

Prom. Nr. 2510

Über den räumlichen Schutzbereich eines Überspannungs-Ableiters

Von der
Eidgenössischen Technischen
Hochschule in Zürich

zur Erlangung
der Würde eines Doktors der Technischen Wissenschaften
genehmigte

PROMOTIONSARBEIT

vorgelegt von
ROBERT RUTZ
dipl. El.-Ing. E.T.H.
von Winterthur

Referent: Herr Prof. Dr. K. Berger
Korreferent: Herr Prof. Dr. B. Bauer

Juris-Verlag Zürich
1956

Leer - Vide - Empty

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Kap. I Einleitung	5
Kap. II Theoretische Grundlagen	7
1. Allgemeine Gesetze über Wanderwellen	
2. Schematische Darstellung der zu erwartenden Spannungsverläufe	
Kap. III Versuchsmaterial	
A. Messapparate	16
1. Mess-Spannungsteiler	
2. Oszillograph und Synchronisierungs-Schaltungen	
B. Leitung	19
1. Daten der vorhandenen Leitung	
2. Schaltungen	
3. Erdungen	
C. Stossgenerator	22
1. Kabel-Stossgenerator	
2. Stosswagen	
D. Ueberspannungsableiter	25
E. Prüf-Funkenstrecke	25
Kap. IV Ausgeführte Messungen	
A. Charakteristiken des Versuchsmaterials	26
1. Form der Stoss-Spannung	
2. Ableiter	
3. Funkenstrecke	
B. Ableiter am Ende der Leitung, Funkenstrecke vor dem Ableiter	30
1. Spannungsverlauf an F	
2. Erwartungen für die Kombination Ableiter nach Funkenstrecke	
3. Messungen und Interpretation der Oszillogramme	
4. Resultate	
5. Ein ähnlicher Versuch als Vergleich	
C. Funkenstrecke am Ende der offenen Leitung, Ableiter vor der Funkenstrecke	49
1. Spannungsverlauf	
2. Resultate	
D. Theoretische Erklärungen	55
Kap. V Diskussion der Resultate	56
Literaturverzeichnis	59

Leer - Vide - Empty

Kapitel I

EINLEITUNG

Jede Schaltanlage hat eine gewisse räumliche Ausdehnung. Damit taucht sofort die Frage auf, wo der Ueberspannungsableiter aufgestellt werden soll. Ein einziger Ableiter soll ja möglichst viele Objekte der Anlage schützen, selbst wenn sie in der einen oder andern Richtung längs der Leitung davon entfernt sind. Unter Schutz ist dabei zu verstehen, dass z. B. eine Funkenstrecke nicht überschlagen soll, und bei Wicklungen durch Spannungssprünge keine schädlichen Windungsspannungen entstehen sollen.

Im Falle einer Ueberspannung kann für den Anschlusspunkt des Ableiters aus seiner Ansprech- und Restspannung genau geschlossen werden, was für ein Spannungsverlauf dort zu erwarten ist. Für irgend eine Stelle, entfernt vom Ableiter, könnte der Verlauf mit Hilfe der Fortpflanzungs- und Reflexionsgesetze der Wanderwellen konstruiert werden.

Der Zweck vorliegender Arbeit bestand nun darin, diesen Spannungsverlauf und das Verhalten der zu schützenden Objekte in der Umgebung eines Ableiters für einen konkreten Fall zu messen.

Zu diesem Zweck wurden folgende Fälle untersucht:

1. Zu schützendes Objekt (Funkenstrecke) in der Fortpflanzungsrichtung der Welle gesehen vor dem Ableiter. Im Speziellen: Ableiter am Ende der Leitung, Funkenstrecke in verschiedenen Abständen davor.
 - a) Leitungsende offen, was ungefähr einer Kopfstation entspricht, dh. einer Leitung, die an einem Transformator endet.
 - b) Leitungsende mit Wellenwiderstand der Leitung abgeschlossen, was einer Durchgangsstation entspricht, dh. einer Leitung, die unbegrenzt weiterläuft.
 - c) Leitungsanfang mit Wellenwiderstand abgeschlossen Ende offen, was einer Leitung entspricht, die aus unbegrenzter Entfernung kommt und in einer Kopfstation endet.
2. Funkenstrecke nach dem Ableiter, dh. am Ende der offenen Leitung, Ableiter in verschiedenen Abständen davor.

Diese hier ausgewählten Anordnungen sind natürlich nur Annäherungen an die wirklichen Verhältnisse einer Anlage. Tatsächlich bildet ein Transformator nicht ein offenes Leitungsende, sondern hat eine Impedanz aus Kapazität und Induktivität, deren Widerstand für die Welle allerdings viel grösser ist als der Wellenwiderstand der Leitung. (Für Leistungstransformatoren werden Wellenwiderstände von einigen 1000 Ohm angegeben (Lit. 3,17), dh. ca. 10 mal grösser als derjenige einer Freileitung). Eine offene Leitung stellt somit in Bezug auf Reflexion den gefährlichsten Extremfall dar. Die am Ende abgegliche Leitung verhält sich wie eine Leitung, die unbegrenzt weiterläuft. Das kommt praktisch vor, wenn z. B. die Leitung an eine Sammelschiene führt, an der noch eine andere Leitung angeschlossen ist. Diese Möglichkeit stellt wieder den ungünstigsten Fall dar; denn falls die eintreffende Ueberspannungswelle auf mehr als einer Leitung weiterlaufen kann, wird sie allein schon dadurch abgesenkt, dass die abgehenden Leitungen wellenmässig parallel geschaltet sind und so einen kleineren Wellenwiderstand bilden als die eine ankommende Leitung (Lit. 17).

Für die Messungen stand eine 1 km lange Freileitung zur Verfügung mit einem Stossgenerator am Anfang. Als Nennspannung für das Versuchsmaterial wurde 45 kV gewählt. Die Versuche erfolgten für 4 verschiedene Schlagweiten der Funkenstrecke, an 3 verschiedenen Abständen vom Leitungsende, bei unverändertem Ableiter.

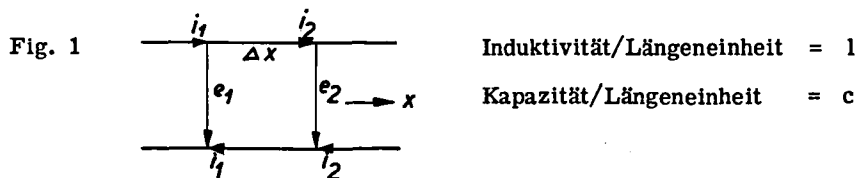
Es hat sich dabei gezeigt, dass die Länge der Leitung vom Stossgenerator an gemessen auch eine Rolle spielt, leider aber konnte in dieser Beziehung an der Anlage nichts geändert werden, da die Leitung und der Stossgenerator fest installiert waren. Ausser der Schaltung 1c gelten also die vorliegenden Resultate nur für den ganz speziellen Fall, da die Ueberspannung (z. B. durch Blitzeinschlag) in 1 km vom Leitungsende entsteht und gehalten wird. Die Schaltung 1c entspricht dem extremen Fall, da die Ueberspannungswelle auf der Leitung aus unbegrenzter Entfernung eintrifft. Leider sind aber diese Messungen etwas unvollständig, da wegen des Abgleichs der Leitung am Anfang (Abgleichwiderstand in Serie zur Leitung) nur noch die halbe Stossspannung zur Verfügung stand.

Den Anstoss zu dieser Arbeit gab Herr Professor Dr. K. Berger. Für seine Unterstützung und seine wertvollen Ratschläge bei den vielen Schwierigkeiten, die im Lauf der Messungen auftraten, möchte ich ihm an dieser Stelle herzlich danken. Herr Professor Berger hat es mir auch ermöglicht, alle Versuche in der Versuchstation Gösgen der FKH (Forschungskommission für Hochspannungsfragen) durchzuführen. Für die Benützung dieser Anlage möchte ich daher auch der FKH meinen besten Dank aussprechen, besonders auch Herrn Ing. H. Peter-Contesse in Gösgen, der mir jederzeit behilflich war. Die Firmen Brown, Boveri in Baden und Sprecher & Schuh in Aarau haben mir in freundlicher Weise einen Ueberspannungsleiter zur Verfügung gestellt. Für dieses Entgegenkommen möchte ich ihnen herzlich danken. Auch der ATEL in Olten und ihrem Kraftwerk Gösgen sei hier bestens gedankt für ihre Aushilfe mit zahlreichem Leitungsmaterial.

Kapitel II
THEORETISCHE GRUNDLAGEN

1. Allgemeine Gesetze über Wanderwellen (Lit. 2, 3, 17)

a) Ausbreitung von Spannungs- und Stromwellen auf einer verlustlosen Leitung



Für die Spannung zwischen den beiden Leitern gilt:

$$e_1 - e_2 = - \Delta e = - l \Delta x \frac{\delta i}{\delta t}$$

oder

$$\frac{\delta e}{\delta x} = - l \frac{\delta i}{\delta t} \quad (1)$$

Für den Strom längs der Leitung gilt:

$$i_1 - i_2 = - \Delta i = - c \Delta x \frac{\delta e}{\delta t}$$

oder

$$\frac{\delta i}{\delta x} = - c \frac{\delta e}{\delta t} \quad (2)$$

Setzt man den Ansatz

$$e = Z i \quad (3)$$

nach x , resp. t abgeleitet in die Gleichungen (1) und (2) ein und dividiert diese durcheinander, so erhält man den Wellenwiderstand der Leitung

$$Z = \pm \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (\text{Ohm}) \quad (4)$$

und durch Einsetzen der nach x abgeleiteten Gl. (3) in Gl. (1) die Fortpflanzungsgeschwindigkeit

$$\frac{\delta x}{\delta t} = v = \pm \sqrt{\frac{1}{lc}} \quad (5)$$

Wellen mit positiver Geschwindigkeit nennt man vorwärtslaufende Wellen:

$$e_v, i_v \quad (\text{Index } v)$$

mit negativer Geschwindigkeit rückwärtslaufende Wellen:

$$e_r, i_r \quad (\text{Index } r)$$

Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung einer Welle lautet dann:

$$e_v = Z i_v \quad (6)$$

$$e_r = -Z i_r \quad (7)$$

Um die totale Spannung und den totalen Strom in einem Punkt der Leitung zu erhalten, können einfach alle vor- und rückwärtslaufenden Wellen überlagert werden:

$$e = \sum e_v + \sum e_r \quad (8)$$

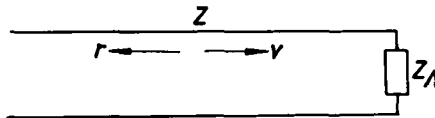
$$i = \sum i_v + \sum i_r \quad (9)$$

b) Reflexionsgesetze

Jede Inhomogenität der Leitung bedeutet eine Änderung des Wellenwiderstandes und damit auch eine Veränderung der Spannungs- und Stromwelle. Solche Inhomogenitäten sind z. B. Leitungs-Enden und -Verzweigungen, Wicklungen, Ableiter, Mess-Spannungsteiler etc.

Für alle Versuche dieser Arbeit können die verwendeten Schaltungen auf den folgenden einfachen Fall zurückgeführt werden: Homogene Leitung (Z) mit irgend einer Impedanz (Z_A) abgeschlossen. (Fig. 2)

Fig. 2



Für die Leitung gelten die Gleichungen (6) und (7), und für die Abschlussimpedanz

$$e_A = i_A Z_A$$

Läuft nun eine Welle (e_v, i_v) auf das Leitungsende, so müssen am Knotenpunkt die Spannungen und Ströme von Leitung und Impedanz übereinstimmen, dh. es ist

$$e_v = e_A \quad \text{und} \quad i_v = i_A$$

Ist $Z = Z_A$, so sind diese Bedingungen ohne Weiteres erfüllt. Ist aber $Z \neq Z_A$, so ist die einzige Möglichkeit zur Erfüllung dieser Bedingungen das Entstehen einer neuen rückwärtslaufenden Welle. Die Spannung und der Strom am Knotenpunkt sind dann:

$$e_A = e_v + e_r \quad (10)$$

$$i_A = \frac{e_A}{Z_A} = \frac{e_v}{Z} - \frac{e_r}{Z} \quad (11)$$

ist e_v gegeben, dann wird

$$e_A = \frac{2Z_A}{Z_A + Z} e_v = p e_v \quad (12)$$

$$e_r = \frac{Z_A - Z}{Z_A + Z} e_v = q e_v \quad (13)$$

p ist der Brechungskoeffizient,
 q der Reflexionskoeffizient

Die folgenden Ausführungen geben eine Zusammenstellung über die verwendeten Schaltungen und die damit bewirkten Veränderungen der ursprünglichen Welle.

1. Leitung am Ende offen, dh. $Z_A = \infty$

Nach Gl. (13) ist $e_r = e_v$ ($q = 1$), dh. totale Reflexion.

2. Leitung mit Wellenwiderstand $R_Z = Z_A = Z$ abgeschlossen.

Nach Gl. (13) ist $e_r = 0$ ($q = 0$) dh. keine Reflexion. Der Abschlusswiderstand am Ende wirkt also, wie wenn die Leitung unbegrenzt weiterlaufen würde.

3. Ableiter am Ende der Leitung.

Vor dem Ansprechen hat der Ableiter abgesehen von der kleinen Kapazität und dem hochohmigen Steuerwiderstand der Funkenstrecken $Z_A = \infty$, was Fall 1 entspricht.

Nach dem Ansprechen bestehen in den beiden Gleichungen (10) und (11) 3 Unbekannte, da Z_A spannungsabhängig ist. Die dritte Gleichung für diese drei Unbekannten, allerdings nur graphisch, liefert die Strom-Spannungs-Charakteristik des Ableiters, $i_A = f(e_A)$, sodass e_A und e_r punktweise berechnet werden können. Etwas einfacher, aber auch nur punktweise kann die Ableiterspannung nach der Methode von Bergeron (Lit. 13) rein graphisch ermittelt werden. Für prinzipielle Betrachtungen kann oft der Ableiter als ideales Ventil angenommen werden. Dann ist in Gl. (10) $e_A = \text{konst.} = \text{Restspannung des Ableiters.}$

4. Kapazität (z.B. Spannungsteiler) am Leitungsende, $Z_A = C$

der Strom in C ist
$$i_A = C \frac{de_A}{dt}$$

ferner nach Gl. (11)
$$i_A = \frac{e_A}{Z_A} = \frac{e_v}{Z} - \frac{e_r}{Z}$$

eliminiert man in diesen beiden Gleichungen i_A so bleibt

$$CZ \frac{de_A}{dt} = e_v - e_r$$

und nach Gl. (10)

$$e_A = e_v + e_r$$

beide Gl. addiert:

$$CZ \frac{de_A}{dt} + e_A = 2e_v$$

Die Lösung dieser Differenzialgleichung für e_A lautet

$$\underline{e_A = 2e_v \left(1 - \xi^{-\frac{t}{T}} \right)} \quad \text{wobei } T = CZ \quad (14)$$

ferner
$$e_r = e_A - e_v = e_v \left(1 - \xi^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (15)$$

Für den allgemeinen Fall, da irgendwo im Zuge der Leitung eine Kapazität gegen Erde geschaltet wird lautet Gl. (14)

$$e_{v_2} = e_A = e_{v_1} \left(1 - \xi^{-\frac{2t}{T}} \right) \quad (16)$$

Index 1: Leitungsstück vor dem Kondensator
 Index 2: Leitungsstück nach dem Kondensator

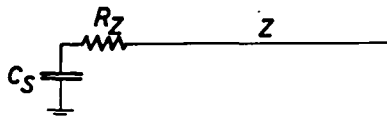
Die Gleichungen (14) - (16) zeigen also, dass ein Kondensator an einer Leitung erstens die auftreffende Welle abflacht mit der Zweitkonstanten $T = CZ$ und zweitens eine rückläufige negative Welle auslöst.

5. Stossgenerator am Anfang der Leitung.

Bei genügend grosser Kapazität kann der Stossgenerator als konstante Spannungsquelle betrachtet werden. Analog Fall 3 ist dann in Gl. (10) $e_A = \text{konst.}$

6. Stossgenerator mit Serie-Abgleichwiderstand am Anfang der Leitung

Fig. 3



Für die relativ hohen Frequenzen, die das Spektrum einer Stossspannung bilden ist der Widerstand von C_S viel kleiner als von R_Z , dh. die Leitung ist analog Fall 2 abgeschlossen, also reflexionsfrei. Der Abgleich des Leitungsanfangs wirkt daher, wie wenn die Welle aus unbegrenzter Entfernung eintreffen würde.

c) Dämpfung durch Verluste

Jede Leitung hat unvermeidliche Verluste, die die Form der Wanderwellen verzerren (dämpfen).

Im Folgenden sei kurz darauf hingewiesen, welche Dämpfungs-Ursachen bei Stossversuchen in erster Linie eine Rolle spielen. Zu deren theoretischen Behandlung sei auf die Literatur verwiesen (Lit. 2, 8, 22).

Der Längswiderstand ist frequenzabhängig, da wegen des grossen Anteils hoher Frequenzen im Spektrum einer Stosswelle der Skineffekt zu berücksichtigen ist. Falls die Rückleitung des Wellenstromes über den Erdboden erfolgt, ist dieser Widerstand überwiegend gegenüber demjenigen der Leitungsseile.

Der Querwiderstand (Ableitung) kann bei Stossversuchen auf Freileitungen vernachlässigt werden.

Die Koronaverluste wirken wie eine Ableitung, sind aber spannungs- und polaritätsabhängig und verursachen hauptsächlich eine Abflachung steiler Spannungssprünge.

