

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 24 (1933)

Heft: 15

Artikel: Ein Kabel-Stossgenerator für grosse Leistung und 1 Million Volt Stossspannung

Autor: Berger, K. / Schneeberger, E.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059528>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.01.2026

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

BULLETIN

REDAKTION:

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

VERLAG UND ADMINISTRATION:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G., Zürich 4
Stauffacherquai 36/38

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXIV. Jahrgang

Nº 15

Mittwoch, 19. Juli 1933

Ein Kabel-Stossgenerator für grosse Leistung und 1 Million Volt Stoßspannung.

Bericht, vorgelegt der Conférence Internationale des Grands Réseaux électriques à haute tension 1933 in Paris.

Von Dr. K. Berger, Ingenieur des SEV, Zürich, und E. Schneeberger, Ingenieur der Kabelwerke Brugg A.-G., Brugg.

621.313.12:621.316.313:621 3.015

Die Autoren beschreiben eine für die Ueberspannungsuntersuchungen des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins ausgeführte Stoßspannungsanlage, die sich von den bisher gebräuchlichen dadurch unterscheidet, dass an Stelle einer Riesenmenge von seriegeschalteten Stufen aus Einzelkondensatoren, Widerständen und Funkenstrecken nur wenige Stufen mit Spezialkabeln für hohe Gleichspannung in Marx-Schaltung verwendet werden. Zum Anstoßen von Freileitungen hat sich diese Anordnung der bisher gewohnten Schaltung aus sehr vielen Stufen mit konzentrierten Kapazitäten als elektrisch ebenbürtig erwiesen, was mit Kathodenstrahl-Oszillogrammen nachgewiesen wird. Sie hat überdies für Anlagen mit grosser Stoßenergie unter Umständen Vorteile, da z. B. Freiluftaufstellung ohne weiteres möglich ist und die wenigen Stufen (Kabelrollen) relativ einfach zu transportieren und aufzustellen sind.

Les auteurs décrivent une installation génératrice de chocs, destinée aux recherches sur les surtensions entreprises par l'Association Suisse des Electriciens. Cette installation se distingue de celles en usage jusqu'ici par le fait qu'au lieu d'une grande quantité d'échelons en série, composés de condensateurs individuels, de résistances et d'éclateurs, elle consiste simplement en quelques échelons composés de câbles spéciaux pour haute tension continue, en couplage Marx. Pour l'essai de choc des lignes aériennes, cette disposition s'est montrée équivalente, au point de vue électrique, au couplage utilisé jusqu'ici et comportant de nombreux échelons de capacités concentrées. Ceci a été prouvé par des oscilloscopes cathodiques. Dans certains cas, cette disposition peut être, en outre, avantageuse pour les installations nécessitant une forte énergie de choc, car on peut la monter sans difficulté en plein air, et les quelques échelons nécessaires (bobines de câbles) sont d'un transport et d'un montage relativement aisés.

Die rasche Entwicklung im Bau und Betrieb von Hochspannungsleitungen mit immer höheren Nennspannungen und mit stets grösseren Anforderungen an die Betriebssicherheit bedingen die Kenntnis der praktisch vorkommenden Ueberspannungen und der Mittel, sie zu verhüten oder unschädlich zu machen.

In den letzten Jahren haben Klydonographen und transportable Kathodenstrahl-Oszillographen (KO) Untersuchungen in den gefährdeten Netzteilen selber erst ermöglicht. Dadurch ist die Erkenntnis der Höhe, Häufigkeit und des zeitlichen Verlaufs der Ueberspannungen in elektrischen Anlagen in vorher ungeahnter Weise gefördert worden. Damit ist auch die Grundlage zum Bau und zur Prüfung wirksamer Schutzapparate erst geschaffen worden. Ueberspannungsschutzapparate bei natürlichen Ueberspannungen in Anlagen zu untersuchen, wäre aber ein ausserordentlich teures und zeitraubendes Unternehmen. Aus diesem Grunde werden seit langem sogenannte Stoss- oder Blitzgeneratoren gebaut, mit denen die in Anlagen vorkommenden Ueberspannungen nachgeahmt werden sollen. Auch für die in der Schweiz durchge-

führten Gewitteruntersuchungen war die Erstellung einer Versuchsanordnung mit einem Stossgenerator nötig. Diese muss erlauben, die speziell durch Blitzschläge verursachten Ueberspannungen naturgetreu nachzuahmen und die Schutzapparate möglichst den gleichen Beanspruchungen auszusetzen, die bei atmosphärischer Einwirkung entstehen. Auf Grund der Gewittermessungen ergab sich, dass die Nachahmung mit richtig bemessenen Stossgeneratoren (Blitz-Generatoren) möglich ist.

Bis jetzt wurden die Stossgeneratoren immer aus sehr vielen Kondensatoren aufgebaut, die parallel- und seriegeschaltet wurden, um die nötige Kapazität und Spannungsfestigkeit zu erreichen. Die Schaltung ist fast ausnahmslos jene von E. Marx.

Die Autoren sind andere Wege gegangen und haben an Stelle der Kondensatorbatterien Hochspannungskabel verwendet, die für solche Anlagen unter Umständen ganz wesentliche Vorteile bieten. Das Schema eines solchen Kabel-Stossgenerators ist aus Fig. 1 ersichtlich, eine Ansicht des Generators aus Fig. 2. Der Generator besteht aus drei nach der Schaltung von Marx zusammengebauten Spezialkabeln für je 350 kV Gleichspannung.

