

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 21 (1930)
Heft: 3

Artikel: Ueberspannungen in elektrischen Anlagen, erläutert an Hand von Untersuchungen mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen
Autor: Berger, K.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061302>

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: 17.02.2026

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des
Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke

REDAKTION {
Zürich 8, Seefeldstr. 301

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

Verlag und Administration

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

Editeur et Administration

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

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

XXI. Jahrgang
XXI^e Année

Bulletin No. 3

Februar I 1930
Fevrier I 1930

Bericht über die Diskussionsversammlung des S.E.V.

Samstag, den 7. Dezember 1929, 8 Uhr 45, im Hotel Schweizerhof
in Olten.

Die Diskussionsversammlung fand am Vormittag unter dem Vorsitz des Herrn Direktor Chuard, Präsident des S. E. V., am Nachmittag unter dem Vorsitz des Herrn Dr. Sulzberger, Vorstandsmitglied des S. E. V., statt. Es nahmen ungefähr 140 Mitglieder und Gäste an dieser Versammlung teil. Zur Behandlung kamen folgende

Diskussionsthema:

1. Ueberspannungen in elektrischen Anlagen, erläutert an Hand von Versuchen mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen. Referent: Herr K. Berger, Ingenieur des S. E. V., Zürich.
2. Fernmessungen, insbesondere Summenfernmessungen. Referent: Herr W. Janički, Ingenieur, Zug.

Ueberspannungen in elektrischen Anlagen, erläutert an Hand von Untersuchungen mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen.

Auszug¹⁾ aus dem Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des S. E. V.
in Olten, den 7. Dezember 1929, von K. Berger, Ingenieur des S. E. V.

621.317.755:621.316.93

Im ersten Teil des Referates werden die neueren, mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen gewonnenen Gewittermessungen und ihre Folgerungen bezüglich des Ueberspannungsschutzes besprochen. Insbesondere zeigt sich ausser der örtlich sehr eng begrenzten Blitzwirkung bei den gefährlichen Schlägen auf der Leitung ein sehr einheitlicher Verlauf der störenden Spannung, nämlich ein einfacher Spannungsschoss kurzer Dauer und grosser Höhe. Abhilfe der Gewitterstörungen scheint für Höchstspannungsleitungen möglich, sogar meistens auch bezüglich direkter Blitzschläge.

Der zweite Teil bringt Aufschluss über Ueberspannungsvorgänge, die sich bei Erd- und

Dans la première partie de sa conférence, l'auteur parle de mesures récentes en temps d'orage, au moyen de l'oscillographe cathodique, et montre les conséquences qui en découlent pour la protection contre les surtensions. En particulier, en dehors de la localisation très étroite de l'effet des coups de foudre violents sur la ligne, on constate une allure très uniforme de la tension perturbatrice, c'est-à-dire un simple choc, de courte durée et de grande amplitude. Il semble qu'on puisse protéger les lignes à très haute tension contre les perturbations d'orage et même, la plupart du temps, aussi contre les coups de foudre directs.

La seconde partie renseigne sur les phéno-

¹⁾ Weggelassen sind diejenigen Teile des Vortrages, welche von bereits im Bulletin des S. E. V. erschienenen Untersuchungen handeln. Siehe Bulletin S. E. V. 1929, No. 20, Seite 681; 1929, No. 11, Seite 321; 1927, No. 21, Seite 657.

(Fortsetzung der Zusammenfassung.)

Kurzschlüssen und beim Schalten entwickeln. Auf die Wertlosigkeit und sogar Gefahr gewisser Drosselspulen wird hingewiesen. Schliesslich werden aus den Sprungwellenversuchen Schlüsse gezogen und mittels einigen Oszillogrammen das Durchlaufen einer Sprungwelle durch eine Transformatorwicklung gezeigt.

(Suite du résumé.)

mènes de surtensions qui se produisent en cas de courts-circuits, de mises à la terre et d'enclenchements. L'auteur signale l'inutilité, voire même le danger de certaines bobines de self. Il tire enfin des conclusions des essais d'ondes à front raide exécutés et montre, à l'aide de quelques oscillogrammes, le passage d'une onde à front raide à travers un enroulement de transformateur.

1. Einleitung.

In den letzten Jahren hat sich mit der Einführung des Kathodenstrahl-Oszillographen in der Messtechnik ein Fortschritt vollzogen, der in erster Linie dem Verständnis der Ueberspannungen in elektrischen Anlagen zugut kommt. Die folgenden Ausführungen sollen von diesem neuen Messinstrument und von damit untersuchten Ueberspannungserscheinungen handeln.

In der Darstellung werden zunächst die bisher gemessenen, durch Gewitter verursachten Ueberspannungen, kurz Gewitterspannungen genannt, dann andere, meist wanderwellenartige Ueberspannungen betrachtet. Solche Ueberspannungen lassen sich bekanntlich nicht im Laboratorium wahrheitsgetreu untersuchen; sondern es gehören dazu Leitungen von praktischer Länge, auf denen die Wellen sich in Freiheit bewegen können. Man ist deshalb auf die Mithilfe der Elektrizitätswerke angewiesen. Es ist mir eine angenehme Pflicht, hier denjenigen Betrieben, die in Erkenntnis dieser Tatsache die Versuche weitgehend unterstützt haben, herzlich zu danken. Es sind dies vor allem die Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (E. K. Z.), die Forchbahn und die Abteilung für Elektrifizierung der Schweizerischen Bundesbahnen (S. B. B.). Ferner gebührt der Stiftung zur Förderung schweizerischer Volkswirtschaft und dem Aluminium-Fonds Neuhausen, sowie den schweizerischen Elektrizitätswerken und Konstruktionswerkstätten Dank für die finanzielle Unterstützung, die sie zum Ausbau des Kathodenstrahl-Oszillographen und zur Durchführung der Untersuchungen gewährt haben.