2. Schematische Darstellung der zu erwartenden Spannungsverläufe

a) Funkenstrecke vor dem Ableiter

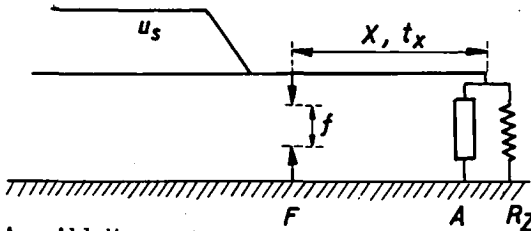


Fig. 4

- A Ableiter
- R_Z Abschlusswiderstand = Wellenwiderstand
- F Funkenstrecke
- f Schlagweite der Funkenstrecke
- u_s Ursprüngliche Stossspannungswelle
- x Abstand der Funkenstrecke vom Leitungsende
- t_x Laufzeit der Welle für die Strecke x

Für die folgenden Betrachtungen werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

Die Leitung sei verlustlos

Die Spannungswelle u_s habe eine linear ansteigende Front und einen horizontalen Rücken

Der Ableiter habe eine bestimmte Ansprechspannung U_a und eine konstante Restspannung u_p , die kleiner ist als die Ansprechspannung. t_{aA} ist der Ansprechverzug.

Den Verlauf der verschiedenen Spannungswellen für den Fall der am Ende abgeglichenen Leitung stellt Fig. 5 dar.

Fig. 5a
Spannung am
Ableiter

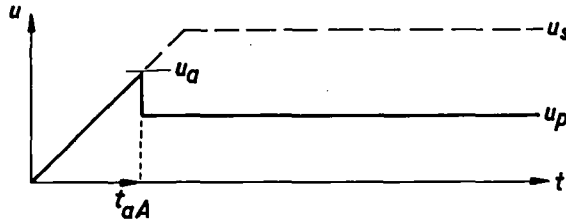
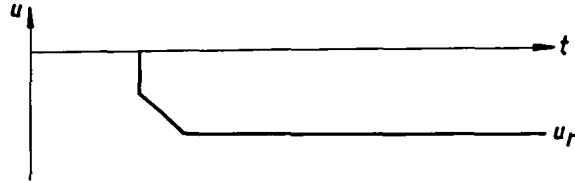


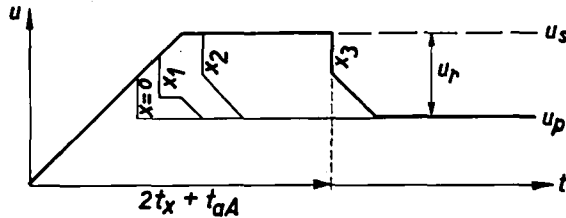
Fig. 5b
Reflektierte
Welle



Bis zur Zeit t_{aA} findet am Leitungsende keine Reflexion statt. Im Moment t_{aA} spricht der Ableiter an und senkt die Spannung u_s auf die Restspannung u_p ab. Es wird also eine negative rückwärtslaufende Welle u_r ausgelöst vom Betrag $u_s - u_p$.

An der Funkenstrecke F im Abstand x ergibt sich daraus folgendes Bild: Die Welle u_s , die mit der Geschwindigkeit v gegen das Leitungsende wandert ist um die Zeit t_x vorher bei F als am Ende. Bis zur Zeit t_{aA} geschieht am Leitungsende nichts, die Welle läuft also unverändert weiter. Vom Ansprechmoment des Ableiters an verfließt wieder t_x , bis die reflektierte Welle F erreicht. F wird also mit der vollen Welle u_s beansprucht bis zur Zeit $2t_x + t_{aA}$ und nachher mit der Differenz $u_s - u_r$. (Fig. 5c)

Fig. 5c
Spannung im
Abstand $x_0 \dots x_3$



Die analoge Darstellung für die offene Leitung zeigt Fig. 6.

Bis zur Zeit t_{aA} wird die Welle am Ende auf Doppelte reflektiert. Die Funkenstrecke erhält also schon zur Zeit $2t_x$ das Stück der positiv reflektierten Welle und nach $2t_x + t_{aA}$ wieder die Absenkung durch die negativ reflektierte Welle.

Ist nun der Anfang der Leitung nicht abgeschlossen, so wird die am Ende durch Reflexion erzeugte Welle am Anfang erneut reflektiert. Die Welle u_r , z. B. Fig. 6b, wandert also auf dem Niveau u_s auf den Stossgenerator, der die Spannung u_s hält. Folglich wird der positive Teil von u_r auf u_s abgesenkt und der negative Teil auf u_s erhöht. Dadurch entsteht wieder eine Vorwärts- welle mit der umgekehrten Polarität von u_r . Diese Welle läuft am Ende wieder auf den, diesmal schon brennenden Ableiter, der die Spannung u_p hält, wodurch die Welle in der Polarität einfach wieder umgekehrt wird. Dieses Spiel wiederholt sich mit der Periode der doppelten Laufzeit $2t_L$ der Leitung.

Fig. 7 zeigt das vollständige Bild der Spannung an F für das Beispiel der Fig. 6.

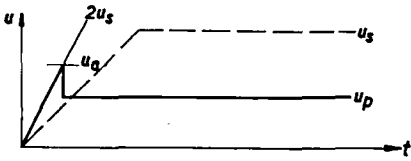


Fig. 6a Spannung am Ableiter

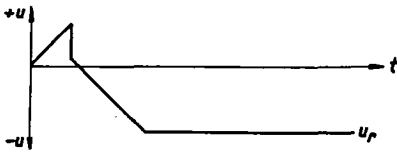


Fig. 6b Reflektierte Welle

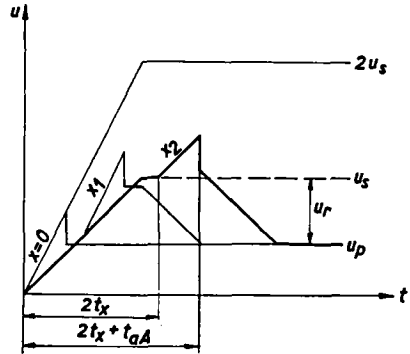


Fig. 6c Spannung im Abstand $x_0 \dots x_2$

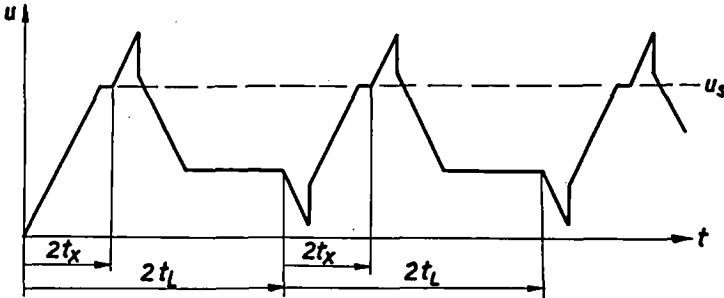


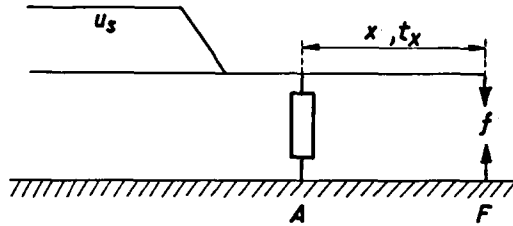
Fig. 7

In Wirklichkeit ist natürlich die Restspannung u_p nicht konstant, sondern steigt stufenweise bei jeder neuen Vorwärtswelle, und zudem sinkt die Stossgeneratorspannung ständig wegen der Entladung der Kondensatoren.

Diese beiden Tatsachen könnten bei Verwendung der Methode Bergeron zur Konstruktion des Spannungsverlaufes berücksichtigt werden. Die Messungen zeigen jedoch, dass die Dämpfung beim Durchlaufen von 1 km Leitung schon so gross ist, dass es gar keinen Sinn hat die Spannung für die zweite und alle weiteren Perioden zu konstruieren. (z.B. beträgt die Zeit des Spannungsanstieges von Null bis zum Scheitelwert am Leitungsanfang beim Ansprechen des Stossgenerators ca. $0,1 \mu s$, am Leitungsende hingegen schon ca. $2,5 \mu s$, und die freie Schwingung der ganzen Leitung hat eine Dämpfungszeitkonstante von ca. 4 Perioden, vgl. Fig. 32b Osz. 4891.)

b) Funkenstrecke nach dem Ableiter

Fig. 8

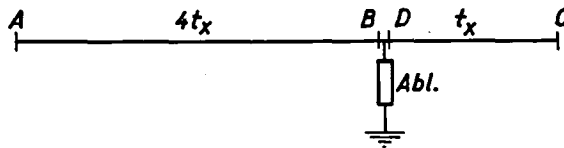


Für diesen Fall soll hier gezeigt werden, wie der Spannungsverlauf an A und F nach der Methode Bergeron konstruiert wird. (Vgl. "Revue Générale de l'Electricité", Band 63, Nr. 4, 1954, Aufsatz von M. A. Mauduit.)
Es gelten folgende Annahmen:

- Ableiter bei $x = 200$ m, ($t_x = 0,66 \mu\text{s}$)
- Totale Leitungslänge 1 km
- Stosspannung: Rechteckwelle $u_s = \text{konst.}$
- Ableitercharakteristik $u = f(i)$ gegeben

Das Diagramm von Bergeron gibt den Zustand (Spannung u . Strom) in den vier Punkten A, B, C, D Fig. 9.

Fig. 9



t_x wird als Zeiteinheit gewählt, die Indices der Buchstaben A, B, C, D bedeuten Vielfache der Zeiteinheit.

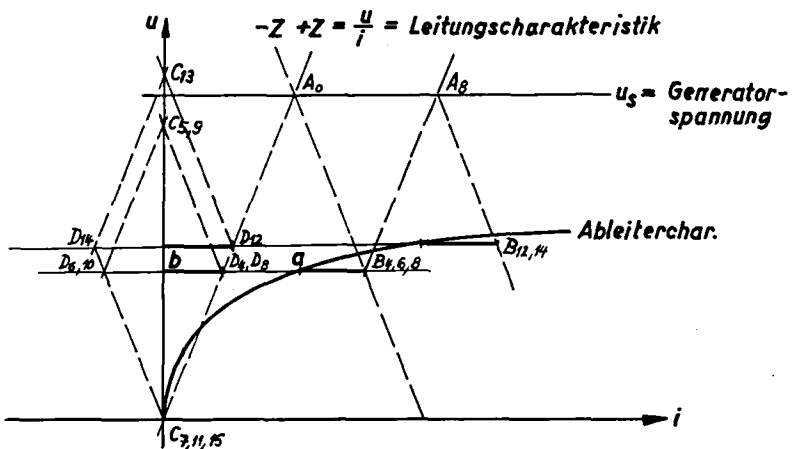


Fig. 10 Bergeron-Diagramm

Die Horizontalen B-D müssen so gelegt werden, dass die Abschnitte bD_4 und aB_4 gleich sind.

- Es bedeutet bD_4 Leitungsstrom nach dem Ableiter
- bB_4 Leitungsstrom vor dem Ableiter
- ba Ableiterstrom

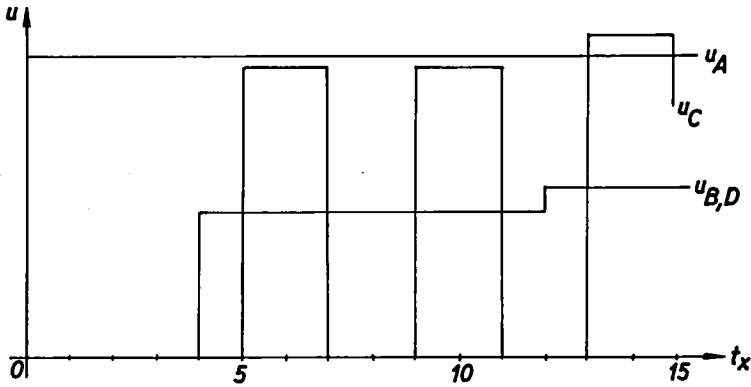


Fig. 11 Spannungsverlauf an den Punkten A, B, C, D

Diese Methode ist sicher sehr praktisch für Rechteckwellen, hingegen ist sie schon sehr zeitraubend für Wellen mit endlicher, nicht linearer Front. In diesem Fall muss nämlich die Spannungskurve durch eine Treppenkurve ersetzt, und für jede Stufe das Diagramm gezeichnet werden. Die Messungen der Spannung im Punkt C haben zudem gezeigt, dass die Schwingung des Leitungsstückes x schon nach wenigen Perioden ganz abgeklungen ist, sodass der Wert der Konstruktion sowieso etwas fragwürdig erscheint. (Vgl. Fig. 42)

Kapitel III

VERSUCHSMATERIAL

A. MESSAPPARATE

1. Mess-Spannungsteiler

Als wesentliche Bedingung muss von der Messeinrichtung verlangt werden, dass sie die Vorgänge auf der Leitung nicht beeinflusst.

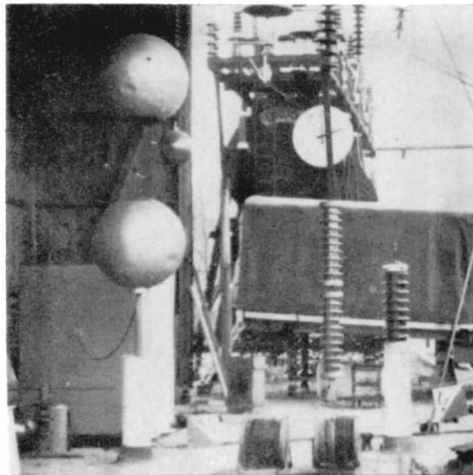
Um Reflexionen zu vermeiden muss also ein Widerstandsteiler einen viel grösseren Widerstand haben als der Wellenwiderstand der Leitung, und ein kapazitiver Teiler muss eine möglichst kleine Kapazität haben. Damit ein ohmscher Widerstand spannungs- und temperaturunabhängig ist, kommt als Material nur Metall in Frage; ein Drahtwiderstand ist aber immer auch etwas induktiv und hat zudem Streukapazität gegen Erde, die ebenfalls die Messung fälscht. Es wurde deshalb ein reiner Kapazitätsteiler gewählt, der diese Nachteile nicht aufweist.

a) Oberspannungskapazität C_0

Als Hochspannungskondensator schien die Kapazität zwischen zwei Kugeln von 1 m Durchmesser und ca. 80 cm Abstand geeignet (Fig. 12). Ein solcher Kondensator ist induktionsfrei, verlustfrei und auch bei hohen Spannungen frei von Glimmentladungen. Dafür hat er den Nachteil, dass sein Wert sehr empfindlich ist auf benachbarte Gegenstände wegen ihrer Streukapazität gegen die Kugeln. Trotz des eigentlich genügend hohen Abstandes der Kugeln erfolgte zudem einige Male ein Ueberschlag bei Spannungen wesentlich unter der maximal zulässigen für die die Kugeldistanz eingestellt wurde.

Fig. 12

Links Kugelspannungsteiler, dahinter Messkabine, rechts auf weissem Porzellansockel Ableiter, Bildmitte Spannungsteiler der FKH, dahinter Stosswagen, ganz hinten Kabelstossgenerator



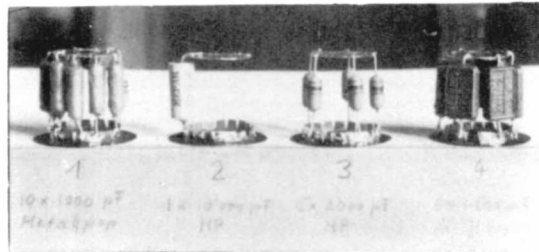
b) Unterspannung

Entsprechend zur kleinen Oberspannungskapazität C_0 war auch die Unterspannungskapazität C_u so klein (6000 - 30 000 pF), dass kein Verzögerungskabel (ca. 10 000 pF) zwischen Teiler und Oszillograph verwendet werden durfte. Der Oszillograph wurde deshalb direkt ans Leitungsende neben den Teiler gestellt und die Spannung über ein nur 2,5 m langes Kabel zugeführt.

Um die Kondensatoren auszuwählen wurde mit vier verschiedenen Anordnungen (entspr. Fig. 13) eine Stosspannung mit ca. $0,1 \mu s$ Frontdauer oszillographiert. Die Anordnungen 1, 3, 4 zeigten keinen Unterschied. Bei 2 konnte ein leichtes Ueberschwingen der Front beobachtet werden, wahrscheinlich wegen zu grosser Induktivität des Kondensators. Silber-Glimmer ist gegenüber Metallpapier vorzuziehen, weil er praktisch temperatur- und alterungsunabhängig ist. Schliesslich wurden 4 Einsätze entspr. Pos. 4 zu 6000, 9000, 13 000 und 20 000 pF und einer entspr. Pos. 3 zu 30 000 pF verwendet.

Fig. 13

Anordnung der Unterspannungskondensatoren. Die Montage erfolgte konzentrisch zum Kabel im Anschlussstecker zur KO - Platte.



c) Eichung der Kugelkapazität

Zum Kugelspannungsteiler wurde der geeichte Teiler der FKH ($C = 464 \text{ pF}$) parallel geschaltet und bei verschiedenen Uebersetzungsverhältnissen Spannungsstösse mit beiden Strahlen des KO gleichzeitig von beiden Teilern oszillographiert.

Diese Eichung lieferte folgende Werte:

Teiler allein $C_0 = 17,8 \text{ pF} \pm 0,5 \%$

Ableiter dazu in ca. 3 m
Entfernung angeschlossen $C_0 = 18,5 \text{ pF} \pm 1 \%$

(Der angegebene Fehler gibt die maximale Streuung der verschiedenen Messungen.)

Der Abgleichwiderstand der Leitung in ca. 8 m Entfernung hatte keinen messbaren Einfluss.

Die Berechnung der Kapazität (Lit. 3, S. 49) gibt den Wert $C_0 = 20,5 \text{ pF}$ (gilt für den Fall, dass eine Kugel an Erde ist, diese selbst aber unendlich weit weg; daher der grössere Wert als der gemessene.)

d) Messgenauigkeit

Spannungsteiler C_0 : Die Anwesenheit des Ableiters verursachte durch zusätzliche Schaltkapazitäten eine Vergrößerung der Teilerkapazität um ca. 4 %. Der Vergleichsteiler stand in ungefähre doppelter Entfernung und vergrößerte demzufolge C_0 um $2 < \Delta C < 4$ %. Um diesen starken Einfluss der Umgebung zu reduzieren wurde versucht, bei der unteren Kugel nur eine Kalotte als Messbelag zu benützen. Dabei traten aber im Unterspannungssystem so starke Eigenschwingungen auf, dass diese Anordnung unbrauchbar wurde. Der Uebersetzungsfehler entstehend durch Falschmessung von C_0 könnte übrigens ausgeschaltet werden mit einer relativen Darstellung, wenn z. B. in den Fig. 33-35 und 46 die Resultate statt auf die Schlagweite f auf die entspr. 50 % -Ueberschlagspannung bezogen würden, die ja mit dem selben Fehler behaftet sind.