Die Konstruktion dieser Kabel weicht im grossen ganzen nicht wesentlich vom Aufbau eines normalen Hochspannungskabels ab. Immerhin waren

Stärke von 9,6 mm ($R = 20,85$ mm). Die durch diese Konstruktion erreichte Kapazität betrug $0,33 \mu\text{F}/\text{km}$ entsprechend einer mittleren Dielek-

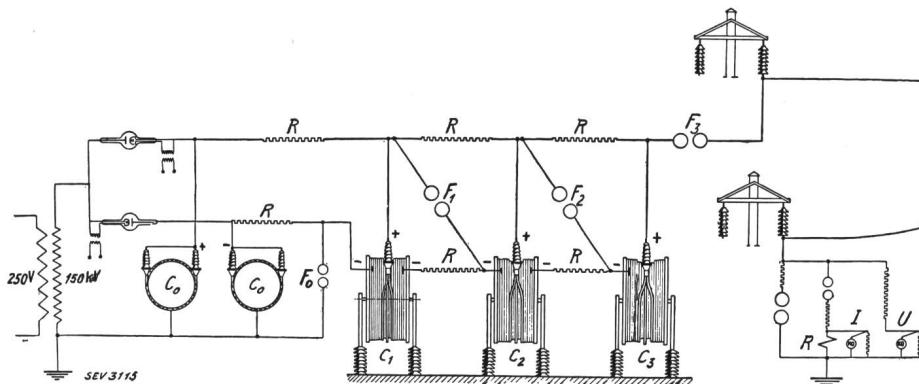


Fig. 1.
Schema des Kabel-Stossgenerators.

einige Punkte zu berücksichtigen, die dem Verwendungszwecke des Kabels entsprechen. Vorerst war Wert darauf zu legen, eine möglichst grosse Kapazität der Kabel zu erlangen, ohne dadurch die Durchschlagsfestigkeit stark zu vermindern. Ferner

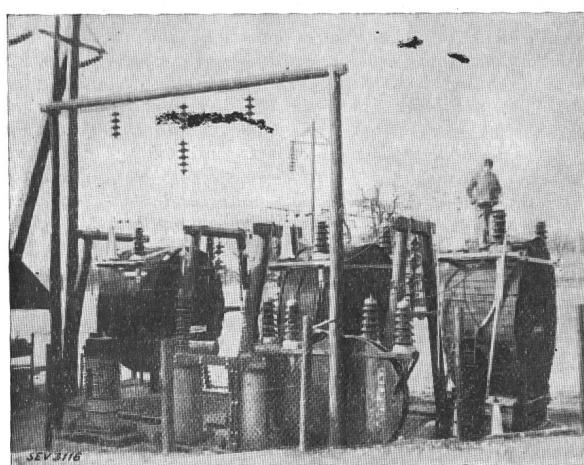


Fig. 2.
Ansicht des Kabel-Stossgenerators.

war dafür zu sorgen, dass die Kabel nicht zu schwer wurden, so dass eine Ortsverlegung der Anlage mit normalen Hilfsmitteln möglich wurde. Die von uns gewählte Konstruktion zeigt Fig. 3.

Zur Erhöhung der Kapazität wurde ein künstlich erhöhter Querschnitt von 300 mm^2 gewählt ($r = 11,25 \text{ mm}$). Die Isolation, bestehend aus ca. 120 Lagen Papier verschiedener Dicke, hat eine

Dielectric constant of $\epsilon = 3,65$. Diese Dielektrizitätskonstante war einerseits nötig, um nach Möglichkeit den Kapazitätswert des Kabels zu steigern, und anderseits vorteilhaft wegen der dadurch erreichten hohen Isolationswerte (vergl. Fig. 4). Da die Kabel vorwiegend für Gleichspannung verwendet werden, wo der Isolationswiderstand zur Geltung kommt, tragen geringe Ohmsche Leitungsverluste im Dielektrikum zur Betriebssicherheit des Kabels bei. Der bei einer Gleichspannungsbelastung von 150 kV gemessene Verluststrom betrug für eine Länge von 370 m ca. 0,017 mA.

Die gegenüber normalen Wechselstromkabeln etwas geänderte Imprägnierung bedingte eine sorgfältige Behandlung der Kabel während der Imprägnierung. Durch verschiedene Überwachungsmethoden war es möglich, die bei gewöhnlichen Höchstspannungskabeln erhaltenen Werte der dielektrischen Verluste ebenfalls einzuhalten (vergl. Fig. 5). Die an einigen Abschnitten von 10 m Länge durchgeführten Zeit-Durchschlags-Versuche, mit 50periodigem Wechselstrom, ergaben folgende Werte (Fig. 6):

Nr. 1	220 kV	1 h 53'	entspr.	$31,8 \text{ kV}_{\text{eff}}/\text{mm}$
» 2	180 kV	10 h 30'	»	$26,1 \text{ "}$
» 3	150 kV	38 h 27'	»	$21,8 \text{ "}$
» 4	140 kV	112 h 14'	»	$20,3 \text{ "}$

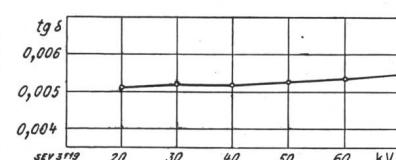


Fig. 5.
Verlustfaktor des
Kabels bei 50 Per./s.

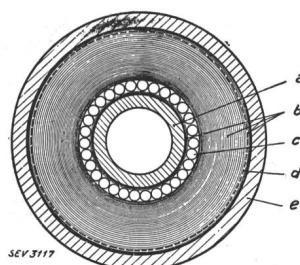


Fig. 3.
Querschnitt des Kabels für
350 kV Gleichspannung.
a Inneres Bleirohr.
b Papierisolation.
c Kupferseele.
d Blattzinn.
e Bleimantel.

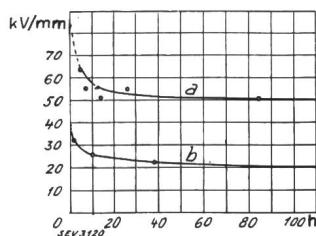


Fig. 6.
Zeit-Durchschlags-Kurve
a bei Gleichspannung,
b bei Wechselspannung von
50 Per./s (Effektivwerte).

Nach den Untersuchungen von Weiset¹⁾ und nach eigenen Messungen an Kabelabschnitten von geringerer Isolationsdicke kann mit einem Verhältnis der Durchschlagsspannungen zwischen Wechsel- und Gleichspannung von 1 : 2,5 gerechnet werden, wenn die Spannungseinwirkung bis zum Durchschlag lange dauert. Daraus geht hervor, dass die verwendeten Kabel eine Beanspruchung mit 350 kV Gleichspannung, die bei Vollaufladung vorkommt, ohne weiteres ertragen, um so mehr, als die Dauer der Beanspruchung immer nur kurz ist. Die entsprechende Wechselspannung beträgt ca. 140 kV_{eff}, eine Spannung, die das Kabel nach Fig. 6 während ca. 112 Stunden ausgehalten hat.