2. Die Gewitterspannungen.

a) Gewitterspannungen in Netzen niedriger Betriebsspannung. Untersuchungen in Netzen mit niedriger Betriebsspannung wurden im Sommer 1928 in der Umformerstation Forch grösstenteils an der mit 1200 V Gleichstrom betriebenen Bahn-

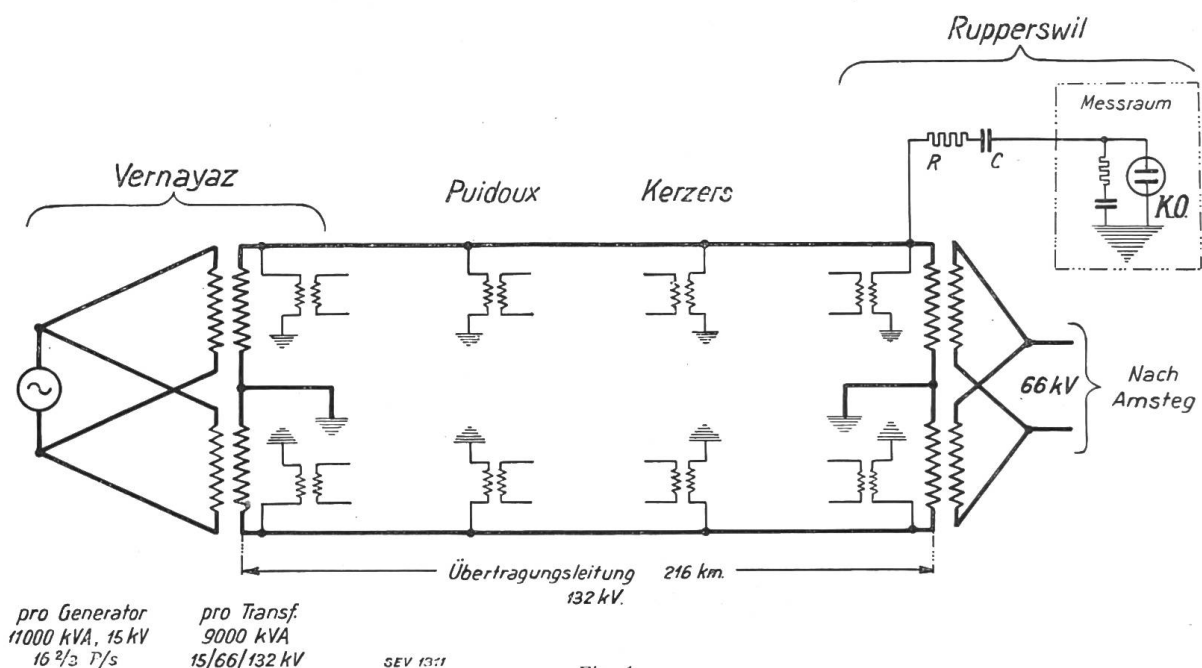


Fig. 1.

Prinzipielles Schema einer 132 kV-Leitung der S. B. B.

fahrleitung der Forchbahn und an einer 8 kV Drehstrom-Leitung der E. K. Z. mit einer Anzahl Abzweigungen, die der Speisung der Umformer und Gleichrichter der Forchbahn dient, durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen wurden im Bulletin des S. E. V. 1929, No. 11, S. 321, mitgeteilt.

b) *Gewitterspannungen in Höchstspannungsnetzen.* Die Messungen wurden im Sommer 1929 an einer Leitung hoher Spannung fortgesetzt. Durch das Entgegenkommen der Abteilung für Elektrifizierung der S. B. B. war es möglich, deren 132 kV-Uebertragungsleitung von Vernayaz nach Rapperswil den Gewittermessungen zugänglich zu machen. Fig. 1 zeigt das prinzipielle Schema einer 132 kV-Einphasen-Leitung der S. B. B., welche die Walliser Kraftwerke Vernayaz und Barberine über die Transformatoren in Rapperswil mit den Gotthardwerken Amsteg und Ritom kuppelt. Die Leitung ist doppelt geführt, grösstenteils auf demselben Gestänge. Die eine Schleife ist 216 km, die andere 210 km lang. Nur von Puidoux bis Vernayaz sind beide Schleifen auf getrennten Masten geführt, auf denen sich dann überdies noch andere Leitungen für 50 resp. 60 kV-Betriebsspannung befinden, die der S. A. l'Energie de l'Ouest Suisse (E. O. S.) und den S. B. B. gehören. Beide Schleifen werden in der Regel getrennt betrieben. Die 132 kV-Leitungen sind unverzweigt von Vernayaz bis Rapperswil. Nur in Kerzers ist normalerweise je ein Transformator an den beiden Leitungsschleifen angeschlossen. Die Mitte aller 132 kV-Transformatorwicklungen ist direkt an Erde gelegt. Fig. 2 zeigt das Bild der Masten, welche von Rapperswil bis wenige km vor Puidoux verwendet sind. Die Leiter sind an 7-gliedrigen Ketten aufgehängt. An dieser Leitung sind die folgenden Oszillogramme (Fig. 4 bis 8 und 10 bis 23) aufgenommen worden, und zwar zum Teil an der einen, zum Teil an der andern Schleife, aber immer am höhern der beiden Leitungsseile.

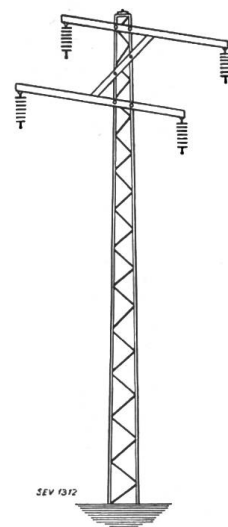


Fig. 2.
Thioleyres (Puidoux)-
Rapperswil.

Fig. 3 zeigt die Leitungs-Abspannung und die Spannungsteilung für den Oszillographen. Diese bestand aus einem Flüssigkeitswiderstand und einem 25 m langen Hochspannungskabel, das in verdankenswerter Weise von den Kabelwerken Brugg gratis zur Verfügung gestellt wurde. Das Kabel stand etwa 3 Monate dauernd unter ca. 66 kV zwischen Seele und Bleimantel und hat sich dabei ohne Störung bewährt. Die Schaltung wurde schon früher von Gabor für die deutsche Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen benutzt.

Fig. 4 zeigt zwei Blitzspannungen während eines Gewitters am 20. Juni, das etwa 5 km von Rapperswil entfernt über die Leitung zog. Die Figur enthält zwei Oszillogramme, herrührend von zwei zeitlich getrennten Blitzschlägen. In der Hauptsache erscheint darin ein steiler und hoher Spannungsschoss von wesentlich kürzerer Dauer als bei den Messungen an der 1200 V-Leitung auf der Forch. In beiden Fällen, die innerhalb weniger Minuten aufgetreten sind, kommen Gewitterspannungen von über 100 kV zum Vorschein, die sich der in diesem Augenblick vorhandenen Phasenspannung überlagern. Der Anstieg der Spannung erfolgt in höchstens $5 \mu\text{s}$. In dieser Zeit wandert eine Wanderwelle 1,5 km längs einer Leitung. Die Dauer des Spannungsschosses ist ca. $40 \mu\text{s}$. Bei diesen Blitzen

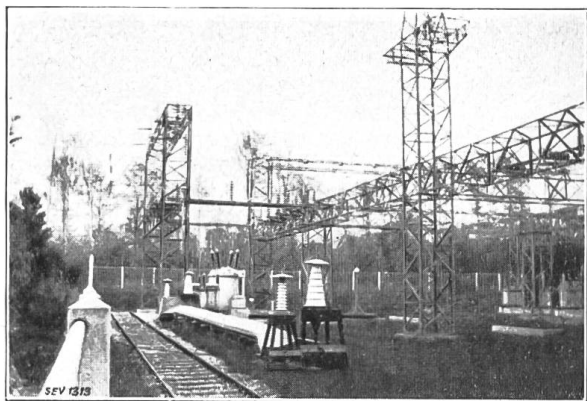


Fig. 3.
Spannungsteilung für den Kathodenstrahl-Oszillograph.

