

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 25 (1934)
Heft: 9

Artikel: Die Gewittermessungen der Jahre 1932 und 193 in der Schweiz
Autor: Berger, K.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056550>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 25.12.2024

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:

Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens
et de l'Union de Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:

S. A. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zurich 4
Stauffacherquai 36/40

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXV^e Année

N^o 9

Vendredi, 27 Avril 1934

Die Gewittermessungen der Jahre 1932 und 1933 in der Schweiz.

Von K. Berger, Zürich.

621.316.93 : 621.317.755

Der Autor, Ingenieur des SEV, berichtet über die im Auftrag der Verwaltungskommission für den Kathodenstrahl-Oszillographen in den Jahren 1932 und 1933 ausgeführten Messungen, im Anschluss an die «Gewitterberichte» der Jahre 1928 bis 1931¹⁾.

Die oszillographischen Ueberspannungsmessungen wurden in den Jahren 1932 und 1933 mit einem dreipoligen Kathodenstrahl-Oszillographen (KO) der früher beschriebenen Bauart beim Kraftwerk Gösigen des EW Olten-Aarburg durchgeführt, wo eine 80 kV-Drehstromleitung sowie zeitweise eine 50 kV-Leitung und drei Seile einer 132 kV-Einphasen-Doppelleitung zur Messung verwendet werden konnten. Daneben wurden gleichzeitig Messungen mit einigen sogenannten Klydonographen ausgeführt, um auch damit Anhaltspunkte über Häufigkeit und ungefähre Höhe der gesamten Ueberspannungen eines Messortes zu bekommen. Höchstwerte von Blitzströmen wurden in einigen Fällen mit Hilfe sogenannter Mastfunkenstrecken ermittelt. Auf Grund der Beobachtungen und Messungen wird nochmals die Frage der Einwirkung von indirekten Blitzschlägen auf verschiedenartig gerdete Hochspannungsnetze besprochen; sodann werden einige Folgerungen gezogen für die Isolation und den Schutz von Hochspannungsanlagen durch Ueberspannungsableiter.

L'auteur, ingénieur de l'ASE, rapporte sur les essais effectués en 1932 et 1933 pour le compte de la commission d'administration des travaux à l'aide de l'oscillographe cathodique, faisant suite aux «mesures d'orages» des années 1928 à 1931¹⁾.

Les mesures oscillographiques des surtensions au cours de 1932 et 1933 ont été effectuées à l'aide d'un oscillographe cathodique tripolaire (KO) du type décrit antérieurement, près de la centrale Gösigen de l'Usine Electrique d'Olten-Aarburg, sur une ligne triphasée à 80 kV, et temporairement sur une ligne à 50 kV et sur trois conducteurs d'une ligne double monophasée à 132 kV. Ces mesures furent accompagnées de mesures simultanées à l'aide de quelques clydonographes, afin d'obtenir des indications générales sur la fréquence et l'intensité approximative des perturbations à l'endroit de mesure. Pour quelques cas, les valeurs extrêmes des courants de décharge ont été déterminées à l'aide d'éclateurs montés sur les pylônes. L'auteur étudie ensuite la question des effets des décharges indirectes sur des réseaux à haute tension mis à la terre de différentes façons, en se basant sur ses observations et mesures; pour terminer, il tire quelques conclusions relatives à l'isolement et à la protection des installations à haute tension à l'aide de parasurtensions.

1. Beschreibung der Versuchsnetze.

Nachdem in den Jahren 1929/31 die Einwirkungen der Gewitter auf eine 132 kV-Einphasen-Ueberspannungsleitung mit starrer Nullpunktserdung sämtlicher Transformatoren mit einem zweipoligen Kathodenstrahl-Oszillographen (KO) beobachtet worden war, bestand der Wunsch, die dort gewonnenen Resultate durch Messungen in einem Dreiphasennetz zu erweitern. Der dazu nötige Ausbau der Apparatur wurde im Frühjahr 1932 durchgeführt, so dass es möglich wurde, drei Phasen eines Netzes zugleich bezüglich ihrer Ueberspannungen gegen Erde zu beobachten. Fig. 1 zeigt eine Abbildung des in den Messwagen eingebauten dreipoligen KO.

Durch das Entgegenkommen des EW Olten-Aarburg wurde es möglich, die Messungen beim Kraftwerk Olten-Gösigen durchzuführen, wofür auch an dieser Stelle der Direktion und der Betriebsleitung der herzlichste Dank ausgesprochen wird.

Die Art des Anschlusses der Oszillographen an die beobachteten Netze war nicht beide Jahre gleich; es sollen deshalb beide Arten nacheinander beschrieben werden.

Das Prinzipschema des Anschlusses der Messeinrichtung im Jahre 1932 wird in Fig. 2 gegeben. Darin ist der Uebersichtlichkeit halber nur ein KO, nicht alle drei, eingezeichnet. Mit A und B sind die beiden getrennten, zur Beobachtung angeschlossenen Hochspannungsnetze bezeichnet. Zur Spannungsteilung haben wir, wie bisher immer bei den Gewittermessungen, die Gáborsche Schaltung benützt. Deren Wirkungsweise läuft bei hohen Frequenzen auf eine Ohmsche, bei tiefen Frequenzen auf eine kapazitive Teilung heraus. Ihr Hauptvorteil besteht darin, dass der KO nicht in unmittelbarer Nähe der Hochspannung aufgestellt werden muss, sondern dass die Einschaltung eines relativ langen Verzögerungskabels Z mit kleinem Messfehler möglich ist. Die Auslösung des Zeitrelais geschieht von den isolierten Flanschen der Durchführungen D aus. Sie erfolgt stets dann, wenn eine plötzliche Abweichung der Spannung um einige kV vom normalen 50periodigen Verlauf vorkommt

¹⁾ Bull. SEV 1929, Nr. 11; 1930, Nr. 3; 1931, Nr. 17; 1932, Nr. 12.

(Ansprechen auf dU/dt). Der KO-Messwagen befand sich etwa 150 m vom Anschlusspunkt der Netze A und B entfernt hinter dem Maschinenhaus des Kraftwerkes. Als Kapazitäten C_1 und C_3 wurden 25 m lange Stücke von Hochspannungs-Massekabeln benützt, als Widerstände R_1 und R_3 Porzellanrohre mit Mannit-Lösung²⁾.

Die Verbindungsleitung Z besteht aus 300 m langen, einpoligen Gummibleikabeln mit 2 mm² Kupferquerschnitt, deren Wellenwiderstand Z mit dem Ohmschen Widerstand $R_2 = Z$ abgeglichen

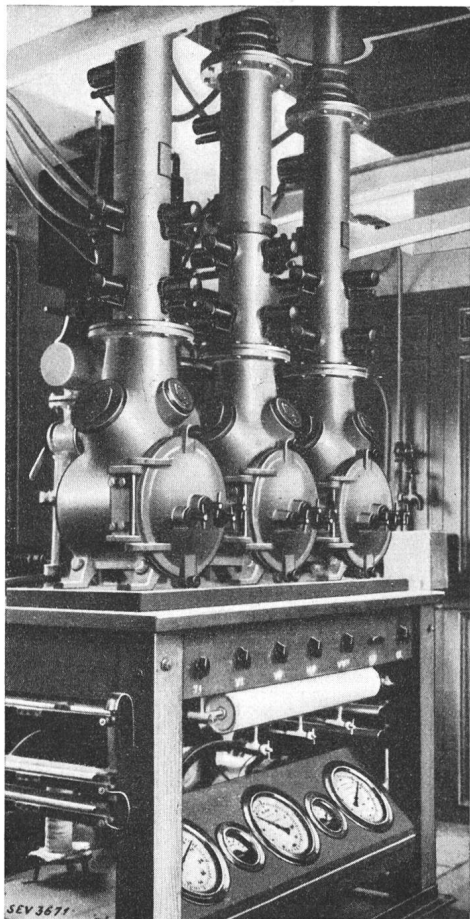


Fig. 1.
Ansicht des dreipoligen, im Messwagen eingebauten Kathodenstrahloszillographen.

ist. Die Parallelschaltung beider Spannungsteilungen zwischen C_1 und C_3 bedingt naturgemäss einen Messfehler, weil nicht aller z. B. aus R_1 und C_1 stammende Strom über Z nach R_2 und C_2 und Erde abfliessen muss, sondern ein Teil davon über R_3 und C_3 ausweichen kann. Weil aber Z mehr als 100 mal kleiner ist als R_3 oder R_1 , so beträgt dieser Fehler weniger als 1%. Diese Schaltung ist dann geeignet, wenn beide Spannungsteilungen A und B räumlich nahe beieinander liegen, wie das bei den Messungen im Jahre 1932 der Fall war.

Bedingung für die Zulässigkeit von gleichzeitigen Messungen an zwei Netzen ist natürlich, dass

²⁾ Ueber Mannitlösung siehe z. B.: F. Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik, oder A. f. E. 1912.

nicht gleichzeitig Gewitterbeeinflussungen beider Netze stattfinden. Diese Bedingung war weitgehend erfüllt, weil die beiden beobachteten Leitungen A und B nur eine kurze Strecke beim Werk Gösgen parallel laufen, nachher aber in ungefähr rechtem Winkel auseinanderstreben. Die Lage der beiden

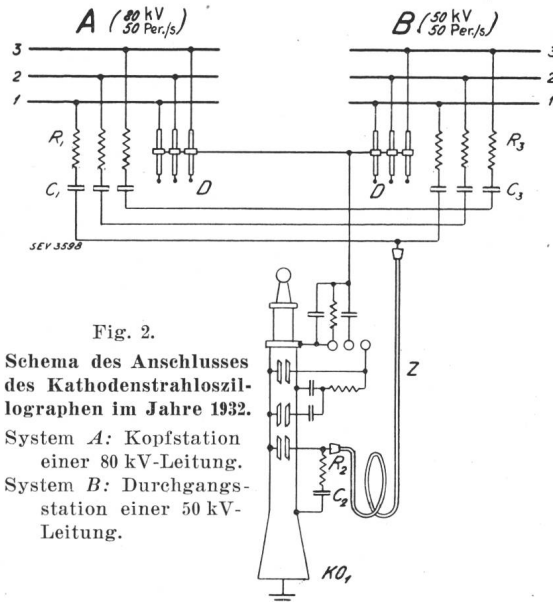


Fig. 2.
Schema des Anschlusses des Kathodenstrahloszillographen im Jahre 1932.
System A: Kopfstation einer 80 kV-Leitung.
System B: Durchgangsstation einer 50 kV-Leitung.

im Jahre 1932 beobachteten Netze (System A und B, Fig. 2) ist in Fig. 3 skizziert.

Das System A besteht aus einer 80 kV-Drehstrom-Einfachleitung, die vom Kraftwerk G über die Unterwerke B_0 und D nach dem französischen Knotenpunkt P führt. Das Mastbild der Leitung ist in Fig. 4 maßstäblich gezeigt, und zwar gilt

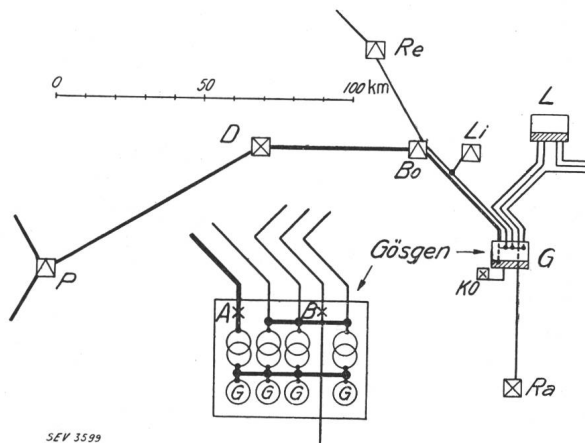


Fig. 3.
Lageplan der im Jahre 1932 beobachteten Netze.
— System A der Fig. 2 (80 kV).
— » B » » 2 (50 kV).

Fig. 4a für die Strecke G— B_0 , Fig. 4b für die Strecke B_0 -D-P. Wie ersichtlich, befindet sich auf der Strecke G- B_0 ausser der 80 kV-Leitung noch eine 50 kV-Leitung auf denselben Eisenmasten. Mit b (blau), g (grün) und r (rot) sind die Phasen des 80 kV-Betriebes bezeichnet. Die 80 kV-Leitung besitzt auf ihrer ganzen Länge ein Erdseil aus Stahl.

Die Leitung ist die erste in der Schweiz gebaute Weitspannleitung³⁾. Die Leitungsisolierung besteht aus Isolator Ketten, zum Teil mit 6 bzw. bei Abspannmasten mit 7 Kappen-Klöppel-Elementen, zum Teil mit 2½ Motor-Elementen. Lichtbogenarmaturen sind nur an wenigen Ketten eingebaut. Die Kupferseile besitzen auf dem Teilstück *G-Bo* 60 mm², auf der Strecke *Bo-D-P* 80 mm², das Erdseil 40 mm² Querschnitt. An diese Leitung sind in

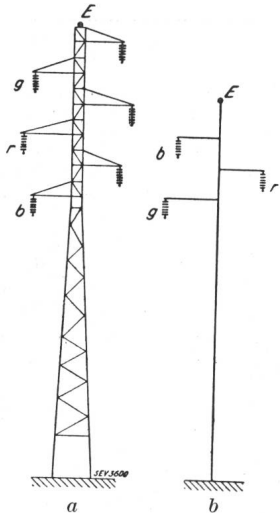


Fig. 4.
Mastbilder der 80 kV-Leitung
(System A der Fig. 2).
a) Mastbild der Strecke Gösgen-Bo,
b) » » » » Bo-D-P,
b, g, r Phasenbezeichnungen («blau»,
«grün», «rot».)
E = Erdseil.

G normalerweise zwei Transformatoren von zusammen ca. 22 000 kVA angeschlossen, deren Nullpunkte frei sind. Eine Erdung besteht in *G* nur über die drei Erdungsspannungswandler. Dagegen ist in Frankreich, hinter dem Punkt *P*, ein Transformator nullpunkt über einen kleinen Widerstand, der zu total ca. 12 Ω angegeben wurde, geerdet.