Spannungsteiler C_U : Diese Kondensatoren wurden jeweils mit einer Reihe geeichter Silberglimmer-Kondensatoren auf einer Messbrücke (Philoskop) verglichen. Der Mittelwert von je 6 Messungen, die höchstens 2 % streuten, kann als genauer als 1 % betrachtet werden.

Auswertung der Oszillogramme (Format 6 x 6 cm): Dank des sehr feinen Strahles des KO (Strichdicke bei sorgfältiger Fokussierung 0,1 - 0,2 mm) können die Oszillogramme auf 0,2 mm genau ausgemessen werden, was bei einer mittleren Amplitude von 30 mm einen Fehler kleiner als 1 % ergibt. Da jedoch die Strahlspannung nicht stabilisiert war und nicht gemessen werden konnte, musste nach jeder Messreihe (15-30 Min.) die Empfindlichkeit geeicht werden. Die Variation der aufeinanderfolgenden Eichungen betrug im Mittel 1 - 2 %. Um also die grosse Genauigkeit des KO, gegeben durch den feinen Strahl, voll auszunützen, sollte die Strahlspannung unbedingt stabilisiert sein.

2. Oszillograph und Synchronisierungs-Schaltungen

Sämtliche Messungen wurden mit einem Kaltkathodenstrahl-Oszillograph mit zwei Strahlen der Firma Trüb Täuber, Typ KOk2 ausgeführt, der während zwei Jahren vorzügliche Dienste leistete.

Da der Vorgang nicht mit einem Kabel verzögert werden konnte, erfolgte die Auslösung der Zeitablenkung über eine Antenne vom Anfang der Leitung aus. Die Laufzeit der Welle über die Leitung beträgt $1 \text{ km} : 3 \cdot 10^5 \text{ km/s} = 3,33 \text{ } \mu\text{s}$. Diese Verzögerung war natürlich für schnelle Zeitablenkungen (bis $T = \text{ca. } 1 \text{ } \mu\text{s}$) zu gross, weshalb zwischen Antenne und Zeitrelais noch eine spezielle Schaltung den Auslösimpuls verzögern musste. Es wurden 3 Varianten ausprobiert:

- a) Ein Hilfsstosskreis mit Funkenstrecken und R - C - Verzögerungsglied streute zu viel.
- b) Ein monostabiler Multivibrator mit 1000 V - Endstufe funktionierte sehr gut, benötigte aber Hilfsspannungsquellen.
- c) Eine künstliche Leitung aus L - C - Gliedern bewährte sich am besten. Sie ist betriebsicher, hat keine Streuung und braucht keine Hilfsspannung. (Lit. 15)(Fig. 14).

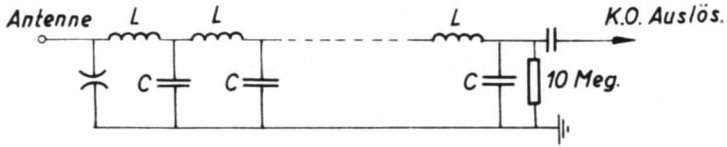


Fig. 14 $L = 45 \mu\text{Hy}$, $C = 2500 \text{ pF}$
Verzögerung $T = \sqrt{LC} = 0,33 \mu\text{s}$ pro Stufe

B. LEITUNG

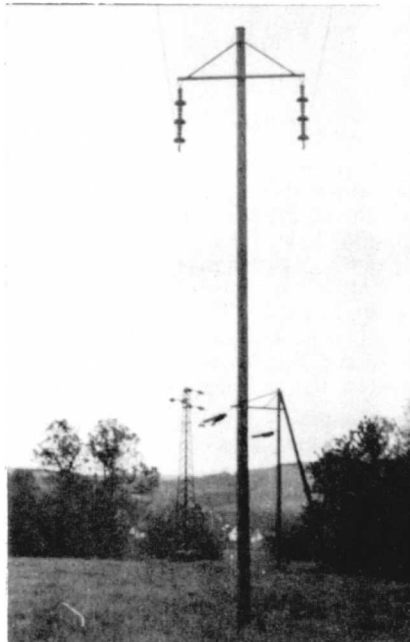
1. Daten der vorhandenen Leitung

a) Abmessungen

Die Leitung bestand aus 2 parallelen Cu-Seilen mit $2r = 10 \text{ mm}$ Durchmesser, im Abstand von $a = 2 \text{ m}$, $h = 5 - 10 \text{ m}$ über dem Erdboden. Die ganze Leitung ist auf Holzstangen montiert und die beiden Seile sind auch gegeneinander für die volle, reflektierte Spannung des Stossgenerators isoliert. Die Länge beträgt 1 km , Anfang und Ende führen auf den Messplatz.

Fig. 15

Teilstück der Ringleitung, vorn Tragmast, dahinter Abspannmast



b) Korona

Für die möglichen Schaltungen der beiden Seile gibt die Rechnung folgende Korona-Einsatz-Spannung U_K (diejenige Spannung, bei der an der Oberfläche des Leiters die erste Stossionisation erfolgt, entspr. einer Feldstärke von $E_K = 30 \text{ kV/cm.}$)

1. Einzelleiter gegen Erde ($r \ll h$)

$$U_{K \text{ min}} = E_K \cdot r \cdot \ln\left(\frac{2h}{r}\right) = 30 \cdot 0,5 \cdot 8 = \underline{120 \text{ kV}} \text{ (Scheitelwert)}$$

$$E_K = 30 \text{ kV/cm, } r = 5 \text{ mm, } h_{\text{mittel}} = 7,5 \text{ m}$$

2. Leiter gegeneinander, ohne Erde ($r \ll a$)

$$U_{K \text{ min}} = E_K \cdot 2r \cdot \ln\left(\frac{a}{r}\right) = 30 \cdot 1 \cdot 6 = \underline{180 \text{ kV}}$$

3. Beide Leiter parallel gegen Erde ($r \ll a \ll h$)

$$U_{K \text{ min}} = E_K \cdot 2r \cdot \ln\left(\frac{2h}{ar}\right) = 30 \cdot 1 \cdot 4,65 = \underline{140 \text{ kV}}$$

Diese Formeln gelten für zylindrische, glatte Leiter. In Wirklichkeit bestehen die Leiter aber aus einzelnen verdrehten Drähten, die natürlich keine glatte Oberfläche bilden. Deshalb sind auch die gemessenen Werte etwas tiefer.

$$\text{Gemessen Fall 1 : } U_K = \text{ca } 110 \text{ kV} \quad (\text{Fig. 21})$$

$$\text{Gemessen Fall 3 : } U_K = 120 - 140 \text{ kV} \quad (\text{Fig. 22})$$

c) Abschlusswiderstand

Die Leitung ist reflexionsfrei abgeglichen, wenn der Abgleichwiderstand rein ohmsch ist mit dem Wert des Wellenwiderstandes. Die besten Resultate zeigte ein Flüssigkeitswiderstand (Minimale Induktivität) aus Wasser und Kochsalz. Leider sind aber solche Widerstände nicht konstant und kommen deshalb nicht in Frage. An einem Metallwiderstand (Cr-Ni-Draht, Schniewindt-Band 2 m lang, 2 Widerstände parallel) zeigte sich, gegenüber dem entsprechenden Verlauf an der offenen Leitung, schon deutlich eine Ueberhöhung der Front, herrührend von der Induktivität der Widerstände. Schliesslich wurde folgender Widerstand als Abschluss verwendet:

Cr-Ni-Draht Gewebe, 1,6 m lang, 4 Stück zu ca 1220 Ohm parallel (entspr. dem gemessenen Wellenwiderstand von 305 Ohm für beide Seile parallel gegen Erde).

Bei dieser Anordnung zeigte sich keine merkliche Fälschung des Spannungsanstieges mehr.

2. Schaltungen

Zuerst bestand die Absicht die Versuche für den gefährlichsten Fall, nämlich möglichst steile Spannungsstösse durchzuführen. Es gelang auch Wellen mit einer Frontdauer von 0,1 - 0,2 μ s zu erzeugen, falls man eines der beiden Leitungsseile parallel zur Erde als Rückleiter für den Strom verwendete (kleiner Widerstand - wenig Dämpfung). Sobald man aber die Spannung über die Koronagrenze steigen liess, flachten diese Verluste die Welle so stark ab, dass die Frontdauer schliesslich nicht kürzer war als im Fall, da der Erdboden den Rückleiter bildete (vgl. Fig. 21 u. 22). Wegen des einheitlicheren Spannungsverlaufes in der Front für hohe und niedrige Spannungen wurden schliesslich für alle Versuche beide Seile parallel gegen Erde verwendet.

3. Erdungen

Auf dem Messplatz stand eine gute Erdung zu Verfügung, bestehend aus acht 4 m - langen Eisenpfählen im Abstand von 6 - 10 Metern, unter dem Boden mit Kupferbändern verbunden. Ausserhalb des Messplatzes war jedoch die Erdung aussergewöhnlich schlecht (aufgeschütteter Kiesboden, einige Meter tief). Zum Erden des Ableiters und der Funkenstrecke wurden deshalb entlang der Leitung bis 250 m vom Ende entfernt alle 50 m 3 - 4 m lange Eisenrohre eingeschlagen und mit einem Cu-Seil von 10 mm \varnothing untereinander und mit der Messplatzerde verbunden. Trotzdem entstand z.B. beim Ansprechen des Ableiters noch ein grosser Spannungsabfall an der Erde (z.B. Osz. 3548 Fig. 42c; die Restspannung ist wesentlich höher als die Ansprechspannung, was bei den Messungen direkt am Ableiter nicht der Fall war.) Der Erdwiderstand ist vorwiegend induktiv, wie die Messungen bei festem Erdschluss der Leitung zeigen, wo fast nur in der Wellenfront ein Spannungsabfall entsteht (Osz. 2181-85, Fig. 41d). Der hier, zwischen 2 verschiedenen Pfählen der Messplatz-Erde gemessene Spannungsabfall setzt sich ungefähr folgendermassen zusammen:

Zuleitung Leitung-Erde: 5 m Draht; $L = \text{ca } 5 \mu\text{Hy}$

Spannungsanstieg in der Leitung: ca 300 kV/ μ s

Stromanstieg in der Leitung: $\frac{300 \text{ kV}/\mu\text{s}}{Z} = \text{ca } 1 \text{ kA}/\mu\text{s}$

Stromanstieg in der Erdung: $2 \cdot 1 \text{ kA}/\mu\text{s}$ (wegen Reflexion)

Spannungsabfall in der Zuleitung = $L \frac{di}{dt} = \text{ca } 10 \text{ kV}$

tot. Spannungsabfall gemessen = 35 kV

Also bleiben 25 kV nur an einem Teilstück der guten Messplatzerde.

C. STOSSGENERATOR

1. Kabelstossgenerator (Lit. 1)

Am Anfang der Leitung steht ein fest installierter Stossgenerator, bestehend aus 4 Stufen zu je $0,24 \mu\text{F}$ mit je 250 kV Ladespannung (Fig. 19). Die Kondensatoren der einzelnen Stufen bestehen aus Kabelrollen mit je $2 \times 370 \text{ m}$ Kabel parallel, von denen bei allen 4 Enden einerseits der Mantel, andererseits die Seele parallel geschaltet ist.

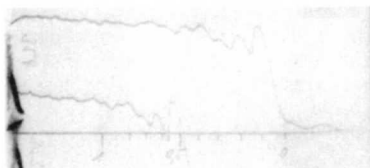
Zuerst bestand die Absicht alle Versuche mit möglichst steilen Spannungswellen durchzuführen. Solche Wellen können erzeugt werden, wenn aller Strom über die Cu-Seile der Leitung fliesst und nicht über den Erdboden mit dem viel höheren Widerstand. Dazu muss der Stossgenerator symmetrisch, d.h. der eine Kondensatorbelag positiv, der andere negativ geladen und nachher auch symmetrisch auf die Leitung entladen werden. Auf dem einen Seil läuft dann eine positive Spannungswelle (Vorwärts-Strom) und auf dem andern Seil eine gleiche negative Welle (Rückwärts-Strom). Zur Messung der totalen Spannung zwischen den Seilen müssen dann allerdings die Spannungen von zwei Teilern, die jede Spannung gegen Erde messen addiert werden.

Die auf diese Weise erzeugten Wellen zeigten tatsächlich eine sehr steile Front. Dafür wurden aber auch die Einschwingvorgänge, die entstanden beim Serie-Schalten der Stosskondensatoren (durch Zünden der Funkenstrecken) praktisch ungedämpft übertragen (Fig. 17a Osz. 311).



Fig. 17a

Symmetrischer Stoss auf beide Seile



17b

Ein Seil parallel zur Erde als Rückleiter



17c

Nur eine Stufe des Stossgenerators

Eine wesentliche Dämpfung der Schwingungen konnte erst erreicht werden, indem der Stossgenerator einseitig geerdet und der Erdboden teilweise als Rückleitung verwendet wurde (Stoss auf ein Seil, das andere Seil parallel zu Erde geschaltet, Fig. 17b Osz. 354).

Dass diese Schwingungen tatsächlich von den Stosskondensatoren her-rühren, zeigt ein Vergleich mit einem Stosskreis, der aus nur einer Stufe des gleichen Stossgenerators bestand: Fig. 17c Osz. 339, Schwingungen ge-ringer.

Dämpfung der Schwingungen mit Widerständen zwischen den einzelnen Stufen kam nicht in Frage, da sonst die nutzbare Spannung auf der Leitung zu klein geworden wäre.

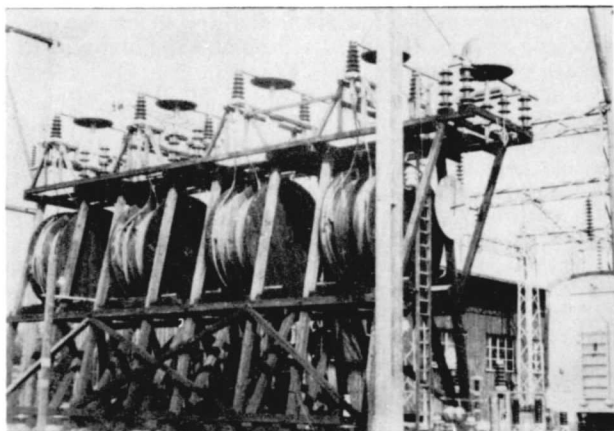


Fig. 16 Kabelstossgenerator, rechts unten Stosswagen

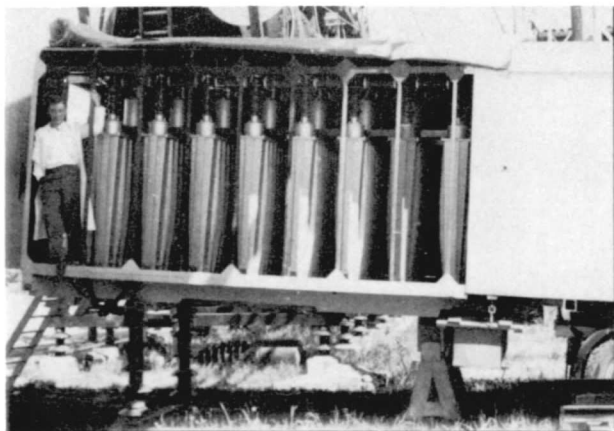


Fig. 18 Stosswagen, rechts geerdete Kabine

2. Stosswagen

Der fahrbare Stossgenerator der FKH (Fig. 18) ist 8-stufig und besteht aus konzentrierten Kondensatoren zu je 1 μF und 70 kV Ladespannung. Im Gegensatz zum Kabelstossgenerator ist die Bauweise sehr gedrängt, so dass weniger interne Schwingungen zu erwarten sind, weshalb auch dieser Stossgenerator ausprobiert wurde. Allerdings kann damit nicht symmetrisch gearbeitet werden, da die Reihe der Kondensatoren einseitig mit der Wagenkabine verbunden ist, die die Speisung und alle Hilfsapparate enthält und deshalb geerdet sein muss. Fig. 19a Osz. 473 zeigt den Spannungsverlauf bei analoger Schaltung wie Fig. 17b. Die Schwingungen sind etwas kleiner. Aus Fig. 19b Osz. 478 ist noch ersichtlich, dass es stark darauf ankommt, wie die Schlagweite f der letzten Funkenstrecke (zwischen Stossgenerator und Leitung) eingestellt wird. Bei Osz. 473 war f ca 1,5 mal höher als alle übrigen Funkenstrecken eingestellt, bei Osz. 478 ca. 7 mal höher. Im zweiten Fall ist der Zündverzögerung der letzten Funkenstrecke deutlich sichtbar, indem die Stoss-Spannung vor der eigentlichen Front einen ausgeprägten Fuss hat, der entsteht durch kapazitive Uebertragung der Spannung auf die Leitung beim Ansprechen der ersten Funkenstrecken. Schliesslich zeigt Fig. 19c Osz. 554 noch den Spannungsverlauf am Anfang der Leitung, mit einem gleichen Spannungssteiler wie am Leitungsende gemessen.