Beispiele gemessener Gewitterspannungen
auf der 132 kV-Leitung der Schweizerischen
Bundesbahnen.

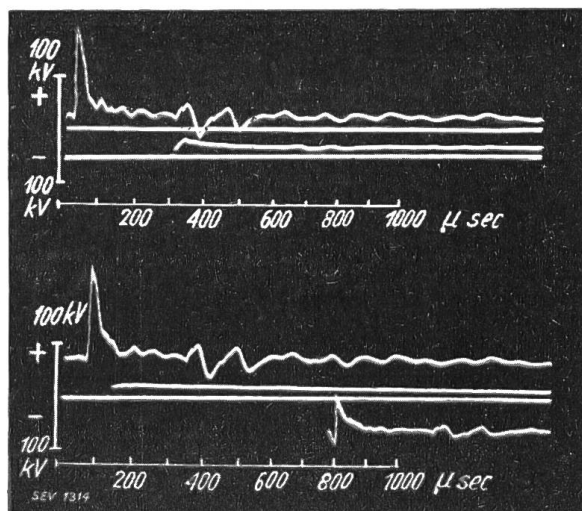


Fig. 4.

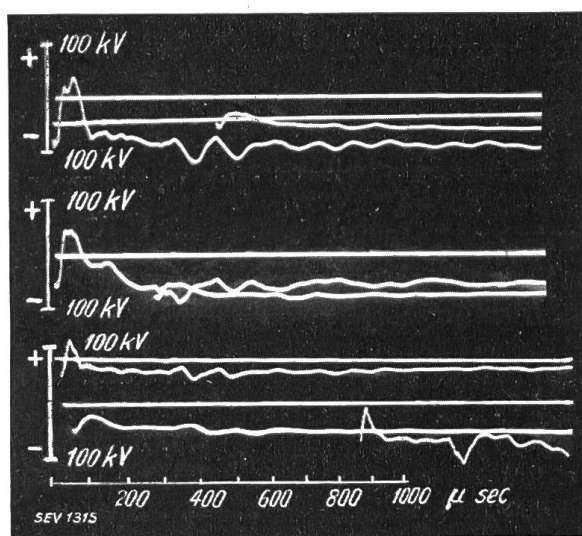


Fig. 5.

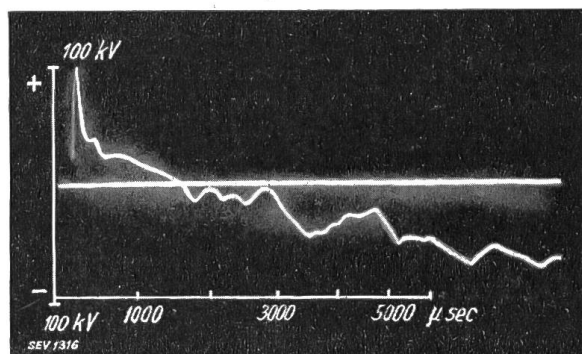


Fig. 6.

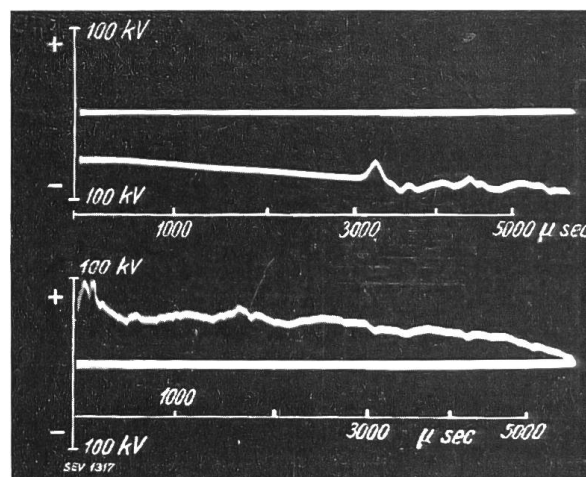


Fig. 7.

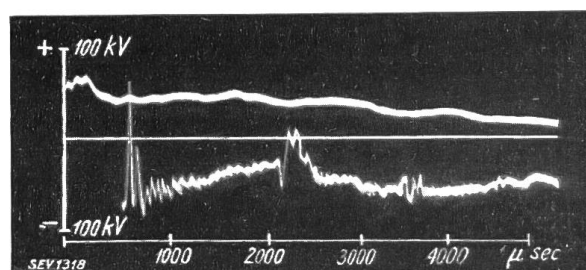


Fig. 8.

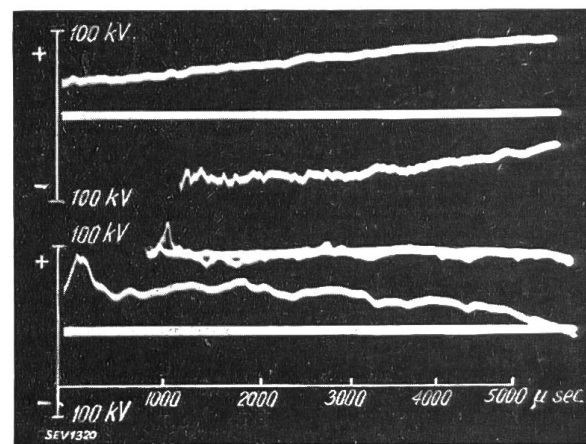


Fig. 10.

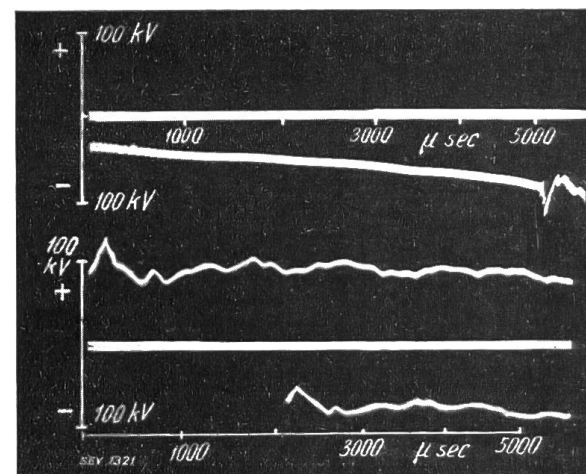


Fig. 11.

