messung.
9 Spannung in P mit SV-Porous-Block-Autovalve nach KO-Messung.
9' Spannung in P mit SV-Porous-Block-Autovalve nach Funkenstrecken-Messung.
10 Spannung in P mit Bendmann-Ableiter mit keramischem Widerstand nach KO-Messung.
10' Spannung in P mit Bendmann-Ableiter mit keramischem Widerstand nach Funkenstrecken-Messung.
11 Spannung in P mit Kathodenfall-Autovalve LV nach KO-Messung.
11' Spannung in P mit Kathodenfall-Autovalve LV nach Funkenstrecken-Messung.
12 Spannung in P mit Porous-Block-Autovalve LV nach KO-Messung.
12' Spannung in P mit Porous-Block-Autovalve LV nach Funkenstrecken-Messung.
U_B Maximalwert der Betriebsspannung zwischen Leiter und Erde.



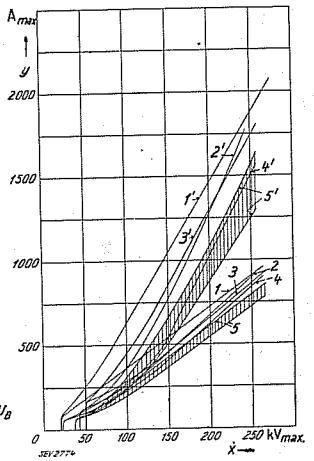


Fig. 54. Von den untersuchten Ableitern in der Kopfstation P aufgenommener Strom (y) in Funktion der Höhe der zulaufenden Ueberspannungswelle (x).

1—5	Anfangsströme I_0 entsprechend Ueberspannungswellen aus grosser Entfernung.
1'—5'	Höchststrom I_m entsprechend einem 0,18 μF-Stossgenerator in ca. 600 m Entfernung von P.
1 und 1'	Bendmann-Ableiter mit keramischem Widerstand.
2 und 2'	SV-Porous-Block-Autovalve.
3 und 3'	LV-Porous-Block-Autovalve.
4 und 4'	Ozelit-Ableiter.
5 und 5'	LV-Kathodenfall-Autovalve. Das schraffierte Gebiet entspricht der Messung von 4 Apparaten derselben Type.

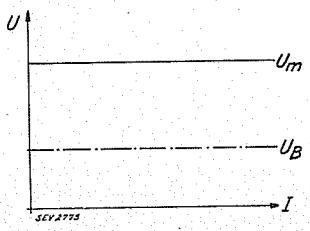


Fig. 55. Ideale Ventilcharakteristik (idealer Ableiter).

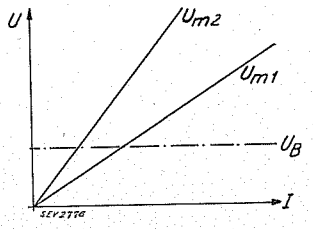


Fig. 56. Charakteristik des Ableiters mit konstantem Widerstand.

