47. Jahrgang Nr. 1 Samstag, 7. Januar 1956

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN
DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Über den räumlichen Schutzbereich eines Überspannungsableiters [1])

Von *R. Rutz*, Zürich

621.316.93

Auf der 1 km langen Freileitung der Versuchsstation Gösgen der FKH wurden Versuche gemacht um festzustellen, wie die Schutzwirkung eines Überspannungsableiters (Ableiters) abnimmt, wenn dieser in einer gewissen Entfernung von den zu schützenden Objekten aufgestellt wird.

Des essais ont été entrepris à Goesgen sur la ligne aérienne, d'une longueur de 1 km, de la Station d'essais de la FKH, dans le but de déterminer la diminution de l'effet protecteur d'un parafoudre, selon son éloignement des objets qu'il doit protéger.

Problemstellung

Bei jeder elektrischen Schaltanlage taucht immer wieder die Frage auf, wo die Überspannungsableiter aufgestellt werden sollen.

Aus den Versuchslokalmessungen der Ableitercharakteristiken (Ansprech- und Restspannung) kann wohl auch für eine Anlage ohne weiteres geschlossen werden, was für eine Spannung an dem zu schützenden Objekt im Fall einer Überspannung auftritt, falls dieses Objekt unmittelbar (d. h. ohne Zwischenleitung) mit dem Ableiter verbunden ist. Sobald aber zwischen dem Ableiter und dem zu schützenden Objekt ein Stück Leitung liegt, stellt sich am Objekt nicht dieselbe Spannung ein wie am Ableiter wegen der endlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wanderwellen.

Der Zweck vorliegender Arbeit besteht nun darin, den Spannungsverlauf und das Verhalten einer Isolierstrecke an einigen vom Ableiter entfernten Punkten einer Leitung zu messen. Als Isolierstrecke wurde eine Luftfunkenstrecke, bestehend aus einem Stützisolator mit Funkenhörnern, gewählt.

Schaltungen

Für die Versuche wurden zwei einfache Grundschaltungen ausgewählt, aus denen eine Anlage aufgebaut sein kann:

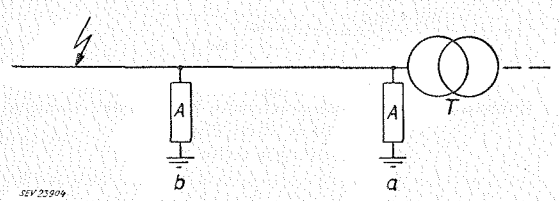


Fig. 1
Kopfstation
A Überspannungsableiter; *T* Transformator; *a* Überspannungsableiter (*A*) an der Transformatorklemme; *b* Überspannungsableiter am Eingang der Station

[1]) Die Untersuchungen wurden am Hochspannungslaboratorium der ETH (Prof. Dr. K. Berger) und in der Versuchsstation der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) durchgeführt.

1. Kopfstation (Fig. 1): Freileitung an einem Transformator *T* endend. Der Ableiter *A* wird üblicherweise entweder direkt am Transformator oder am Eingang der Leitung in die Station aufgestellt.

2. Durchgangsstation (Fig. 2): Anlage mit zwei oder mehr Leitungen, so dass eine eintreffende Überspannungswelle auf einer oder mehreren Leitungen weiterlaufen kann. Ableiter an der Sammelschiene oder am Eingang jeder Leitung.

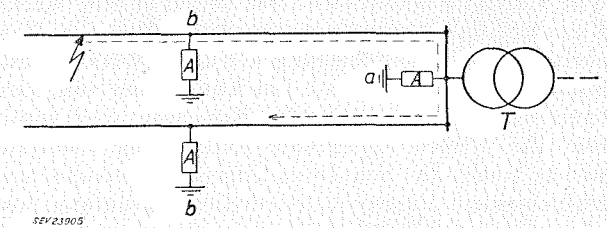


Fig. 2
Durchgangsstation
A Überspannungsableiter; *T* Transformator; *a* Überspannungsableiter an der Sammelschiene; *b* Überspannungsableiter am Eingang der Station

Für die Versuche stand eine ringförmig angelegte, 1 km lange Freileitung zur Verfügung, so dass Anfang und Ende auf dem Versuchsplatz der Anlage in Gösgen lagen. Die obigen zwei Grundschaltungen konnten damit wie folgt nachgebildet werden (Fig. 3):

1. Kopfstation. Wellenmässig stellt die Kopfstation praktisch eine offene Leitung dar, da Transformatoren einen viel grösseren Wellenwiderstand haben als Leitungen (Fig. 3b, c, d).

2. Durchgangsstation. Es wurde der einfachste Fall gewählt mit nur zwei gleichen Leitungen; d. h. die auf der einen Leitung eintreffende Welle kann auf der andern Leitung unverändert weiterlaufen. Das kann sehr einfach nachgebildet werden, indem das Ende der Versuchsleitung mit einem Widerstand reflexionsfrei abgeschlossen wird ($R = Z =$ Wellenwiderstand der Leitung) (Fig. 3a).

Zur Erzeugung der Überspannungswelle am Anfang der Leitung diente der fahrbare Stossgenera-

tor der FKH, bestehend aus 8 Stufen zu je 1 µF und 80 kV Ladespannung.