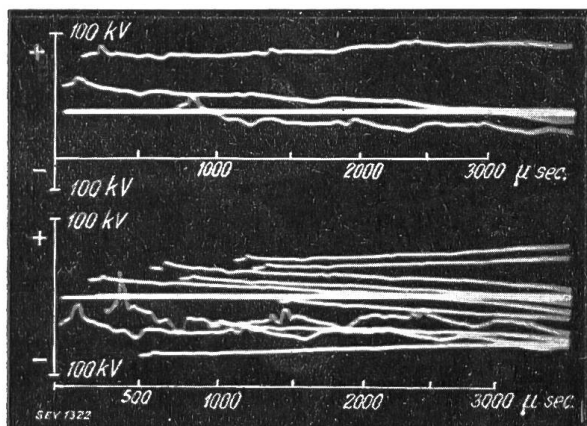


Fig. 12.

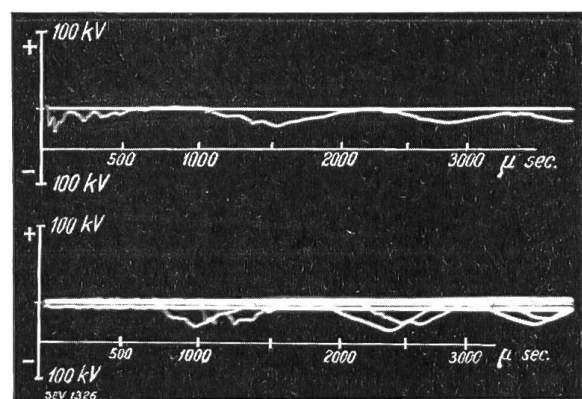


Fig. 16.

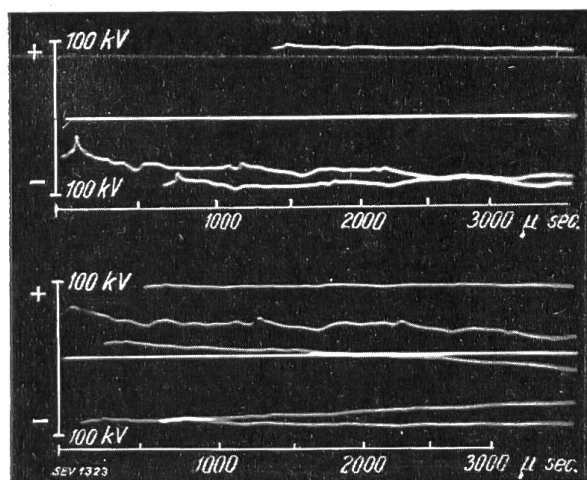


Fig. 13.

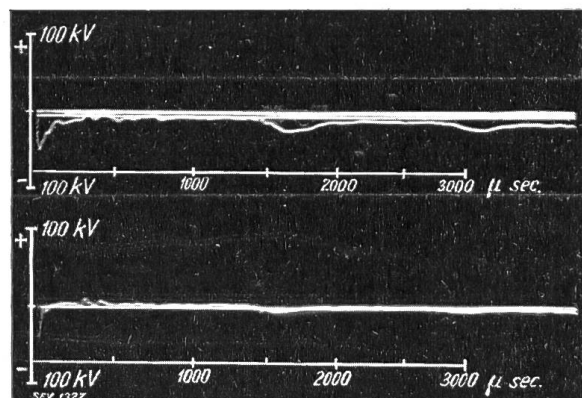


Fig. 17.

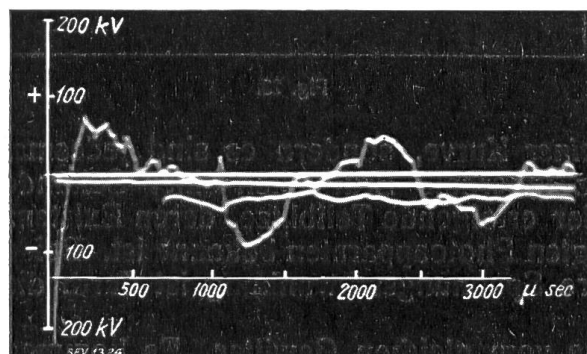


Fig. 14.

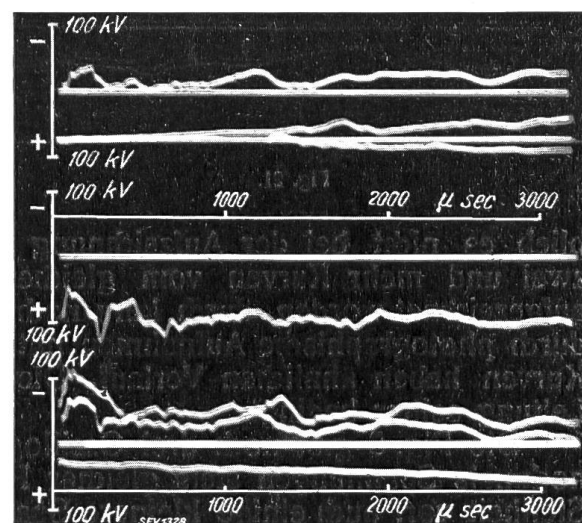


Fig. 18.

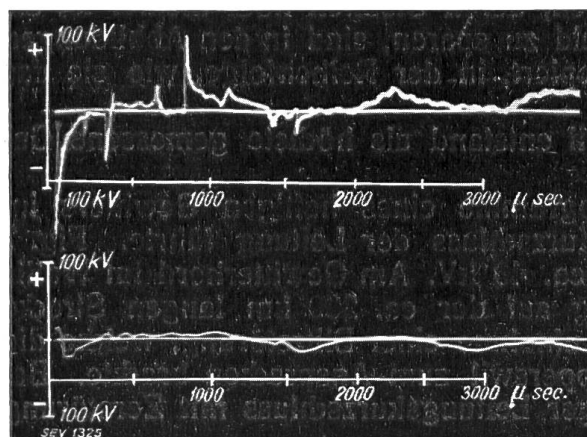


Fig. 15.

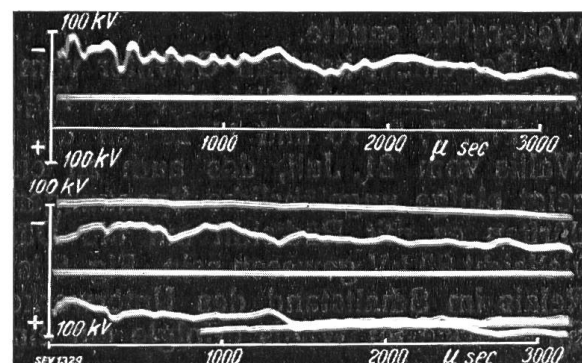


Fig. 19.