Das System *B* der Fig. 3 besteht aus einer auf Holzstangen verlegten 50 kV-Leitung, die im Unterwerk *Ra* offen endet und durch *G* hindurchführt, ohne die dortigen Hauptsammelschienen zu berühren. Im Werk *L* wurde die Leitung von den dortigen Hauptschienen aus unter Spannung gehalten. Diese Leitung *Ra-G-L* ist mit Stützisolatoren mit ca. 100 kV Ueberschlagsspannung in trockenem Zustand und unter Regen ausgerüstet und ohne Verwendung eines Erdseiles gebaut. Auf demselben Gestänge befindet sich oberhalb noch eine zweite 50 kV-Leitung, welche die Hauptschienen der Werke *L* und *G* verbindet. Während der Messperiode 1932 waren in *G* sämtliche Transformatoren auf ihrer Unterspannungsseite gekuppelt, so dass die beobachteten 80 kV- und 50 kV-Netze durch die Vermaschung in *L* synchrone Spannung aufweisen.

Die an R_2C_2 (Fig. 2) auftretende Spannung entspricht der geometrischen Addition der Spannungsteilerströme aus C_1R_1 und C_3R_3 . Die Phasenverschiebung der Systeme *A* und *B* betrug 30°. Die vom *KO* registrierte Teilspannung an R_2C_2 entspricht deshalb einer aus beiden Spannungsteilungen resultierenden Ersatz-Betriebsspannung von $80/\sqrt{3} + 50/\sqrt{3} \cdot \sqrt{3}/2 = 71 \text{ kV}_{eff}$; da die Be-

³⁾ Bull. SEV 1914, S. 53.

triebsspannungen etwas höher als die Nennspannungen sind, wird im folgenden anstelle des Nennwertes (71 kV) entsprechend den Messungen der Betriebswert $74 \text{ kV}_{eff} \cong 105 \text{ kV}_m$ verwendet. Dieser Spannung entspricht die Amplitude der 50 Perioden-Linie der Oszillogramme im Normalbetrieb. Das 50 kV-Netz besitzt Nullpunktserdung über eine an den Hauptschienen in *G* angeschlossene Löschspeule, die den Erdschlußstrom des 50 kV-Netzes fast restlos kompensiert.

Im Jahre 1933 war die soeben beschriebene 50 kV-Leitung nicht mehr zur Messung verfügbar. An ihre Stelle trat die schon in den Vorjahren beobachtete 132 kV-Einphasen-Uebertragungsleitung der SBB. Dies war möglich, weil diese Leitung in wenigen Kilometer Entfernung vom Kraftwerk *G* vorbeiführt und weil ausserdem durch einen günstigen Zufall eine Verbindungsmöglichkeit der Leitung nach dem ungefähr 500 m vom Messort Gösgen entfernten Freiluft-Unterwerk der Schweizerischen Kraftübertragungs A.-G. (SK) bestand.

Die Lage der im Sommer 1933 zu den Messungen herangezogenen Leitungen ist in Fig. 5 dargestellt. Von der 132 kV-Einphasen-Doppelleitung bis zur SK-Station bei *G* wurde ein 2,5 km langer Abzweig geschaffen, der die Spannung von dreien der vier SBB-Leiter nach der SK-Station bringt. Dort wurden die Spannungsteilungen aufgestellt und die Meßspannung über ein ca. 500 m langes Verbindungskabel zu den *KO* geführt. Auf diese Weise war es möglich, das von der Messung erfasste Einzugsgebiet atmosphärischer Leitungsüberspannun-

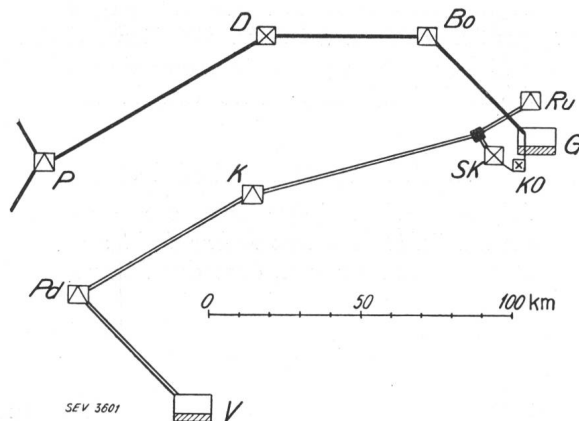


Fig. 5.
Lageplan der im Jahre 1933 beobachteten Netze.
— System A der Fig. 6 (80 kV).
- - - » B » » 6 (132 kV).

gen wesentlich zu vergrößern. Dafür sind wir besonders der Abteilung für Elektrifizierung der SBB, der Schweizerischen Kraftübertragungs A.-G. und für die Zurverfügungstellung des Verbindungskabels der Kabelwerke Brugg A.-G. zu grossem Dank verpflichtet.

Die räumliche Entfernung der Spannungsteilungen beider Netze (80 und 132 kV) im Sommer 1933 bewirkte, dass die Meßschaltung nach Fig. 2 nicht mehr brauchbar war; sie wurde für 1933 durch das

Schema Fig. 6 ersetzt. Um zu wissen, welchem System, A oder B, eine Oszillogramm-Aufzeichnung zuzuschreiben war, wurde in der Auslöseleitung zwischen der Ankopplung von A und B und dem Zeitrelais der KO ein Signal-Zwischenrelais eingebaut, das mittels zweier durch Funkenstrecken gesteuerter Glockensignale die Herkunft der Sprungwellen

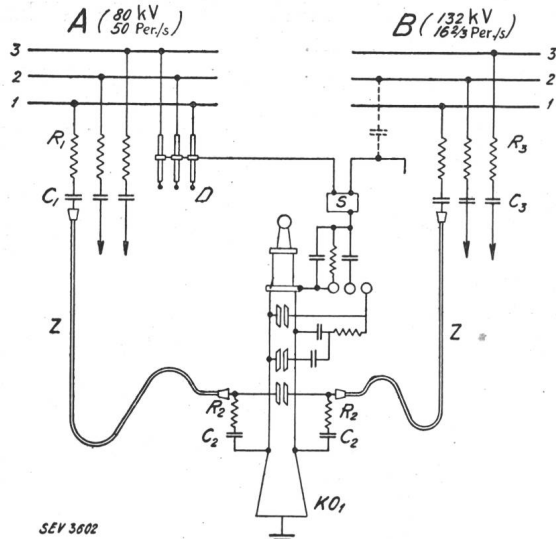


Fig. 6.

Schema des Anschlusses der Kathodenstrahloszillographen im Jahre 1933.

System A: Kopfstation einer 80 kV-Leitung, wie 1932.
System B: Abzweig von einer 132 kV-Leitung, nach Fig. 5.

anzeigt. Uebersies macht sich ein Erdschluss des Systems A im Oszillogramm dadurch bemerkbar, dass der 50 Perioden-Anteil der Normalspannung in der gestörten Phase wegfällt. Ein Erdschluss des Systems B bewirkt in gleicher Weise den Wegfall der $16\frac{2}{3}$ Perioden-Komponente der Normalspannung.

2. Oszillogrammbeispiele.

Im folgenden sind einige Beispiele von Oszillogrammen zunächst aus dem Jahre 1932 angeführt. Dazu ist zunächst zu sagen, dass der Sommer 1932 für das beobachtete Einzugsgebiet ganz ausserordentlich arm an Gewitterstörungen war. Die meisten in G sichtbaren Gewitter waren lokaler Art und entluden sich im Osten der Gegend, ohne die zur Messung angeschlossenen Leitungen stark zu beeinflussen. Dagegen scheint die Gewittertätigkeit im Elsass und im angeschlossenen ostfranzösischen Netz lebhafter gewesen zu sein. Auf der Strecke zwischen G und dem Unterwerk Bo wurde keine einzige Blitzstörung wahrgenommen, ebensowenig auf dem beobachteten 50 kV-Netz L-G-Ra (Fig. 3). Auch im Kraftwerk G selber wurde über den ganzen Sommer 1932 kein einziger Ueberschlag konstatiert, der auf Ueberspannungen hätte schliessen lassen.

Die Oszillogramme betreffen deshalb entweder Erdschlüsse, die in grosser Entfernung von G durch Blitze entstanden, und die durch das Fallen von Erdschluss-Klappen oder im 80 kV-Netz infolge der

Nullpunktserdung in Frankreich durch den entstehenden leichten Kurzschluss erkennbar wurden. Im 50 kV-Netz besteht ueberdies eine Registriervorrichtung des Löserspulenstromes.

Zu solchen fernen Störungen gehören die Oszillogramme der Fig. 7 bis 12. Die Oszillogramme sind aus Ersparnisgründen nachgezeichnet worden. Bevor wir auf ihre inhaltliche Besprechung eingehen, ist noch eine allgemeine Bemerkung nötig.

Die Oszillogramme stellen in gleicher Weise wie in den Vorjahren den Verlauf der Spannung der drei Phasen gegen Erde in zwei verschiedenen Zeitmaßstäben dar:

Der erste kurze Zeitabschnitt nach erfolgter Auslösung des Oszillogrammes, das heisst vom Beginn des Zuckens der Momentanspannung an, wird vom Kathodenstrahl beim Ueberstreichen der Zeitachse von links nach rechts angezeichnet. Das damit erfasste Zeitintervall ist kurz; es beträgt hier ca. 200 μ s. Am rechten Rand des Oszillogrammes angelangt, kehrt der Strahl seine Bewegungsrichtung um; das heisst, er schreibt das anschliessende Zeitintervall bei seiner Rückkehr in die Anfangslage von rechts nach links zunächst weiter auf. Dieser zweite Zeitmaßstab ist sehr viel größer gewählt, so dass bei dieser Rückkehr sogar einige Halbwellen der Frequenz 50 bzw. $16\frac{2}{3}$ sichtbar aufgezeichnet werden. Nachdem der Strahl über etwa $\frac{1}{3}$ der Oszillogrammbreite sichtbar zurückgekehrt ist, wird er von der Sperrung vom aufnehmenden Film weggesperrt, so dass die weitere Strahlrückwärtsbewegung bis zu seiner Ruhelage unsichtbar wird. Damit ist bezweckt, das Anfangszeitintervall möglichst ausführlich niederzuschreiben, so dass das Wellenhafte der Ueberspannungen, ihre Form und womöglich ihre Frontsteilheit sichtbar werden. Das anschliessende Zeitintervall einiger Hundertstel Sekunden dagegen hat Interesse, weil daraus erst ersehen werden kann, wie die von den Maschinen erzeugte Betriebsspannung auf die atmosphärischen Einwirkungen reagiert hat. Die Anwendung der zwei verschiedenen Zeitmaßstäbe auf den Oszillogrammen bedingt natürlich zwei stark verschiedene Strichhelligkeiten und damit Schönheitsfehler; sie erspart uns aber eine zweite Gruppe von Oszillographen⁴⁾. Der grobe Zeitmaßstab des Strahlrücklaufes ist in den Oszillogrammen nicht angeschrieben, da er sich aus den halben Perioden der Frequenz 50 oder $16\frac{2}{3}$ ohne weiteres ergibt. Die Zeitskala ist sowohl bei Strahlhin- und -rücklauf nicht linear, sondern ungefähr logarithmisch.

Wir kehren nun zu den Fig. 7 bis 12 zurück. Zunächst ist daraus allgemein ersichtlich, dass wellenartige Spannungen nennenswerter Höhe in keinem der gezeigten Fälle entstanden sind.

Im Moment der Aufnahme der Fig. 7 vom 13. Juli, 15.55 Uhr, wurde das Fallen einer Erdschlussklappe des 50 kV-Netzes konstatiert. Das Oszillogramm zeigt praktisch keine wellenartige Ueberspannung, dagegen einen Erdschluss der Phase «grün» mit Erhöhung der Spannung in den Phasen «rot» und «blau». Dessen Dauer beträgt nur ca. $\frac{1}{100}$ s; dann bilden sich bereits wieder die normalen Spannungen gegen Erde. Dieser Fall stellt einen sogenannten «Wischer» dar, das heisst einen sehr rasch vorübergehenden Erdschluss, der vermutlich von der Löserspule sofort gelöscht wird. Seine Lage ist nicht bekannt; das Gewitter befand sich zu jener Zeit in der Gegend von Re (Fig. 3).

Fig. 8 wurde während eines Gewitters am 13. Juli, 18.18 Uhr, in der Gegend von Bo-D-Re (Fig. 3) aufgenommen. Begleiterscheinung war das

⁴⁾ E. Bell und A. Price, Lightning Investigation, J. Amer. Instn. electr. Engr. 1931.

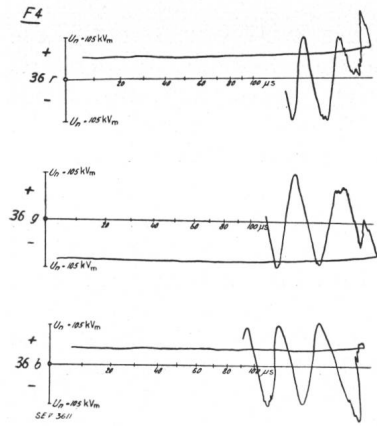


Fig. 7.

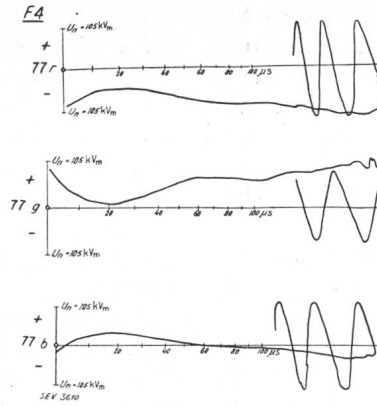


Fig. 8.

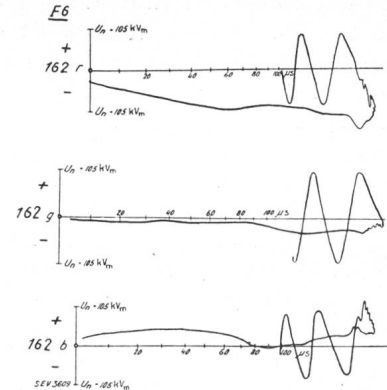


Fig. 9.