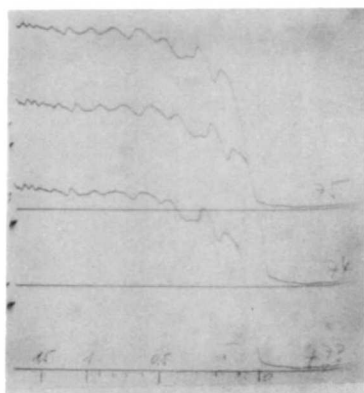


Fig. 19a
Ein Seil parallel zur
Erde als Rückleiter

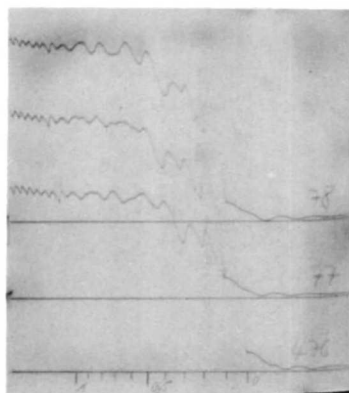
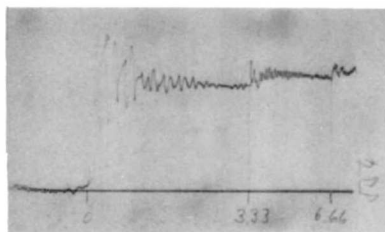


Fig. 19b
Letzte Funkenstrecke
höher eingestellt

Fig. 19c
Spannung am Leitungs-
anfang



D. UEBERSPANNUNGSABLEITER

Für alle Versuche mit dem Ableiter am Ende der Leitung wurde ein normaler Freiluft-Ableiter der Firma Sprecher und Schuh verwendet mit folgender Bezeichnung:

Type BHF 508

Nennsp. 45 kV, 50 ~

Nennableitervermögen 10 000 A 30 μ s

Max. Betr. Sp. 1,15 $\cdot U_N$

Für die Versuche mit dem Ableiter im Abstand x vor der Funkenstrecke (dh. dem Leitungsende) wurde ein entsprechender Ableiter der Firma Brown, Boveri u. Co. in Baden verwendet:

Typ HCF 45 q spez.

kV \prec 45, f = 50-60

kA 30, 4 μ s, kA lim 100, 10 μ s

Die Ansprechcharakteristiken (Fig. 24) am Ende der Leitung gemessen, waren für beide Ableiter praktisch gleich. Eine Veränderung im Lauf der Versuche konnte nicht festgestellt werden.

E. PRUEF-FUNKENSTRECKE

Dazu diente ein Stütz-Isolator mit Funkenhörnern in einer Anordnung, die ungefähr einem Pol eines 45 kV-Trennschalters entspricht (Fig. 20a und b)

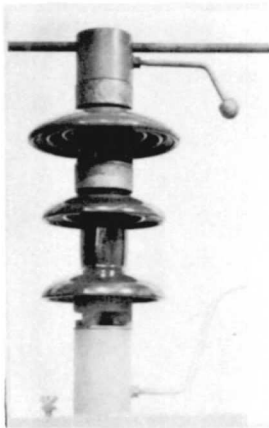


Fig. 20a
Funkenstrecke

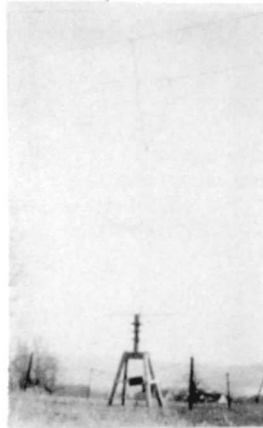


Fig. 20b Funkenstrecke
an Leitung angeschlossen

Kapitel IV

AUSGEFUEHRTE MESSUNGEN

A. CHARAKTERISTIKEN DES VERSUCHSMATERIALS

1. Form der Stoss-Spannung

Wie schon die Ausführungen bei der Beschreibung der Stossgeneratoren zeigen, ist es nicht möglich die ursprünglich gewünschte steile Stoss-
welle auf der Leitung sauber zu erzeugen. Fig. 19a zeigt, dass es wohl gelingt eine Welle zu erzeugen mit einer anfänglich sehr steilen Front von ca. $0,1 \mu\text{s}$ Dauer. Nach dieser Zeit ist aber die Spannung erst auf ca. 70 % des Scheitelwertes gestiegen, der erst nach 2 - 3 μs erreicht wird. Zudem sind der Welle noch hochfrequente Schwingungen überlagert, so dass der Scheitelwert gar nicht genau bestimmt ist. Ganz unmöglich wird aber die steile Spannungswelle über der Korona-Einsatzspannung, wo in Folge der Verluste beim Durchlaufen der Leitung schon nach 1 km die Wellenfront stark abgeflacht wird (Lit. 2, 8, 22). Fig. 21 zeigt für verschiedene Spannungshöhen den Frontanstieg für den Fall, da ein Seil der Leitung parallel zur Erde verwendet wurde, entsprechend der Fig. 19a. Die Korona-Einsatzspannung liegt sogar etwas tiefer als die Ableiter-Ansprechspannungen (ca. 145 kV), so dass sicher alle Versuche mit Spannung über der Korona-Grenze gemacht werden mussten, also immer mit abgeflachten Wellen. Es wurde daher auch auf das relativ kurze, steile Anfangsstück verzichtet, beide Leiter-Seile parallel geschaltet und der Erdboden allein als Rückleiter verwendet (Fig. 22).

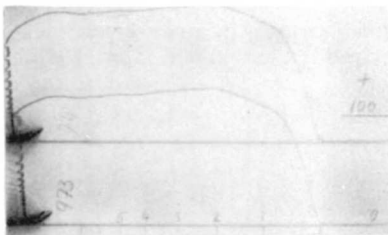


Fig. 23a Welle unter Korona-Einsatzspannung

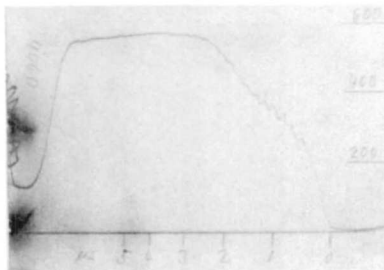


Fig. 23b Korona bei pos. Welle

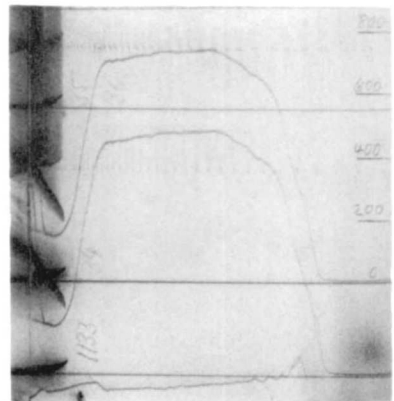


Fig. 23c Korona bei neg. Welle

Damit wurden aber auch alle Schwingungen des Stossgenerators bis sie das Leitungsende erreichten vollständig gedämpft (vgl. Fig. 23 Osz. 973/4). Mit dem Erreichen der Koronaspannung setzen dann allerdings wieder hochfrequente Schwingungen ein, und zwar bei positiver Polarität (Fig. 23b Osz. 4060) stärker als bei negativer (Fig. 23 Osz. 1134). Diese Spitzen in der Spannungskurve haben ihre Ursache im Entstehen einzelner unregelmässiger stromstarker Büschelentladungen der Leitung, speziell der Armaturen und Verbindungsstellen gegen das Ende der Leitung (Lit. 18).

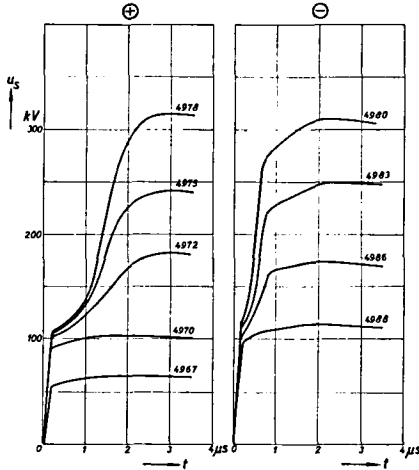


Fig. 21 Front der Stossspannung, ein Seil parallel zur Erde geschaltet als Rückleiter. Nr. der Kurven = Osz. Nr.

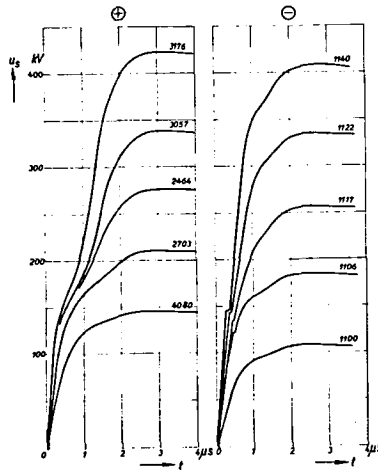


Fig. 22 Front der Stossspannung, beide Seile parallel geschaltet, Erdboden allein als Rückleiter

2. Ableiter (mit A bezeichnet)

Für beide Ableiter wurde am Ende der offenen und abgeschlossenen Leitung die Ansprechcharakteristik aufgenommen. Die Kurven für die beiden Ableiter fallen praktisch zusammen. In Fig. 24 ist der Ansprechverzug in Funktion der effektiven Ansprechspannung U_a und des Scheitelwertes der auf der Leitung laufenden Spannung U_s aufgetragen. Die Kurven für den Fall der offenen Leitung sind auf die nicht reflektierte Welle reduziert, sind also die halben gemessenen Werte. Die Ansprechzeiten sind die gemessenen Höchstwerte des Streubereiches von 5 - 10 Punkten, die 50 % Ansprechspannung für beide Ableiter und beide Polaritäten liegt zwischen 140 und 145 kV (Ende der offenen Leitung gemessen).

3. Funkenstrecke (mit F bezeichnet)

Für alle Messungen wurden 4 Schlagweiten der Funkenhörner ($f = 210, 250, 290$ u. 330 mm) gewählt, wobei die kleinste so, dass die Ueberschlagspannung nur wenig höher lag als die Ansprechspannung des Ableiters.

Um das Verhalten der Funkenstrecke beurteilen zu können, ohne Ableiter in der Nähe, wurden am Ende der abgeschlossenen Leitung die Ansprechcharakteristiken gemessen (Fig. 24) und bei abgeschlossener und offener Leitung die 50 % Ansprechspannung (Fig. 25). Zum Vergleich ist noch die Ansprechspannung beim Normalstoß $1/50 \mu\text{s}$ und bei 50 Hz aufgetragen.

Bei der offenen Leitung fällt auf, dass die Funkenstrecke erst in der 2. oder 3., in einem Fall sogar erst in der 4. Periode anspricht, obwohl der Scheitelwert der zweiten Periode um 18 %, der der dritten Periode um 30 % kleiner ist als derjenige der ersten.

Eigenartig ist die Tatsache, dass die Werte bei abgeschlossener Leitung höher liegen, obwohl die Funkenstrecke nach dem Spannungseinsatz dauernd unter Spannung steht, während im ersten Fall die Spannung jeweils während $6,6 \mu\text{s}$ (doppelte Laufzeit der Leitung) praktisch fehlt. Auffallend ist aber, dass das Ansprechen in den meisten Fällen während der ersten $6,6 \mu\text{s}$ erfolgt, was bei der offenen Leitung die erste Periode der Schwingung bedeuten würde. Man kann aber sagen, dass die Spannung höher sein muss, weil der Ueberschlag früher erfolgen muss, da der Rücken schneller abfällt als die Scheitelwerte des schwingenden Stosses. Der Vergleich mit dem Normalstoß $1/50 \mu\text{s}$ zeigt auch, dass die Werte hier wegen des flacheren Rückens tiefer liegen als im Fall der abgeschlossenen Leitung. Der Ansprechverzug beim Stoß $1/50$ streut zwischen 4 - 10 μs .

Folgende Tabelle zeigt, wie die Spannung im Rücken der verschiedenen Stöße abnimmt (der Stern* zeigt ungefähr den Zeitpunkt des Ueberschlages):

Zahl des Scheitelwertes der schwingenden Spannung (entspr. je $13,3 \mu\text{s}$)	1	2	3	4	5
Amplituden der schwingenden Spannung (offene Leitung):	100	82*	70*	62	56 %
Spannung zur entspr. Zeit bei Stoß $1/50 \mu\text{s}$:	100-*	78	61		%
do. bei abgeschlossener Leitung	100*	76	56		%

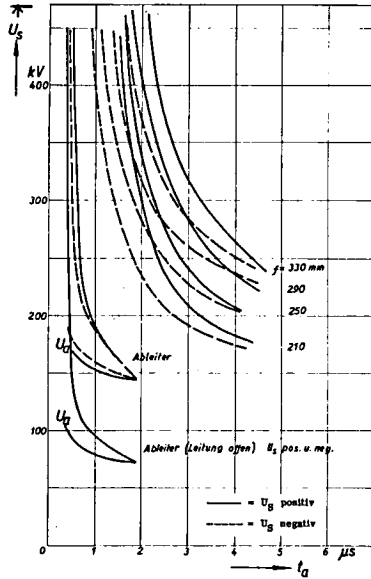


Fig. 24 Ansprechcharakteristiken von A und F am Ende der abgeschlossenen Leitung gemessen. Bei A höchste, bei F kürzeste Zeiten des Streubereichs

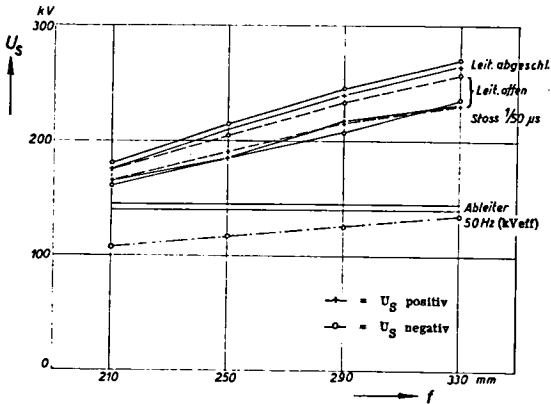


Fig. 25 50 % - Ansprechspannungen von Funkenstrecke und Ableiter am Ende der Leitung gemessen.

50 % - Ansprechspannung der Funkenstrecke bei Normalstoß 1/50 μ s im Labor gemessen.

50 Hz Ansprechspannung der Funkenstrecke(kVeff).

B. ABLEITER AM ENDE DER LEITUNG, FUNKENSTRECKE VOR DEM ABLEITER (Fig. 4)

1. Spannungsverlauf an F

a) Konstruiert aus den Messungen am Ende der Leitung

Wie in Kap. II Abschnitt 2a dargestellt wurde, entsteht die am Ende der Leitung ausgelöste rückläufige Spannungswelle u_r aus der Differenz der ankommenden Welle u_g und der an der Abschlussimpedanz, in diesem Fall am Ableiter, sich einstellenden Spannung u_p . Diese beiden Spannungen können direkt gemessen werden und durch entsprechende zeitliche Verschiebung kann also daraus die Spannung an F konstruiert werden (wegen der Dämpfung allerdings nur angenähert und nur für die erste Periode, dh. für zwei Laufzeiten der ganzen Leitung $2t_L$).

In den folgenden Figuren 26 - 31 sind für verschiedene Fälle einige Spannungsverläufe dargestellt.

b) Spannung an F direkt gemessen

Zu diesem Zwecke wurde bei F ein kapazitiver Spannungsteiler aufgestellt und die Mess-Spannung mit einem Kabel zum KO geführt. Diese Zuleitungen von 100- 200 m Länge fälschen allerdings die Messungen etwas (Lit. 21), und die Teilerkapazität von 200 pF überspannungsseitig hat zudem einen Einfluss auf den Spannungsverlauf der Leitung. Es war jedoch nicht beabsichtigt mit dieser Anordnung genaue Messungen auszuführen, sondern in erster Linie sollen diese Oszillogramme ein Bild geben von den Vorgängen an der Stelle F (Fig. 32).

Vergleicht man diese Aufnahmen mit den im letzten Abschnitt konstruierten Spannungen, so findet man eine gute Übereinstimmung für die erste Periode, dh. während $2t_L$. (Vgl. z. B. Fig. 26 - Osz. 4329, wobei allerdings Osz. 4329 bei $x = 60$ m aufgenommen wurde. / Fig. 29 - Osz. 2225 / Fig. 28 - Osz. 4903 / Fig. 31 - Osz. 4893). Alle Spannungsimpulse der weiteren Perioden sind wegen der Dämpfung der Leitung schon sehr stark verformt. Die scharfen Spitzen, die im Falle der offenen Leitung entstehen, sind schon in der zweiten Periode vollständig verschwunden (z. B. Fig. 32b Osz. 4887, Fig. 32d Osz. 4593). Das zeigt deutlich, dass es nur einen Sinn hat den Spannungsverlauf für die zweite und alle weiteren Perioden zu konstruieren falls die Dämpfung berücksichtigt werden kann, wie schon in Kap. II Abschn. 2a erwähnt wurde.