Fig. 4

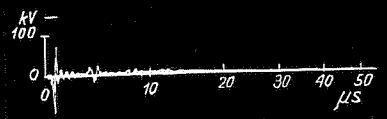


Fig. 8a

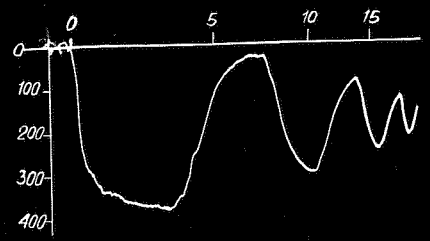


Fig. 8 b

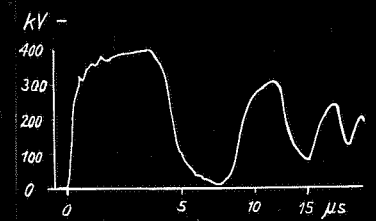


Fig. 9

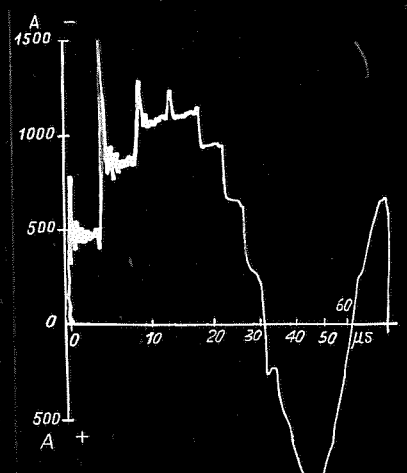


Fig. 11

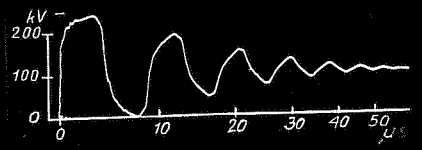


Fig. 12

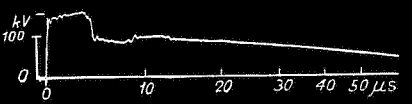


Fig. 13

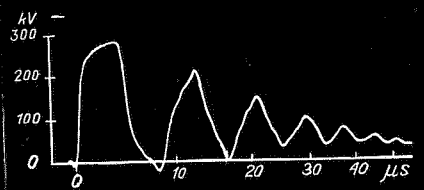


Fig. 14

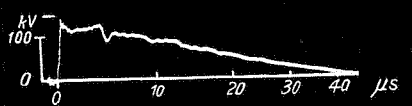


Fig. 15

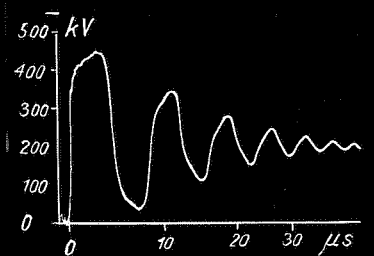


Fig. 16

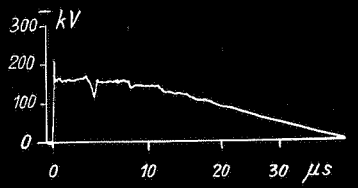


Fig. 17

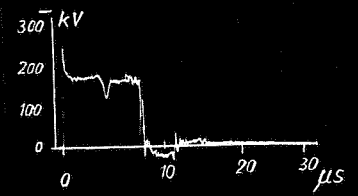


Fig. 18

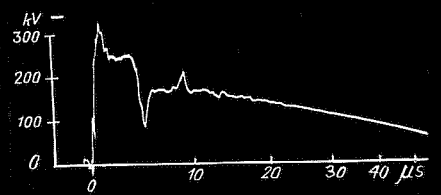


Fig. 19

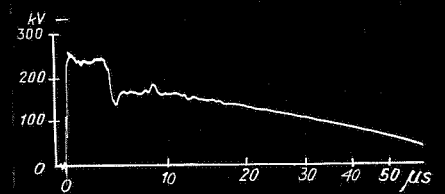


Fig. 20