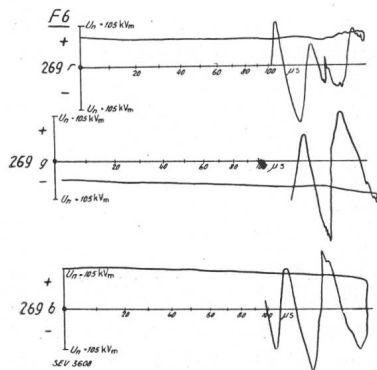


Fig. 10.

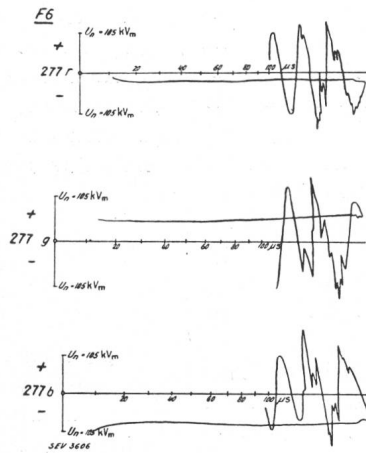


Fig. 11.

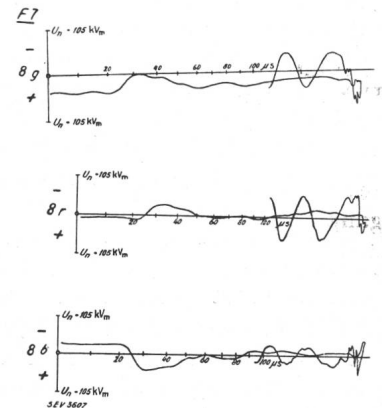


Fig. 12.

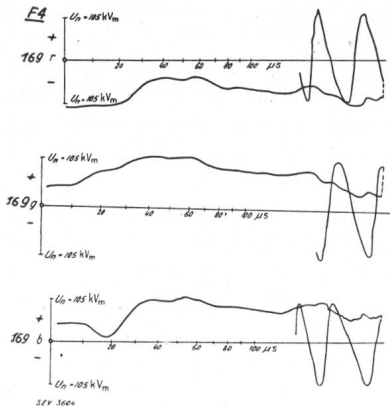


Fig. 13.

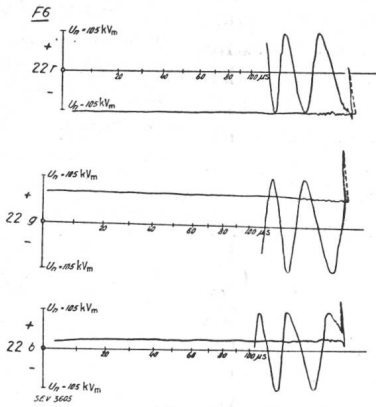


Fig. 14.

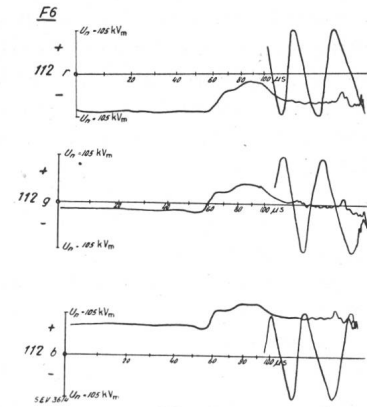


Fig. 15.

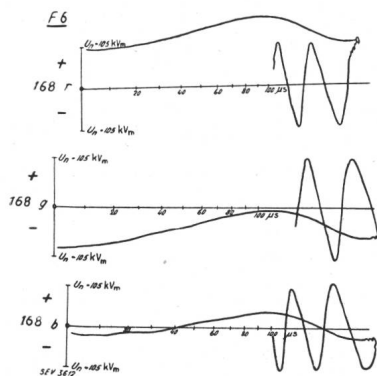


Fig. 16.

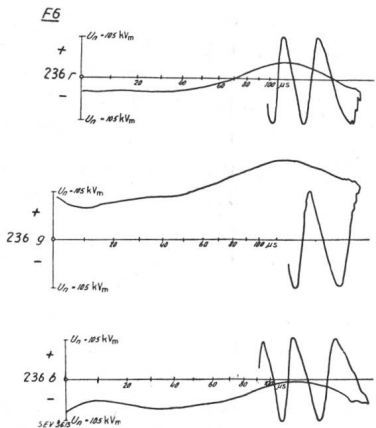


Fig. 17.

Oszillogramm-Beispiele aus d. Jahre 1932.

b, g, r Phasenbezeichnungen («blau», «grün», «rot»).

Zeitmaßstab: Von links nach rechts nach Anschrift, von rechts nach links aus der Sinuslinie mit Frequenz 50 zu messen.

Spannungsmaßstab: Die Spannung im Normalbetrieb der Versuchsnetze $U_n = 74 \text{ kV}_e = 105 \text{ kV}_m$ folgt als geometrische Summe der Phasenspannungen des 80- und 50 kV-Systems.

Fallen einer Erdschlussklappe des 80 kV-Betriebes in G. Die Phase «grün» weist während der aufgezzeichneten vier Halbperioden zu kleine Spannung auf. Vorangehend weist diese Phase eine umgekehrt polarisierte Welle auf, wie die beiden Phasen «rot» und «blau». Schalterauslösungen traten nicht auf; vermutlich löschte der Erdschluss von selber.

Fig. 9 vom 22. August, 00.37 Uhr, entspricht ebenfalls dem Fallen der Erdschlussklappen des 80 kV-Betriebes. Die Spannung der Phase «rot» ist etwas reduziert. Die Störungsstelle ist nicht bekannt.

Fig. 10 vom 27. August, 22.29 Uhr, gehört zu einer kurzschlussartigen Schwankung des 80 kV-Betriebes infolge einer Blitzstörung in Frankreich hinter D (Fig. 3). Phase «rot» zeigt einen vorübergehenden Erdschluss; die beiden andern Phasen «grün» und «blau» eine entsprechende Spannungserhöhung gegen Erde, ohne dass vorangehende Ueberspannungen ersichtlich waren.

Fig. 11 vom 27. August, 23.43 Uhr, entstand $\frac{5}{4}$ Stunden nach Fig. 10 durch eine weitere Blitzstörung in Frankreich, welche einen Belastungsrückgang in G zur Folge hatte. Das Oszillogramm zeigt deutliche Zacken, wie sie als Folge eines Lichtbogens entstehen. Eine vorangehende Ueberspannungswelle ist nicht ersichtlich.

Fig. 12 entstand am 30. August, 15.49 Uhr, ebenfalls bei einem Gewitter in Frankreich, westlich von D (Fig. 3). Die Erdschlussklappe des 80 kV-Betriebes fiel. Phase «blau» zeigt gegenüber den Phasen «rot» und «grün» reduzierte Spannung und vorangehend eine umgekehrt polarisierte Spannungswelle. Zu diesem Oszillogramm ist noch zu bemerken, dass im Zeitpunkt der Aufnahme die beiden beobachteten Netze A (80 kV) und B (50 kV) nicht synchron liefen, so dass die resultierende Sinus-Spannung mit dem Schlupf variiert. Sie ist im Moment des Oszillogrammes (Fig. 12) kleiner als die synchrone Spannung der vorhergehenden Bilder.

Aus allen bisher gezeigten Oszillogrammbeispielen ist ersichtlich, dass in G als Folge der sehr weit entfernten Gewitterstörungen (um solche handelt es sich bei den gezeigten Figuren stets) keine praktisch nennenswerten Ueberspannungen nachgewiesen werden konnten, auch dann nicht, wenn mit der Störung das Fallen der Erdschlussklappen verbunden war. Diese Erfahrung deckt sich ganz mit derjenigen der Vorjahre: Blitzeinschläge in die unverzweigte 80 kV-Leitung in mehr als 100 km Entfernung vom Leitungsende G sind bezüglich Ueberspannungen absolut gefahrlos. Die Dämpfung der Ueberspannungen längs der Leitung spielt eine grosse praktische Rolle.

Weitere fünf Figuren sollen Beispiele für die indirekten Blitzwirkungen sein.

Fig. 13 vom 15. Juli, 14.22 Uhr, stammt von einer Gewittereinwirkung auf die beobachtete 50 kV-Leitung (Fig. 3). Zugleich fielen die Erdschlussklappen der von G ausgehenden 8 kV-Leitungen. Das Gewitter befand sich über der Leitung G-L.

Fig. 14 vom 1. August, 13.47 Uhr, zeigt, gerade bei der Umkehr des Kathodenstrahls, in allen drei Phasen eine beträchtliche Spannungswelle infolge eines nahen Gewitters in der Gegend von G. Alle drei Phasen erleiden ungefähr gleich grosse Spannungsüberlagerung.

Fig. 15 vom 13. August, 21.47 Uhr, ist ebenfalls die Folge einer Blitzeinwirkung in unmittelbarer Nähe von G, die alle drei Phasen fast gleich stark trifft.

Fig. 16 vom 22. August, 00.48 Uhr, zeigt eine sehr flache Welle auf der 80 kV-Leitung als Folge eines Gewitters in Frankreich, hinter D (Fig. 3). Das gleiche gilt für Fig. 17 vom 27. August, 20.17 Uhr.

In den letzten fünf Fällen war eine Beeinflussung des Betriebes nicht festzustellen. Die Ueberspannungen blieben stets genügend klein, um keine Erdschlüsse entstehen zu lassen. Die Steilheit der gemessenen indirekten Blitzüberspannungen erreichte Werte von:

75 kV in 12 μ s	bei Fig. 13
70 » » 12 »	» » 8
45 » » 6 »	» » 15
65 » » 8 »	» » 12
80 » » 100 »	» » 16
75 » » 70 »	» » 17

Das macht mit Rücksicht auf Reflexion am Leitungsende der 80 kV-Leitung höchstens ca. 4 kV/ μ s bei einer mittleren Leitungshöhe von ca. 10 m über Boden, oder 0,4 kV/ μ s · m als Feldänderungsgeschwindigkeit pro Meter Höhe über dem Boden.

Diese Werte sind naturgemäss am Entstehungsort der Ueberspannungswellen beim Blitzort höher, da beim Durchlaufen der Leitung eine Verflachung eintritt. Als Folge muss jedenfalls bei indirekten Wellen in Uebereinstimmung mit früheren Messungen mit einer möglichen Wellensteilheit von ca. 4 kV/ μ s bzw. von ca. 8 kV/ μ s in Kopfstationen gerechnet werden.

Was sodann die *Gewittereinwirkungen des Sommers 1933* anbetrifft, so ist zu sagen, dass auch dieses Jahr im ganzen als gewitterarm zu bezeichnen war und dass wie im Vorjahr sich fast alle Gewitter örtlich sehr begrenzt auswirkten. Im Gegensatz zu 1932 hatten wir aber das «Glück», ein solches lokales Gewitter in der Gegend zwischen Solothurn und Aarau, also in nächster Nähe von G, sich auswirken zu sehen. Dieses Gewitter vom 7. Juli war überdies von einer ausserordentlichen Heftigkeit und elektrisch sehr wirksam, da sehr viele Blitze den Erdboden erreichten («Bodengewitter»).

Dieses eine Gewitter brachte über 400 oszillographische Aufnahmen pro registrierte Phase mit sich, die innert einer Dauer von ca. zehn Stunden aufgezeichnet wurden.

Wir führen nachstehend die interessantesten Oszillogrammbeispiele des Sommers 1933 an:

Fig. 18 vom 24. Mai, 21.39 h, zeigt mit aussergewöhnlicher Deutlichkeit, wie sich eine Blitzstörung im 80 kV-Teil des Kraftwerkes G entwickelte. Nachdem der ganze Spätnachmittag im Osten

Frankreichs und in einzelnen Gegenden der Schweiz mässige Gewitter gebracht hatte, traten von 20 bis 21 h an westlich G mehrere kräftige Blitzschläge auf, wovon einer um 20.29 h ausserordentlich lang rötlich nachleuchtete und das Aussehen einer Perlschnur hatte. Bald darauf begann der Regen. Dieses Gewitter zog ziemlich rasch gegen Osten und befand sich um 21 h bereits östlich von G. Offenbar folgte von Westen her ein neues Gewitter, denn die Auslösungen der KO setzten sich fort, wobei mehrere grössere induzierte Spannungen aufgezeichnet wurden. 21.39 h erfolgte ein Kurzschluss infolge von Ueberschlägen an einem der beiden 80 kV-Transformatoren des Kraftwerkes Gösigen und einem zugehörigen 80 kV-Schaltepol. Zu dieser Störung gehört das Oszillogramm Fig. 18.

Die drei untereinander kopierten Spannungskurven entsprechen dem Spannungsverlauf in den drei Leitungsphasen «grün» (oben), «rot» (Mitte) und «blau» (unten).

Die Besichtigung der Kurzschlußspuren ergab folgendes: Am Transformator wies die herausgeführte, offene Nullpunktsklemme samt der benachbarten Klemme und Transformatoranzuleitung der Phase «grün» starke Lichtbogenspuren auf. Die Ueberschlagsentfernung beider Klemmen beträgt 57 cm, die Ueberschlagsdistanz der Phase «grün» gegen Eisen ca. 53 cm. Ebenso war der Deckel des Transformators angeschmort. Weitere, davon getrennte Brandspuren fanden sich auf dem Schaltepol der Phase «rot», etwa 10 m vor dem Transformator, wo ein Ueberschlag über ca. 53 cm Schlagweite nach dem geerdeten Schalterkessel stattgefunden hatte.