Nun ist aber zu beachten, dass jede am Leitungsende durch Reflexion erzeugte rückwärtslaufende Welle am Leitungsanfang, d. h. am Stossgenerator

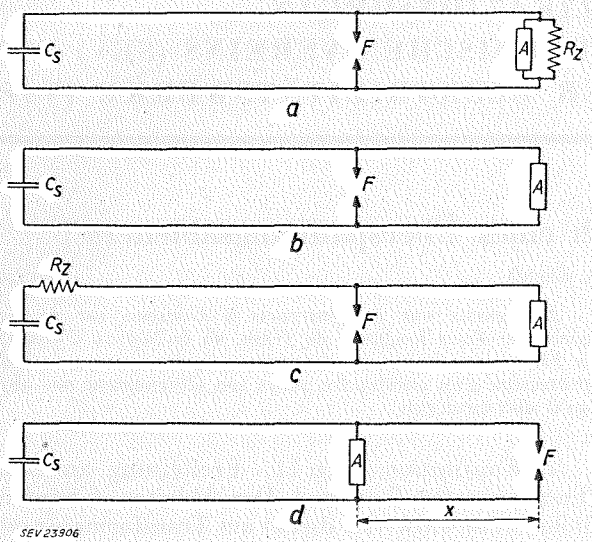


Fig. 3
Anordnungen der Schaltelemente an der Leitung
Cs Stossgenerator; *Rz* Ableitwiderstand; *A* Ableiter; *F* Funkenstrecke mit Schlagweite *f*; *x* Abstand zwischen *A* und *F*

wieder reflektiert wird und so den Spannungsverlauf am Ende beeinflusst. Das bedeutet eine starke Einschränkung des Gültigkeitsbereiches der Versuche, denn diese Schaltung würde in Wirklichkeit einem Blitzeinschlag in 1 km Entfernung vom Leitungsende entsprechen; die Resultate sind somit nur für diesen speziellen Fall gültig. Deshalb wurde noch die Schaltung Fig. 3c verwendet mit reflexionsfrei abgeschlossenem Leitungsanfang, was gleichbedeutend ist mit einer aus unbegrenzter Entfernung eintreffenden Spannungswelle. Leider sind aber diese Versuche unvollständig. da wegen des Serieabgleichwiderstandes auf der Leitung nur noch die halbe Stoßspannung zur Verfügung stand.

Schematische Darstellung des zu erwartenden Spannungsverlaufes an der Funkenstrecke

Für den zu erwartenden Spannungsverlauf an der Funkenstrecke sollen folgende vereinfachende Annahmen getroffen werden:

a) Die Leitung sei verlustlos;

b) Die ursprüngliche vom Stossgenerator auf die Leitung gegebene Spannungswelle u_S habe eine linear ansteigende Front und einen horizontalen Rücken (Keilwellen);

c) Der Ableiter habe eine Ansprechspannung u_a und eine konstante Restspannung $u_p < u_a$; t_{aA} sei sein Ansprechverzug vom Nullpunkt der Spannung am Ableiter an gemessen.

t_x sei die Laufzeit der Spannungswelle für die Strecke x, t_L für die ganze Leitung.

Die Spannungen an A und F für die Schaltung in Fig. 3a sehen dann wie folgt aus (Fig. 4):

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. Dabei wird eine negative, rückläufige Welle u_r vom Betrag $(u_S - u_p)$ ausgelöst.

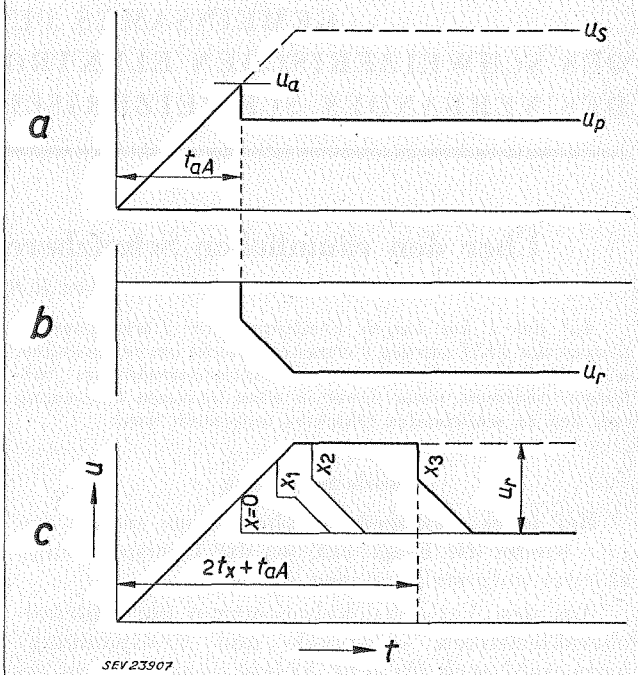


Fig. 4
Verlauf der Spannungen an Ableiter und Funkenstrecke bei abgeschlossener Leitung
Schaltung nach Fig. 3a
a Spannung am Ableiter; *b* reflektierte Welle; *c* Spannung an der Funkenstrecke bei verschiedenen Abständen $x_0 \ldots x_3$
u_s zulaufende Welle; u_r reflektierte Welle; u_a Ansprechspannung des Ableiters; u_p Restspannung des Ableiters

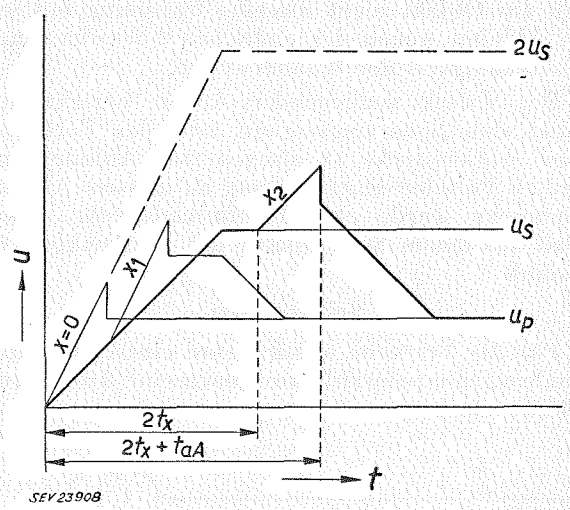


Fig. 5
Spannung an der Funkenstrecke bei offener Leitung
Schaltung nach Fig. 3b
Bezeichnungen siehe Fig. 4