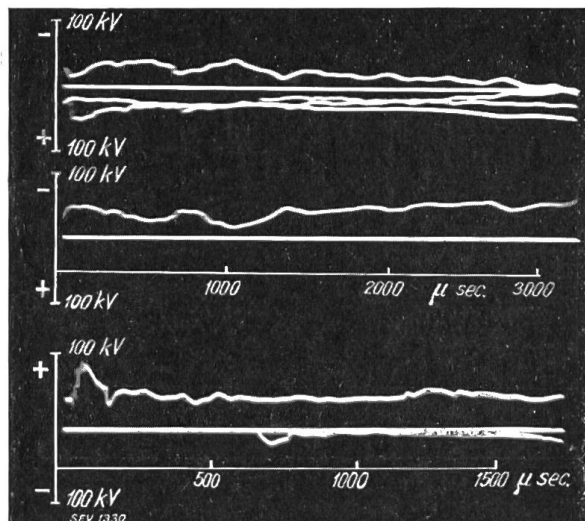


Fig. 20.

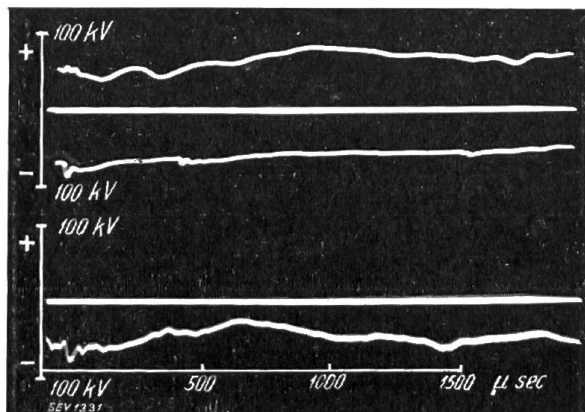


Fig. 21.

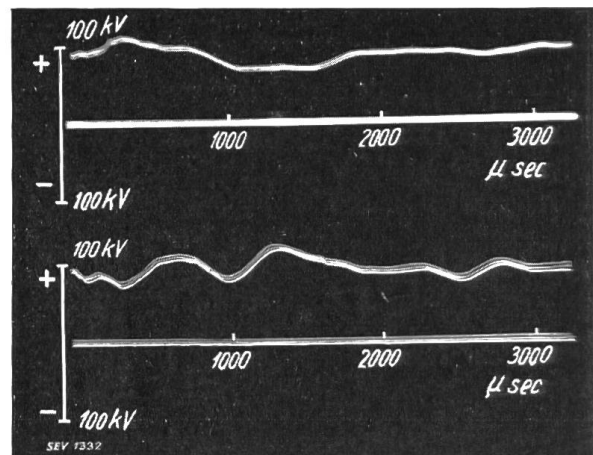


Fig. 22.

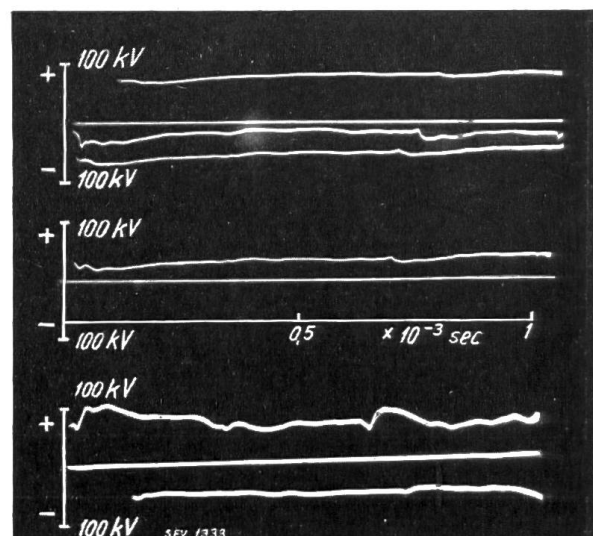


Fig. 23.

blieb es nicht bei der Aufzeichnung nur *einer* Kurve, sondern es sind jedesmal zwei und mehr Kurven vom gleichen Blitz innerhalb Bruchteilen einer Sekunde aufgezeichnet worden, durch kurz nacheinander erfolgende Teilblitze, deren Existenz durch photographische Aufnahmen mit bewegten Photoapparaten bekannt ist. Beide Kurven haben ähnlichen Verlauf. Die spätere Spannungsschwankung ist durch die Leitung selber bedingt.

Die Fig. 5 gibt noch drei Oszillogramme vom gleichen Gewitter. Es kommen nochmals Spannungen stets gleicher Polarität von ca. 100 kV mit etwas kleinerer Steilheit vor, auch einige kleinere Spannungen, deren Steilheit noch kleiner ist als bei grösseren Spannungen. Um Zeit und Geld zu sparen, sind in den Abbildungen öfters 2 oder 3 Oszillogramme zusammenkopiert, in der Reihenfolge, wie sie das Wetterglück sandte.

Bei einem heftigen Gewitter vom 4. Juli entstand als höchste gemessene Gewitterspannung nur diejenige der Fig. 6.

Fig. 7, 8, 10 und 11 zeigen die Oszillogramme eines heftigen Gewitters im Wallis vom 21. Juli, das auch zu einem Kurzschluss der Leitung führte. Fig. 7 zeigt einige ungefährliche Spannungen von ca. 40 kV. Am Gewitterherd im Wallis dürften es mit Rücksicht auf die Dämpfung auf der ca. 200 km langen Strecke vielleicht 80 kV gewesen sein. Fig. 8 ist die Aufnahme einer Blitzstörung, welche die Relais im Schaltstand des Unterwerkes Rapperswil zum Ansprechen brachte. Bei St. Maurice im Wallis erfolgte ein einphasiger Leitungskurzschluss mit Zerstörung

einer Isolatorenkette in der nicht gemessenen Phase. Das Oszillogramm zeigt einen sehr steilen Spannungsanstieg und einen etwas flacheren Spannungsrückgang innerhalb ca. $60 \mu\text{s}$, dann eine Wiederholung in kleinerem Masstab und anschliessendes Zucken. Das spätere Schwanken der Spannung ist durch das Hin- und Herlaufen der Welle auf der Leitung bedingt, woraus die Dämpfung der Welle beim ein- und mehrmaligen Durchlaufen der Leitung erkannt werden kann. Der Spannungssprung brachte in Rapperswil etwa 140 kV Gewitterspannung zustand mit Berücksichtigung der dort auftretenden Reflexion; ohne diese würden 70 kV Scheitelwert oder ca. 50 kV Effektivwert resultieren. Die zweite Spitze ist wahrscheinlich durch die Reflexion am andern Leitungsende in Vernayaz bedingt. Interessant ist, dass bei diesem Kurzschluss in der gemessenen Phase in Rapperswil eine absolute Ueberspannung nicht zustande kam, weil sich die Gewitterspannung in einem günstigen Phasenmoment der Betriebsspannung überlagerte. Besonders interessant ist das Verhalten der verschiedenen Leiter bei diesem Blitzschlag. Fig. 9 gibt ein Massbild des betroffenen Mastes bei St. Maurice. Das Gewitter befand sich unmittelbar in dem dortigen Talkessel: ob es sich um einen direkten Einschlag handelte, wurde nicht beobachtet. *Nur die Hängekette der Phase rechts (Ostseite des Tales) überschlug und wurde zerstört*, und zwar waren von den 7 Elementen 3 gebrochen, 3 weitere leicht beschädigt. Das Oszillogramm wurde an der andern Phase aufgenommen. Auf demselben Mast liegen unterhalb der S. B. B.-Leitung zwei Drehstrom-Leitungen der E. O. S. Beide werden mit 60 kV betrieben, sind aber durch 3-gliedrige Ketten mit Motorisolatoren mit Porzellanschirm für 120 kV isoliert. Die eine Leitung war während dem Gewitter-Nachmittag geerdet; die andere, direkt unter der gestörten Phase liegende, erlitt keine Betriebsstörung; auch kein Erdschluss wurde von den beiden Löschspulen dieses Netzes angezeigt. Das ist sehr bemerkenswert. Weiter ist zu bemerken:

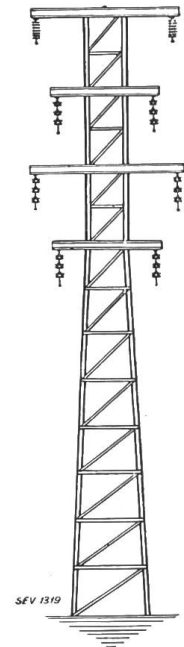


Fig. 9.
Bild des vom Blitz
getroffenen Mastes
bei St. Moritz.

Die Gegend von St. Maurice enthält ein grosses Gedränge von Hochspannungsleitungen. In 120 m Abstand von der Versuchs-Leitung, auf dem andern Ufer der Rhone, befindet sich eine 50 kV-Leitung der Lonza, in nochmals etwa gleichem Abstand weitere 50 und 66 kV-Leitungen. Keine dieser andern Leitungen erlitt gleichzeitig eine Betriebsstörung, trotzdem die beschädigte Phase auf der diesen Leitungen zugewendeten Seite des betroffenen Mastes liegt. Diese Unabhängigkeit der auf wenige Meter und auf 120 m entfernten Leitungen muss festgestellt werden, weil die Erkenntnis für den Schutz gegen Gewitterstörungen Interesse hat. Ob die Spannung auf der gemessenen Phase lediglich als Influenz-Spannung von der andern Phase, in welcher der Ueberschlag stattfand, erzeugt wurde, lässt sich nicht ohne weiteres entscheiden. Unmöglich ist diese Annahme jedenfalls nicht.

Die 4 Oszillogramme (Fig. 10 und 11) geben die grössten nachher gemessenen Spannungen wieder. Während dieser Zeit kamen zwei Spannungs- und Leistungsschwankungen im unten liegenden Netz der E. O. S. vor, als Folge von Blitzwirkungen in einem gekuppelten 10 kV-Netz. Man sieht, dass gleichzeitig auf der darüber liegenden 132 kV-Leitung keine gefährlichen Spannungen entstanden.

Fig. 12 bis 17 zeigen Oszillogramme aus der Gewitternacht vom 24. auf den 25. Juli. Dieses Gewitter brachte Abkühlung auf die lange Trockenperiode und zeichnete sich durch grosse Heftigkeit aus: Im Unterwallis wurde das Dörfchen Torgon durch Blitzschlag eingeäschert, in Aigle-Ormont wurde ein Haus in Brand gesteckt, ebenso in Berlens-Romont. Nachdem infolge des Gewitters bereits zwei Leitungskurzschlüsse auf der S. B. B.-Leitung und ein zeitlich davon getrennter, auf der E. O. S.-Leitung erfolgt waren, die wegen zu später Gewittermeldung nicht gemessen werden konnten, zeigen die Fig. 12 und 13 den Fortgang des Gewitters, das sich in breiter Front vom Unterwallis gegen Palézieux-, Fribourg-Solothurn-Aarau verzog. Bemer-

kenswert ist die starke Aehnlichkeit der Kurven, ferner die grosse Anzahl solcher auf einzelnen Oszillogrammen, das heisst, die grosse Anzahl von Teilblitzen eines Gesamtblitzes. Die Polarität der Blitzspannungsschüsse ist bei allen Oszillogrammen des Gewitters dieselbe; sie entspricht den Entladungen einer während des ganzen Gewitters stets negativ geladenen Wolke. Nun folgt wohl das wertvollste Oszillogramm des letzten Sommers in Fig. 14. Es handelt sich hier um einen direkten oder jedenfalls der Leitung sehr nahen Blitzschlag, der von einem Bauern bei Palézieux zufällig beobachtet und sofort gemeldet wurde. Ein Element der überschlagenen Isolatorenkette wurde zerstört. Der Erdungswiderstand des betroffenen Mastes beträgt: ohne Erdseil $22,1 \Omega$, mit Erdseil $0,7 \Omega$. Das Bild zeigt einen sehr steilen Spannungsanstieg mit anschliessendem Zusammenbruch infolge des Leitungskurzschlusses bei Palézieux, in 150 km Distanz vom Oszillographen. Daran schliesst sich die Entladeschwingung der Leitung. Infolge der noch angeschlossenen, auf den Kurzschluss arbeitenden Transformatoren hat diese eine komplizierte Form. Die Dauer des Spannungsschusses ist nur ca. $20 \mu s$. Der Spannungsanstieg erfolgte in Rapperswil in höchstens $10 \mu s$. Das entspricht an der Kurzschlussstelle einem Spannungshochsprung in höchstens ca. $5 \mu s$, was sich durch spätere Versuche ergab. Die Steilheit des Anstieges ist interessanterweise sogar grösser als jene des anschliessenden Spannungszusammenbruches durch den Leitungskurzschluss. Die in den Lehrbüchern vertretene Meinung, wonach erst der durch den Leitungsüberschlag verursachte Spannungszusammenbruch steile Wellen und entsprechende Windungsschäden in Transformatoren verursacht, ist demnach nicht richtig. Die absolute Spannungsspitze beträgt in Rapperswil noch 220 kV Scheitelwert = 155 effektive kV. Es ist ein glücklicher Zufall, dass gerade dieser Einschlag gesehen wurde. Aus den vor- und nachher aufgenommenen Oszillogrammen geht hervor, dass alle von indirekten Blitzen herrührenden Spannungen entgegengesetztes Vorzeichen aufwiesen, als die des einzigen direkten Einschlages. Das stimmt gut mit der Theorie überein, wonach bei indirekten Schlägen die Leitung entgegengesetzte Spannung annimmt als bei direkten Einschlägen. Eine Ausnahme macht allerdings das erste Oszillogramm der Fig. 16, wo im Verlauf eines Blitzes ein negativer Stoss vorkommt. Sofern sich weiter bestätigen würde, dass die Wolke ihre Polarität während eines Gewitters beibehält, wäre der Vergleich der Polarität der vielen kleinen Blitzspannungen mit derjenigen der gefährlich starken Schläge ein und desselben Gewitters ein Mittel, um direkte und indirekte Blitzschläge zu unterscheiden. *Zu erwähnen bleibt noch, dass der direkte Einschlag der Fig. 14 nur die gemessene Phase traf; die andere erlitt keinen Kurzschluss, was dank der Relaisfallklappen in jeder Phase und der starren Nullpunktserdung einwandfrei festgestellt werden konnte. Ebenso erlitt auch die andere Leitungsschleife auf der andern Seite der Masten keine Betriebsstörung.*