Die Kabel wurden in Längen von 370 m geliefert und immer zu zweien auf eine Trommel gewickelt. Je die beiden Anfänge und Enden waren gemeinsam in einen Spezialendverschluss eingeführt. Die Gründe, die zur Unterteilung der Kabel führten, werden nachstehend im theoretischen Teil näher umschrieben. Die Endverschlüsse (vergl. Fig. 7) sind für eine Ueberschlagsspannung von 170 kV_{eff} bei unter 45° einfallendem Regen konstruiert. Der Trockenüberschlag erfolgt bei 260 kV_{eff} Wechselstrom. Die beim Stossgenerator auftretenden maximalen Gleichspannungen von 350 kV an jedem Kabel werden von diesen Endverschlüssen noch knapp ausgehalten.

Jede Kabelrolle ist mitsamt ihren Endverschlüssen und ihrer Funkenstrecke gegenüber Erde isoliert, wie es zur Marx-Schaltung nötig ist. Wie aus Fig. 2 ersichtlich ist, wurde das erste Kabel auf Porzellanstützer gestellt, deren Kapazität zur Auslösung des Kathodenstrahl-Oszillographen benutzt ist. Dagegen ist das zweite und dritte Kabel je an zwei viergliedrigen Ketten aus Motorisolatoren moderner Bauart an Holzböcken aufgehängt. Jede Kette hat *dauernd* ca. 4 t Zug zu halten, was bisher ohne jede Schwierigkeit möglich war.

Als Spannungsteiler und für die Spannungsverdopplungsschaltung als Hilfskondensatoren kamen normale 50 kV-Einphasenkabel zur Verwendung. Diese wurden auf Spezialrollen mit grossem Kern gewickelt. Die Endverschlüsse, welche direkt an die Rollen montiert sind, haben gleiche Abmessungen wie die der Kabel des Blitz-Generators.

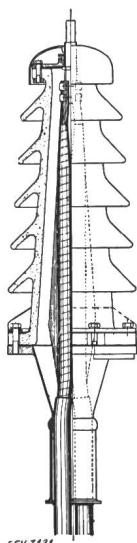


Fig. 7.
Endverschluss.

Gleiche Kabelstücke wurden versuchsweise in eine 132 kV-Leitung direkt eingebaut. Während der Probezeit sind weder an Kabeln noch an Armaturen Defekte aufgetreten, trotzdem die Kabel mit ca. 8 kV_{eff}/mm beansprucht wurden.

Wirkungsweise des Stossgenerators.

Die Kabel Nr. 1 bis 3 werden, wie aus Fig. 1 ersichtlich ist, über zwei Glühventile langsam auf eine maximale Spannung von je 350 kV aufgeladen; auch die beiden Hilfskabel werden aufgeladen. Sobald die an der Schalfunkenstrecke F₀ eingestellte Spannung erreicht ist, spricht sie an, wodurch auch F₁ bis F₃ ansprechen; damit werden die drei Kabel in Serie geschaltet und über die Funkenstrecke F₃ auf das angeschlossene Leiterseil entladen.

Die Daten des Stossgenerators sind folgende: 3 Kabel zu je 2·370 m Länge und 6,5 t Gewicht, je 0,245 μF Kapazität, je 350 kV Gleichspannung. Resultierende Kapazität 0,0817 μF, theoretische Spannungsgrenze 1050 kV; Ventilröhren für 200 kV und 400 kV Sperrspannung; Spannungstransformator 250/150 000 V. Die Heiztransformatoren sind normale 80 kV-Stromwandler. Die maximale Stossarbeit des Generators beträgt:

$$A = U^2 \cdot \frac{c}{2} = 1050^2 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,0817 \cdot 10^{-6}}{2}$$

$$A = 45\,000 \text{ Ws} = 45 \text{ kWs.}$$

Die Erdung des Stossgenerators wurde durch Verlegen von ca. 200 m Kupferband (50·3 mm) hergestellt, wodurch sich ein Erdungswiderstand von ca. 2 Ohm erreichen liess. Da die Stossanlage hauptsächlich Wellen zwischen der Versuchslleitung und Erde erzeugen soll, so fliesst naturgemäß ein hoher Stoßstrom von einigen 1000 A kurzzeitig über diese Erdung. Der tiefe Erdungswiderstand ist erforderlich, um eine unzulässige Spannungs erhöhung an der Erdung infolge dieser Ströme zu vermeiden, weil sonst Ueberschläge an den Niederspannungs- und Schwachstromleitungen entstehen würden. Das Erdungsband ist von einem ca. 10 m weiten Erdungsrings aus strahlenförmig nach allen Seiten verlegt.

Die Art der Ueberspannungsbeanspruchung bei den Versuchen mit dem Kabelstossgenerator.

Beim Ansprechen der Funkenstrecken F₀ bis F₃ des Stossgenerators läuft eine Spannungswelle über das Versuchsseil. Waren anstelle der Kabel konzentrierte Kapazitäten vorhanden, so würde sich die Höhe der Spannungswelle angenähert aus der Summe der Spannungen der aufgeladenen Kapazitäten im Moment des Ansprechens der Funkenstrecke ergeben. Beim Kabelstossgenerator ist aber die Kapazität nicht konzentriert, sondern längs der Kabel verteilt. Die Stosswelle entsteht auf Grund des Schemas Fig. 8 a, resp., wenn wir zunächst das Zeitintervall während des erstmaligen Durchlaufens

¹⁾ ETZ 1920, S. 48 und 71.

der Kabelentladewelle betrachten, nach dem Ersatzschema der Fig. 8 b. Dabei sind die für den Stoßvorgang unwesentlichen Ladewiderstände und