Betrachten wir nun das Oszillogramm, so können wir den Vorgang wie folgt verstehen: Die Spannung steigt zunächst in allen drei Phasen gegen die positive Seite an, wenn von einem anfänglichen Hügel in Phase «blau» abgesehen wird. Im Zeitpunkt $t_1 = 52 \mu\text{s}$ zuckt die Spannung aller drei Phasen, und es folgt darauf ein Rückgang der Spannung «grün». Dieser Rückgang erfolgt interessanterweise nicht plötzlich, sondern mit einer Zeitkonstanten von ca. $20 \mu\text{s}$. Immerhin sinkt die Spannung «grün» von ihrem Maximalwert von ca. 200 kV_m jetzt rascher zusammen, als sie vorher angestiegen ist. In den andern beiden Phasen «rot» und «blau» steigt die Spannung vom Moment $t_1 = 52 \mu\text{s}$ an rascher als vorher. Sie erreicht besonders in Phase «rot» hohe Werte (ca. 275 kV_m) gegen Erde, so dass schliesslich im Zeitpunkt $t_2 = 95 \mu\text{s}$ ein Ueberschlag dieser Phase nach Erde auftritt. Der von der gegenseitigen Phasenkapazität bedingte Spannungssprung der andern beiden Phasen «grün» und «blau» bei $t_2 = 95 \mu\text{s}$ ist deutlich ersichtlich. Von hier an beginnt der Ausgleich der Spannungen gegen Erde. Das Einschwingen des Netzes in den Erdschlusszustand «rot» mit Phasenkurzschluss «grün» bewirkt die am rechten Ende der Zeitachse sichtbaren Netzausgleichsschwingungen. Nach deren Abklingen bleiben die dem Kurzschluss ent-

sprechenden 50periodigen Spannungen bestehen. Diese sind sehr ungleich: In Phase «grün» kleiner als im Normalbetrieb (Phasenkurzschluss auf dem Transformator), in Phase «rot» gleich Null (Erdschluss auf dem Schaltepol), und in Phase «blau» grösser als im Normalbetrieb (infolge des Erdschlusses «rot» und der unvollständigen und sehr weit entfernten Nullpunktserdung).

Die Erdschlussklappen der Phase «rot» fielen in G. Während der Oszillogrammaufzeichnung bestand nur in Phase «rot» Erdschluss, auch auf der Leitung besteht in «grün» und «blau» kein Erdschluss, jedenfalls nicht in der Nähe von G. Die Blitzüberspannung hat sich demnach ausschliesslich im Werk G ausgewirkt. Leider ist die genaue Lage des Gewitterherdes in jenem Zeitpunkt nicht bekannt.

Fig. 19 vom 25. Mai, 16.16 h, ist aufgenommen im Moment einer Ueberspannungsstörung in dem aus der 50 kV-Leitung G-Bo gespiesenen Unterwerk Li (Fig. 3). Dargestellt sind wieder die Spannungen der drei Phasen des 80 kV-Netzes gegen Erde. Die Aufnahmen sind deshalb interessant, weil in 80 kV im gleichen Moment keine Störung aufgetreten ist. Dagegen sind in allen drei Phasen der 80 kV-Leitung Ueberspannungswellen mit annähernd gleicher Form ersichtlich. Ob sie durch indirekte Blitzeinwirkungen oder durch Influenz von der gestörten 50 kV-Leitung des gleichen Gestänges herkommen, lässt sich nicht sagen. Bei den Fig. 18 und 19 war nur das 80 kV-Netz A (Fig. 5) zur Messung angeschlossen. Bei den folgenden Aufnahmen sind zugleich A und B (80 und 132 kV, 50 und $16\frac{2}{3}$ Per./s) registriert.

Fig. 20 vom 15. Juni, 14.03 h, gehört zu einem Gewitter über der Leitung Bo-D-P (Fig. 5). An allen drei Phasen der 80 kV-Leitung zeigt sich eine sehr flache Ueberspannungswelle beträchtlicher Höhe. Die Spannung ist immerhin zu klein, um zu einem Ueberschlag zu führen. Eine Betriebsstörung tritt nicht auf.

Fig. 21 vom 15. Juni, 14.05 h, entstand zwei Minuten nach dem letzten Oszillogramm. Gleichzeitig wurde im 80 kV-Schaltheus starkes Zischen wahrgenommen und unmittelbar darauf ein Kurzschluss mit Ueberschlag am 80 kV-Transformatorschalter in Phase «grün».

Vergleichen wir damit das Oszillogramm. Zunächst bemerken wir, dass ein Erdschluss während der Niederschrift des Oszillogrammes nicht vorgekommen ist.

Dagegen tritt etwa 0,03 s nach der im Detail-Zeitmaßstab aufgezeichneten flachen Welle plötzlich nochmals eine zweite Spannungsspitze auf. Wegen des gedrängten Zeitmaßstabes erscheint sie als eine Parallele zur Spannungsachse. Ihre Dauer beträgt jedenfalls weniger als $\frac{1}{10}$ einer 50 Perioden-Halbwelle, das heisst weniger als $1000 \mu\text{s}$. Der Strichhelligkeit nach zu schliessen besitzt sie ähnliche Dauer (ca. $200 \mu\text{s}$) wie die beim Vorwärtsgang des Strahles im grossen Zeitmaßstab aufge-

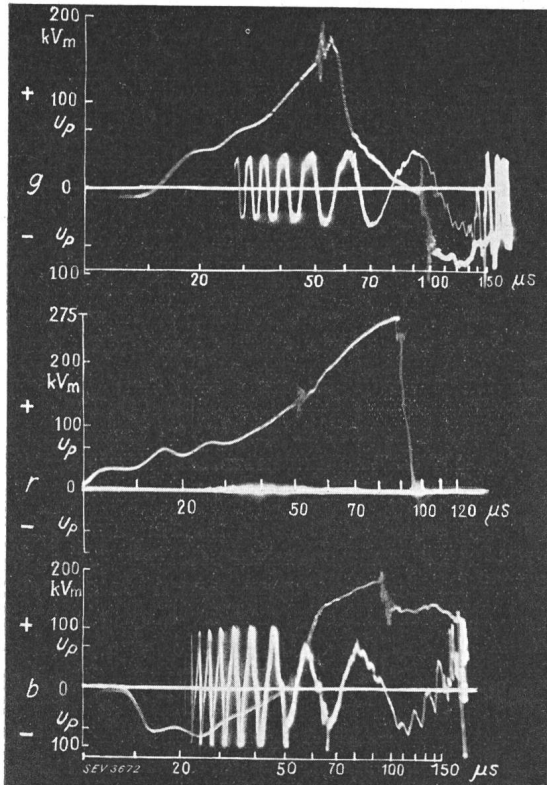


Fig. 18.

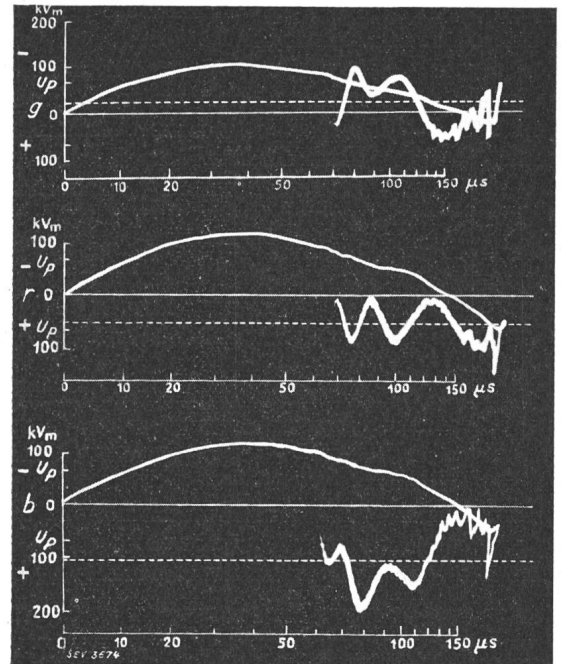


Fig. 20.

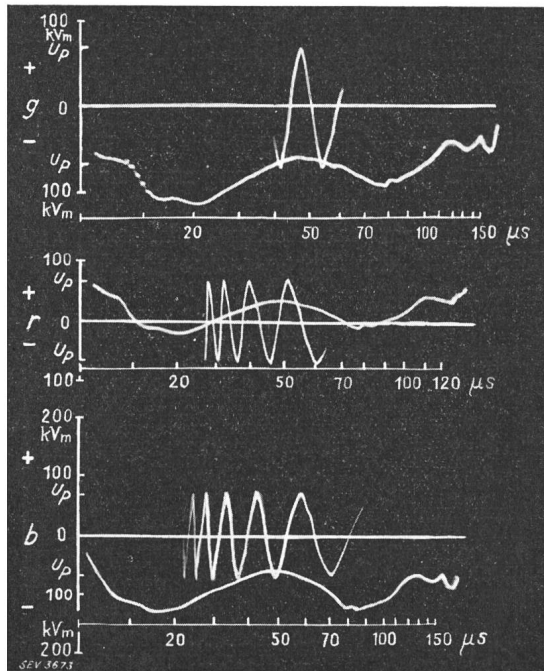


Fig. 19.

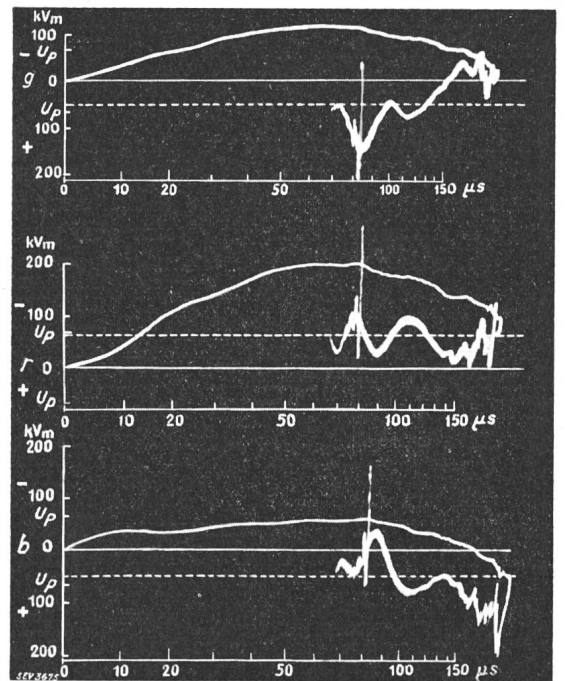


Fig. 21.

Fig. 18 bis 23 und 25 bis 27.
Oszillogrammbeispiele aus dem Jahre 1933.

Fig. 18 und 19: Nur System A (Fig. 5) zur Messung angeschlossen.
 Fig. 20 bis 23 und 25 bis 27: Beide Systeme A und B (Fig. 5) angeschlossen.
 Zeitmaßstab: Von links nach rechts nach Anschrift, von rechts nach links aus der 50- und 16%-Per./s-Linie zu messen.
 Spannungsmaßstab: Die Abweichung vom Momentanwert der Betriebsspannung ist von der ausgezogenen Nulllinie an zu zählen; die gestrichelte Parallele ist die Nulllinie der Betriebsspannungen der Frequenzen 50 und 16%.
 Mit U_p ist die Phasenspannung im Normalbetrieb des betroffenen Netzes bezeichnet.

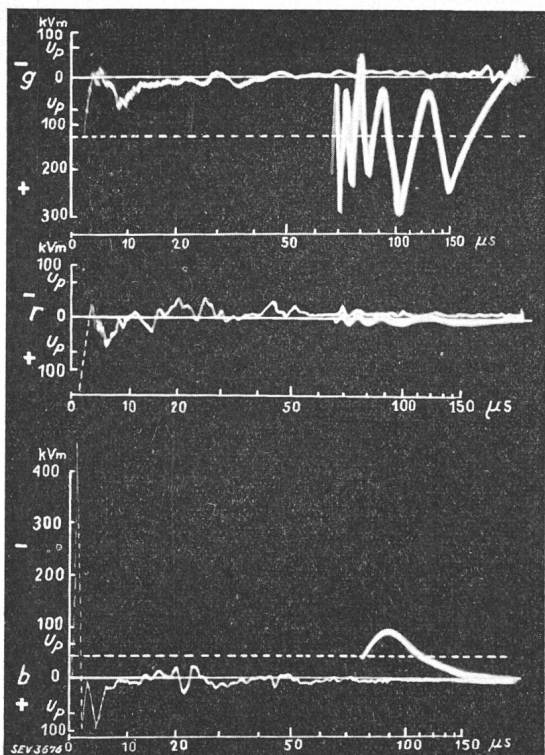


Fig. 22.

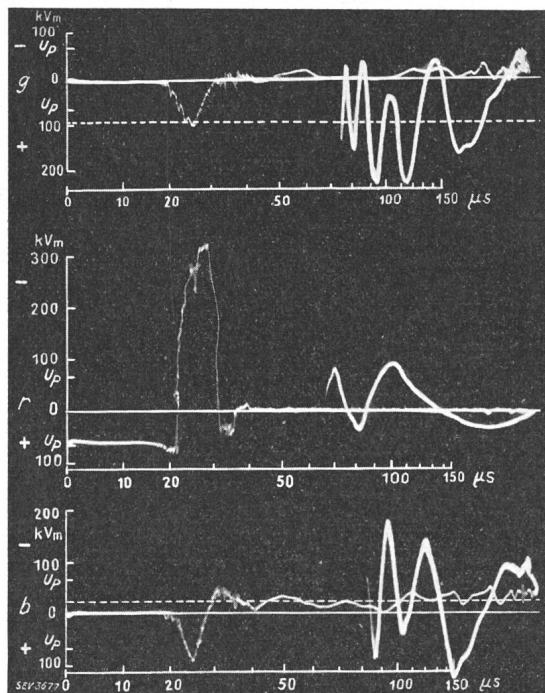


Fig. 23.

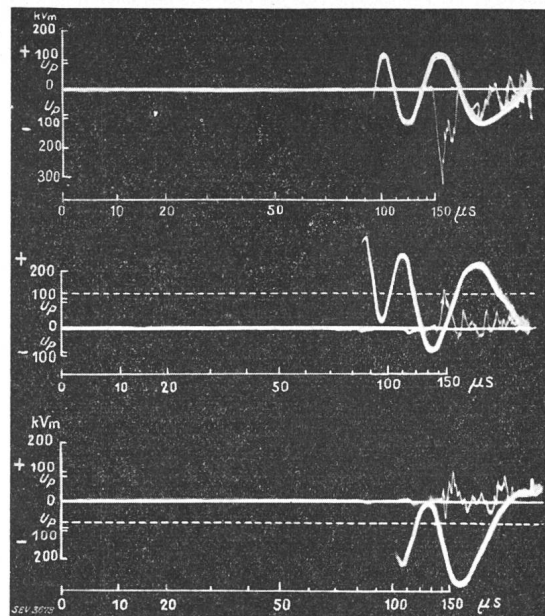


Fig. 25.