2. Erwartungen für die Kombination Ableiter nach Funkenstrecke

Betrachtet man z. B. Osz. 2225 (Fig. 32a) oder 4329 (Fig. 32h), so könnte man annehmen, dass die Funkenstrecke im ersten grossen Spannungsimpuls ansprechen würde, oder aber gar nicht, da die Spannung nach-

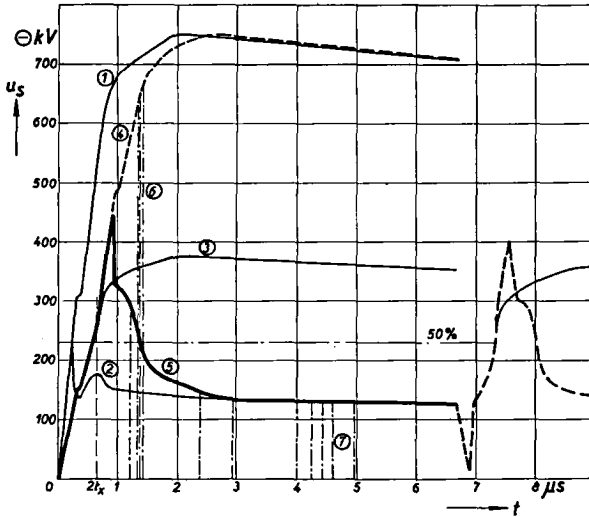


Fig. 26 Leitung offen, $x = 100 \text{ m}$, $f = 290 \text{ mm}$
 Kurve - - - - : Reflexion vom Leitungsanfang (ohne Dämpfung)

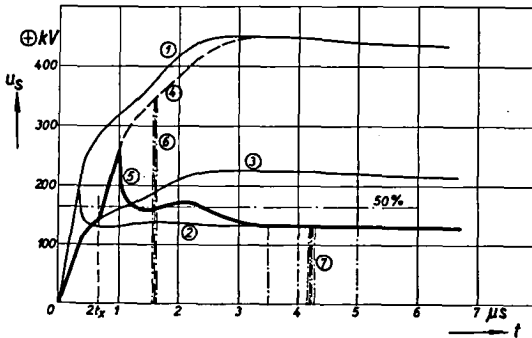


Fig. 27 Leitung offen, $x = 100 \text{ m}$, $f = 210 \text{ mm}$

Legende zu Fig. 26 - 29:

- Kurve 1 volle reflektierte Welle $2u_s$ (gemessen)
- 2 Spannung am Ableiter (gemessen)
- 3 Ankommende Welle auf Leitung $u_s = 1/2$ von Kurve 1
- 4 Verlauf an F ohne Ableiter
- 5 Verlauf an F mit Ableiter
- 6 Ueberschläge an F ohne Ableiter
- 7 Ueberschläge an F mit Ableiter (bei einer Spannung höher als die Grenzansprechspannung)

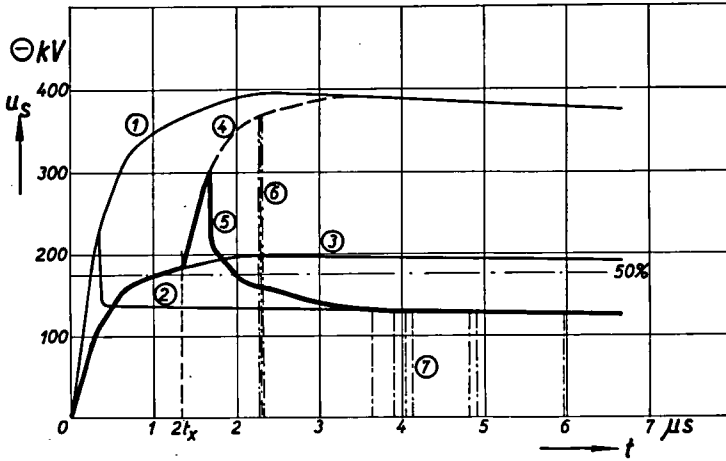


Fig. 28 Leitung offen, $x = 200$ m, $f = 210$ mm

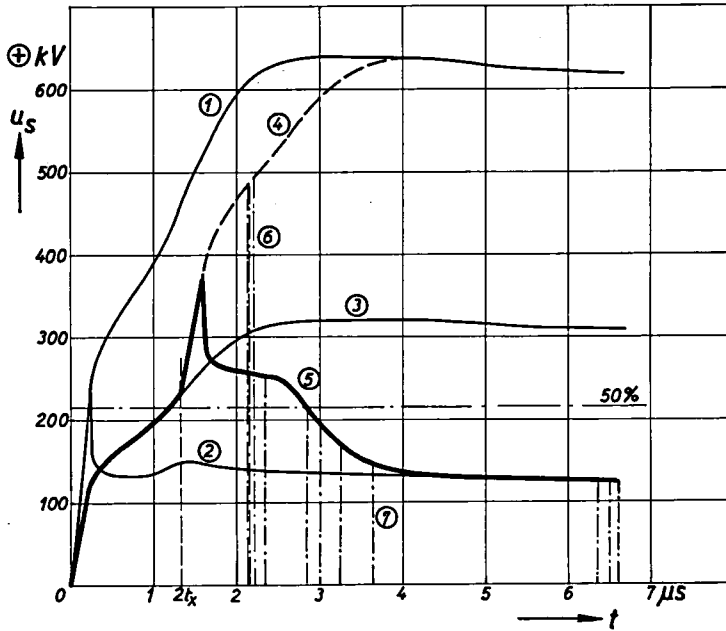


Fig. 29 Leitung offen, $x = 200$ m, $f = 290$ mm

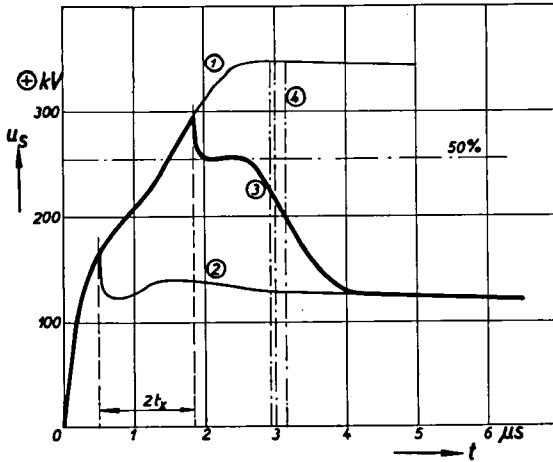


Fig. 30 Leitung mit R_Z abgeschlossen, $x = 200$ m, $f = 330$ mm

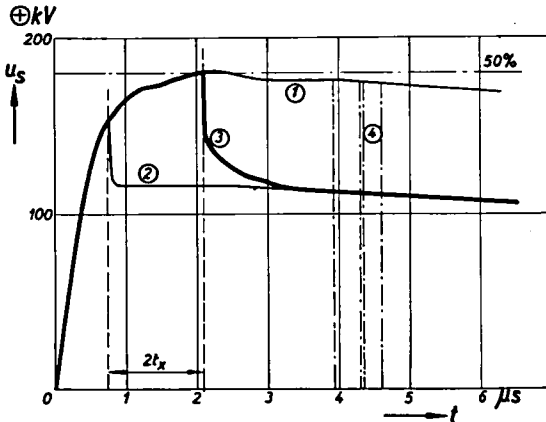
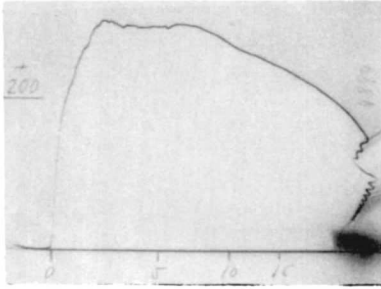


Fig. 31 Leitung mit R_Z abgeschlossen, $x = 200$ m, $f = 210$ mm

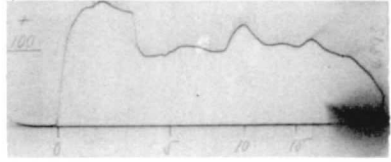
Legende zu Fig. 30, 31:

- Kurve 1 Spannungsverlauf am Leitungsende (gemessen)
= Spannung an F ohne Ableiter
- 2 Spannung am Ableiter (gemessen)
- 3 Spannung an F mit Ableiter
- 4 Uberschläge an F ohne Ableiter

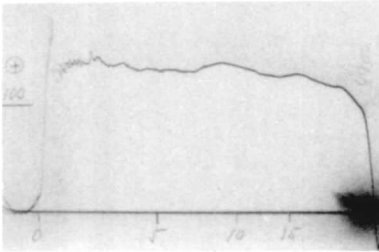
Fig. 32a Leitung Ende abgeglichen, $x = 200$ m



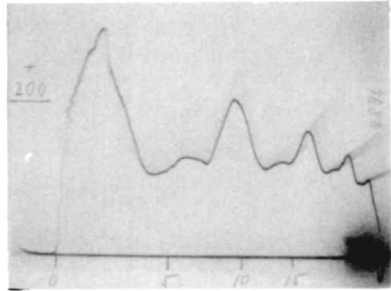
A Messtelle Ende Leitung ohne Ableiter



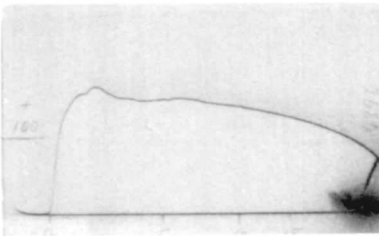
D Messtelle x mit Ableiter (U_S wie bei C)



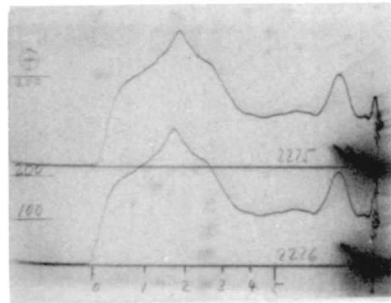
B Messtelle Ende Leitung mit Ableiter



D U_S wie bei A



C Messtelle x ohne Ableiter



D $U_S = \text{ca. } 500 \text{ kV}$

NB Die Bezeichnung der Aufnahmen mit A B C D für den Ort der Messung und die Art der Schaltung gilt auch für alle folgenden Osz. bis Fig. 32 h.

Fig. 32b $x = 200 \text{ m}$
Leitung offen

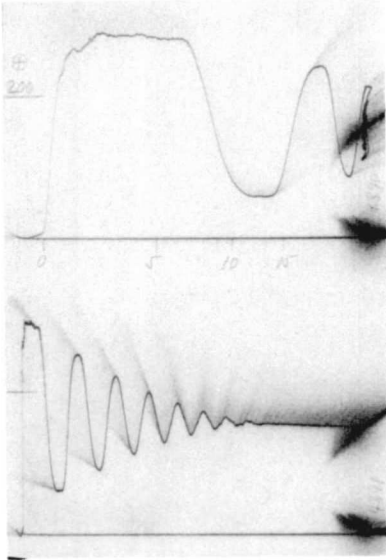
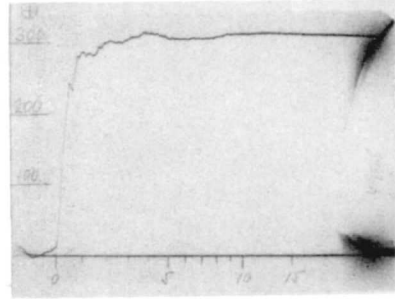
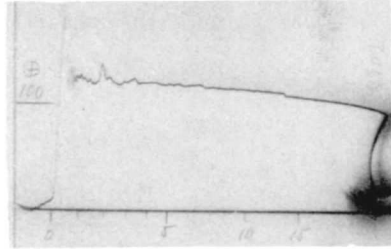
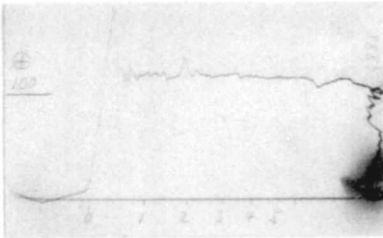


Fig. 32c $x = 200 \text{ m}$
Leitung Anfang abgeglichen

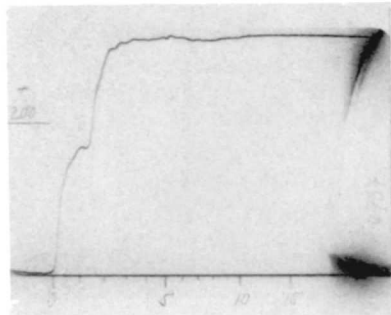
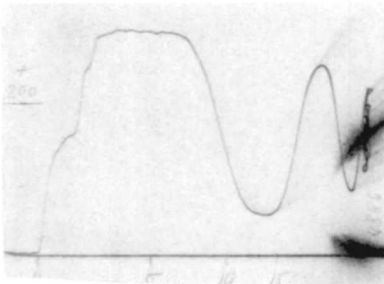
-A-



-B-



-C-



zu B: Die scharfe Zacke in der Restspannung bei $2 \mu\text{s}$ ist eine Reflexion am Spannungsteiler an der Stelle x .

Fig. 32b (Fortsetzung)

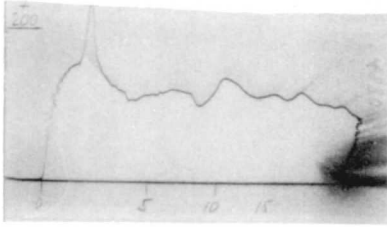
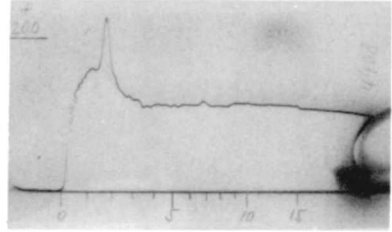


Fig. 32c (Fortsetzung)



-D-

Fig. 32d $x = 100 \text{ m}$
Leitung offen

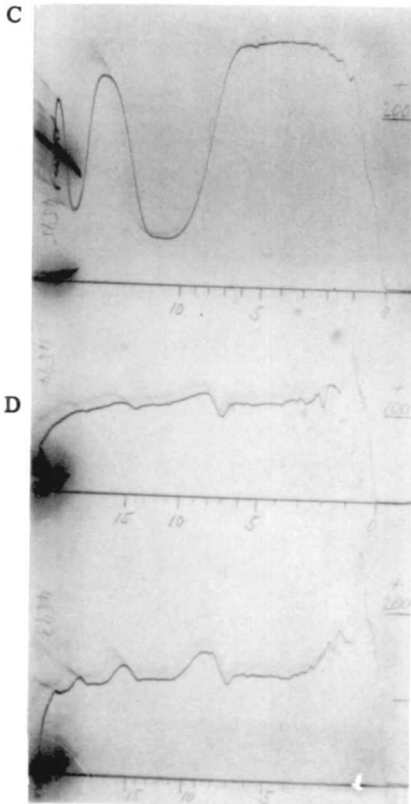
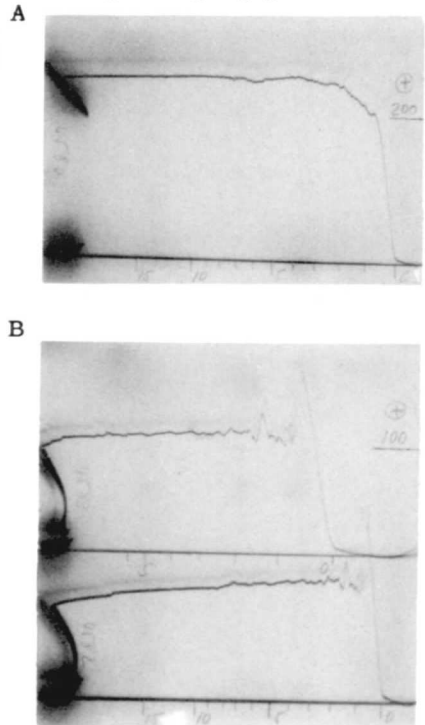


Fig. 32e $x = 100 \text{ m}$
Leitung Anfang abgeglichen



Osz. 4594/95 $U_S = 145 \text{ kV}$

4593 $U_S = 230 \text{ kV}$

Fig. 32e (Fortsetzung)

Leitung Anfang abgeglichen

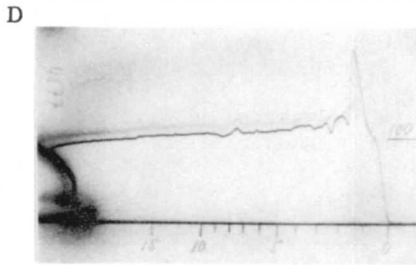
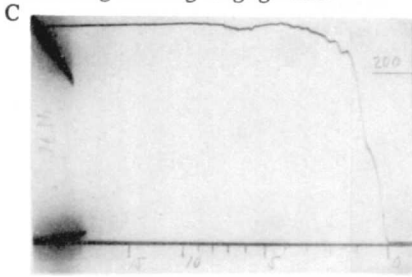


Fig. 32f x = 100 m

Leitung Ende abgeglichen

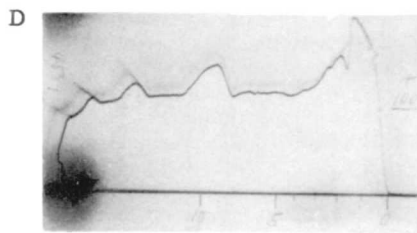
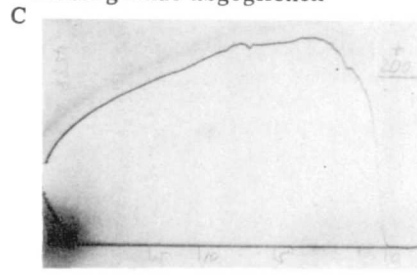
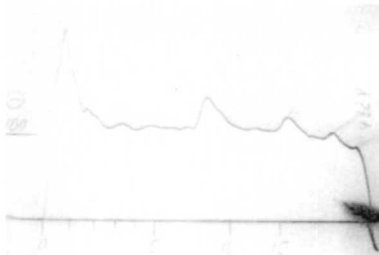


Fig. 32g x = 60 m

Leitung Ende abgeglichen

D $U_S = \text{ca. } 300 \text{ kV}$



D $U_S = \text{ca. } 190 \text{ kV}$

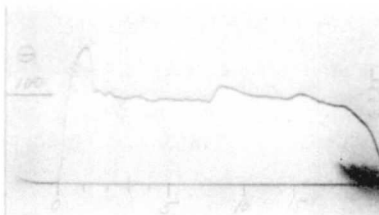
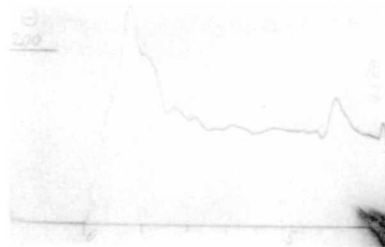


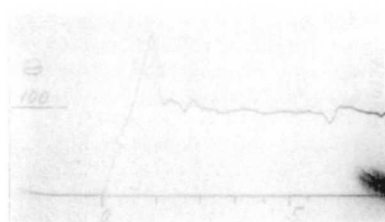
Fig. 32h x = 60 m

Leitung offen

D $U_S = \text{ca. } 300 \text{ kV}$



D $U_S = \text{ca. } 150 \text{ kV}$



her unter der 50 % Ansprechspannung für volle Stösse liegt. Besonders im Fall der am Anfang reflexionsfrei abgeschlossenen Leitung glaubt man annehmen zu dürfen, dass die Spannung, einmal für immer auf die Restspannung des Ableiters abgesenkt (Osz. 4908 Fig. 32c), für die Funkenstrecke nicht mehr gefährlich sei. Die Restspannung ist ja in gewissen Fällen nur etwa die Hälfte der 50 % Ansprechspannung.