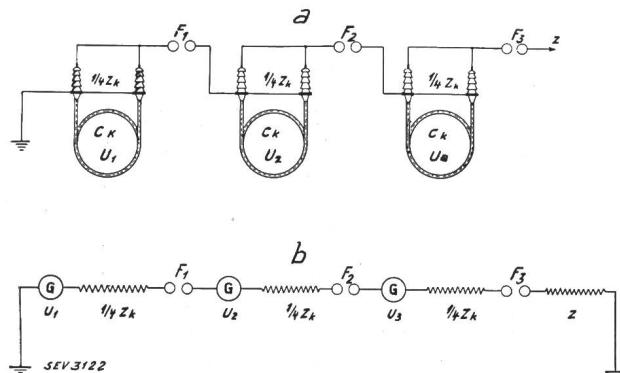


Fig. 8.

a Vereinfachtes Schema des Stoßgenerators.
b Ersatzschema für den ersten Durchlauf der Kabelentladewelle beim Anstossen einer langen Freileitung z .

die in unserm Fall nebensächlichen Erdkapazitäten der Bleimäntel weggelassen worden. Für drei Kabelstufen ergibt sich die Wellenhöhe zu:

$$U = \frac{Z}{Z + 3 Z_k} \cdot (U_1 + U_2 + U_3)$$

resp., bei n Stufen eines Kabelstoßgenerators, zu:

$$U = \frac{Z}{Z + n Z_k} \cdot (n \cdot U_1),$$

wo U_1 = Ladespannung pro Stufe,

Z = Wellenwiderstand der Freileitung,

Z_k = Resultierender Wellenwiderstand eines Kabelkondensators. (In unserem Falle zwei parallel geschaltete Kabel von je 370 m.)

Zwischen dem Wellenwiderstand Z_k , der Kapazität pro km C_k , der Induktivität pro km L_k und der Dielektrizitätskonstanten ϵ des Kabels besteht nun bekanntlich ein Zusammenhang, der sich aus folgendem ergibt:

Nach Definition ist $Z_k = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}$ und ferner die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Welle

$$v = \sqrt{\frac{1}{L_k C_k}} = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon}},$$

wo v_0 = Lichtgeschwindigkeit = $3 \cdot 10^{10}$ cm/s.

$$\text{Somit } Z_k = \sqrt{\frac{1}{v^2 C_k^2}} = \pm \frac{1}{v C_k} = \frac{\sqrt{\epsilon}}{v_0 C_k}.$$

Nehmen wir an, die Dielektrizitätskonstante ϵ sei für rasche Vorgänge (Wellen) dieselbe wie bei 50 Per./s, so ergibt sich in unserm Fall: mit $\epsilon = 3,65$ und $C_k = 0,33 \cdot 10^{-11}$ F/cm

$$Z_k = \frac{\sqrt{3,65 \cdot 10^{11}}}{3 \cdot 10^{10} \cdot 0,33} = 19,3 \Omega \approx 20 \Omega.$$

Der Spannungswirkungsgrad des Kabelstoßgenerators beträgt in unserm Fall mit
 $Z = 450 \Omega$,
 $Z_k = \frac{1}{4} \cdot 20 \Omega$ (die vier Kabelenden eines Kondensators parallel geschaltet)

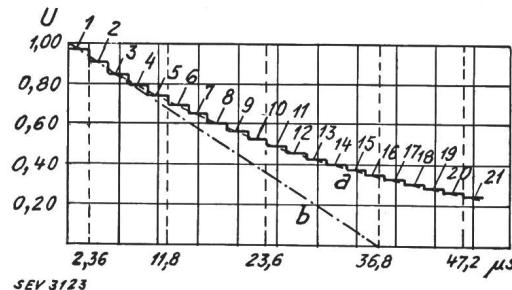
$$\frac{Z}{Z + 3 Z_k} = 0,968.$$

Der Spannungsverlust, infolge der Wellenwiderstände der Kabel, macht $\alpha = 1 - \frac{Z}{Z + 3 Z_k} = 3,2 \%$ aus.

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

Zum Unterschied von der stetig absinkenden Spannung einer sich entladenden konzentrierten Kapazität bleibt nun beim Kabelstoßgenerator die Stoßspannung während der Laufzeit über die Kabellänge (bei uns ca. $2,5 \mu s$) konstant. Nach halber Laufzeit begegnen sich in der Kabelmitte die von beiden Kabelenden herkommenden Entladewellen und heben, von der Mitte ausgehend, den Kabelstrom vollständig auf, indem sie zugleich den Spannungsabfall verdoppeln. Nach einfacher Laufzeit sind die ganzen Kabel stromlos. Sie haben dabei den doppelten Abfall (2α) an Spannung eingebüßt. Nun wiederholt sich qualitativ genau das anfängliche Spiel mit dem einzigen Unterschied, dass die Spannung jedes Kabels nicht mehr wie anfangs U_0 , sondern gleich $U_0 (1-2 \alpha)$ beträgt. Mit diesem neuen Wert der EMK gilt wieder das Schema Fig. 8. Die weitere Entsendung der Ladewelle auf die Leitung Z bedingt eine neue Entladewelle im Kabel, welche die neue Kabel-EMK ($1-2 \alpha$) wieder um $\alpha \%$ absenkt.

Während die Kabel-EMK nach Potenzen von $(1-2 \alpha)$ fortschreitet, liegt die Klemmenspannung und damit die Stoßspannung jedesmal um den



a Gerechneter Verlauf der Spannung an den Klemmen des Stoßgenerators, der mit einer Leitung unendlicher Länge verbunden ist. Die Zahlen bei den einzelnen Stufen sind die Ordnungszahlen der Entladewellen im Kabel.
b Tangente, welche die Zeitkonstante der Entladung des Stoßgenerators angibt.

Spannungsabfall $\alpha \%$ tiefer. Sie folgt daher dem Gesetz $(1-2 \alpha)^n \cdot (1-\alpha)$, wenn mit n die Ordnungszahl der Wellen im Kabel, resp. die Ordnungszahl

der Stufen der Entladewelle bezeichnet wird. Fig. 9 zeigt den zu erwartenden Spannungsverlauf an den Kabelklemmen, resp. die Form der Stoßwelle des Kabelstossgenerators.

Die Verschleifung der Wellenfront im Kabel bewirkt, dass die Treppe nach einigen Stufen ihre scharfen Ecken einbüsst, womit die Kurve in eine Exponentialkurve mit der Zeitkonstante $C \cdot Z$ übergeht. Dadurch verschwindet der Unterschied zwischen Stoßgeneratoren, die mit konzentrierten Kapazitäten und solchen, die mit Kabeln aufgebaut sind.