An der Funkenstrecke im Abstand x vom Leitungsende ergibt sich daraus folgendes Bild: Die Welle, die mit der Geschwindigkeit v über die Leitung wandert, ist um die Zeit t_x früher bei F als bei A. Bis zur Zeit t_{aA} passiert am Leitungsende nichts, d. h. die Welle läuft unverändert über den Widerstand R ab. Vom Ansprechmoment des Ab-

leiters an verstreicht wieder t_x bis die reflektierte Welle F erreicht. F wird also mit der vollen vorwärtslaufenden Welle u_S beansprucht bis zur Zeit $2t_x + t_{aA}$ und nachher mit der Differenz $u_S - u_r$. Als

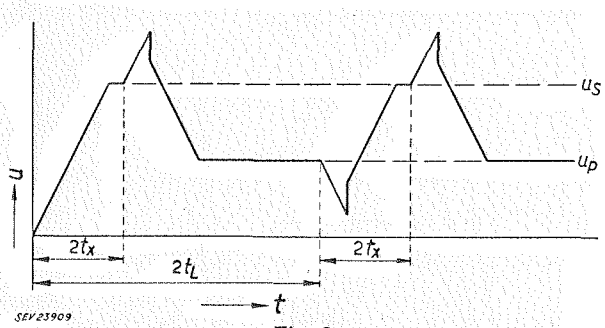


Fig. 6
Verlauf der Spannung an der Funkenstrecke F entsprechend Fig. 5, aber mit Berücksichtigung der Reflektion am Leitungsanfang
t_L Laufzeit der Welle für die ganze Leitung
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

Zeitpunkt Null ist an beiden Punkten F und A jener Zeitpunkt gewählt, wo die Welle dort eintrifft.

Für die Schaltung in Fig. 3b ergibt sich folgendes Bild (Fig. 5):

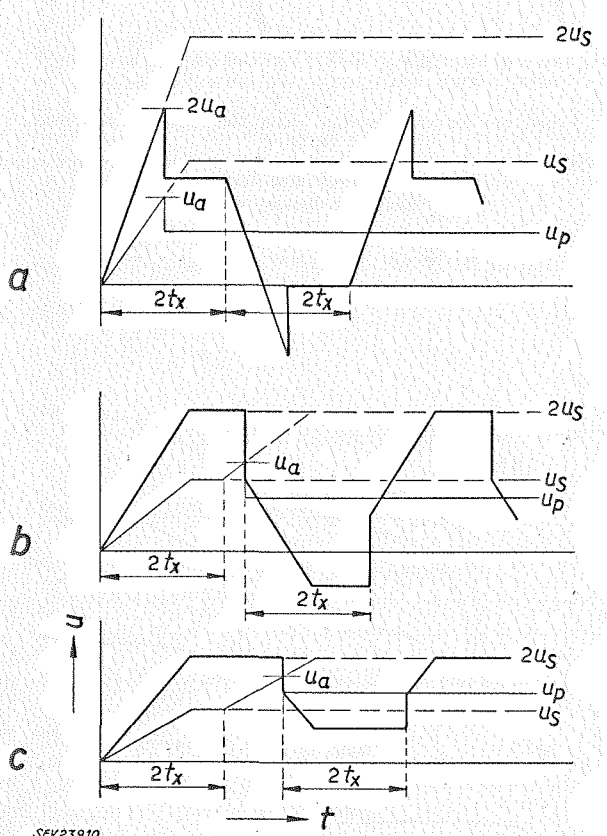


Fig. 7
Spannung an der Funkenstrecke F für die Schaltung nach Fig. 3d
a $u_S > u_a > u_p$
b $u_a > u_S > u_p$
c $u_a > u_p > u_S$
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 4

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

Fig. 6 zeigt das vollständige Bild des Spannungsverlaufes an der Funkenstrecke F unter Berücksichtigung der fortgesetzten Reflexionen an der unendlich grossen Stosskapazität am Leitungsanfang und am Ableiter mit konstanter Restspannung am Leitungsende.

Die Schaltung nach Fig. 3c zeigt zuerst den gleichen Verlauf wie Fig. 5. Im Gegensatz zu Fig. 6 bleibt aber die Spannung nach dem ersten Impuls dauernd auf der Restspannung.