Die folgenden Messungen zeigen aber, dass diese Vermutungen bei weitem nicht zutreffen.

3. Messungen und Interpretation der Oszillogramme

Wünschenswert wäre natürlich die Messung der Spannung direkt an F im Abstand x vom Leitungsende entfernt. Eine solche Anordnung würde jedoch zu viele Schwierigkeiten bieten, so dass die Messungen auf das Leitungsende beschränkt wurden, was übrigens vollkommen genügt, wenn man über die Vorgänge auf der Leitung im Bild ist.

Als Bezugsspannung für sämtliche Versuche wurde der Scheitelwert U_S der ersten auf die Leitung gegebenen Welle u_S gewählt, und zwar so wie sie am Leitungsende gemessen wurde. Bei der mit dem Wellenwiderstand abgeschlossenen Leitung entspricht er direkt dem Messwert, bei der offenen Leitung der Hälfte des Messwertes. Falls der Ableiter angeschlossen war, konnte diese Spannung leider nicht mehr gemessen werden, da der Ableiter immer in der Front anspricht. Unmittelbar nach jeder Messung mit dem Ableiter wurde dieser deshalb von der Leitung abgetrennt, ebenso die Funkenstrecke und so mit unverändertem Stossgenerator nochmals einige Stossspannungen registriert. Als Kontrolle wurde dabei immer die Ladespannung des Stossgenerators gemessen. Wegen der allzugrossen und unregelmässigen Schwingungen konnte leider die Spannung vom Anfang der Leitung nicht als Basis verwendet werden.

Das Verhalten der Funkenstrecke ist aus den Oszillogrammen zu lesen, indem direkt der Ansprechverzög gemessen werden kann, da sowohl der Spannungseinsatz als auch der Zusammenbruch gegenüber dem Leitungsende um die Zeit t_x verschoben sind.

4. Resultate

Das Ergebnis aller Messungen ist in den Kurven Fig. 33 - 35 zusammengestellt.

Auf der Abszisse ist die Schlagweite der Funkenstrecke aufgetragen. Die Ordinate gibt den Scheitelwert der Bezugsspannung u_S , bei der von einer Anzahl gleicher Stösse ein Teil zum Ueberschlag an F führte, bei der Kombination Funkenstrecke - Ableiter.

Parameter ist die Distanz x der Funkenstrecke vom Ende der Leitung.

Alle Werte sind auf den Normalzustand (20° C, 760 mmHg) reduziert. Zum Vergleich ist jeweils noch die 50 % Ueberschlagsspannung aufgetragen, (auch auf die Bezugsspannung U_S reduziert), gemessen allerdings mit F am Ende der Leitung.

Als wichtigstes Resultat ist folgendes zu beachten:

Eine Funkenstrecke, in irgend einem Abstand vor dem Ableiter, wird durch diesen nicht unbedingt geschützt, selbst wenn eine Stoss-Spannung nach einem gewissen Anfangswert (über der 50 % Spannung der Funkenstrecke), der aber allein noch nicht zum Ueberschlag führt, dauernd oder intermittierend auf die Restspannung des Ableiters (tiefer als die 50 % Spannung) abgesenkt wird. Ein Ueberschlag kann trotzdem relativ spät in der Restspannung noch erfolgen.

Um dieses Verhalten zu illustrieren zeigt Fig. 36 - 40 eine Reihe von Oszillogrammen, wie sie zur Ermittlung der Punkte der Fig. 33 - 35 aufgenommen wurden.

Als Beispiel sei auf die Osz. 4560-75 (Fig. 36) verwiesen, aus denen wir folgendes lesen können:

Schaltung: Leitung Ende offen, Anfang abgeglichen, $x = 100$ m, $t_x = 0,33 \mu\text{s}$,
 $f = 250$ mm, $U_{50\%} = 185$ kV

gemessen : $U_S = 375 : 2 = \text{ca. } 190$ kV (Osz. 4560-62)
 $u_p = 130$ kV

Ansprechverzug von F $t_{aF} = 6,3 \dots 8 \mu\text{s}$ (Osz. 4564-75)

" " A $t_{aA} = \text{ca. } 0,45 \mu\text{s}$

Ansprechspannung " A $U_{aA} = 190$ kV

Spannung zur Zeit $2t_x + t_{aA} (=1,1 \mu\text{s})$, dh. im Moment da an F die Spannung abgesenkt wird

$u_S = 165$ kV (Osz. 4560)

Die höchste Spannungsspitze an F beträgt also

$$u_S + \frac{U_a}{2} = 165 + 95 = \underline{260 \text{ kV}}$$

$$\text{zur Zeit } t = \underline{1,1 \mu\text{s}}$$

Im selben Moment sinkt nun die Spannung auf

$$u_S + \frac{U_a}{2} - (U_a - u_p) = 260 - 60 = 200 \text{ kV}$$

und nach der weiteren Zeit von $t_S - t_{aA} = \text{ca. } 2 \mu\text{s}$ ($t_S = \text{ca. } 2,5 \mu\text{s}$ = Frontdauer O - Scheitelwert von u_S), also nach total $2t_x + t_S = \text{ca. } 3,3 \mu\text{s}$ endgültig auf die Restspannung $u_p = 130$ kV. Trotzdem erfolgt noch 3 - 4,7 μs später (entspr. t_{aF} 6,3 - 8) an F ein Ueberschlag.

Etwas komplizierter sind die Verhältnisse im Fall der am Anfang nicht abgeglichenen Leitung. Hier wird die Spannung nicht dauernd auf die Restspannung abgesenkt, sondern es sind dieser noch eine Reihe abklingender Impulse überlagert. Die Lage dieser Impulse ist in den Oszillogrammen der Fig. 37-40 als eine leichte Erhöhung der Restspannung sichtbar. Auffallend ist, dass die Ueberschläge an F nicht unbedingt bei einem Impuls erfolgen, sondern willkür-

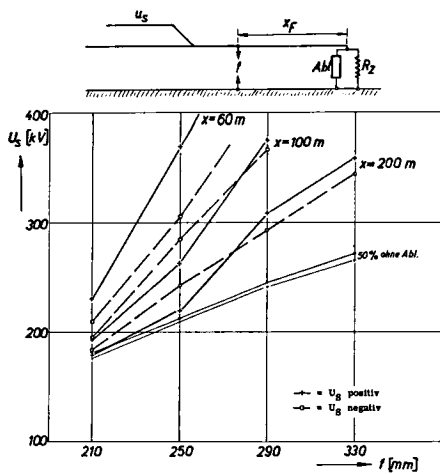


Fig. 33

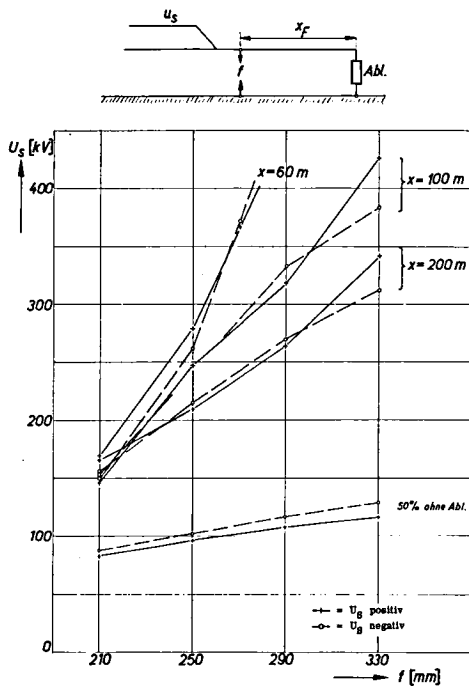


Fig. 34

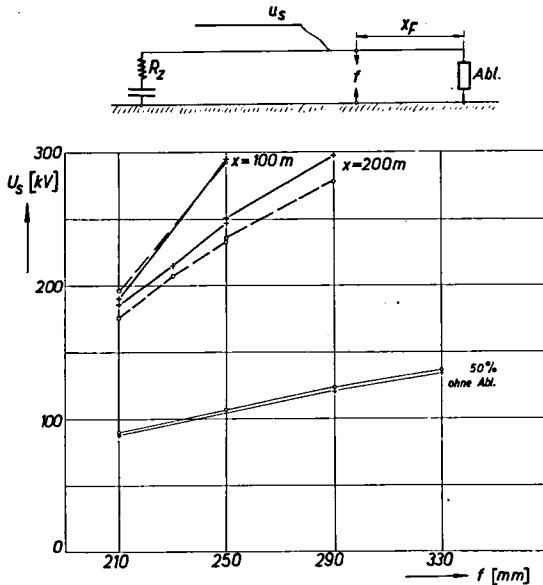


Fig. 35

lich über ein gewisses Zeitintervall streuen. Dass die Impulse aber trotzdem den Ueberschlag begünstigen geht daraus hervor, dass der Ansprechverzug im Mittel grösser ist als beim Verlauf ohne Impulse. Diese Begünstigung wird auch bestätigt beim Vergleich der Fig. 34 und 35: Die Spannungen U_s für den Verlauf ohne Impulse (Fig. 35) liegen höher.

Ein weiteres auffallendes Merkmal in Fig. 33 und 34 ist die grosse Unregelmässigkeit der einzelnen Messpunkte im Verlauf der Kurven. Leider war es nicht möglich eine Ursache für diese Unregelmässigkeiten zu finden. Ein Einfluss z. B. der Witterung (Feuchtigkeit, Sonnenbestrahlung) konnte nicht festgestellt werden.

Wie gross die Streuung der Messungen an ein und derselben Anordnung sein kann zeigt folgendes Beispiel:

Fig. 34: Punkte für $f = 250$ mm, $x = 200$ m

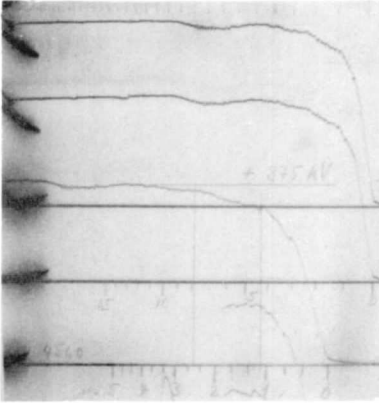
Eine erste Messung lieferte $U_S = + 265$ kV (!)
 - 210 kV
 eine zweite Messung 2 Tage später $U_S = + 205$ kV
 bei genau gleicher Witterung: - 210 kV

Umgekehrt zeigte die Messung für $f = 250$ mm, $x = 100$ m einen scheinbar viel zu tiefen Punkt $U_S = - 210$ kV (statt ca. 240 kV).

Aehnliche Streuungen wurden auch bei den Messungen der Anordnung des Ableiters vor der Funkenstrecke z. B. bei $x = 60$ m, $f = 250$ und 290 mm festgestellt.

Leitung am Anfang abgeglichen, Ende offen, $x = 100 \text{ m}$

Fig. 36a



Volle Stosspannung $2\mu\text{s}$, ohne A und F

$$2U_S = + 380 \text{ kV}$$

Zu beachten ist der flache Rücken, da keine Reflexion vom Anfang der Leitung und keine Ableitung gegen Erde erfolgt.

Fig. 36b

$f = 210 \text{ mm}$

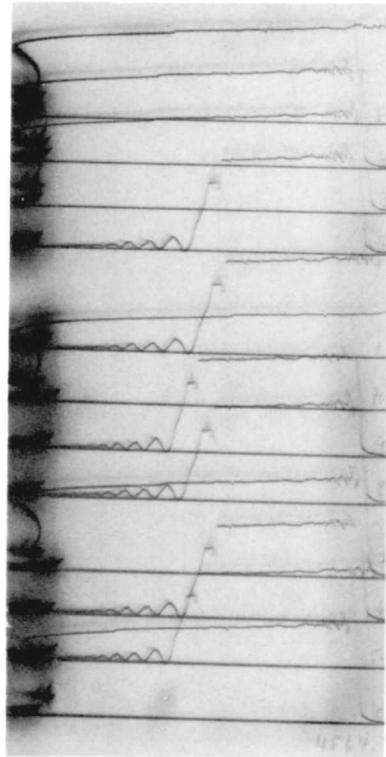
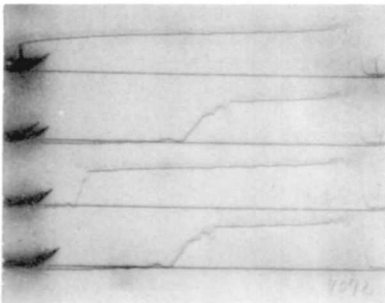


Fig. 36c

$f = 250 \text{ mm}$



$$u_p = 145 \text{ kV}$$

Ansprechverzug 5,7 - ca. $20 \mu\text{s}$

Spannung am Ableiter

$$u_p = 130 \text{ kV}$$

Die Restspannung ist praktisch konstant, da keine Reflexion vom Leitungsanfang erfolgt. Der Zusammenbruch der Restspannung bedeutet ein Ueberschlag an F.

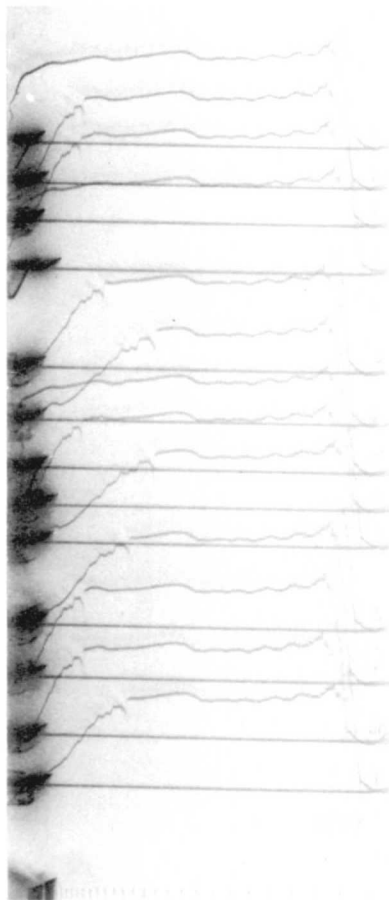
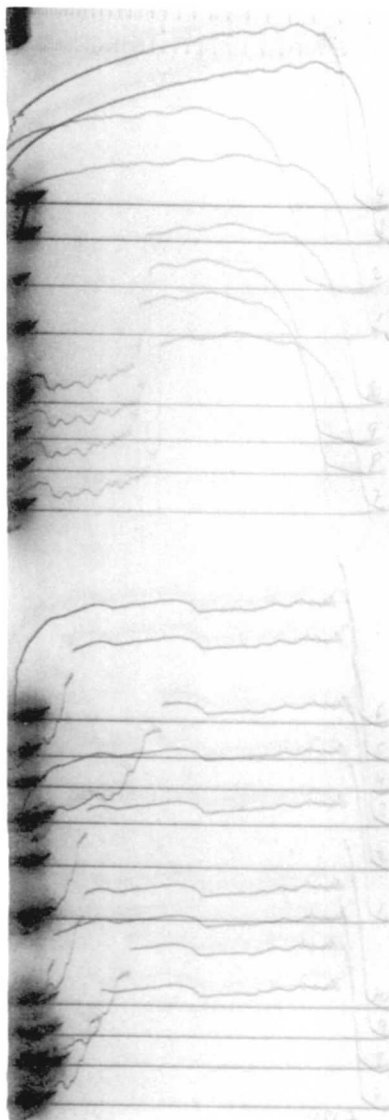
Leitung am Ende abgeglichen, $x = 200$ m

Fig. 37a

$f = 210$ mm

Fig. 37b

$f = 290$ mm



Restspannung $u_p = 140$ kV
Volle Stosspannung $U_S = -290$ kV
Zeiteichung am unteren Bildrand : 1 MHz

- Osz. 4867-76 Spannung am Ableiter, $u_p = 115$ kV
Nach je 1 Periode ($6,6 \mu\text{s}$) erfolgt eine Erhöhung der Restspannung durch die vom Leitungsanfang reflekt. Welle. Die Überschläge an F streuen von der 2. bis zur 4. Periode.
- Osz. 4877-80 Gleiche Stosspannung ohne Ableiter.
- Osz. 4881-84 Volle Stosspannung, $U_S = -180$ kV.