Damit dieser Entladevorgang für beliebig lange Zeit gilt, muss allerdings vorausgesetzt werden, dass keine Welle von der gestossenen Leitung her zurückkehrt, d. h. die gegebene Beschreibung gilt nur für den Anstoss einer unendlich langen Leitung. Bei endlicher Leitungslänge kommt die reflektierte Ladewelle nach ihrem Hin- und Zurücklauf über die Leitung wieder zum Stoßgenerator zurück. Das trifft in unserm Fall, mit 900 m Leitungslänge, nach etwas mehr als $6 \mu\text{s}$ ein. Die Aufnahme der reflektierten Welle vom Stoßgenerator geschieht, wie die Abgabe der Ladewelle, unter Bildung eines Spannungsabfalles im Kabelwellenwiderstand. Dadurch

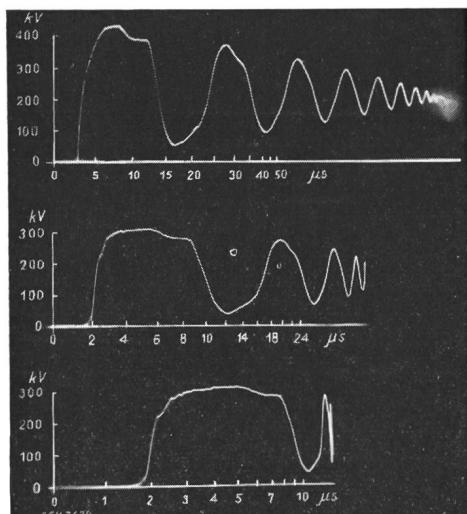


Fig. 10.

Oszillogramm des am Leitungsende reflektierten positiven Spannungsstoßes. Die drei Kurven sind drei Oszillogramme mit verschiedenen Zeitmaßstäben; das oberste Oszillogramm ist bei höherer Stoßspannung aufgenommen als die beiden andern.

entstehen auch in den Kabelwellen wieder kleine Treppenstufen, die sich ihrerseits wieder in den auf die Leitung ausgeschickten Ladewellen bemerkbar machen. Die auf der Versuchslleitung sich ausbildende Schwingung erhält dadurch kleine treppenförmige Stufen, von denen aber abgesehen werden kann, da es sich stets nur um Spannungsabfälle von wenigen Prozenten handelt. Der Einschaltvorgang, bei Verwendung des Kabelstossgenerators und der oben erwähnten Leitung, ist somit ganz analog demjenigen bei Verwendung einer konzentrierten Stoßkapazität. Der am offenen Leitungsende ohne an-

geschlossenen Ableiter gemessene Spannungsverlauf ist in Fig. 10 für positive und Fig. 11 für negative Spannungsstöße kleiner Höhe aufgezeichnet sind.

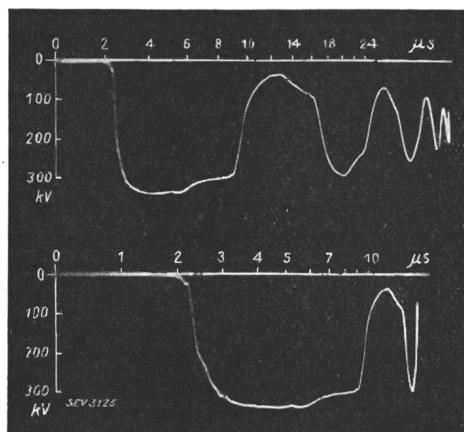


Fig. 11.
Oszillogramm des am Leitungsende reflektierten negativen Spannungsstoßes. Zwei Zeitmaßstäbe.

Die Schwingung entspricht dem Einschalten des kurzen Versuchsseiles von der grossen Stoßkapazität aus. Es tritt deshalb anfänglich am Leitungsende gegenüber dem Schaltwert der Spannung am Stoßgenerator annähernd Spannungsverdoppelung auf. Diese Reflexion wird bekanntlich durch einen dem Wellenwiderstand gleichgemachten Widerstand zwischen Leitungsende und Erde aufgehoben. Es kommt dann am Leitungsende die lediglich durch das Durchlaufen der 900 m Freileitung etwas verflachte Form der Kabel-Klemmenspannung zum Vorschein.

Fig. 12 gibt den gemessenen Spannungsverlauf am Leitungsende, wenn dieses über einen Flüssigkeitswiderstand von ca. 560Ω an Erde verbunden war. Das zweite Leitungsseil war dabei beidseitig offen. Man sieht tatsächlich innert der ersten Freileitungshalbwelle von ca. $6 \mu\text{s}$ zwei sanfte Stufen. Deren Ecken und noch mehr die späteren sind aber bereits durch das Durchlaufen der Leitung so stark verflacht, dass die Kurve (Fig. 9) kaum noch angedeutungsweise zu finden ist. Die Spannungsbeanspruchung am Leitungsende kann demnach durch

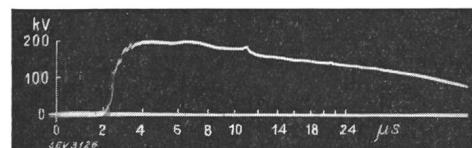


Fig. 12.
Oszillogramm der Stoßspannung am Ende der Versuchslleitung, ohne Reflexion der Welle.

den Kabelstossgenerator ebensogut erzeugt werden wie durch eine konzentrierte Kapazität. Die Spannungsform auf dem angestossenen Leitungsseil hängt außerdem von der Beeinflussung des benach-

barten, im vorliegenden Fall isolierten Leitungsseils ab. Auf diese Influenzwirkung kann hier nicht eingegangen werden.

Messanordnung für die Stoßspannungsversuche.

Der beschriebene Stoßgenerator wurde insbesondere zum Zweck der Untersuchung von Ueberspannungsschutzapparaten gebaut, daneben aber auch für andere Untersuchungen, bei denen Wanderwellen eine Rolle spielen. Als Beispiele seien genannt: Messungen über die Umformung von Influenzwellen, deren anomales Verhalten bei Gewittermessungen festgestellt wurde; ferner Dämpfungsmessungen an Wellen verschieden hoher Spannung und eventuell Untersuchung von Rückzünderscheinungen an Schalterlichtbögen.