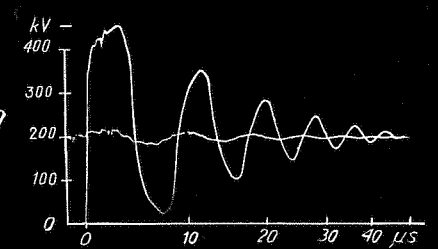


Fig. 21

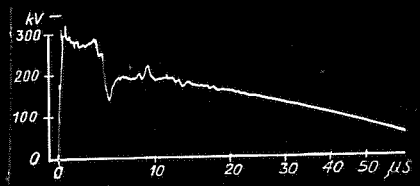


Fig. 22

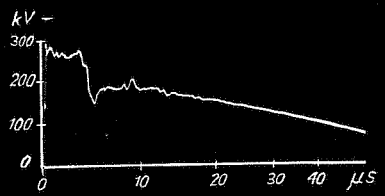


Fig. 23

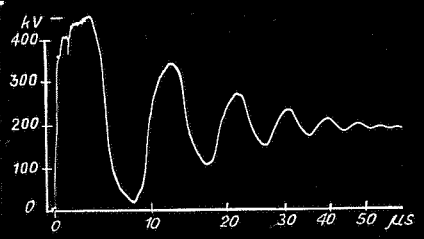


Fig. 24

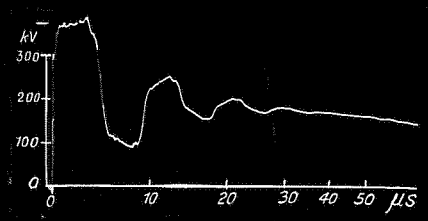


Fig. 26

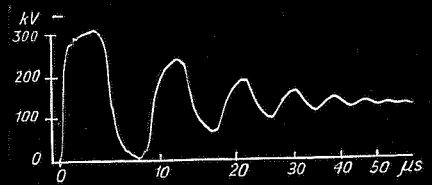


Fig. 27a

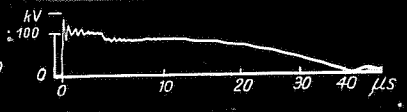


Fig. 27b

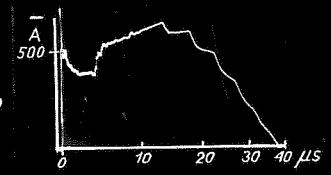


Fig. 28a

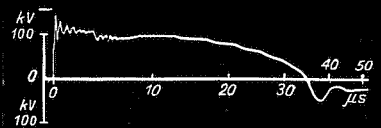


Fig. 28b

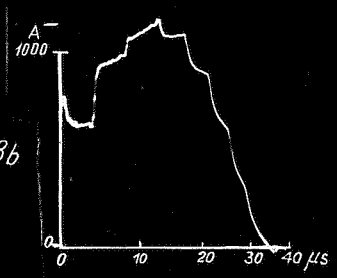


Fig. 30a

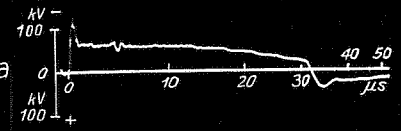


Fig. 30b

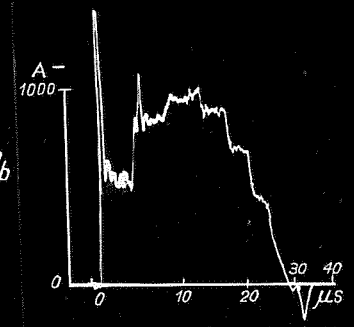


Fig. 31

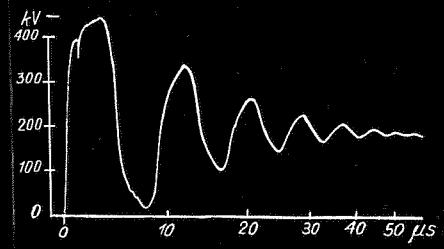
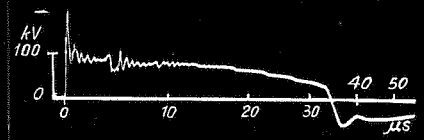