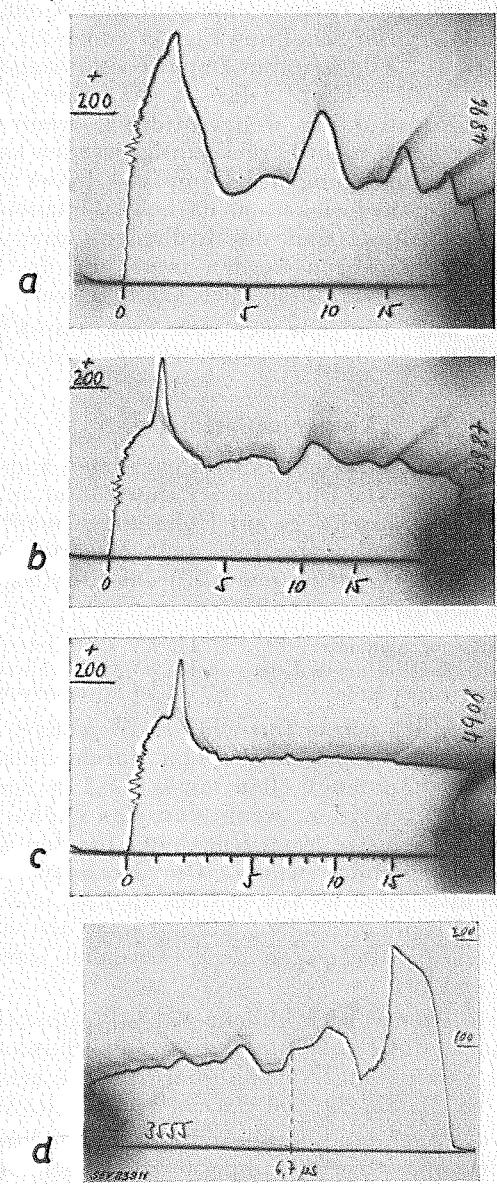


Fig. 8
An der Funkenstrecke gemessene Spannung (in kV) bei x = 200 m
a Schaltung nach Fig. 3a (vgl. Fig. 4c)
b Schaltung nach Fig. 3b (vgl. Fig. 6)
c Schaltung nach Fig. 3c (vgl. Fig. 5)
d Schaltung nach Fig. 3d (vgl. Fig. 7c)

Bei der Schaltung nach Fig. 3d entsteht an F eine schwingende Spannung entsprechend Fig. 7, je nach der Höhe der ersten zulaufenden Welle u_S. Im Gegensatz zu den Schaltungen nach Fig. 3a und b hat die vom Leitungsanfang wegen der Refle-

xion wiederkehrende Welle auf die Spannung an F keinen grossen Einfluss, da sie vor dem Erreichen von F am Ableiter abgesenkt oder erhöht wird, so dass an F nur die Variation der Restspannung spürbar ist.

Die Messungen haben übrigens gezeigt, dass diese Schwingung schon nach wenigen Perioden ganz abgeklungen ist (bei $x = 60$ und 100 m schon nach 3, bei $x = 200$ m nach ca. 5 Perioden der Wellenschwingung).

Vergleicht man die konstruierten Spannungsverläufe mit den oszillographisch gemessenen, so zeigt sich für die erste Periode eine sehr gute Übereinstimmung, d. h. in Schaltung Fig. 3a und b $2t_L$ und in Fig. 3d $4t_x$. Alle weiteren Impulse sind hingegen schon so stark gedämpft, dass es gar keinen Sinn hat, die Konstruktion weiterzuführen, wenn die Dämpfung dabei nicht berücksichtigt werden kann. Eine Berücksichtigung der Dämpfung bietet aber sehr grosse Schwierigkeiten, da beim Längswiderstand der Leitung und des Erdbodens auch der Skineffekt einbezogen werden muss und die Koronadämpfung theoretisch auch kaum erfassbar ist.

Fig. 8 zeigt für jede der vier Schaltungen ein Beispiel der an der Funkenstrecke F gemessenen Spannungen.

Versuchsmaterial

Die *Leitung* bestand aus zwei parallelen Kupferseilen von 10 mm Durchmesser, horizontal in ca. 2 m Abstand, durchwegs auf Holzstangen montiert und auch gegeneinander für ca. 10 MV Stoßspannung isoliert. Die gemessenen Korona-Einsatzspannungen betrugen:

beide Seile gegeneinander	≈ 170 kV (Scheitelwert)
beide Seile parallel gegen Erde	≈ 130 kV (Scheitelwert)
Einzelleiter gegen Erde	≈ 110 kV (Scheitelwert)

Ursprünglich wurde versucht, die Messungen für möglichst steile Spannungswellen durchzuführen. Tatsächlich konnten Wellen mit 0,1...0,2 µs Frontdauer erzeugt werden, wenn statt des Erdbodens eines der Leitungsseile als Rückleiter für den Wellenstrom verwendet wurde. Die Koronaverluste flachten aber diese Wellen so stark ab, dass schliesslich die Frontdauer nicht kürzer war, als wenn beide Seile parallel gegen Erde verwendet wurden (Fig. 9 und 10).

Als *Ableiter* wurden übliche 45-kV-Freilufttypen verwendet; die *Funkenstrecke* war ein Stützisolator mit verzinkten Funkenhörnern, deren Schlagweiten zu 21, 25, 29 und 33 cm gewählt wurden.

Für die *Spannungsmessung* diente am Leitungsende ein kapazitiver Spannungsteiler, dessen Oberspannungskapazität aus einer Kugelfunkenstrecke bestand aus Kugeln mit 1 m Durchmesser und ca. 70 cm Schlagweite. Die Kapazität wurde durch Vergleich mit einem bekannten Spannungsteiler genau gemessen und betrug ca. 18 pF. Diese Kapazität wurde absichtlich so klein gewählt, damit sie die Vorgänge auf der Leitung nicht beeinflusst. Die Registrierung erfolgte mit einem Kaltkathodenstrahl-Oszillographen, der direkt neben dem Spannungsteiler stand, um ein Verzögerungskabel zu vermeiden. Die Aufnahmen an der Funkenstrecke F