Die zu diesen Zwecken nötige, vom Stoßgenerator angestossene Leitung (Wellenleitung) besteht aus zwei Aluminiumseilen von 82 mm^2 Querschnitt und 12,5 mm Seildurchmesser, die vorläufig an Ketten aus sieben Ohio-Brass-Elementen aufgehängt sind. An den Tragmasten sind zum Teil noch Jeffrey-Dewitt-Isolatoren benutzt, die früher auf Hochspannungsleitungen verwendet worden waren. Die Leitung macht eine grosse Schleife von 900 m Länge; sie endet am Versuchsstand für die zu untersuchenden Apparate, der sich nur ca. 25 m vom Stoßgenerator entfernt befindet, so dass vom Versuchsstand aus die ganze Anlage gut übersehen werden kann. Jedes der beiden Leitungsseile kann am Stoßgenerator oder an der Erdung angeschlossen werden, je nachdem das Seil als Phasenleiter oder als Erdseil gelten soll.

Beim Versuchsstand befindet sich, außer den zu untersuchenden Apparaten, noch die gesamte Messapparatur, sowie zwei Transformatoren zu je 2000 kVA Drehstromleistung, die zur Herstellung von Betriebsspannungen bis zu 35 kV_{eff} zwischen Leitung und Erde dienen; diesen Spannungen wird die Ueberspannungswelle des Stoßgenerators überlagert. Es ist dadurch hauptsächlich bezweckt, die Löschfähigkeit bzw. Betriebssicherheit von Ableitern festzustellen. Die Möglichkeit, jede Spannung bis zu 35 kV_{eff} zu erzeugen, erlaubt auch, die Grenze der Betriebsspannung festzustellen, bei der ein Ableiter noch einwandfrei arbeitet. Um die Transformatoren selber vor unzulässig hohen Ueberspannungen zu behüten, ist an deren Klemmen ein besonderer erprobter Ableiter ständig angeschlossen. Dieser lässt die Klemmenspannung der Transformatoren bei beliebig hohen Ueberspannungswellen nie über die Transformatorprüfspannung anwachsen.

Die Untersuchungen von Ueberspannungsableitern werden jeweils so durchgeführt, dass zunächst die Schutzapparate nur mit der vom Stoßgenerator auf die Leitung geschickten Ueberspannungswelle beansprucht werden. Damit ist vorerst die Feststellung der Schutzwirkung der Apparate bezüglich Verminderung der Ueberspannungshöhe und Steilheit und die Ermittlung der absorbierten Ströme möglich. Nicht weniger wichtig ist bei den Schutz-

apparaten die Frage der Betriebssicherheit. Ableiter müssen imstande sein, den einmal eingeleiteten Stromdurchgang nach kurzer Zeit einwandfrei zu unterbrechen. Diese Fähigkeit wird in betriebsmässiger Schaltung mit Hilfe der Leistungstransformatoren für je 2000 kVA Drehstromleistung ermittelt.

Die Messapparate bestehen aus zwei, nötigenfalls drei Kathodenstrahlloszillographen (KO) mit

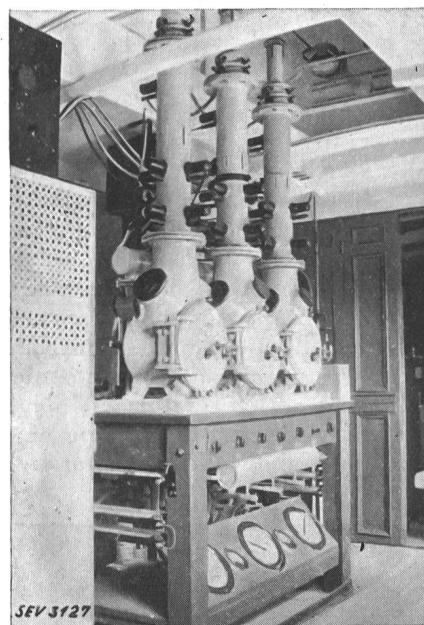


Fig. 13.
Ansicht der drei Oszillosraphen.

zugehöriger Spannungsteilung für die Spannungsmessung und Shunten für die Messung von Strömen. Als Kontrollinstrument dient eine Kugelfunkenstrecke mit ca. 10^4 Ohm Vorwiderstand. Die Messapparatur der KO ist in einem Bahnwagen eingebaut, der auch zu den Gewittermessungen dient und bereits beschrieben wurde²⁾. Fig. 13 zeigt eine Ansicht der drei eingebauten KO.

Die Spannungsteilung ist für die Messung ohne Betriebsspannung eine rein Ohmsche, mit 5500 bzw. 11 000 Ohm Hochspannungswiderstand und 40 Ohm Niederspannungswiderstand an den Ablenkplatten des KO. Das zwischen geschaltete Verzögerungskabel besitzt 40 Ohm Wellenwider-

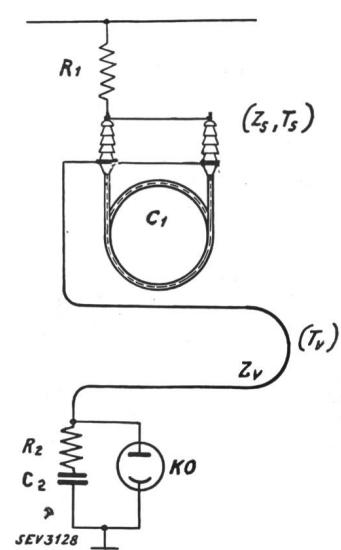


Fig. 14.
Spannungsteilung nach Gábor.
Zeitkonstante $T = R_1 C_1 = R_2 C_2$
Wellenwiderstand $Z_v = R_2$
Laufzeit einer Welle über
Kabel $C_1 = T_s$
Laufzeit einer Welle über
Kabel $Z_v = T_v$

²⁾ Bull. SEV 1931, Nr. 17.

stand und nur einige Meter Länge. Die formgetreue Abbildung der Hochspannungswelle ist dadurch am besten gewahrt.