$1\frac{1}{2}$ Stunden später schlug der Blitz in einen Mast 300 m vor dem Unterwerk Kerzers, was von zwei Beobachtern von verschiedenen Seiten gesehen wurde. Der Erdungswiderstand des Mastes beträgt: ohne Erdseil $9,4 \Omega$, mit Erdseil $0,8 \Omega$. Die eine Schleife war zu Versuchszwecken spannungslos; die andere Schleife auf demselben Gestänge speiste den Bahnbetrieb und erlitt *keine Betriebsstörung*. Brandspuren infolge des Einschlages konnten nicht gefunden werden.

Das erste Oszillogramm der Fig. 15 zeigt noch einige steile Spannungsschüsse während dieser Zeit der spannungslosen, als Antenne durchgeschalteten Leitung. Leider ist hier die Höhe des ersten Schusses nicht mehr auf dem Oszillogramm ersichtlich, sondern reicht darüber hinaus. Die Fig. 16 und 17 geben noch weitere Gewitterspannungen auf der ausser Betrieb befindlichen Leitung Rapperswil-Vernayaz. Die Wellenschwingung der Leitung kommt darin deutlich zum Ausdruck mit der sehr starken Abflachung der ersten Wellenfront. Die Höhe aller dieser weiteren Spannungen ist nicht mehr bedeutend, wie eben die meisten Gewitterspannungen zum Glück für den Höchstspannungsbetrieb nicht hoch sind. Beim Wiederinbetriebsetzen der Leitung zeigte sich dann ein Defekt der sekundärseitigen Sicherungen des

Spannungswandlers, der beim beobachteten Masteinschlag oder bei der Blitzspannung der Fig. 15 aufgetreten sein muss. Dieselbe Erscheinung wurde auch bei Schalterversuchen beobachtet; die am Wandler aufgetretene Spannung muss ca. 200 kV_{eff} betragen haben (66 kV normal). Erwähnt muss noch sein, dass nach einer Pause im Gewitter die Polarität der Blitzspannungsschüsse wechselte. Das entspricht einem Uebergang der Wolkenladung während der Gewitterpause von — auf + Werte.

Die Fig. 18 bis 23 geben noch einige Spannungsverläufe von spätern Gewittern. Neues bringen sie nicht. Sie bestätigen nur, dass die Anzahl der gefährlich hohen Spannungen klein ist. Wenn sie aber vorkommen, kennzeichnen sie sich durch sehr steile Spannungsspitzen grosser Höhe. In einzelnen Oszillogrammen zeigt sich deutlich die Kompliziertheit des Spannungsverlaufes der Influenz-Spannungen indirekter Blitze. Ihre Höhe beträgt aber selten oder vielleicht nie über ca. 50 kV Scheitelwert.

Die Oszillogramme der Fig. 23, die bei dem letzten Gewitter des Jahres 1929 am 8. Oktober erhalten wurden, sind deshalb interessant, weil während derselben Minuten zwei Einschläge in die Fahrleitungen vorkamen, und zwar in 400 und 550 m Distanz von der gemessenen Uebertragungsleitung. Die höchsten, gleichzeitig auf der Uebertragungsleitung registrierten Spannungen sind durchaus ungefährlich. Ebenso ist es bei einem frühern Blitzschlag, der in 1200 m Distanz von der Leitung ein Haus entzündete. Auf der Leitung konnte von diesem Blitzschlag gar keine Gewitterspannung nachgewiesen werden.

Ich komme nun zum zweiten praktischen Teil meiner Ausführungen: *Was folgt aus den beschriebenen Gewitterspannungsmessungen? Wie machen wir die Blitze in Hochspannungsanlagen unschädlich?* Wir haben uns das Ziel gesteckt, die Gewitterspannungen in ihrem Verlauf genau zu erkennen, um sie dann zu bekämpfen und unschädlich zu machen. Das Gefährliche der Gewitter für Leitungen sehr hoher Spannung liegt nach den Oszillogrammen einzig und allein in den relativ selten vorkommenden steilen und hohen Spannungsspitzen kurzer Dauer. Diese Stösse sind auch in Amerika durch 2 Oszillogramme der G. E. Co. und der Westinghouse Co., in Verbindung mit bedeutenden Werken, sowie durch zahlreiche Klydonographenmessungen nachgewiesen worden.

Die Verteilung einer grossen Anzahl Klydonographen²⁾, mit denen man die Höhe der Ueberspannungsspitzen einigermaßen genau messen kann, hat ermöglicht, die Spannungsverteilung längs der Leitung und auch die Ueberspannung in der Nähe der Blitzschläge zu erfahren. Auf einer 132 kV-Leitung mit 14-gliedrigen Isolatoren-Ketten sind z. B. auf diese Weise 2100 kV Spannungsspitze bei Blitzen mit anschliessendem Kurzschluss der Leitung registriert worden, ferner ca. 1450 kV Spannungsspitzen ohne nachfolgenden Leitungskurzschluss. Das sind ca. 1500 resp. 1000 kV effektive Spannung.

Leider sind die amerikanischen Kathodenstrahl-Oszillographen nicht in der Lage, auch kleinere Blitzspannungen aufzuzeichnen. Es sind deshalb, trotzdem heute im ganzen 5 Stationen mit Kathodenstrahl-Oszillographen ausgerüstet sind, erst 2 gute Oszillogramme veröffentlicht worden, eines mit 750 kV, das andere mit 600 kV Spannungsspitze. Diese zwei Oszillogramme zeigen im wesentlichen denselben Verlauf wie unsere Bilder von Blitzspannungen mit nachfolgendem Leitungskurzschluss (Fig. 8 und 14).

Aus diesen Messungen lassen sich zunächst zwei allgemeine Ergebnisse für den Schutz gegen Gewitterstörungen ableiten;

1. Auch bei kräftigen Gewittern rufen nur wenige Blitze gefährliche Ueberspannungen hervor; die weitaus meisten Blitzschläge sind für die Leitung harmlos und ohne Bedeutung. Die Auffassung, dass jeder Blitzschlag eines einigermaßen nahen Gewitters gefährliche Ueberspannungen gebe, ist durchaus nicht berechtigt.