Fig. 32a



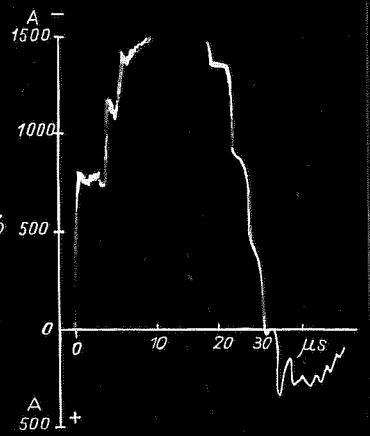


Fig. 32b

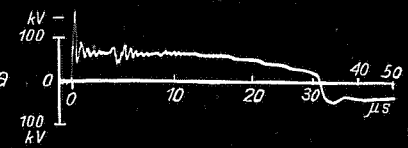


Fig. 33a

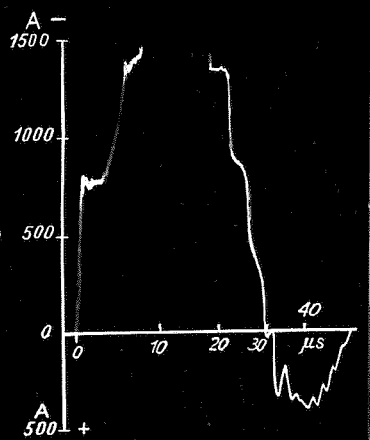


Fig. 33b

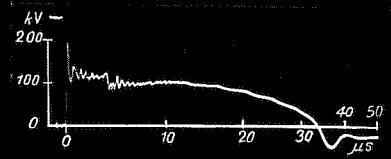


Fig. 34a

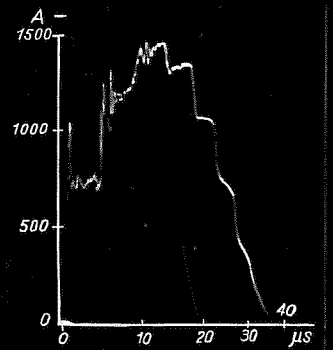


Fig. 34b

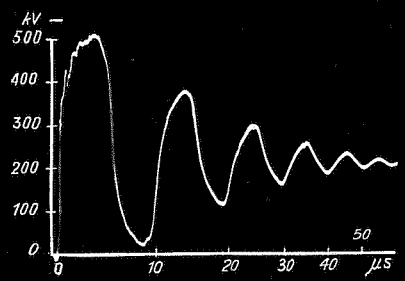


Fig. 35

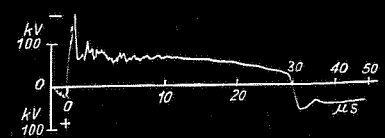


Fig. 36

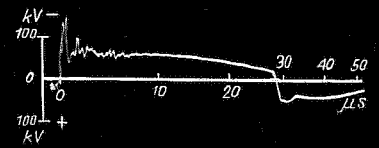


Fig. 37

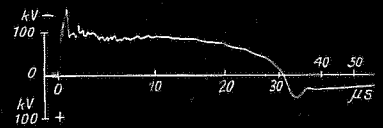


Fig. 38

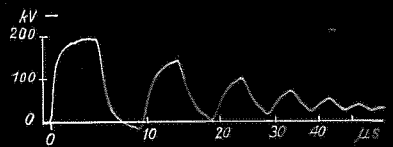