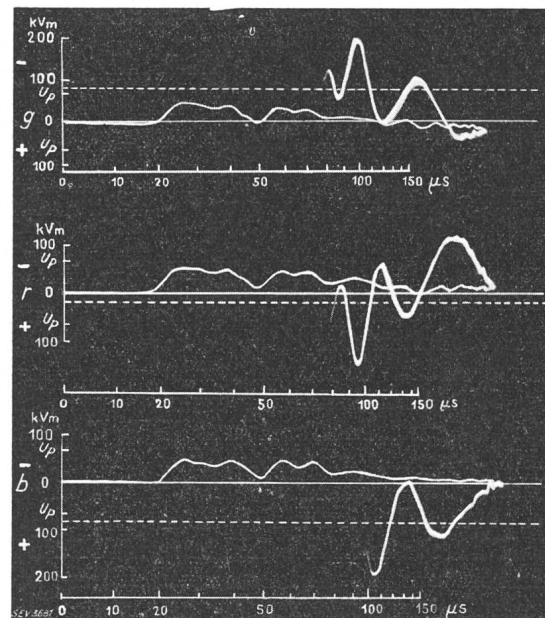


Fig. 26.

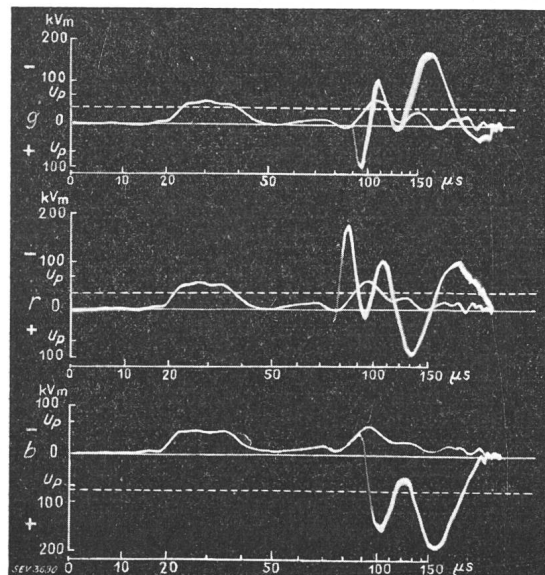


Fig. 27.

Fortsetzung der Legende Seite 220.

Fig. 18 bis 23 und 26 bis 27: die oberste Kurve ist aufgenommen in Phase *g* («grün»), die zweite in Phase *r* («rot»), die dritte in Phase *b* («blau») des 80 kV-Netzes.

Fig. 25: erste Kurve: Phase *A_v*
 zweite » » *B_u*
 dritte » » *A_u*

des 132 kV-Netzes. (Bezeichnungen nach Bull. SEV 1932, Nr. 12, S. 292, Fig. 3.)

zeichnete Ueberspannungswelle⁵⁾. Auch diese Ueberspannungsspitze führt aber noch nicht zum Erdschluss in G, trotzdem ihre Spannung schon wesentlich höher ist als die der ersten Welle. Das Oszillogramm zeigt ausserordentlich deutlich die Einwirkung einer Aufeinanderfolge von Teilblitzen auf die Hochspannungsleitung. Solche sind bereits bei den Aufnahmen des Jahres 1928 nachgewiesen, wenn auch nicht in der hier gezeigten Ueberspannungshöhe. Vermutlich hat ein weiterer Teilblitz eine dritte Ueberspannungswelle erzeugt, die dann zum Ueberschlag in G. ausgereicht hat. Verständlich ist auch das vom Schaltwärter gehörte starke Zischen, das diesem Kurzschluss voranging. Von den Versuchen mit Stossgeneratoren her weiss man, dass rasche Spannungsstöße solcher Höhe an Isolatoren sehr gut hörbar sind infolge der raschen Bildung von Glimm- und Gleitfunken an Leitern und Isolatoren. Der vom Gewitter der Betriebsspannung überlagerte flache Spannungsstoss erreicht in der Kopfstation G in der Phase «rot» rund 200 kV_m , die Wellenamplitude war also rund 100 kV_m .

Fig. 22 vom 16. Juni, 14.54 h, zeigt im Gegensatz zu den vorigen Oszillogrammen die Einwirkung eines direkten Blitzeinschlages in einen Gittermast der 80- und 50 kV-Leitungen G-Bo (Fig. 5), in ca. 3,5 km Entfernung vom Werk G. Am Mast überschlugen alle drei Phasen der 50 kV-Leitung, ferner die Phase «rot» und eventuell «blau» der 80 kV-Leitung. Die Mastfunkenstrecke des betroffenen Mastes sprach an, siehe Tabelle I. Im Kraftwerk G überschlugen zwei Durchführungen des 80 kV-Schalterpoles «blau» eines speisenden Transformators. Im Oszillogramm ist infolge eines defekten Silitwiderstandes das erste Zeitintervall nicht deutlich gezeichnet, so dass es durch die gestrichelte Linie verstärkt werden musste. Doch ist in der Phase «blau» deutlich eine Spannungsspitze von ca. 450 kV_m mit nachfolgendem Ueberschlag nach Erde zu sehen. Die andern zwei Phasen zeigen kleinere positive Anfangsspitzen; Phase «rot» hat wenig Spannung gegen Erde infolge des Erdschlusses beim blitzbetroffenen Mast. Da zugleich die entsprechende Phase des 132 kV-Betriebes spannungslos war, zeichnet der Kathodenstrahl beim Rückgang die Nulllinie bzw. Lichtbogenspannung auf, während in Phase «blau» nur die $16\frac{2}{3}$ periodige Spannung bestehen bleibt. Phase «grün» zeigt infolge des Erdschlusses in «rot» und «blau» erhöhte 50-Perioden-Spannung gegen Erde. Das Oszillogramm bildet ein Beispiel für einen Rücküberschlag infolge Blitzeinschlages in einen nahen Eisenmast. Die beiden Transformatoren hielten die Windungsbeanspruchung ohne jeden Schaden aus.

Es folgen nun noch einige Figuren vom Gewittertag des 7. Juli.

⁵⁾ Daraus ist der enorme (ca. 1000fache) Unterschied der beiden Zeitmaßstäbe links-rechts und rechts-links der Oszillogramme drastisch ersichtlich: Im weit ausgezogenen links-rechts-Zeitmaßstab erscheint eine Welle als flacher Hügel, im gedrängten rechts-links-Maßstab als scharfe Spitze auf der Betriebsspannung.

Fig. 23 vom 7. Juli, 17.34 h, gehört zu einem Blitzeinschlag in die Leitung G-Bo (Fig. 5), sehr wahrscheinlich bei Mast 45 (Sissach) in 9,4 km vom Werk G. In jener Gegend wurde um die gleiche Zeit ein Haus vom Blitz getroffen und beschädigt. Mast 45 wies am folgenden Tag ein beschädigtes Betonfundament auf, wie das hin und wieder bei Blitzeinschlägen vorkommt. Fig. 24 zeigt eine Ansicht des Mastfusses. Seile und Isolatoren wiesen dagegen an diesem Mast keine Beschädigungen auf. Im Kraftwerk G wurden am Abend dieses Tages die Spannungswandlersicherungen der Phase «rot» zweimal zerstört; auch liessen

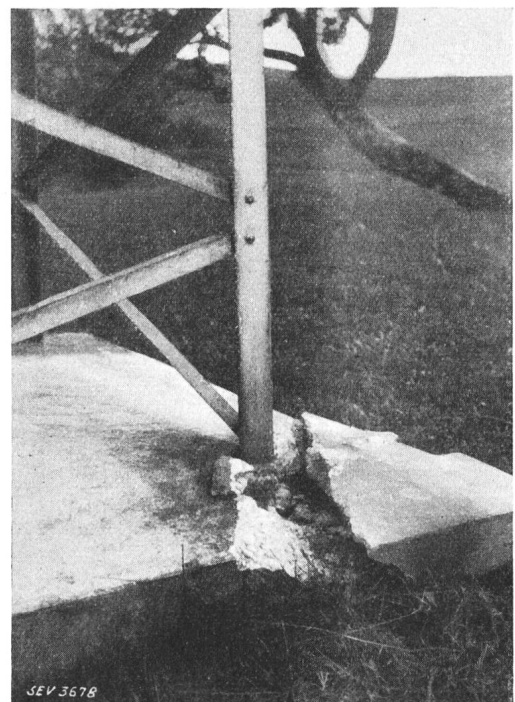


Fig. 24.
Vom Blitz beschädigter Beton-Mastsockel, zu Oszillogramm Fig. 23.

sich nachher deutlich die Spuren zweier Ueberschläge an den Spannungswandlerdurchführungen der Phase «rot» feststellen.

Das Oszillogramm zeigt nach anfänglich unbedeutenden Spannungsvariationen einen plötzlichen Hochsprung in Phase «rot», mit anschliessendem Erdschluss dieser Phase; im Oszillogramm ist nur noch $16\frac{2}{3}$ -Perioden-Spannung ersichtlich. Die beiden andern Phasen zeigen den aus unsern frühern Blitzmessungen bekannten, umgekehrt polarisierten Spannungswellenkopf und nachher, da sie keinen Erdschluss erlitten, erhöhte Betriebsspannung gegen Erde. Die gesamte Ueberspannungsdauer in Phase «rot» ist $10 \mu\text{s}$ lang; die Ueberspannung erreicht rund 300 kV_m . Die auftretende Steilheit erreicht annähernd $1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

Fig. 25 vom 7. Juli, 19.05 h, betrifft eine Blitzstörung der 132 kV-Leitung der SBB. Die genaue Lage des betroffenen Mastes konnte nicht festgestellt werden, da die Leitung mit Lichtbogenarma-

turen ausgerüstet ist, so dass Isolatoren und Leitungsseile trotz des Kurzschlusslichtbogens oft unbeschädigt bleiben. Das Gewitter befand sich nördlich von G, längs der Leitung gemessen ca. 7 km von der Meßstation entfernt. Die im Oszillogramm zu oberst abgebildete Phase erlitt Erdschluss, wie aus dem Fallen von Erdschlussklappen und aus dem Oszillogramm einwandfrei hervorgeht (beim Strahlrückgang ist nur noch die 50 Perioden-Komponente der Betriebsspannung sichtbar). Das Oszillogramm zeigt in der betroffenen Phase rund 300 kV_m Wellenspannung am Messort SK (Fig. 5). Auch hier tritt der grosse Ueberspannungsschlag erst gegen das Ende der Zeitachse auf, nachdem vorher nur schwache Spannungsvariationen stattfinden. Die Auslösung des Oszillogrammes geschah vermutlich schon beim Einschlag des Blitzes in das Mast-eisen; die grosse Ueberspannung entsteht aber erst beim Rücküberschlag vom Mast in die obere Phase.

Die vielen Aufnahmen von Erdschlüssen in grösserer Entfernung wollen wir nicht wiederholen; sie wurden bereits bei den Messungen des Vorjahres (1932) erwähnt. Dagegen werden nachstehend noch zwei Beispiele von indirekten Blitzüberspannungen reproduziert, als Beispiel für die Formgleichheit der in den drei Phasen erzeugten Ueberspannungswellen (Fig. 26 und 27). Auch die Grösse der drei Spannungen ist annähernd gleich, wie dies die Theorie der kapazitiven Leistungsbeeinflussung verlangt. In diesen beiden Fällen waren die Ueberspannungen zu klein, um Ueberschläge zu erzeugen; Betriebsstörungen entstanden dadurch keine.

3. Auswertung der Oszillogramme.

a) Ausgleich der Ueberspannungen über Transformatorwicklungen.

Neu ist die Beobachtung von hohen Spannungswellen mit flacher Front, welche überdies in allen drei beobachteten Phasen annähernd gleiche Form und Höhe besitzen. Dies ist im allgemeinen das Kennzeichen induzierter Wellen. Die Oszillogramme Fig. 18, 20, 21, 26 und 27 sind Beispiele dazu. In mehreren Fällen erreichen diese Wellen beträchtliche Höhe, so dass z. T. Ueberschläge in der Kopfstation G entstehen (Fig. 18, 20, 21, 26 und 27). Solche Wellen waren in dem geerdeten 132 kV-System nie zu beobachten. Die Erklärung liefert offenbar Fig. 18 selber: Die erste Kurve lässt erkennen, dass im Moment des Ueberschlages von Phase «grün» zur freien Nullpunktsterminalle die Spannung der «grünen» Phase sich rascher abbaut, als sie vorher entstand. Das heisst aber, dass der Ausgleich der Ladungen von der zum Nullpunkt kurzgeschlossenen Phase nach den andern Phasen rascher geschieht als der Aufbau der induzierten atmosphärischen Wellen. Wäre der Nullpunkt des Transformators direkt geerdet gewesen, so hätten die atmosphärischen Ladungen vielleicht genügend rasch über die Wicklungen zum Nullpunkt und damit nach Erde abfliessen können, so dass die Stauung an den Phasenklappen gemildert worden

wäre. Ein Ueberschlag wäre in diesem Fall nicht entstanden. Das Abfliessen flacher Wellen und allgemein der Ausgleich jeder Welle über die Wicklung eines Transformators mit direkter Nullpunktserdung lässt sich in erster Näherung nach dem Ersatzschema Fig. 28 beurteilen.

Die Kapazität C stellt die gesamte Eingangskapazität und Erdkapazität der Anlage pro Phase dar. Die Induktivität L ist eine Ersatzinduktivität, die sich je nach der Schaltung des Transformators, nach der an den Unterspannungsklemmen derselben vorhandenen statischen Kapazität und nach der dortigen Generatorleistung schätzen lässt. In ihr kommt die Art des Transformator-Streufeldes (Joch- oder Kurzschlußstreuung) in erster Linie zum Ausdruck. Leider ist der Ausgleich von Wellen über verschieden geschaltete Drehstrom-Transformatoren noch wenig bekannt, so dass man auf Schätzungen des Wertes L angewiesen ist.