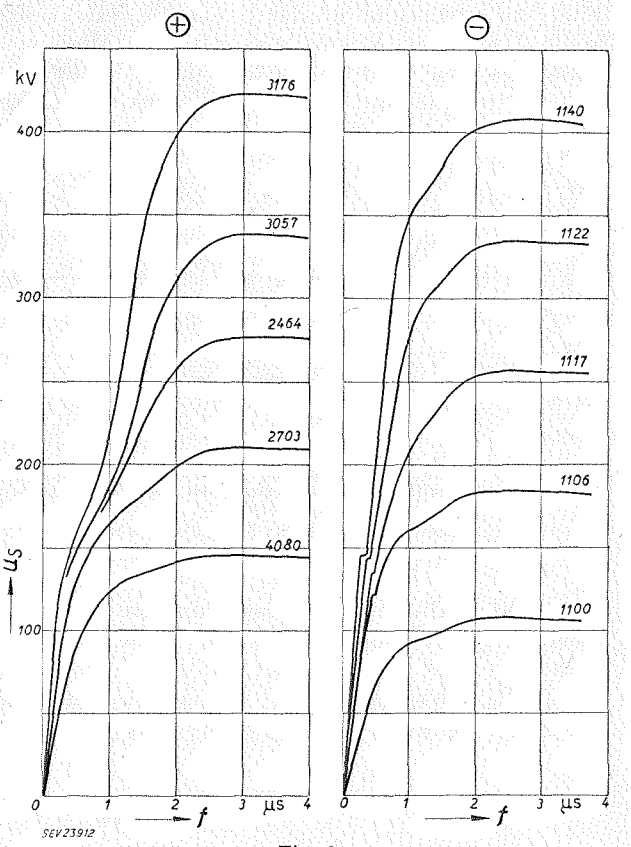


Fig. 9
Front der Spannungswelle nach Durchlaufen von 1 km Leitung
Beide Seile der Leitung sind parallel geschaltet, Stromrückleitung über den Erdboden
t Zeit; us Spannungswelle

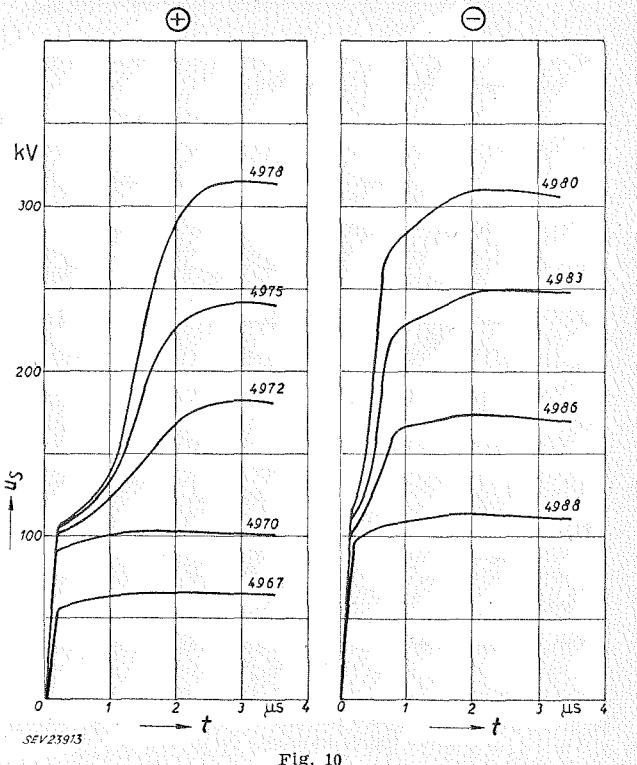


Fig. 10
Front der Spannungswelle nach Durchlaufen von 1 km Leitung
Ein Seil der Leitung ist parallel zum Erdboden als Stromrückleiter geschaltet (Korona-Einsatzspannung ca. 100 kV)
t Zeit; us Spannungswelle

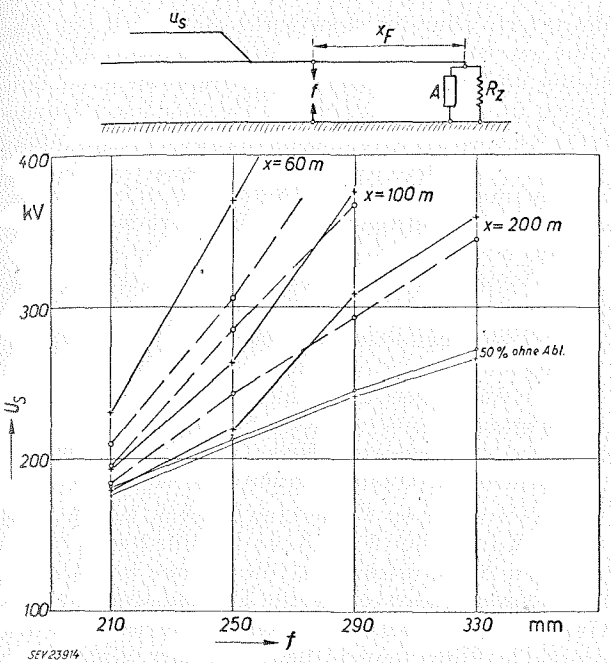


Fig. 11

Fig. 11...14

Grenze des Ansprechens (ca. 50 % Überschläge) der Funkenstrecke bei den Schaltungen nach Fig. 3

U_S Scheitelwert der zulaufenden Welle u_S; f Schlagweite der Funkenstrecke; x Distanz zwischen Ableiter und Funkenstrecke. Die Indizes A bzw. F geben an, ob die ankommende Welle zuerst auf den Ableiter bzw. auf die Funkenstrecke trifft.