Leitung Anfang und Ende offen, $x = 60$ m

Fig. 38a

$f = 250$ mm

Fig. 38b

$f = 210$ mm



- Fig. 38a Osz. 4015-20 Restspannung $u_p = 135$ kV. Ueberschläge in 2.-4. Periode
4021-23 Ueberschläge in F ohne Ableiter, nach dem Ueberschlag freie Schwingung des Leitungsstückes von 60 m.
4024-27 Volle Stosspannung $2u_s$, freie Schwingung der ganzen Leitung. $2U_s = + 560$ kV
Oberer Bildrand Zeiteichung 3 MHz zu 4021-27
- Fig. 38b $u_p = 115$ kV, Ueberschläge in 2.-3. Periode, $2U_s = + 340$ kV
Zeiteichung 3 MHz zu Osz. 4046-52

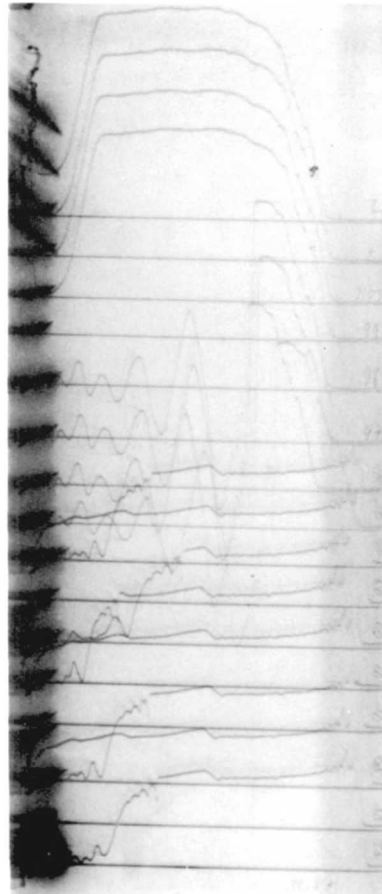
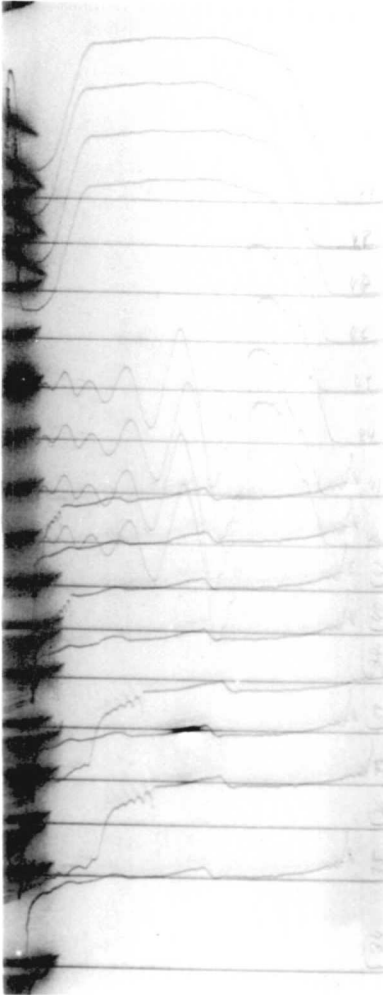
Leitung Anfang und Ende offen, $x = 100$ m

Fig. 39a

$f = 330$ mm

Fig. 39b

$f = 290$ mm



$u_p = 150$ kV, Ueberschläge in 2.-3.
Periode
 $2U_S = - 660$ kV

- Osz. 3134-41 Restspannung $u_p = 155$ kV
Ueberschläge in 2. u. 4. Periode
3142-45 Ueberschläge an F ohne Ableiter, nach dem Ueberschlag
freie Schwingung des Leitungsstückes von 100 m.
3146-49 Volle Stosspannung $2U_S = - 755$ kV

Leitung Anfang und Ende offen, $x = 200$ m

Fig. 40a

$f = 290$ mm

Fig. 40b

$f = 210$ mm

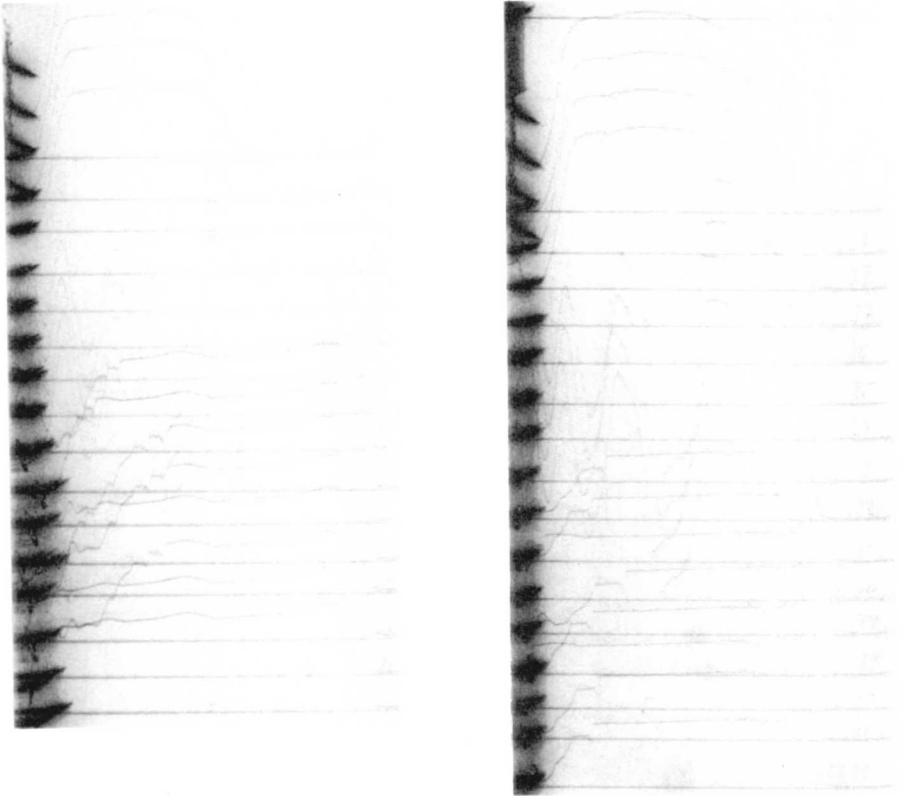


Fig. 40a Osz. 2498-2505 Restspannung $u_p = 140$ kV
Ueberschläge in 2. - 3. Periode
2506-09 Ueberschläge an F ohne Ableiter, nach
dem Ueberschlag freie Schwingung des
Leitungsstückes von 200 m.
2510-13 Volle Stosspannung $2U_S = + 550$ kV

Fig. 40b $u_p = 135$ kV, Ansprechverzög 4,75 ... 6,35 μ s
 $2U_S = + 405$ kV (50 % Anspr. Sp. für diesen Fall 350 kV)
Zeiteichung für alle Osz. 3 MHz

5. Ein ähnlicher Versuch als Vergleich

An Stelle des Ableiters wurde die Leitung am Ende kurzgeschlossen. An der Funkenstrecke entstehen dann mit einer Frequenz entsprechend der doppelten Laufzeit der Leitung Impulse der Dauer $2t_x$, mit Flanken entsprechend der Wellenfront. Zwischen den Impulsen ist die Spannung Null. Die Fig. 41a, b, c zeigt einige solche Impulsfolgen wie sie an verschiedenen Stellen x gemessen wurden.

Interessant ist nun das Verhalten der Funkenstrecke bei der Beanspruchung mit einer solchen Impulsfolge. Ganz entsprechend den vorangehenden Versuchen mit dem Ableiter spricht F nicht im ersten, sondern meistens erst im zweiten Impuls an, obwohl dieser bei $x = 200$ m nur noch ca. 50 % des ersten beträgt.

Da eine Messung der Spannung direkt an F wegen des grossen Spannungsabfalles an der Erde im Falle eines Ueberschlages nicht empfehlenswert war, musste der Zeitpunkt des Ueberschlages aus der Erdschluss-Spannung am Ende der Leitung gemessen werden, wo im Moment des Ueberschlages ein scharfer, negativer Impuls entstand. Fig. 41d, Osz. 2181-85.

Fig. 41a

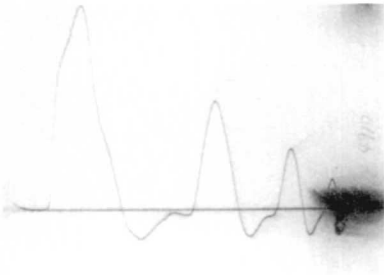
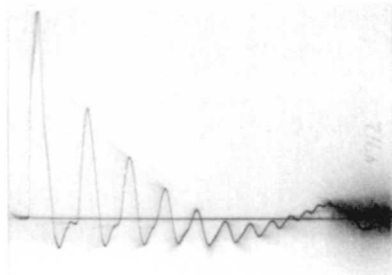


Fig. 41b



Messtelle $x = 200$ m. Kurzschluss Ende Leitung. 2 gleiche Aufnahmen mit verschiedener Zeitablenkung. Periode der Impulse $6,6 \mu\text{s}$.

Fig. 41c

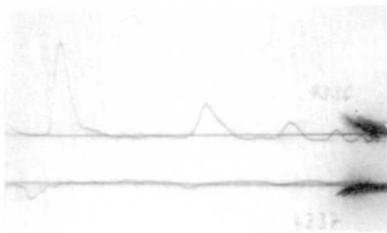


Fig. 41d



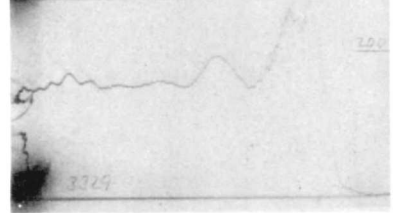
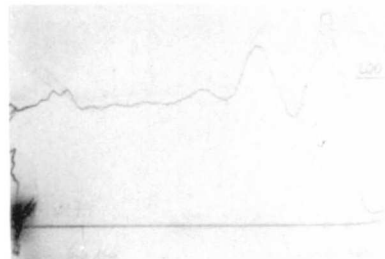
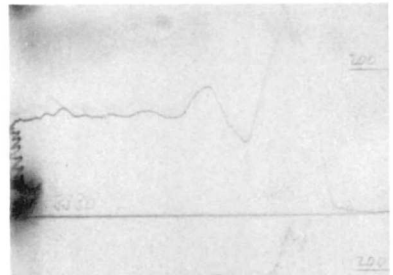
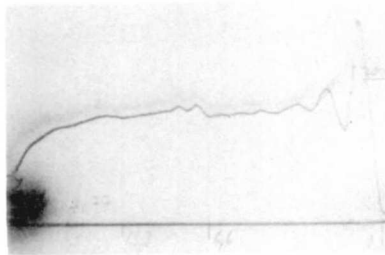
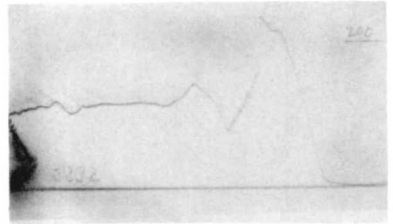
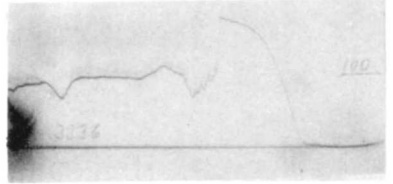
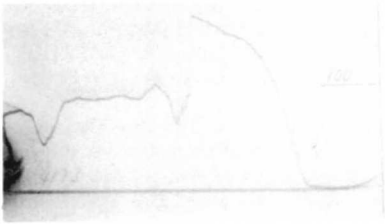
Messtelle $x = 60$ m
Osz. 4337: Erdschluss-Spannung am Ende der Leitung

Erdschluss-Spannung am Ende der Leitung gemessen. F an der Stelle $x = 200$ m, die Ueberschläge an F sind mit einem Pfeil Markiert

Ableiter an der Stelle x, Leitungsende offen

Fig. 42a x = 60 m

Fig. 42b x = 100 m

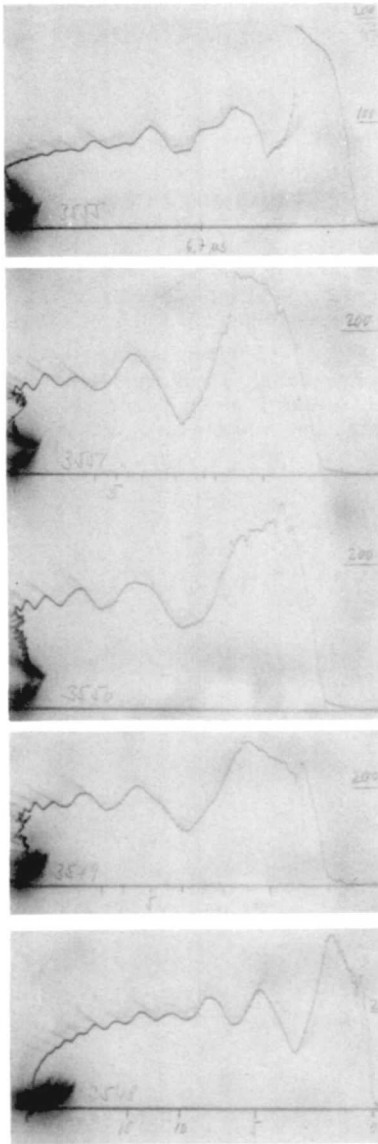


Volle Stosspannungen $2U_S$ (von oben nach unten):

+160 kV
220
440
740

+190 kV
260
370
550

Fig. 42c x = 200 m



+180 kV
300
390
550
700

C. FUNKENSTRECKE AM ENDE DER OFFENEN LEITUNG, ABLEITER VOR DER FUNKENSTRECKE (Fig. 9)

1. Spannungsverlauf

Im Gegensatz zur vorhergehenden Anordnung konnte in diesem Fall der Spannungsverlauf an F direkt gemessen werden mit der vorhandenen Einrichtung (Kugelspannungsteiler). Eine Uebersicht über alle möglichen Spannungsverläufe gibt die Fig. 42.

In den Oszillogrammen ist folgendes zu sehen:

Die Eigenschwingung des Leitungstückes x ist stark gedämpft, und zwar je stärker desto kleiner x ist.

Nach der doppelten Laufzeit der Leitung entsteht in der Restspannung ein positiver oder negativer Impuls, herrührend von der am Anfang der Leitung reflektierten Welle. Bei kleinen Stoss-Spannungen u_S ist dieser Impuls negativ. In diesem Fall liegt die Welle U_S unter der Ansprechspannung des Ableiters und läuft daher über den Ableiter ohne dass dieser anspricht. Er spricht dann erst auf dem Rückweg der am Ende reflektierten Welle an falls $U_S > 1/2 U_a$. Ganz ähnlich wie Fig. 6 zeigt, läuft dann eine positive Ansprechspitze auf den Leitungsanfang und erscheint nach der Reflexion als negative Spitze am Ableiter, wo die Restspannung entsprechend sinkt (vgl. Fig. 42a, Osz. 4173 und 74).

Ist $U_S > U_a$ so zündet der Ableiter schon beim ersten Erscheinen von u_S . Analog zur Fig. 5 läuft dann nur eine negative Welle auf den Leitungsanfang zurück, also nach der Reflexion wieder eine positive Welle auf den Ableiter, wo die Restspannung entsprechend erhöht wird (vgl. Fig. 42a, Osz. 4177 u. 79).

Auffallend ist auch der sehr steile Spannungszusammenbruch in den Fällen da der Ableiter erst nach der Reflexion zündet (vgl. Fig. 42a, Osz. 4173/74, Fig. 42b, Osz. 3332/36, Fig. 42c, Osz. 3551/55).

Wie schon früher erwähnt wurde, ist in Fig. 42c, Osz. 3648 und 49 die Restspannung höher als die Ansprechspannung wegen der schlechten Erdung.

2. Resultate

Wird nun am Leitungsende eine Funkenstrecke mit den soeben beschriebenen Spannungswellen beansprucht, so zeigt sich, wie jetzt zu erwarten ist, wieder dasselbe Verhalten wie in allen vorhergehenden Fällen:

Ein Ueberschlag erfolgt mit erheblichem Verzug noch in der Restspannung des Ableiters, falls die Funkenstrecke vorher auch nur kurzzeitig über die 50 % Ansprechspannung beansprucht wurde.

Dieses Verhalten veranschaulichen die Fig. 43-45. Die Grenze des Ansprechens von F, analog den Fig. 33 - 35, ist in Fig. 46 dargestellt. Fig. 47 zeigt einen Vergleich der Spannungen, die an F einen Ueberschlag bewirken. Schraffiert sind die Werte der Spannungen wie sie an F tatsächlich vorhanden sind entsprechend Fig. 42.

Ableiter bei $x = 60$ m, Leitungsende offen

Fig. 43a $f = 250$ mm

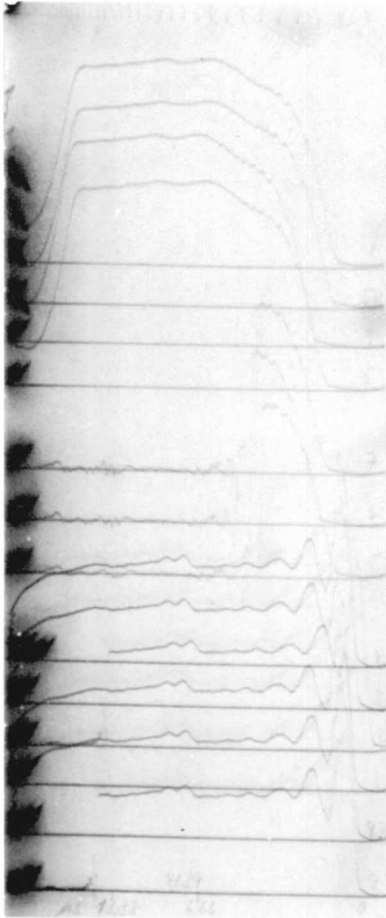


Fig. 43b $f = 210$ mm

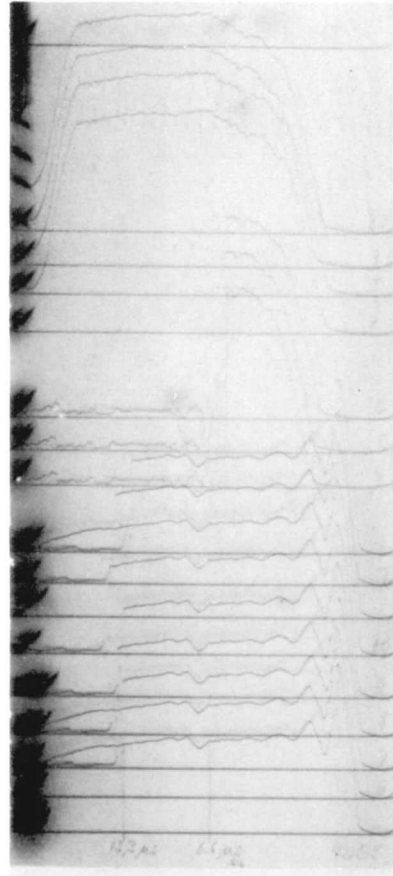


Fig. 43a Osz. 4139-44 Mittl. Restspannung $u_p = 140$ kV
Ueberschläge Anfang 3. Periode
4145-47 Ueberschläge an F ohne Ableiter
4148-51 Volle Stosspannung $2U_S = - 425$ kV

Fig. 43b $u_p =$ ca. 130 kV
Ueberschläge Ende 2. Periode, $2U_S$
 $2U_S = +290$ kV