Für Messungen an der unter Betriebsspannung stehenden Leitung wird die Betriebsspannung durch eine Kapazität C_1 sowie die entsprechende Teilkapazität C_2 , entsprechend der Schaltung von Gábor, abgesperrt (Fig. 14).

Theorie und Versuch zeigen, dass auch hier, an Stelle der konzentrierten Kapazität C_2 , ein kurzes Hochspannungs-Kabelstück praktisch denselben Dienst tut wie eine konzentrierte Kapazität, was aus folgendem hervorgeht: Zu den Bedingungen gleicher Uebersetzungsverhältnisse

$$\ddot{u} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{C_2}{C_1},$$

sowie der Reflexionsfreiheit des Verzögerungskabels $Z_v = R_2$, tritt die Bedingung genügend grosser Zeitkonstanten

$$T = C_2 R_2 = C_1 R_1$$

relativ zur Laufzeit T_v einer elektrischen Welle über das Verzögerungskabel Z_v .

Das Zeitverhältnis $\frac{T_v}{T}$ bedingt nach Gábor einen maximalen Fehler δ_1 im Hochspannungsteilverhältnis: $\delta_1 = 2 \frac{T_v}{T}$. Wird nun an Stelle eines Kondensators C_1 ein Kabelstück gleicher Kapazität benutzt, dessen Wellenwiderstand Z_s beträgt, so lässt sich durch eine einfache Ueberlegung zeigen, dass der zusätzliche Messfehler δ_2 höchstens den Wert

hat: $\delta_2' = \frac{Z_s}{R_1}$, sofern die beiden Kabelenden von Z_s nicht parallel geschaltet sind,

oder $\delta_2'' = \frac{1}{2} \frac{Z_s}{R_1}$, sofern beide Kabelenden von Z_s verbunden sind.

Mit $R_1 = 5500$ Ohm, $Z_s = 30$ Ohm wird $\delta_2' = 3\%$, mit $R_1 = 11000$ Ohm, $Z_s = 30$ Ohm wird $\delta_2'' = 1,4\%$.

Während eine gleichmässig ansteigende Front bei Verwendung einer konzentrierten Kapazität C_1 als gleichmässige Front abgebildet wird, erscheint bei Verwendung eines Kabelstückes C_1 im Oszillogramm eine Treppenlinie mit $2 T_s$ (T_s = Laufzeit über das Kabel Z_s) Stufendauer und der maximalen Ordinatenabweichung δ_2 . In den weitaus meisten Fällen, insbesondere bei hohen Spannungen, lässt sich deshalb auch als Spannungsteilkapazität C_1 unbedenklich ein kurzes Kabelstück an Stelle eines konzentrierten Kondensators verwenden.

Fig. 15 und 16 geben vergleichsweise die mit Gábor-Teilung und mit reiner Widerstandsteilung gemessene Form der Stoßwellen am Leitungsende. Dabei war an Stelle der konzentrierten Kapazität C_1 (Gábor) ein 25 m langes Kabelstück mit ca. 8000 cm Kapazität einseitig angeschlossen.

Die Verwendung gleicher Dielektrika (imprägniertes Papier) für C_1 und C_2 (Fig. 14) schaltet störende Einflüsse infolge frequenzabhängiger Di-

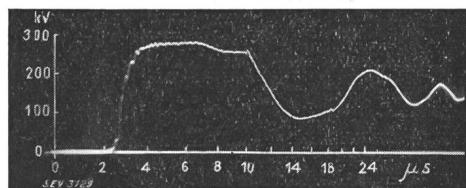


Fig. 15.
Oszillogramm der am Leitungsende reflektierten Stoßspannung, aufgenommen mit Spannungsteilung nach Gábor, in welcher die Kapazitäten kurzgeschlossen waren.

elektrizitätskonstanten aus. Der Widerstand R_1 besteht aus einem resp. zwei mit Mannitlösung³⁾ gefüllten Porzellanrohren zu je 1,5 m Länge, die der Bedingung kurzer und doch temperaturunabhängiger Widerstände am besten entsprechen. Sämtliche Berührungsflächen der Lösung an den Rohrenden (Kappen) sind versilbert, womit sich die Lösung jahrelang rein erhalten lässt, wie die Gewittermessungen ergaben.

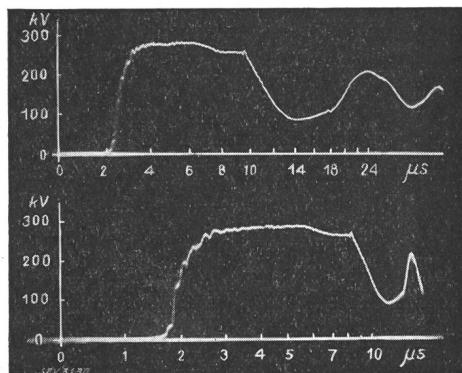


Fig. 16.
Oszillogramm der gleichen Stoßspannung (Fig. 15), aufgenommen mit Spannungsteilung nach Gábor, wobei die Reihenfolge von R_1 und C_1 gegenüber Fig. 14 vertauscht ist. Zwei Zeitmaßstäbe.

Die Reihenfolge von C_1 und R_1 war bei diesen Aufnahmen umgekehrt als in Fig. 14, so dass das Kabel direkt an der Hochspannung lag. Die kleine Kabel-Erdkapazität bewirkt, wie ersichtlich ist, gegenüber den steilstmöglichen Wellen nach Fig. 10 und 11 eine nur unwesentliche Frontverflachung. Dagegen war es nicht möglich, mit der in Fig. 14 gezeichneten Reihenfolge R_1-C_1 eine formgetreue Spannungsteilung zu erhalten, was schliesslich Fig. 17 belegen möge. Trotz der Kabelabschirmung durch einen geerdeten Blechmantel ergeben sich Schwingungen, die das Spannungsteilverhältnis falschen.