Ohne hier auf die Rechnung einzugehen, zeigt sich in der Tat, dass die Abfluss-Zeitkonstante von Ladungen der Welle U_o über die Wicklung bei einem Transformator für 80 kV und 10 MVA in

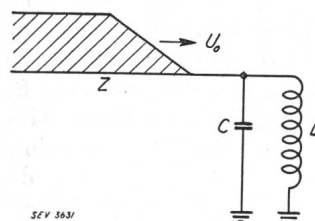


Fig. 28.
Ersatzschema des Transformators mit Nullpunktserdung.

die Grössenordnung von 50 bis 100 μs fällt, sofern seine Schaltung so ist, dass nur seine Kurzschlussstreuung für den Wellen-Ausgleichsvorgang in Betracht kommt, was bei grosser Generatorleistung an den Unterspannungsklemmen zutrifft, ausgenommen bei dreiphasigen Wellen, wo reine Jochstreuung auftritt. Bei kleiner Generatorleistung an den Unterspannungsklemmen des betrachteten Transformators dagegen (Grenzfall: In Unterspannung offener Transformator) erfüllt nur der Stern-Dreieck-geschaltete Transformator die Bedingung des raschen Ausgleichs, und zwar nur bei dreiphasigen Wellen, während in allen andern Fällen Jochstreuung und damit langsamerer Ausgleich stattfindet.

Ist nun die Anstiegsdauer der Blitzwelle von ähnlicher Grösse wie diese Ausgleichszeit über die Wicklung nach Erde, so kann damit eine Stauung der Welle am Transformator teilweise oder ganz vermieden werden⁶⁾. Man erkennt, dass in Netzen von 80 kV und mehr nur die Nullpunktserdung sehr grosser Transformatorenleistungen von mindestens 10 MVA zu diesem Ziele führt. Das Versuchsnetz, in dem das Oszillogramm Fig. 18 aufgenommen wurde, besitzt am Messort G keine Nullpunktserdung. Dagegen benötigt der Ausgleich von Phase «grün» zu den Phasen «rot» und «blau», in Uebereinstimmung mit der Theorie eine Zeit, die in die gleiche Grössenordnung von 50 μs fällt. Der Ausgleich dreiphasiger Wellen zum geerdeten Null-

punkt erfolgt theoretisch langsamer, so dass die Ausgleichsgeschwindigkeit bei Nullpunktserdung nur eines 7000 kVA-Transformators vermutlich noch etwas zu klein wäre, um die Stauung flacher Wellen am Transformator ganz zu verhindern. Es geht aber daraus die Möglichkeit hervor, dass ein Teil der atmosphärischen Wellen, nämlich jene mit Anstiegszeiten von der Grössenordnung $100 \mu\text{s}$, von Grosstransformatoren mit direkter Nullpunktserdung und passender Schaltung (z. B. Stern-Dreieck) genügend rasch nach Erde abgeführt werden können, um die Gefahr von Spannungserhöhungen (Reflexionen) an ihren Klemmen zu vermindern. Diese Erscheinung ist wahrscheinlich die Ursache davon, dass im früher beobachteten 132 kV-Netz mit Nullpunktserdung aller Transformatoren nur steile, von direkten Blitzeinschlägen in die Leitung herührende Wellen als Störungsursache erkannt wurden. Die Messungen des Sommers 1933 zeigen demgegenüber, dass Kopfstationen ohne Nullpunktserdung in Anlagen bis 80 kV Betriebsspannung gelegentlich auch durch flache Wellen gestört werden. Deren Entstehung ist, insbesondere bei Fig. 18, auf zwei Arten erklärlich:

1. als Wirkung eines indirekten Blitzschlages, der die Leitung selber nicht berührte,

2. als Wirkung eines direkten Blitzschlages in mindestens ein Leitungsseil, wobei der Blitzstrom ungewöhnlich langsam anstieg, nämlich mit einer

Steilheit von nur ca. $\frac{1000 \text{ A}}{50 \mu\text{s}} = 20 \text{ A}/\mu\text{s}$. Ob so

schwache Strombildungen möglich sind, erscheint sehr fraglich, so dass auch aus diesem Grunde die Erklärung durch indirekte Blitzwirkung wahrscheinlich die richtige ist. Die Entscheidung wäre sofort möglich, wenn das dreiphasige Oszillogramm nicht an den Klemmen eines grossen, nicht geerdeten Transformators gemessen worden wäre. Es empfiehlt sich deshalb, zur vollständigen Erfassung atmosphärischer Leitungseinwirkungen den Messort möglichst entfernt von grossen Transformatoren zu wählen. Ist nämlich der Nullpunkt eines nahen Transformators direkt geerdet, so werden flache Wellen nicht von der Messung erfasst, weil sie zum Teil über die Wicklung nach Erde abgeführt werden; ist aber der Transformatornullpunkt nicht oder nur über eine grosse Impedanz geerdet, so sind die Messungen der drei Phasen infolge des Ausgleichs flacher Wellen über die Wicklungen nicht mehr unabhängig.

Schliesslich fällt in Fig. 18 noch auf, dass der erste Ueberschlag von Phase «grün» nicht nach Erde auf 53 cm, sondern zur offenen Nullpunkt-klemme auf 57 cm Distanz erfolgte. Es muss daraus auf eine Nullpunktsschwingung der offenen Klemme geschlossen werden, welche die Spannungsdifferenz zwischen ihr und der benachbarten Phasen-klemme über das Mass der Spannung gegen Erde hinaus erhöhte.

⁶⁾ L. Binder, Die Wanderwellenvorgänge auf experimenteller Grundlage, 1928.

b) Steilheit direkter Blitzüberspannungen.

Die Bilder direkter Blitzeinschläge (Fig. 22, 23 und 25) kennzeichnen sich vor allem durch den grundsätzlich verschiedenen Verlauf der Wellen in den drei gleichzeitig beobachteten Phasen, in zweiter Linie durch die grosse Steilheit des Spannungsanstieges. Die Steilheit erreichte bei den Aufnahmen im Sommer 1933 Werte von einigen 100 bis annähernd $1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$. In dieser Beziehung ist die Erscheinung am 80 kV-Netz ohne Nullpunktserdung gleich wie im 132 kV-Netz mit Nullpunktserdung aller Transformatoren. Die Steilheit der Wellen ist etwa gleich wie jene von Schaltwellen von der Höhe der Stoss-Ueberschlagsspannung der Leitungs-isolatoren, die vom Blitzort über die Leitung zum Messort zulaufen.

c) Steilheit indirekter Blitzüberspannungen.

Aus Fig. 18, 20, 21, 26 und 27 und einer ganzen Menge ähnlicher des Vorjahres (Fig. 8 bis 17) ergeben sich Anstiegsteilheiten der Wellen von ca. 1 bis $8 \text{ kV}/\mu\text{s}$ in der Kopfstation. In Fig. 18 beträgt die Steilheit ca. $200 \text{ kV}/50 \mu\text{s} = 4 \text{ kV}/\mu\text{s}$ im Mittel. Mit einer mittleren Leitungshöhe von 10 m ergeben sich pro Meter über dem Boden Feldänderungsgeschwindigkeiten von maximal 200 bis $400 \text{ V}/\mu\text{s} \cdot \text{m}$. Diese Zahlen bilden die obere Grenze unserer Beobachtungen und liegen als solche um etwa eine Grössenordnung höher als die auf Grund von Antennenmessungen von der deutschen Studiengesellschaft als Höchstspannungsanlagen gewonnenen Werte ⁷⁾.

d) Polarität der Ueberspannungswellen.

Sämtliche bisherigen Blitzstörungen der beobachteten 132- und 80 kV-Netze zeigen in den Oszillogrammen auf der blitzgestörten Phase *negative* Ueberspannung, mit Ausnahme des soeben besprochenen Bildes Fig. 18 und ähnlicher Bilder mit sehr flachen Spannungswellen. Man vergleiche dazu die früheren Figuren in Bull. SEV 1930, S. 81, Fig. 14 und 15; 1931, S. 426, Fig. 10; 1932, S. 293/94, Fig. 4 und 7, sowie Fig. 22, 23 und 25 dieses Aufsatzes.

Diese sämtlichen, von direktem Blitzeinschlag verursachten Stösse zeigen grosse Steilheit des Anstieges. Einen Gegensatz dazu bildet der Spannungsverlauf in den Fig. 18, 20, 21, 26 und 27, welche in allen Phasen *positive* Ueberspannung mit *flachem* Anstieg aufweisen. Die Erscheinung ist durchaus einheitlich, wenn unterschieden wird zwischen direkten und indirekten Blitzen, und ferner bei direkten Blitzen zwischen dem direkt betroffenen Seil und den nur durch ihre Nähe beeinflussten Nachbarseilen. Unter diesen Gesichtspunkten können wir folgendes feststellen:

1. Das *direkt vom Blitzschlag betroffene Leitungsseil* und ebenso das vom Rückueberschlag eines

⁷⁾ A. Matthias, Gewitterforschungen und Blitzschutz, Weltkraftkonferenz Berlin 1930; L. Binder, Wanderwellenvorgänge auf experimenteller Grundlage, 1928.

⁸⁾ Bull. SEV 1932, Nr. 12.

blitzbetroffenen Mastes berührte Seil erhält eine *steile negative* Ueberspannungswelle.

2. Die dem *blitzbetroffenen Leitungsseil benachbarten Seile* werden derart von jenem beeinflusst, dass sie beim KO-Messpunkt in der Regel eine Welle mit *steilem positivem* Kopf und schwach negativem Rücken aufweisen. Als typisches Beispiel eines solchen direkten Ueberschlages sei Fig. 23 genannt.

3. *Indirekte Blitzschläge*, welche die Leitung nur kapazitiv beeinflussen, erzeugen Wellen mit viel flacherer Front, wobei die *positive* Wellenpolarität überwiegt. Die Wellenhöhe ist selten grösser als 100 kV_m , das Maximum unserer Messungen ist aus den Beispielen Fig. 18 und 21 zu entnehmen; es beträgt ca. 120 kV_m bzw. 100 kV_m Wellenamplitude auf der Leitung. Die Reflexion erhöht diese Beträge in der Kopfstation auf doppelte Spannungshöhe. Die dabei auftretende Wellensteilheit von der Grössenordnung einiger 100 bis einiger $1000 \text{ V}/\mu\text{s}$ (weniger $\text{kV}/\mu\text{s}$) wird oft erreicht. Die Dauer des Anstieges ist aber meistens so kurz, dass es relativ selten zu Spannungen von mehreren 100 kV reicht (z. B. Fig. 26 und 27). Die Gefahr indirekter Blitze scheint hier in erster Linie von der *Dauer* der Wolkenfeldänderung während des Blitzes abhängig zu sein. Die meisten Oszillogramme gehören zu dieser Kategorie.

4. Es gibt einzelne Fälle, wo vom Blitz auf einem Leitungsseil sehr *steile* Spannungszacken *positiver* Polarität und kleiner Höhe hervorgerufen werden, ohne dass es dadurch zu Störungen kommt; siehe Beispiele im Bull. SEV 1930, S. 80, Fig. 4; 1932, S. 295, Fig. 9, und S. 296, Fig. 12. Die Steilheit dieser Stösse deutet auf Funken an der Leitung hin. Offenbar handelt es sich hier um stromschwache Seitenfunken des Blitzes, welche ein Leitungsseil erreichen, die aber zu wenig Strom führen, um zum Leitungsüberschlag zu führen. Der umgepolte Influenzwellenkopf, der mit Sicherheit auf Stromzufuhr aus dem Blitz hindeutet, ist auch hier, z. B. aus Fig. 9 des Berichtes von 1932, deutlich ersichtlich. Da in diesem Falle die Leitung das negative Ende des Blitzfunkens darstellt, ist die Bildung von Teilfunken sehr wahrscheinlich, weil sich die Entladung zwischen einer positiven Wolke und dem negativen Boden nach dem Boden stark verzweigt, ähnlich wie bei der Funkenentladung zwischen positiver Spitze und negativer Platte (Boden)⁹⁾.

Diese Feststellungen erklären viele Rätsel, die bei den Messungen an nur einer Leitungsphase, wie sie besonders in Amerika durchgeführt wurden, aufgetaucht sind. Die dort vorgeschlagenen Gruppeneinteilungen werden damit verständlich; sie sind nicht verschiedenen Blitzsorten, sondern dem Durchlaufen der Leitung zuzuschreiben. Das Bild der Blitzstörung hat durch die Beobachtungen mit mehrpoligen KO derart an Klarheit und Einheit

⁹⁾ Siehe z. B. E. Marx, Lichtbogen-Stromrichter; W. Lewis und C. Foust, Gen. electr. Rev. 1931, S. 452.

gewonnen, wie es durch einpolige Beobachtungen kaum möglich gewesen wäre. Ursache davon ist besonders die theoretisch nicht vorausgesehene Entstehung von Influenzwellen mit umgekehrt polarisiertem Wellenkopf. Wir haben die Ursache dieser Erscheinung inzwischen durch umfangreiche Versuche mit dem Stossgenerator und der Versuchs-Wellenleitung in Gösigen zu ermitteln versucht und werden demnächst auch hierüber berichten.

e) *Blitzvorgang.*

Ohne an dieser Stelle auf den Vorgang des Blitzes selber einzugehen, ist doch ersichtlich, dass alle Beobachtungen, mit Einschluss Fig. 18, erklärt werden können, wenn angenommen wird, dass es sich bei den Störungen stets um *Blitzschläge zwischen einer negativen Wolke und dem Boden* gehandelt hat. Ob diese negative Ladungswolke nun im oberen Teil der Gewitterwolke sitzt, wie es die Gewittertheorie von G. C. Simpson, Lenard und Dauzère verlangt¹⁰⁾, oder ob sie gemäss der Theorie von C. T. R. Wilson, Elster und Geitel¹¹⁾ in den untern Wolkenbezirken schwebt, ist aus den Messungen der Polarität direkter Einschlüge nicht zu bestimmen.