\+ Messpunkte für positive Stösse
o Messpunkte für negative Stösse

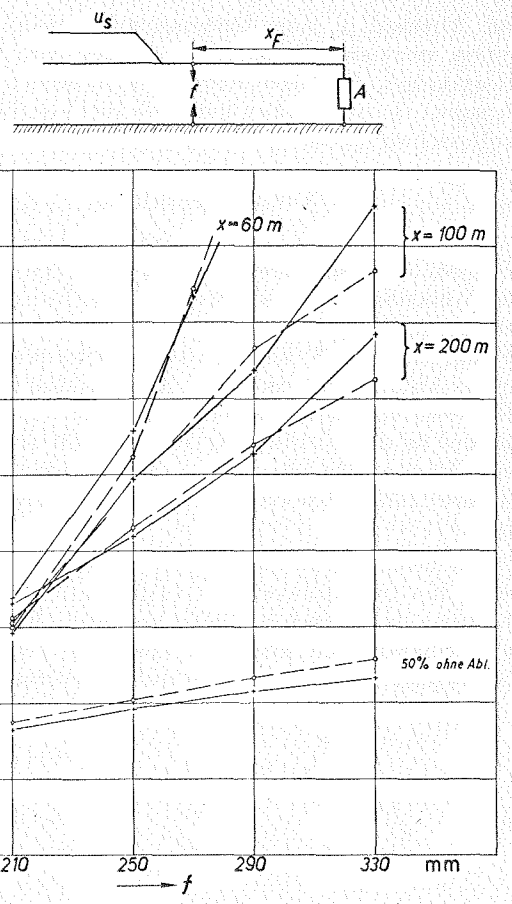
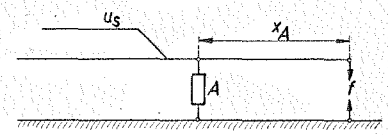
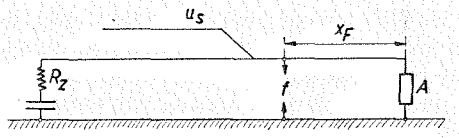


Fig. 12





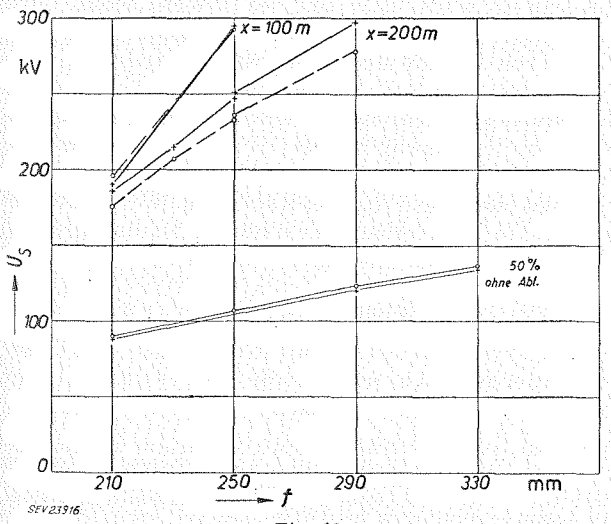


Fig. 13

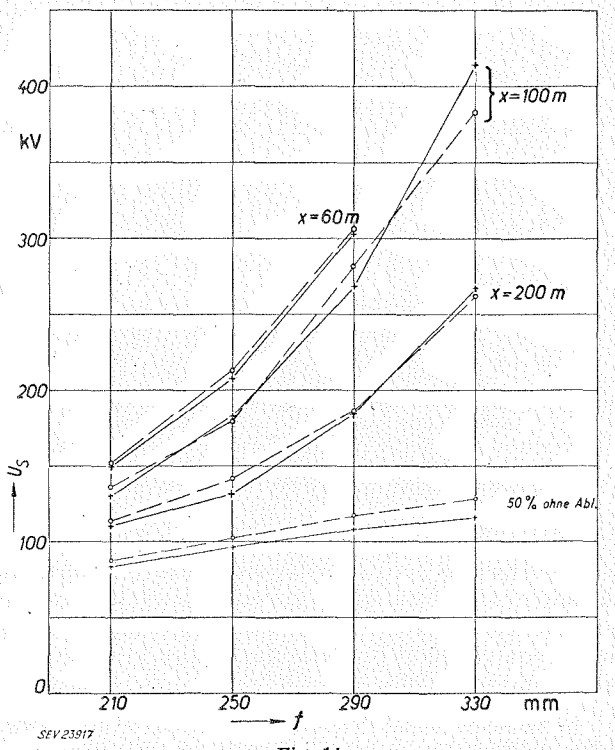


Fig. 14

im Abstand x vom Leitungsende erfolgten über einen normalen kapazitiven Teiler mit Verzögerungskabel. Dadurch haben sie natürlich Verzerrungen; sie sollen aber lediglich die Vorgänge an F veranschaulichen.

Versuchsresultate

Die Ergebnisse aller Messungen sind in den Fig. 11...15 zusammengestellt. Diese Figuren zeigen in Funktion der Schlagweite f der Funkenstrecke zunächst die 50 %-Stossüberschlagspannung der Funkenstrecke F bei der vollen Stosswelle, d. h. ohne Ableiter, ferner als 2. Kurvenschar die Höhe U_S jener zulaufenden Welle, bei der trotz des Ableiters in der Entfernung $x = 60$, 100 oder 200 m von F ungefähr die Hälfte der angelegten Stösse wieder zum Überschlag an der Funkenstrecke F führt[2]).

Zu beachten ist dabei, dass die Ordinate U_S immer den Scheitelwert der ursprünglichen auf der Leitung zulaufenden Welle bedeutet. Ferner sind alle Spannungen auf den normalen Umgebungsbedingungen 20 °C und 760 mm Hg reduziert.