Fig. 40

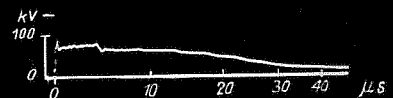


Fig. 41a

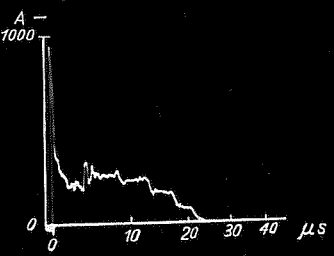


Fig. 41b

Fig. 42

Fig. 43a

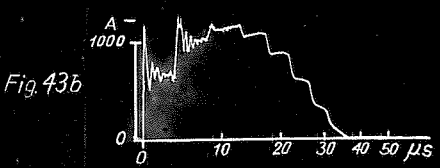


Fig. 43b

Fig. 44

Fig. 45a

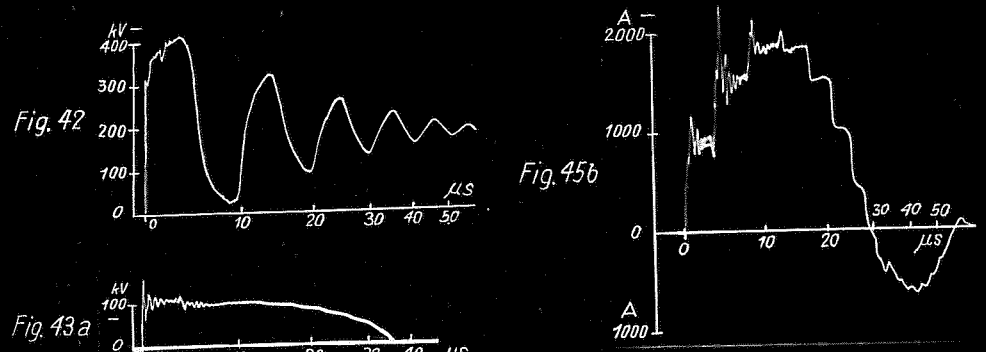


Fig. 45b

Fig. 46a

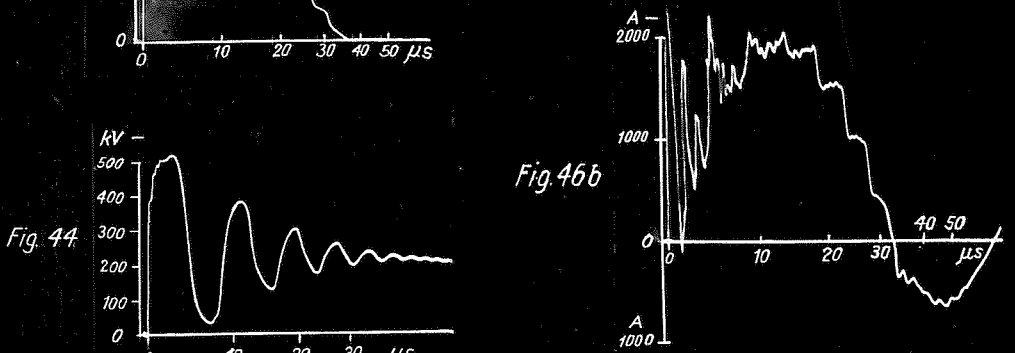


Fig. 46b

Fig. 47

Fig. 48a

Fig 48b

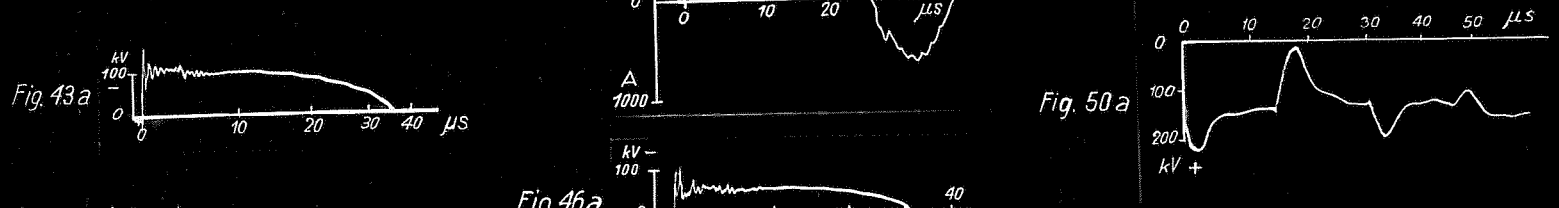


Fig. 50a

Fig. 50b

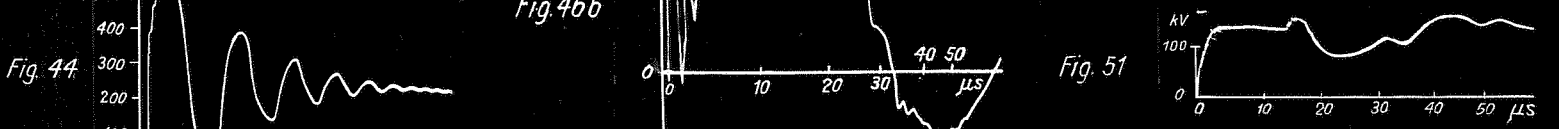


Fig. 51

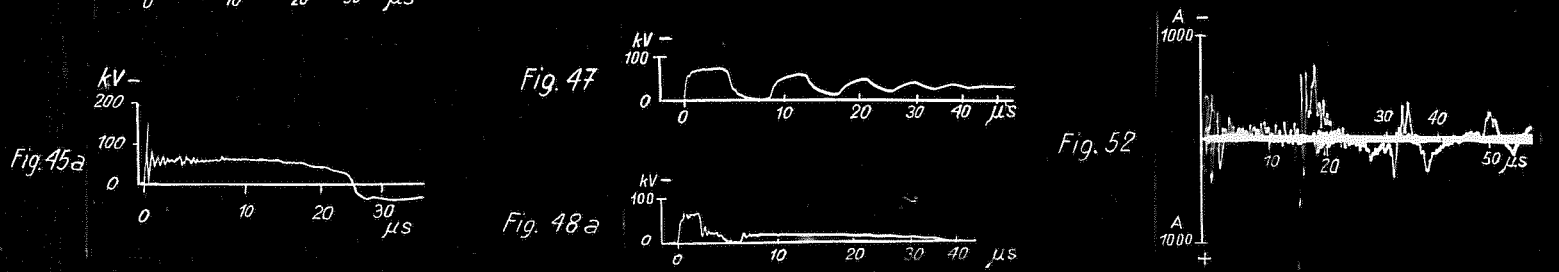


Fig. 52