Sicher ist nur, dass die Leitung bzw. der Erdboden bei den gefährlichen, stromstarken Blitzen das positive Ende des Blitzfunkens bildet. Der Blitz transportiert negative Ladungen aus den Wolken in den Mast, die, sofern der Mastfuss nicht sehr gut geerdet ist, infolge des Spannungsabfalles des Blitzstroms in der Erdung zum sogenannten «Rücküberschlag» des Mastes führen. Damit ergiessen sich die negativen Blitzladungen auch auf das «rücküberschlagene» Leitungsseil. Die Steilheit des Blitzstromes kann deshalb aus den an Eisenmastleitungen gewonnenen Oszillogrammen nicht ohne weiteres geschlossen werden, da sie auch vom Rücküberschlag des Mastes bedingt sein kann. Die wenigen an Holzstangenleitungen gemessenen Wellenfronten scheinen uns noch nicht genügend zuverlässig für die Bestimmung der Blitzstromsteilheit¹²⁾, so dass hier noch eine Lücke in der Kenntnis besteht.

Aus den indirekten Blitzwirkungen (z. B. Fig. 18, 26 und 27) ist zu schliessen, dass sowohl negative Luftfelder (Wolke gegen Boden überwiegend negativ) als auch positive Luftfelder (Wolken gegen Boden überwiegend positiv) vorhanden sind, die durch ihr Zusammenbrechen infolge der Blitzentladung positive (z. B. Fig. 18) oder negative (z. B. Fig. 26 und 27) Ueberspannungswellen auf der Leitung erzeugen.

Ohne die Lage des Blitzes zwischen den Wolken oder zwischen Wolke und Boden zu kennen, kann auch aus indirekten Blitzwirkungen kaum auf die

¹⁰⁾ G. C. Simpson, Phil. Trans., A vol. 209, p. 379, 1909; Royal Soc. Proc., A vol. 111, p. 56, 1926; Royal Soc. Proc., A vol. 114, p. 376, 1927.

¹¹⁾ C. T. R. Wilson, Proc. Royal Soc. London, A vol. 92, p. 555, 1916, und Phil. Trans. Royal Soc. London, A vol. 221, p. 73, 1921.

¹²⁾ R. Pittman und J. Torok, Lightning Investigation on a Wood Pole Transmission Line, Winter Convention, N.Y. 1931.

relative Lage der positiven und negativen Ladungswolken geschlossen werden, sondern es kann lediglich festgestellt werden, wie die Feldänderung am Boden verläuft. In dieser Beziehung ist aus den Messungen zu schliessen, dass weder die eine noch die andere Gewittertheorie sich als ausschliesslich richtig ergibt, sondern dass die Gewitterwolken ausserordentlich komplexe Gemische von positiven und negativen Ladungsbezirken darstellen.

f) Die Häufigkeit

der verschieden hohen Blitzüberspannungen auf Hochspannungsleitungen, wie sie sich aus den Messungen der Jahre 1932 (1931) und 1933 ergaben, ist durch die Fig. 29 und 30 dargestellt. Die Spannungswerte sind wie früher¹³⁾ als Abweichung von der momentan vorhandenen Betriebsspannung gezählt.

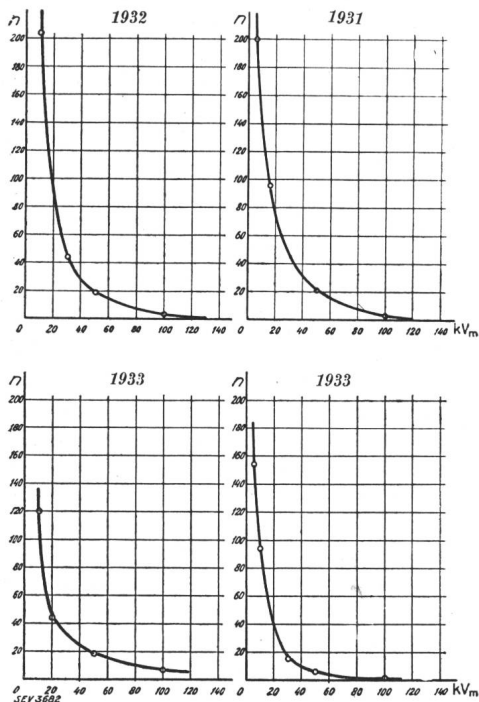


Fig. 29.

Fig. 30.

Häufigkeitskurven verschieden hoher atmosphärischer Ueberspannungen nach Messungen mit dem Kathodenstrahloszillographen

in der 80 kV-Kopfstation. | in der 132 kV-Durchgangsstation.
Ordinate n = Anzahl Ueberspannungen pro Sommerhalbjahr, deren Höhe den Abszissenwert erreicht oder übertrifft.

Es sind mit andern Worten die vom Blitz überlagerten Wellenhöhen. Fig. 29 gilt für das 80 kV-Netz (Jahre 1932 und 1933), Fig. 30 für das 132 kV-Netz (1931 und 1933). Der Verlauf aller Kurven ist ähnlich wie in früheren Kurven. Kleine Ueberspannungen von 10 bis 50 kV Scheitelwert sind häufig, grössere Ueberspannungen von mehr als 100 kV schon ziemlich selten. Solche Starkstromnetze, in denen ein Isolatorüberschlag bereits zu einer Störung führen kann und die weniger als ca. 50 kV Ueberschlagsspannung aufweisen, müssen deshalb den Gewitterstörungen viel stärker unterworfen sein als besser isolierte Netze. In Schwachstromnetzen spielen gelegentliche Ueberschläge, abgesehen vom jedesmaligen Störgeräusch («Knack-

ken») beim Telephon und von der Beanspruchung der Uebertragerwicklungen, keine grosse Rolle, denn infolge der ungenügenden Betriebsspannungshöhe hat ein Isolatorüberschlag infolge von Blitzspannung keinen Lichtbogen zur Folge. Für Hochspannungsnetze, genauer gesagt für solche Netze, wo infolge eines Isolatorüberschlags ein Lichtbogen eingeleitet wird, lässt sich aus den gewonnenen Erfahrungen der Wunsch begründen, sämtliche Anlageteile für mindestens ca. 50 kV_{eff} Stoss-Ueberschlagsspannung zu isolieren, um auf diese Weise die häufigen kleinern Blitzüberspannungen für den Betrieb bedeutungslos zu machen. Interessant ist, dass diese Forderung bezüglich der Leitungen bereits ganz oder annähernd erfüllt ist, indem es kleinere Freileitungsisolatoren kaum gibt. Das gilt aber leider noch nicht für die Isolation der Stationen, weshalb sich atmosphärische Ueberspannungen in Netzen kleiner Hochspannung und in Sekundärnetzen meistens in den Stationen auswirken. Viele Erfahrungen aus Hochspannungsbetrieben und Hausinstallationen bestätigen dies. Will man die logische Folgerung ziehen, so müsste, mit Rücksicht auf die Bemessung der Prüfspannung nach den CEI-Entwürfen [$U_p = (2 U_n + 10)$ kV], jede Hochspannungsstation in Freileitungsnetzen für mindestens 15 bis 20 kV Betriebsspannung (40 bis 50 kV Prüfspannung) isoliert sein. Die Praxis einiger grösserer Elektrizitätswerke der Schweiz, die besonders für ihre 8 kV-Netze eine erhöhte Stationsisolation bereits eingeführt haben, zeigt, dass unsere Messergebnisse mit den Erfahrungen der Betriebe in Einklang stehen. Auch die Erhöhung der Prüfspannung nach den VDE-Vorschriften¹⁴⁾ [$U_p = (2,2 U_n + 20)$ kV] ist daraus für Freileitungsnetze begründbar, wenigstens für kleinere Hochspannungen. Sofern in Freileitungsanlagen auch Kabel verwendet sind, ist darauf zu achten, dass die Endverschlüsse diesen Forderungen entsprechen. Die Kabel selbst haben bekanntlich eine hyperbelähnliche Zeit-Durchschlagkurve, aus der für kurze (z. B. sekundenlange) Spannungsdauer eine ganz beträchtlich höhere Festigkeit hervorgeht, als sie z. B. bei der Minutenprüfung auftritt. Die Erfahrung bestätigt dies, indem Durchschläge der Hochspannungskabel selber als Folge von Stoss-Ueberspannungen ausserordentlich selten sind, auch dann, wenn Kabel im Zug von Freileitungen liegen, deren Isolation bereits obigen Forderungen entspricht.

Ein zweiter Weg zur Unschädlichmachung der häufigen kleineren atmosphärischen Ueberspannungen besteht im Einbau von Ableitern, welche zulaufende Wellen auf ungefährliche Werte reduzieren. Diese Lösung kommt besonders in Niederspannungsnetzen in Frage, wo die Konstruktion von Ableitern relativ einfach ist, worauf hier nicht eingegangen werden kann.

In Hochspannungsnetzen kommt man dagegen um die zuerst empfohlene Massnahme guter Stationsisolation auch bei Anwendung von Ableitern

¹³⁾ Bull. SEV 1932, Nr. 12.

¹⁴⁾ ETZ 1931, S. 427.

nicht herum, insbesondere bei Betriebsspannungen von mehr als etwa 30 kV. Gute Stationsisolation ist in allen Fällen die primäre und wichtigste Forderung des Ueberspannungsschutzes; dies soll auch hier erneut betont werden.

4. Resultate der Blitzstrom-Messungen.

Wie im Vorjahre 1931 wurden auch 1932 und 1933 eine grössere Anzahl Mastfunkenstrecken montiert, um damit Anhaltspunkte über die Grösse des vom Blitz durch die Masten fliessenden Strommaximums zu bekommen. Die Einrichtung wurde schon früher beschrieben¹⁵⁾. Zur Berechnung des Blitzstrommaximums dient dessen Spannungsabfall in der Masterdung. Der Erdungswiderstand muss für den betroffenen Mast bekannt sein, und zwar naturgemäss der Erdungswiderstand des betroffenen Mastes allein, das heisst bei abgehobenem Erdseil, falls ein solches vorhanden ist.

Nun erhebt sich hier eine schon lang umstrittene Frage: Ist der gegenüber dem Blitzstromstoss wirksame Erdungswiderstand des Mastes gleich oder doch vergleichbar mit dem bei Niederfrequenz und Niederspannung gemessenen Widerstandsbeitrag? Von verschiedenen Stellen wird behauptet, dass der bei Stoss wirksame Widerstand 10- bis 20-mal grösser sein könne als der mit gebräuchlichen Messinstrumenten gemessene Wert¹⁶⁾. Von seiten des Gebäudeblitzschutzes her wird sogar behauptet, der Erdungswiderstand spiele überhaupt keine wesentliche Rolle bei der Ausbreitung des Blitzstromes im Boden¹⁷⁾. Wir haben deshalb zu dieser Frage eine Reihe von Versuchen an mehreren Masterdungen auf je drei parallel geschalteten, ca. 1,5 m langen Eisenrohren vorgenommen, über die später berichtet werden wird. Hier sei nur das eine Resultat vorweggenommen, dass bei Stössen aus der früher beschriebenen Stossanlage¹⁸⁾ über die zweidrähige Wellenleitung in diese Masterdungen (Wellenfront ca. 100 m) in keinem Falle eine Widerstandserhöhung auf mehr als ca. 1,5fachen Normalwert mit dem KO gemessen werden konnte. Die Rohrerdungen befanden sich zum Teil in Kiesboden (95 Ω -Erdungswiderstand), zum Teil in grasbewachsenem Humus (Erdungswiderstand 32 und 16 Ω). Eine Widerstandserhöhung bei Stoss lässt sich nur bei kleinen Erdungswiderständen (gutem Boden) mit dem KO nachweisen; diese scheint aber nicht so hoch zu sein, wie sie andernorts durch Messungen mit Funkenstrecken gefunden wurde. Offen bleibt dabei die Frage, ob Blitzstromstösse die Steilheit von nur 100 m Frontlänge erreichen oder nicht doch flacher sind.

Solange wir nicht nachweisen können, dass die Front der Blitzströme sich auf wesentlich weniger

als 1 μ s erstrecken kann, scheint deshalb die Rechnung mit dem bei Niederfrequenz auf übliche Weise gemessenen Erdungswiderstand zulässig zu sein. Ausgenommen sind natürlich örtlich sehr ausgedehnte Erdungsanlagen, die aber für Masterdungen nicht in Frage kommen, da wir nur den betroffenen Mast allein (ohne Erdseilverbindungen) als Erdung berücksichtigen.

Ohne Rücksicht auf eine solche eventuell vorhandene Korrektur infolge extrem steiler Blitzstromanstiege ergeben die in den letzten zwei Jahren vorgekommenen Ansprechungen von Mastfunkenstrecken die in Tabelle I ausgerechneten vorgekommenen Blitzstrommaxima.

Tabelle I.

Mast Nr.	Erdungswiderstand		Blitzeinschlag am	Betriebsstörung?	Blitzstrommax. im Mast	
	mit Erdseil Ω	ohne Erdseil Ω			grösser als A_m	kleiner als A_m
S. 139.	2,0	21,8	20. 7. 32, 17 ⁴⁰	Ja	32 000	52 000
S. 138	2,5	26	20. 7. 32, 17 ⁰	Ja	4 000	45 000
B. 56	—	8	7. 7. 33	Nein	20 000	100 000
B. 78	—	—	7. 7. 33	Nein	—	—
Z. 34 A.	—	—*)	30. 8. 32	Ja	—	—
Z. 34 A.	5,5	27**)	13. 9. 33	Nein	5 000	15 000
O. 18	—	—	16. 6. 33, 14 ⁵⁴	Ja	—	—
O. 45	1,7	—	7. 7. 33, 17 ³⁴	Ja	—	—
O. 102	7	26	7. 7. 33, 16 ²³	Ja	21 000	35 000

*) Dieser Mast steht auf felsigem, nagelfluhartigem Boden; er besass ausnahmsweise keine besondere Erdung, sondern war nur über das Erdseil geerdet.
**) Der Mast wurde im Mai 1933 geerdet.