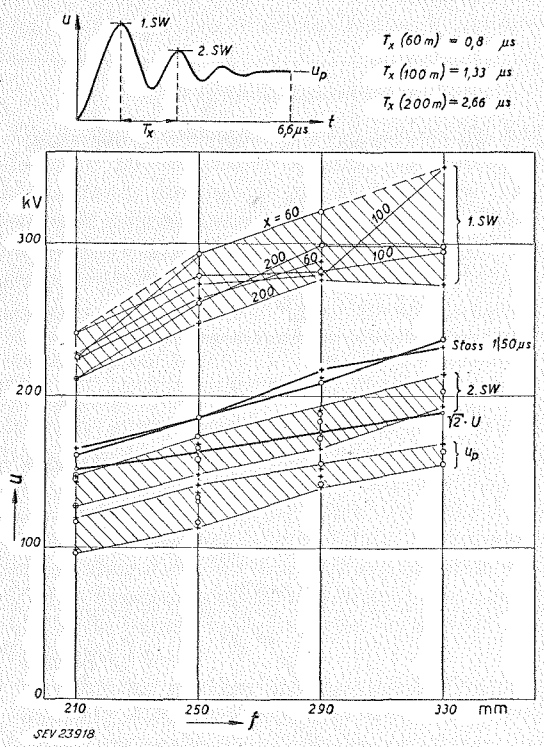


Fig. 15

Vergleich der Spannungen (u), die an der Funkenstrecke der Schlagweite f einen Überschlag bewirken

Schraffiert die Werte der Spannung, wie sie an F nach Schaltung in Fig. 3c entsteht

x Distanz zwischen Ableiter und Funkenstrecke

Diese Kurven geben also ein gutes Bild, auf welche Distanz gewisse Isolationsstrecken von einem Ableiter noch geschützt werden, allerdings nur für eine obere Grenze der zulaufenden Überspannungswelle von ca. 400 kV. Holzstangenleitungen können aber um ein mehrfaches höhere Stoßspannungen übertragen. Dann wird natürlich die durch den Ableiter geschützte Distanz auch wesentlich kleiner, so dass ein einziger Ableiter sicher nicht mehr den ganzen Leitungszug innerhalb der Station schützen kann. Es wäre deshalb vorteilhaft und für die praktische Anwendung der Kurven nötig, die Höhe der Überspannung schon auf der Leitung zu begrenzen, z. B. durch Anbringen von Funkenstrecken an geerdeten Masten.

Ein Vergleich der beiden Anordnungen mit dem Ableiter am Ende der Leitung oder am Eingang der Station zeigt keine wesentlichen Unterschiede. Im allgemeinen ist der erste Fall (Ableiter am Ende) etwas günstiger, d. h. es sind etwas grössere Überspannungswellen zulässig und es entstehen kleinere Spannungssprünge am Leitungsende (Transformator) beim Zünden des Ableiters.

Wie schon in der Einleitung bemerkt wurde, gelten die Kurven der Fig. 11...15 nur für die in Fig. 3 gezeigten Schaltungen und die daraus resultierenden Spannungskurven an der Funkenstrecke F, sowie nur für die in Fig. 9 wiedergegebene Form der Stosswelle. Eine weitere Beschränkung bildet aber auch das Versuchsmaterial (Ableiter und Funkenstrecke). Es ist nicht ohne weiteres möglich, diese Resultate auf andere Nennspannungen zu übertragen, da andere Schlagweiten auch andere Ansprechverzüge haben und sich deshalb wahrscheinlich bei den komplizierten Spannungsbeanspruchungen auch anders verhalten. Dabei ist vor allem auch wichtig festzuhalten, dass die Konstruktion eines zusammengesetzten Spannungsverlaufes nur dann zum Ziele führt, wenn gleichzeitig das Verhalten des zu schützenden Objektes bei Beanspruchung mit dieser Spannung geprüft werden kann, was aber nur mit einem Versuch möglich ist. Stoßspannungen der Form von Fig. 8a und d könnten z. B. mit einem überschwingenden Stossgenerator reproduziert werden, jene in Fig. 8b und c eventuell mit Ableitern erhöhter Ansprechspannung.

Eigentlich würde man erwarten, dass eine Funkenstrecke nicht überschlagen sollte, wenn die angelegte Stoßspannung innerhalb ihres Ansprechverzuges auf eine Restspannung abgesenkt wird, die kleiner ist als die statische Ansprechspannung. Es scheint aber, dass bei der ersten, wenn auch nur kurz dauernden Spannungsspitze, die Luft in der Schlagweite der Funkenstrecke teilweise ionisiert wird. Die Zeit ist jedoch zu kurz, um einen Lichtbogen aufzubauen. Selbst nach der Absenkung der Spannung auf die Restspannung des Ableiters bleiben aber Ionen noch einige Zeit in der Schlagweite liegen und schwächen so die Isolationsstrecke, so dass selbst eine niedrige Spannung noch einen Lichtbogen ausbilden kann[3]).

Zusammenfassung

Für den einfachsten Fall einer Kopf- und einer Durchgangsstation wurde mit 45-kV-Material der Schutzbereich eines Ableiters und der Spannungs-

[2]) Zwischen beiden Kurvenarten liegt somit das Gebiet jener Wellenhöhen, für die der Ableiter die Funkenstrecke F wirksam schützt.

[3]) vgl. *Mayr, O.:* Positive Ionen mit hohem Ionisierungsvermögen und deren Einfluss auf den elektrischen Durchbruch in Luft. Arch. Elektrotechn. Bd. 24(1930), Nr. 1, S. 8...14, wonach bei hohen Feldstärken an Metallspitzen Ionen entstehen, die imstande sind schon bei Feldstärken von nur 6 kV/cm die Luft weiter zu ionisieren.

verlauf am zu schützenden Objekt in beiden Richtungen vom Ableiter entfernt gemessen.