Eine fehlerhafte Spannungsteilung ergab sich immer, wenn der Hochspannungswiderstand R_1 nicht direkt bis zum Anfang des Messkabels reichte, sondern ein nur ca. meterlanges Zwischenstück vor-

³⁾ Kohlrausch, Handbuch der praktischen Physik.

handen war. Dessen Kapazität gegen die Hochspannung und Erde bildet eine unzulässige Fehlerquelle. Als die für Stoßwellen am besten geeig-

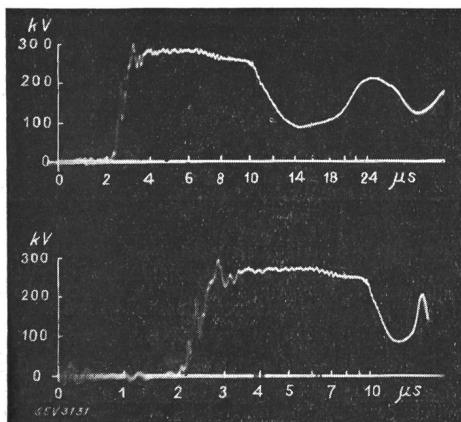


Fig. 17.

Oszillogramm der am Leitungsende reflektierten Stoßspannung, aufgenommen mit Spannungsteilung nach Fig. 14. Zwei Zeitmaßstäbe.

nete Spannungsteilung ergab sich aus eingehenden Versuchen die reine, kapazitätsarme Widerstands teilung, die bei sämtlichen Versuchen, wo keine ständige Betriebsspannung vorhanden ist, benutzt wird⁴⁾.

Die Strommessung geschieht nach dem Schema der Fig. 18. Das mit dem Widerstand $R_5 = Z_m$ abgeglichene Zuleitungskabel Z hat, wie dasjenige der Spannungsteilung, nur einige Meter Länge. Der

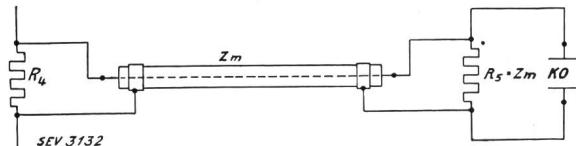


Fig. 18.
Schema der Schaltung zum Oszillographieren der Stoßströme.

Shuntwiderstand R_4 darf frei gewählt werden. Der für die Stromberechnung massgebende Widerstand ist der aus der Parallelschaltung R_4 und R_5 resultierende.

Es ist hier nicht bezweckt, Resultate der Versuche mit der beschriebenen Stoßanlage zu nennen. Wir geben zum Abschluss nur zwei Oszillogramm beispiele (Fig. 19 und Fig. 20), um zu zeigen, wie ein kurzes Kabelstück oder ein Ableiter am Leitungsende die Steilheit und den späteren Verlauf der Stoßwelle beeinflussen. In bekannter Weise ist es auch möglich, durch kleine, zwischen Stoßgenerator und Leitungsanfang geschaltete Drosselpulen die Frontsteilheit der Stoßwellen zu verkleinern oder durch einen dem Wellenwiderstand gleichgemachten Widerstand die Schwingung am Leitungsende zu unterdrücken und damit eine unendlich lange Leitung vorzutäuschen, in den Fällen, wo das erwünscht ist.

Zusammenfassend mag darauf hingewiesen sein,

⁴⁾ Für extrem steile Wellen hat auch die kapazitive Spannungsteilung Vorteile; sie bedingt aber das Heraufführen der Hochspannung bis unmittelbar zum KO.

dass in der Stoßwelle des Kabelgenerators (Fig. 10, 11 und 12) keine derart ausgeprägten Stufen sichtbar sind, dass sich ein praktisch wesentlicher Unterschied gegenüber einem Stoßgenerator mit konzen-

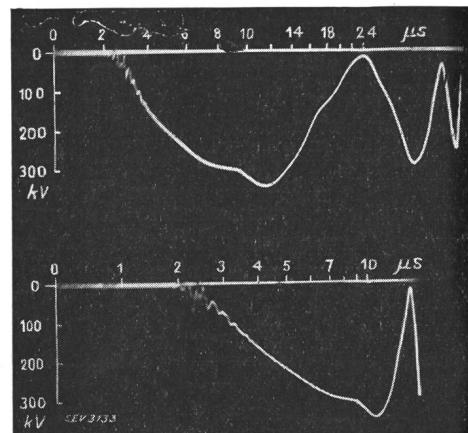


Fig. 19.

Verflachung der Wellenfront durch ein 25 m langes, als Kondensator am Leitungsende angeschlossenes Kabelstück. Zwei Zeitmaßstäbe.

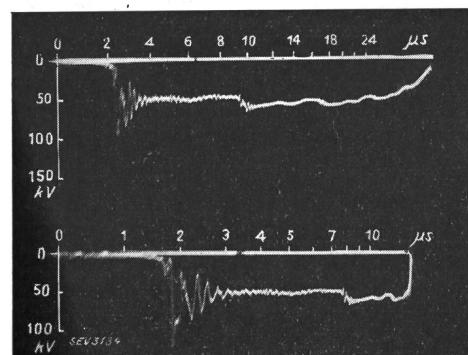


Fig. 20.

Oszillogramm einer Stoßspannung; bei der Aufnahme war das Ende der Versuchsleitung durch einen modernen Überspannungsableiter geschützt. Zwei Zeitmaßstäbe.

trierten Kapazitäten erkennen liesse. Es scheint uns, dass der Kabelstossgenerator für das Anstoßen von Leitungen eine der Kondensatorkapazität gleichwertige Lösung ist, die infolge der hohen Durchschlagsfestigkeit der Gleichstromhochspannungskabel jedenfalls viel weniger Stufen benötigt als die gebräuchlichen Aufbauten aus sehr vielen Wickelkondensatoren, Ladewiderständen und Funkenstrecken. Da Kabel ohne weiteres für Freiluftaufstellung geeignet sind, lässt sich in diesem Fall auch eine wesentliche Preiserersparnis beim Kabelstossgenerator erreichen.

Die Verfasser benützen die Gelegenheit, der Direktion und dem Personal des Elektrizitätswerkes Olten-Aarburg für die Montage der Anlage, die Erstellung der Wellenleitung und die weitgehende Unterstützung bei den Versuchen den besten Dank auszusprechen. Ebenfalls danken sie bestens der Direktion der Kabelwerke Brugg A.-G. für die Hochspannungskabel und Armaturen, die sie zur Verfügung stellte.