Die Ströme liegen in der Grössenordnung 10^4 bis $10^5 A_m$, wie bei den Messungen der Vorjahre. Die Anzahl Messpunkte ist naturgemäss klein; immerhin geben die bisherigen Messungen bereits ein ungefähres Bild der Häufigkeitskurve verschieden hoher Blitzströme.

5. Klydonographen-Resultate.

Zur Vervollständigung sollen hier noch die Resultate einiger Messungen angeführt werden, die mit sogenannten Klydonographen durchgeführt wurden. Fig. 31 und 32 zeigen die Häufigkeit der gesamten Ueberspannungen an einem Messpunkt (Kraftwerk) mit 50 kV- und 80 kV-Leitungen in den Sommern 1932 und 1933..

Das 50 kV-Netz, auf das sich Fig. 31 bezieht, umfasst eine vom Messort ausgehende Einfachleitung (ca. 18 km Länge) und eine Doppelleitung (ca. 85 km), beide sind auf Holzstangen geführt. In ca. 33 km Abstand vom Messort bestand ein zweiter Messpunkt. Die an diesem weitem 50 kV-Messpunkt gewonnenen Resultate zeigen, dass der grösste Teil der Ueberspannungen sich nicht zugleich auf beide Messpunkte erstreckt, sondern lokal auf den ersten Messpunkt beschränkt bleibt.

¹⁵⁾ Bull. SEV 1932, Nr. 12.

¹⁶⁾ L. Binder, Das Verhalten von Erdungsanordnungen bei Blitzschlägen. Sondertagung der Sächsischen Werke e. V. Dresden, 1932.

¹⁷⁾ V. Schaffers, Le paratonnerre et ses progrès récents, Bruxelles-Paris 1931, und Monney, Bull. SEV 1933, S. 365/366.

¹⁸⁾ Bull. SEV 1933, Nr. 15.

Das 80 kV-Netz, auf das sich Fig. 32 bezieht, umfasst eine im Messort durchgehende, auf Eisenmasten montierte Leitung von ca. 10 + 130 km Länge.

Die Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die schon aus amerikanischen Aufsätzen bekannten Figuren¹⁹⁾. Die Aufteilung der Kurven nach Ursachen der Ueberspannung ist nicht immer eindeu-

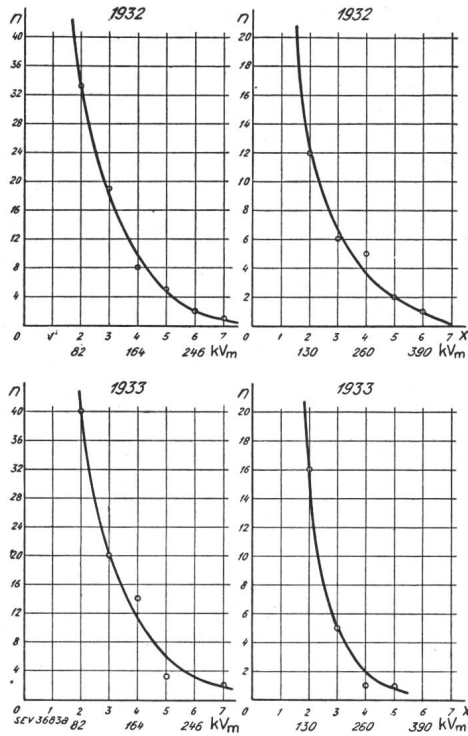


Fig. 31.

Fig. 32.

Häufigkeitskurven verschieden hoher Ueberspannungen je gleicher Ursache nach Klydonographen-Messungen in 50 kV-Durchgangsstation. | in der 80 kV-Durchgangsstation. Abszisse x = Vielfaches der Netz-Phasenspannung. Ordinate n = Anzahl Ueberspannungen pro Sommerhalbjahr, deren Höhe den Abzissenwert erreicht oder übertrifft.

tig möglich, doch ist festgestellt, dass mehr als die Hälfte der mittelgrossen Ueberspannungen des betreffenden Netzes von Schaltueberspannungen herührt.

Die Klydonographen bilden ein gutes Hilfsinstrument, um die ungefähre Häufigkeit von Ueberspannungen bestimmter Netzpunkte zu erkennen. Die Präzision der Ausmessung ist nicht hoch; auch können negative Ueberspannungen bis zur drei- bis vierfachen Phasenspannung nicht sichtbar gemacht werden, da die negativen Funkenfiguren klein sind und deshalb im Band der normalen Wechselspannung verschwinden, sofern nicht durch Doppelapparate beide Polaritäten getrennt als positive Spannungen registriert werden.

Die angeführten Kurven sollen einen Begriff geben von der Häufigkeit von Ueberspannungen pro Sommersemester. Sie beziehen sich auf einen schweizerischen Messpunkt, an dem die genannte Ueberspannungshäufigkeit relativ gross ist, so dass für schweizerische Netze im allgemeinen mit we-

sentlich kleinerer Ueberspannungshäufigkeit gerechnet werden kann, insbesondere dann, wenn es sich um Stationen mit vielen parallelen Leitungen handelt.

6. Statistische Resultate.

Im Jahre 1932 wurde von einer Anzahl schweizerischer Elektrizitätswerke eine Gewitterstörungsstatistik auf einheitlicher Grundlage durchgeführt, die wertvolle Resultate bezüglich des Vergleichs verschiedener Leitungen lieferte. Es zeigte sich erstens, dass ein wesentlicher Unterschied zwischen Holzstangenleitungen und Eisenmastleitungen besteht in dem Sinne, dass sich bei den ersten mehr Ueberspannungen in den Stationen auswirken als bei den zweiten. Z. B. wirken sich bei dem bereits beschriebenen 132 kV-Netz mehr als 90 % aller Blitzueberspannungen nur als Kurzschluss auf der Eisenmastleitung aus. Dagegen beträgt diese Ziffer in einem ca. 730 km umfassenden 50 kV-Verteilnetz, das mit Ausnahme weniger Eisenmasten auf Holzstangen montiert ist, weniger als 50 %. Weiterhin liess sich zeigen, dass in den meisten Fällen, wo Holzstangen vom Blitz angesplittet wurden, ohne dass es zu Ueberschlägen in den benachbarten Transformatorstationen kam, mindestens ein geerdeter Eisenmast zwischen Störungsstelle und Station stand. Wo dieser fehlte, trat oft ausser der Holzstangenbeschädigung gleichzeitig auch ein Ueberschlag in den benachbarten Stationen auf.

Den einzelnen, in Holzstangenleitungen eingefügten geerdeten Eisenmasten kommt ohne Zweifel bezüglich des Schutzes der angrenzenden Stationen ein erheblicher Schutzwert zu, was mit den Messungen durchaus im Einklang steht.

Eine dritte Beobachtung ist ebenso mit den Folgerungen aus den Gewittermessungen in schöner Uebereinstimmung: Die Enden (Kopfstationen) ungeschützter 132- und 150 kV-Leitungen sind Punkte, wo hie und da Ueberschläge durch Blitzwellen vorkommen. Besteht aber eine Doppelleitung und werden die beiden Leitungen in den Kopfstationen metallisch gekuppelt, so können dort Ueberspannungsstörungen nur noch selten beobachtet werden. Die Erklärung besteht darin, dass nur sehr selten mehrere Seile zugleich von der Blitzspannung betroffen werden, so dass eine Reflexion mit der dadurch bedingten Spannungsverdopplung an der Kuppelstelle (Kopfstation) nicht mehr eintritt.

Wo es die Relaiseinrichtung des Netzes erlaubt, ist eine Kupplung oder Vermaschung der Netze als Schutz gegen Ueberspannungen in Kopfstationen zu empfehlen.

Ein vierter Punkt der Statistik zeigt, dass im genannten 50 kV-Holzstangennetz Ueberschläge nicht nur in Kopfstationen vorkommen, sondern relativ häufig auch in Durchgangsstationen. Das Bedürfnis eines Ueberspannungsschutzes der Stationen ist sowohl auf Grund der Messungen als auch der statistischen Resultate in Holzstangennetzen grösser als in Netzen mit Eisenmastleitungen.

¹⁹⁾ Z. B.: W. Lewis, Gen. electr. Rev. 1929, S. 470.

7. Zusammenfassung und Ausblick.

Die Messungen der Jahre 1932 und 1933 haben auch in dem beobachteten 80 kV-Drehstromnetz als Hauptgefährdung des Betriebes die direkten Blitzeinschläge in die Leitung bzw. in deren Eisenmasten erkennen lassen. Soweit sind durch die erstmals dreiphasig durchgeführten KO-Messungen die Ergebnisse der Vorjahre bestätigt worden. Neu dazugekommen ist die Beobachtung induzierter Blitzüberspannungen von mehr als 100 kV_m Wellenhöhe, die in zwei Fällen zu Ueberschlägen in der ungeerdeten 80 kV-Kopfstation führten. Nachdem die Steilheit der letztern Wellen festgestellt ist, wird besprochen, wie rasch solche Wellen sich über die Wicklungen von Transformatoren zwischen den Phasen und bei geerdetem Nullpunkt nach Erde ausgleichen können. Vor- und Nachteile der starren Nullpunktserdung gehen daraus hervor: Die direkte Nullpunktserdung an sehr grossen Transformatoren verhindert die Stauung flacher Wellen und die dadurch entstehenden Ueberschläge. Sie ist aber wertlos bei steilen Wellen, die infolge direkter Blitzeinschläge in die Leitung entstehen, und hat in diesen Fällen den Nachteil, dass auch lediglich einpolige Leitungs-Erdschlüsse zu Kurzschlüssen und Abschaltungen führen. Die Löschpulenerdung vermag infolge ihrer grossen Impedanz auch flache Wellen nicht abzuleiten; sie macht aber einpolige Phasenueberschläge für den Betrieb bedeutungslos. Ableiter als Schutzmittel gegen die Wirkungen von Ueberspannungen sind in gewissen Netzen erwünscht, insbesondere in Kopfstationen und wieder besonders in Netzen mit auf Holzstangen verlegten Leitungen.

Auf den Blitzstörungsvorgang wird kurz verwiesen. Eine noch ungenügend geklärte Frage bleibt die nach der Häufigkeit verschieden hoher *Blitzströme* und nach deren Steilheit. Denn die konstatierte grosse Steilheit der Ueberspannungswellen muss nicht unbedingt dem Blitzstrom selber zugeschrieben werden, sondern kann bei Eisenmastleitungen auch vom Rückueberschlag vom Masteisen auf die Phasen verursacht sein. Die oft viele Mikrosekunden betragende Zeit zwischen Auslösezeitpunkt eines Oszillogrammes und dem Auftreten des steilen Spannungsanstieges auf den Phasen deutet auf diese Möglichkeit hin.

Für die Anzeige stattgefunderer Blitzeinschläge und die ungefähre Messung des Blitzstrommaximums I_m bilden die Stahldrahtbündel der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen ein sehr einfaches Messmittel, das die Strommessung ohne Hilferdung auszuführen gestattet.

Für die Messung des Blitzstromanstieges dI/dt untersuchen wir zur Zeit ein einfaches Messgerät,

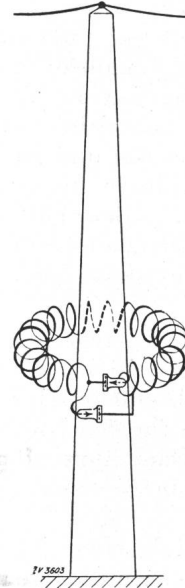


Fig. 33.
Anordnung zur Bestimmung der maximalen Blitzstromsteilheit.

das im Prinzip einen offenen Stabstromwandler darstellt, wobei der Mast oder ein Teil desselben als Stab wirkt, der den Blitzstrom I führt (Fig. 33). In einigen um den Mast gelegten Sekundärwindungen oder unter Umständen einer einzigen Drahtschleife entsteht infolge des Blitzstromes eine induzierte Spannung, die proportional zu dI/dt ist und die von einer klydonographenähnlichen Anordnung Spitze-Platte mit Photoschicht festgehalten wird. Durch Parallelschaltung von zwei Elektrodenpaaren Spitze-Platte mit Platte-Spitze können positive und negative Spannungen (Stromanstiege) gleich gut sichtbar gemacht werden.

Um Anhaltspunkte über die vorkommenden Werte des Blitzstromanstieges dI/dt zu erhalten, wäre es nötig, solche einfache Messgeräte in grosser Zahl an Masten, Schornsteinen und andern exponierten Punkten auszusetzen. In Verbindung mit einer genügend grossen Anzahl von Blitzstrom-Messungen wird es damit möglich sein, auch die Streitfrage zu entscheiden, ob Erdwiderstandsmessungen bei Niederfrequenz massgebend sind zur Beurteilung des Verhaltens der Erdungen gegenüber Blitzeinschlägen. Die Entscheidung dieser Frage hat nicht nur für den Betrieb von Hochspannungsleitungen, sondern auch für die Beurteilung der Gebäude-Blitzschutzerdungen grosse praktische Bedeutung.

Die Wechselstromvormagnetisierung im Stromwandlerbau und ihre anschauliche Wirkungsweise.

Von J. Goldstein, Zürich.

621.314.224-187

Die sogenannte *Vormagnetisierung* bei Stromwandlern dient dazu, den Arbeitsbereich in ein Gebiet der Eisensättigung zu verlegen, wo die Permeabilität gross und möglichst konstant ist. Dadurch werden Uebersetzungsfehler und Fehlwinkel kleiner. Im folgenden Aufsatz wird die Wirkungsweise dieser Vormagnetisierung dargelegt.

Allgemeines.

Bekanntlich haben vormagnetisierte Stromwandler eine grosse praktische Bedeutung erlangt. Es

Dans les transformateurs d'intensité, la prémagnétisation sert à faire travailler le transformateur dans une région de la courbe de saturation où la perméabilité est forte et, autant que possible, constante. Cette mesure permet de réduire l'erreur de rapport et de phase. Dans l'article ci-dessous, l'auteur explique comment agit la prémagnétisation.

handelt sich dabei um eine Vormagnetisierung mit Wechselstrom, sei es, dass die Vormagnetisierung von einer fremden Hilfsquelle, sei es, dass sie vom