Die Konstruktion des Spannungsverlaufs stimmt für die erste Periode des schwingenden Stosses gut mit der Messung überein, hingegen dürfen alle weiteren Perioden nicht ohne Berücksichtigung der Dämpfung (Widerstand und Koronaerscheinung) konstruiert werden, da die Verzerrung der Wellenform schon sehr erheblich ist. Zweitens muss die zu schützende Isolationsstrecke mit dem so konstruierten Spannungsverlauf im Versuch geprüft werden, da das Verhalten bei der komplizierten Beanspruchung nicht vom Verhalten beim Normalstoss abgeleitet werden kann.

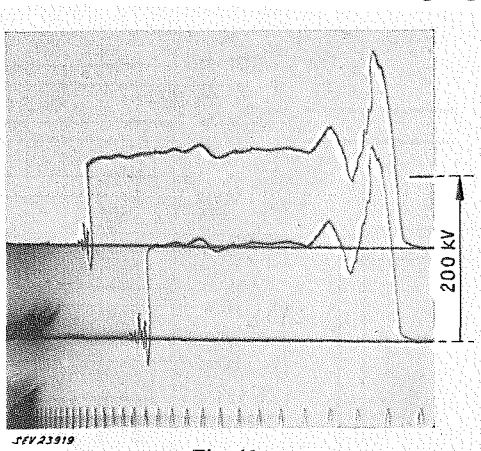


Fig. 16
Oszillogramme der Schaltung in Fig. 3d
Ableiter der Funkenstrecke im Abstand x = 100 m, Schlagweite f = 210 mm, Zeitmarke 1 MHz. Ansprechen der Funkenstrecke nach ca. 11 und 18 µs von Beginn der Restspannung

Die Kurven Fig. 11...14 geben für eine Funkenstrecke mit verschiedenen Schlagweiten (21, 25, 29, 33 cm) in verschiedenen Abständen (60, 100, 200 m) vor oder hinter dem Ableiter diejenigen auf der Leitung zulaufenden Wellenhöhen, bei denen an der Funkenstrecke ungefähr die Hälfte der Stösse zum Überschlag führt. Als Vergleich ist noch die 50 %-Ansprechspannung ohne Ableiter eingetragen. Allgemein zeigt sich, dass der Schutzbereich sehr klein ist (kleiner als erwartet), da eine Funkenstrecke auch bei der als unschädlich betrachteten Restspannung des Ableiters anspricht, sofern sie anfänglich auch nur kurzzeitig über ihre 50 %-Spannung beansprucht wird (Fig. 16).

Adresse des Autors:
R. Rutz, Hochspannungslaboratorium der ETH, Gloriastrasse 35, Zürich 7/6.

Zentralisierte, elektrische Werkzeugmaschinen-Steuerung

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 10. November 1955 in Olten,
von *R. Müller*, Basel

621.316.7 : 621.9

Es werden allgemeine Betrachtungen über elektrische Werkzeugmaschinensteuerungen angestellt unter Berücksichtigung des Gestehungspreises, der Wirtschaftlichkeit, Betriebstüchtigkeit, Betriebssicherheit, des Platzbedarfes und der Formschönheit. Im weiteren wird das Prinzip des Monokontrollers, eines Spezialschalters für zentralisierte Steuerungen, anhand von Schemata und Bildern erläutert.

Considérations générales sur les commandes électriques de machines-outils, compte tenu de leur prix, du rendement économique, de la sécurité de fonctionnement, de l'encombrement et de l'esthétique. Description, à l'aide de schémas et d'illustrations, du monocontrôleur, qui est un commutateur spécialement prévu pour les commandes centralisées.

Die Werkzeugmaschinen-Industrie, und darunter ganz besonders die schweizerische, hat im Verlaufe der letzten Jahre Erzeugnisse auf den Markt gebracht, die hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Genauigkeit kaum mehr zu überbieten sind. Nicht unbeteiligt an dieser Entwicklung sind die in den modernen Werkzeugmaschinen eingebauten, elektrischen Steuerungen.

Das wichtigste Problem bei der Bestimmung der Steuerung für Werkzeugmaschinen ist die Grenzziehung zwischen der mechanischen, hydraulischen und elektrischen Steuerung. Diese Aufgabe kann nur durch engste Zusammenarbeit zwischen dem Maschinenkonstrukteur und dem Fachmann für elektrische Steuerung gelöst werden. Für die Wahl der Steuerung sind folgende, wichtigste Faktoren zu berücksichtigen:

a) Gestehungspreis;
b) Wirtschaftlichkeit;
c) Betriebstüchtigkeit;
d) Betriebssicherheit;
e) Platzbedarf und
f) Formschönheit.

Der *Gestehungspreis* der elektrischen Ausrüstung hat natürlich Einfluss auf den Verkaufspreis einer

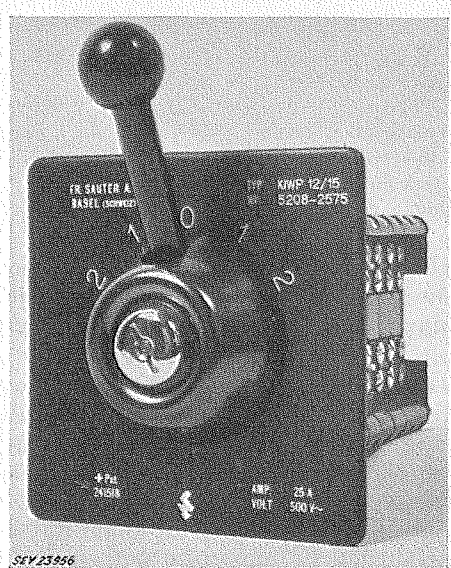


Fig. 1
Monokontroller