Ableiter bei $x = 100$ m, Leitungsende offen

Fig. 44a

$f = 250$ mm

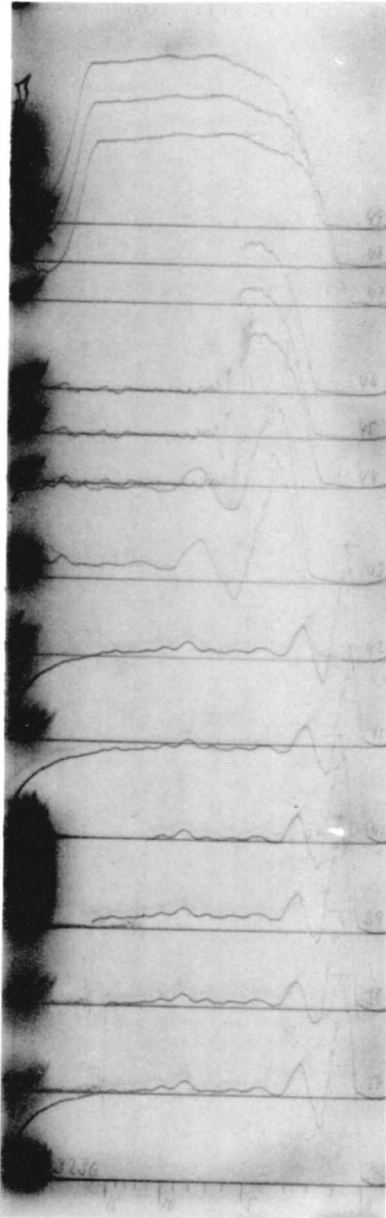
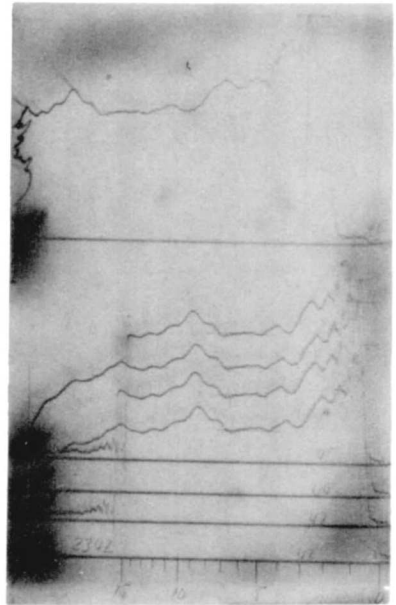
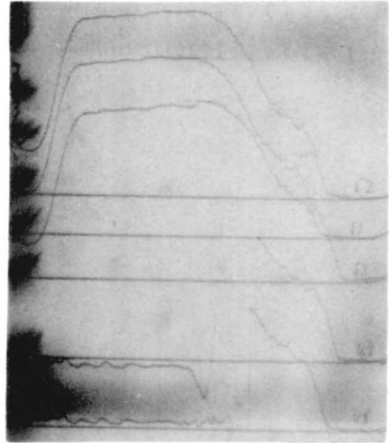


Fig. 44b

$f = 330$ m



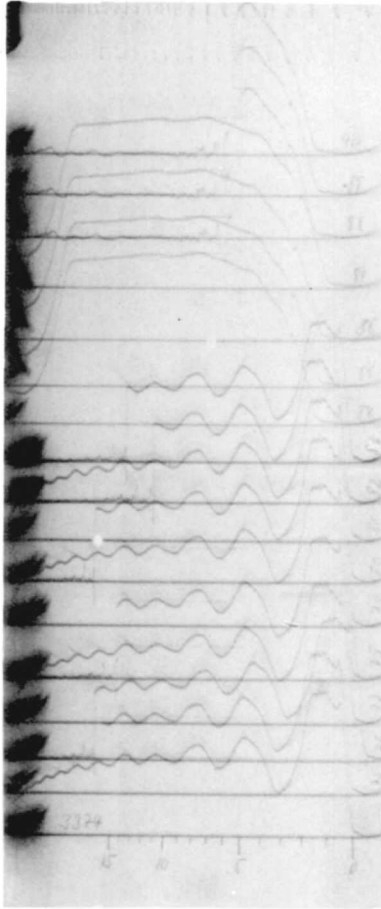
$u_p = \text{ca. } 170$ kV, Ueberschläge in 3. Periode

$2U_S = + 805$ kV

$u_p = \text{ca. } 130$ kV, Ueberschläge in 2. - 3. Periode, $2U_S = - 360$ kV

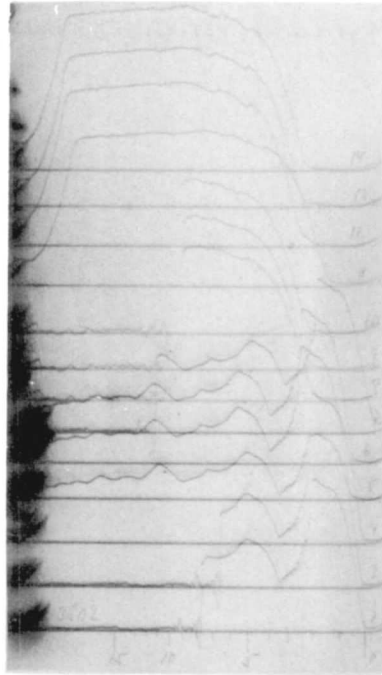
Ableiter bei $x = 200$ m, Leitungsende offen

Fig. 45a $f = 330$ mm



$u_p = \text{ca. } 165 \text{ kV}$, Ueberschlä-
ge in 2. - 3. Periode
 $2U_S = - 520 \text{ kV}$

Fig. 45b $f = 210$ mm



$u_p = \text{ca. } 100 \text{ kV}$, Ueberschläge in
1. - 2. Periode
 $2U_S = + 220 \text{ kV}$

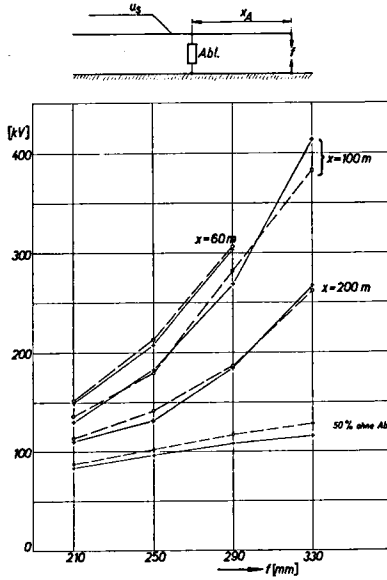


Fig. 46

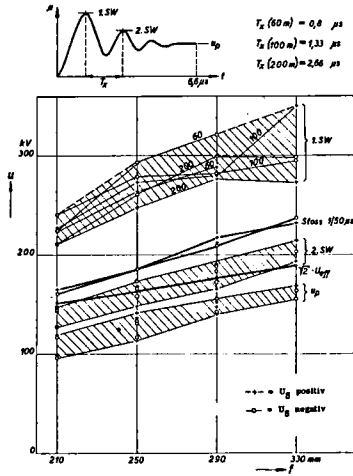


Fig. 47

Schaltung wie Fig. 46 (A vor F). Vergleich der verschiedenen Ueberschlagsspannungen. (Die schwingende Stossspannung entspricht den Formen der Fig. 42)

Leer - Vide - Empty

Kapitel V

DISKUSSION DER RESULTATE

Gültigkeitsbereich

Wie schon in der Einleitung festgestellt wurde, sind alle Resultate (ausser denjenigen der am Anfang abgeglichenen Leitung) nur gültig für den bestimmten Fall, da die Ueberspannungswelle in 1 km Distanz vom Leitungsende erzeugt wird, und die Spannung dort während mindestens 20 - 30 μ s gehalten wird. Der Versuch mit der am Anfang reflexionsfrei abgeschlossenen Leitung würde einer Ueberspannungsquelle von mehreren km Distanz entsprechen. In diesem Fall würde dann allerdings eine wesentlich flachere Welle (wegen Dämpfung und Korona), als dies im Versuch der Fall war, am Leitungsende erscheinen.

Alle diese Versuche greifen also nur ein Beispiel aus den vielen in Wirklichkeit möglichen Fällen heraus. Vergleicht man jedoch die beiden Messungen mit oder ohne Reflexion am Leitungsanfang (Fig. 34 - 35), so stellt man fest, dass der Unterschied nicht sehr gross ist (in Fig. 35 liegt die Grenzspannung für $x = 200$ m ca. 10%, für 100 m ca. 20% höher als in Fig. 34).

Die Resultate sind aber nicht nur begrenzt auf die erwähnten Schaltungen der Leitung, sondern auch auf das verwendete Material. Eine spannungsproportionale Uebertragung auf andere Nennspannungen ist also nicht ohne weiteres zulässig, denn andere Schlagweiten von Isolationsstrecken haben auch andere Ansprechverzögerungen und werden sich deshalb bei der Beanspruchung mit der vom Ableiter verformten Stossspannung auch anders verhalten.

Auch die Steilheit der Stosswelle bedeutet natürlich eine grosse Einschränkung des Gültigkeitsbereiches, denn die Höhe der ersten Ueberspannungsspitze nimmt mit der Steilheit der Wellenfront auch zu. Diese Tatsache ist aber trotzdem nicht sehr gefährlich, da wegen der Dämpfung gar keine steileren Wellen die Station erreichen können, falls diese durch geeignete Abschrimmung vor direkten Blitzeinschlägen im Umkreis von 1 km geschützt wird.

Vergleich der verschiedenen Schaltungen

Führt man den Begriff des Schutzwertes einer bestimmten Schaltung ein, d.h. das Verhältnis der zulässigen Wellenhöhe mit Ableiter zur 50% Ansprechspannung von F ohne Ableiter, so fällt der grosse Unterschied auf zwischen den Fig. 33 und 34 (Leitungsende abgeschlossen resp. offen). Dieser Unterschied ist aber nur scheinbar, da auch ohne Ableiter die Spannungen im Verhältnis 2:1 liegen wegen der Reflexion am offenen Leitungsende. Absolut gemessen liegen jedoch die zulässigen Werte der Wellenhöhe bei der offenen Leitung tiefer, was ganz natürlich ist, weil bis zum Zünden des Ableiters die Welle total reflektiert wird, und so an F eine um die halbe Ansprechspannung höhere erste Spitze entsteht.

Ein Vergleich der beiden Schaltungen Fig. 34 (Ableiter nach F) und Fig. 46 (Ableiter vor F) zeigt im allgemeinen günstigere Verhältnisse für den ersten Fall (Ableiter am Ende), besonders für den Abstand $x = 200$ m.

Auch hinsichtlich der auftretenden Spannungs-Sprünge, die für die Windungsspannungen bei Wicklungen massgebend sind, ist der erste Fall etwas günstiger. Gefährlich ist ja hauptsächlich der Spannungszusammenbruch beim Zünden des Ableiters, d. h. die Differenz $U_a - u_p$. Im zweiten Fall (Ableiter vor dem Ende) wird diese Ansprechspitze noch reflektiert, und es entsteht ein Sprung von $2(U_a - u_p)$.

Praktische Anwendung der Resultate

Aus den Kurven der Fig. 33, 34, 35 und 46 erkennt man, dass es selbst für kleine Distanzen x und grosse Schlagweiten f immer möglich sein wird, an F einen Ueberschlag zu erhalten, sofern die Wellenhöhe nach oben nicht begrenzt ist. Das ist aber bei 45 kV - Leitungen häufig der Fall, nämlich dann, wenn sie ausschliesslich auf Holzmasten montiert sind. Wird hingegen die Spannung der Leitung (Wellenhöhe) mittels Funkenstrecken soweit begrenzt, dass keine höheren Spannungen als z. B. 400 kV auf die Station laufen können, so ist es an Hand der Graphiken Fig. 33, 34, 35, 46 möglich, innerhalb der Station an verschiedenen Punkten das Isolationsniveau so einzustellen, dass keine Ueberschläge erfolgen. Zu diesem Zweck wäre es allerdings wünschenswert, über eine noch grössere Zahl Messungen verfügen zu können, um auch die relativ grosse Unsicherheit der Streuungen auszuschliessen.

Konstruierte Spannungsverläufe

Wenn für irgend eine Anlage ein Spannungsverlauf konstruiert wird, so ist zu bedenken, dass gleichzeitig das Verhalten des zu schützenden Objekts bei Beanspruchung mit dieser Spannung geprüft werden muss. Das ist aber nur mit einem Versuch möglich, denn das Verhalten bei einer komplizierten Spannungswelle ist nicht ohne weiteres vom Verhalten beim Normalstoss abzuleiten. Stosspannungen der Formen wie Fig. 42 sie zeigt könnten z. B. mit einem überschwingenden Stossgenerator reproduziert werden, solche wie Fig. 32cD und 32eD ev. mit Ableitern erhöhter Ansprechspannung.

Hinweis auf Untersuchungen anderer Autoren

Lit. 4 Bodier findet, dass bei den heutigen Ueberspannungsableitern der Schutzwert hauptsächlich von der Art der Montage abhängt, wobei in erster Linie auf gute Erdung zu achten ist und auf kurze Zuleitungen spannungsseitig.

Lit. 5 Carpenter, Johnson und Saline behandeln den Einfluss der Entfernung des Ableiters vom Transformator. Verschiedene Versuche haben gezeigt, dass ein Kondensator die beste Nachbildung für einen Transformator darstellt. Der Einfluss der Länge der Zuleitung zwischen Leitung und Ableiter und zwischen Ableiter und Erde wird eingehend untersucht. Die schwingende Spannung, die am Leitungsende bei davon entferntem Ableiter entsteht, wird durch eine Stosspannung mit überlagerter gedämpfter Schwingung ersetzt und die Gefährlichkeit einer solchen Spannung mit Normalstössen ver-

Leer - Vide - Empty

LITERATURVERZEICHNIS

- 1 Berger K. & Schneeberger E.
Ein Kabel - Stossgenerator für grosse Leistung und 1 Mill. Volt
Stoss-Spannung.
Bull. SEV 1933, S. 324.
- 2 Bewley L. V.
Travelling Waves on Transmission Lines.
Wiley New York 1951.
Chapman & Hall London 1951.
- 3 Biermanns J.
Hochspannung - Hochleistung.
Hanser München 1949.
- 4 Bodier G.
Conf. int. Grands Rés. Electr. Haute Tension.
Paris 1939, rap. No. 327 p. 23.
- 5 Carpenter T. J., Johnson I. B., Saline L. E.
Protection of Apparatus against Lightning.
AIEE - Transactions 69 (1950) II p. 933.
- 6 Clem J. E., Meador J. R., Rudge W. J., Powell A. H.
Proposed Basic Impulse Insulation Levels for High-Voltage
Systems.
Electrical Engineering 70 (1951) I p. 61.
AIEE-Transactions 69 (1950) II p. 953.
- 7 Craggs J. D. & Meek J. M.
High Voltage Laboratory Technique.
Butterworths London 1954.
- 8 ERA The British Electrical and Allied Industries Research Association. 1941.
Surge Phenomena.
- 9 Fitger M.
L'emploi des Parasurtensions dans la Protection des Réseaux à
Haute et à Basse Tension.
Eclairage et Force Motrice 24 (1936) 6 p. 344.
- 10 Frank S.
Der Staubeinfluss bei Funkenstrecken.
Archiv f. Elektrotechnik 28 (1934) 485.
- 11 Gänger B.
Der elektrische Durchschlag in Gasen.
Springer Berlin 1953.
- 12 Jacottet P.
Stossüberschlagversuche an Stabfunkenstrecken.
ETZ 60 (1939) 92.
- 13 Mauduit A.
Méthode graphique de Bergeron pour l'étude de la propagation des
ondes le long des lignes électriques.
Revue Générale de l'Electricité, Avril 1954.

- 14 Mayr O.
Positive Ionen mit hohem Ionisierungsvermögen und deren Einfluss
auf den elektrischen Durchbruch in Luft.
Archiv f. Elektrotechnik 24 (1930) 8.
- 15 MIT Radiation Laboratory Reports
XVII Component Handbook, p. 209 (Delay Lines).
- 16 Roth A.
Hochspannungstechnik.
Springer Wien 1950.
- 17 Rüdenberg R.
Elektrische Schaltvorgänge.
Springer Berlin 1933.
- 18 Schneider H. H.
Büschelentladungen bei hohen Stoss-Spannungen.
Archiv f. Elektrotechnik 34 (1940) 457.
- 19 Schweiz. Elektrotechn. Verein
Leitsätze für den Schutz elektrischer Anlagen gegen atmosphäri-
sche Ueberspannungen.
Publikation Nr. 163d.
- 20 Schweiz. Elektrotechn. Verein
Regeln für Spannungsprüfungen.
Publikation Nr. 173.
- 21 Seylaz E.
Cables de mesures retardeurs.
FKH Bericht AK-2/50.
- 22 Skilling H. H. & Dykes P. de K.
Distortion of Travelling Waves by Corona.
Electrical Engineering 56 (1937) 7 p. 850.
- 23 Striegel R.
Elektrische Stossfestigkeit.
Springer Berlin 1939.
- 24 Striegel R.
Ueber die Aufbauzeit innerhalb des Entladeverzugs.
ETZ 59 (1938) 1.
- 25 Wanger W.
Stossbeanspruchung von Stabfunkenstrecken.
Bull. SEV 34 (1943) 8.
- 26 Witzke R. L. & Bliss T. J.
Lightning Arrester Location.
AIEE - Transactions 69 (1950) II p. 964.

Lebenslauf

Am 16. Januar 1925 wurde ich in Karachi (Pakistan) geboren.

Die wichtigsten Daten meiner Ausbildung sind:

1941 - 44 Oberrealschule Zürich mit Maturität.

1944 - 45 Rekruten- und Unteroffiziersschule, 3 Monate Werkstattpraxis in der Maschinenfabrik Oerlikon.

1945 - 49 Studium an der Abteilung für Elektrotechnik der Eidgenössischen Technischen Hochschule mit Diplomabschluss Richtung Starkstrom (schriftliche Diplomarbeit am Hochspannungslabor bei Prof. Dr. K. Berger).

**Mai 1950 - April 51
Anstellung bei Brown, Boveri & Co. in Baden, Abteilung für Energieerzeugung in stationären Anlagen.**

**Mai 1951 - Juni 1955
Assistent im Hochspannungs-Labor der Eidgenössischen Technischen Hochschule unter Prof. Dr. K. Berger. Daneben in den Jahren 1953 - 55 Durchführung der Versuche für die Promotions-Arbeit.**