²⁾ Beschreibungen von Klydonographen (Wellenschreibern), resp. von Surge Recorders, finden sich bei J. F. Peters: El. World, Band 83, 1924; I. H. Cox & J. W. Legg: AIEE-Journal 1925; Müller-Hildebrand: Siemens-Zeitschrift 1927, Hefte 8/9.

2. Bezüglich des Prinzipes des Ueberspannungsschutzes ist es heute durchaus klar, dass es infolge der gemessenen Steilheit der Blitzspannungsschüsse, d. h. infolge ihrer raschen örtlichen Entstehung, ausgeschlossen scheint, die Leitungsüberschläge unter dem Gewitterherd durch Schutzapparate, die in vielen Kilometer weit entfernten Stationen aufgestellt sind, zu verhindern.

Zur Unschädlichmachung der Gewitter gibt es offenbar zwei Wege:

a) *Erhöhen der Leitungsisolation*, bis diese auch der höchsten Blitzspannung standhält, also möglichstes *Verhindern* des Leitungs-Kurzschlusses. Die hohen und steilen Wanderwellen, welche auf die Stationen auftreffen, müssen dabei vor oder in den Stationen unschädlich gemacht werden.

b) *Absichtliches Zustandekommenlassen des Leitungs-Ueberschlags, ev. sogar bei nicht allzu hoher Spannung*, so dass die abfliessenden Wellen keine allzu grosse Höhe erreichen können; dabei als Hauptforderung: *Unschädlichmachen des Leitungs-Ueberschlags für die Betriebsführung*.

Es ist interessant und wertvoll, dass heute beide Wege verfolgt werden, der erste von den Amerikanern, speziell der General Electric Co., der zweite in Europa. Ich habe auf Grund der Messungen im Sommer 1928 diesen Weg angedeutet: er ist, unabhängig davon, ungefähr gleichzeitig auch von Prof. Matthias, Direktor der Deutschen Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen, auf Grund deren Gewitteruntersuchungen angegeben worden. Der amerikanischen Absicht kommt die Tatsache zu Hilfe, dass die Ueberschlagsspannung der Isolatoren bei Spannungsschüssen von der Dauer weniger millionstel Sekunden ungefähr das Doppelte des Ueberschlagswertes bei Normal-Frequenz beträgt. Indem sie diese Stossüberspannung erhöhen, wollen sie die Anzahl der Abschaltungen durch Blitz *vermindern*. Die Westinghouse Co. glaubt, durch Einbau ihrer Ventil-Ableiter in jede Isolatorenkette der Leitung dem Ziel noch näher zu kommen.

Meine Auffassung geht davon aus, dass sich der Leitungsüberschlag trotz riesiger Isolation nicht immer verhindern lässt, vor allem nicht bei direkten Einschlägen. Fügen wir uns also ins Unvermeidliche, helfen uns aber dadurch, dass wir den Leitungsüberschlag *für die Leitung gefahrlos und für die Betriebsführung bedeutungslos machen*. Dabei stützen wir uns in erster Linie auf die Beobachtung, dass bei Höchstspannungsleitungen die Blitzspannungen lokal sehr eng begrenzt sind, nicht nur längs der Leitung, sondern noch viel mehr, wie ich Ihnen gezeigt habe, quer dazu, *so dass ein Blitz bei guter Masterdung fast ausnahmslos nur einen Leiter stört*, während die andern unbehelligt bleiben. In diesem Fall ist das gesteckte Ziel auch erreichbar, wenigstens vorläufig für Leitungen auf Eisenmasten, wie ich zeigen werde. Neben den bereits bei der Besprechung der Gewitter-Oszillogramme angeführten Fällen, wo auf untereinanderliegenden Leiterseilen und nebeneinanderliegenden Betrieben die Unabhängigkeit der Blitzstörungen konstatiert werden konnte, soll folgende Störungsstatistik, die ich der Abteilung für Elektrifizierung der S. B. B. verdanke, diese Beobachtungen ergänzen:

1. Von allen Kurzschlüssen des 132 kV-Netzes im Sommer 1929 waren $\frac{9}{10}$ einpolig und nur $\frac{1}{10}$ zweipolig;

2. Von allen 8 resp. 10 Kurzschlüssen infolge Blitzschlages waren sämtliche einpolig, keiner zweipolig.

3. Keine Blitzstörung hat zugleich beide Betriebe links und rechts der Masten betroffen.

Diese Tatsachen liessen sich dank des für diesen Zweck ausserordentlich günstigen Netzes mit starrer Nullpunktserdung und Relais in beiden Phasen einwandfrei feststellen. Nach amerikanischen Statistiken³⁾ betreffen 5 bis 25 % aller Blitzstörungen zugleich zwei auf denselben Masten angeordnete Leitungssysteme. Dabei wird auf kleine Masterdungswiderstände in Amerika weniger geachtet als bei uns;

³⁾ W. W. Lewis, G. E. Rev. No. 7, Juli 1929.

diese Widerstandswerte sind leider nirgends angegeben. Ein Teil der mehrpoligen Ueberschläge ist vermutlich auf hohe Masterdungswiderstände zurückzuführen, die, ähnlich wie Holzmasten, Kurzschlüsse zwischen den Phasen ermöglichen, ein anderer Teil auch auf das Uebergreifen des Kurzschlusslichtbogens auf zunächst unbeteiligte Phasen.

Wir müssen uns versagen, auf die Konsequenzen der amerikanischen Vorschläge einzugehen. Sicher ist, dass Ueberschläge als Folge von Blitzen auch auf 220 kV-Leitungen in nicht wesentlich geringerer Zahl als auf Leitungen kleinerer Spannung vorkommen. Zum Beispiel gibt es auf der von Lewis genannten 106 km langen 220 kV-Leitung der Pennsylvania Power & Light Co. ca. 15 Abschaltungen pro Jahr infolge von Blitzen. Und zwar kommen Blitzschläge auch vor auf Teilstrecken, die mit zwei Erdseilen ausgerüstet sind. Die erforderliche Stossspannung zum Ueberschlag der 14-gliedrigen Ketten beträgt ca. 2700 kV. Wenn es trotzdem gelingen sollte, für so hohe Betriebsspannungen die Leitung blitzsicher (wenigstens bez. indirekter Blitzschläge) zu isolieren, so bleibt doch das Problem für alle Netze mit kleineren Betriebsspannungen ungelöst.

Ich will nun die wichtigsten *Folgerungen* meines Vorschlages ziehen, und zwar in erster Linie bezüglich der Schutzmassnahmen auf der Leitung selber, in zweiter Linie bezüglich jener in den Stationen.

A. Schutzmassnahmen auf der Leitung.

1. Vor allem müssen die Isolatoren auch der Stossspannung gewachsen sein, ohne zertrümmert zu werden. Wir verlangen *stossichere* Isolatoren. Die Gewittermessungen geben der Stossspannungsprüfung von Isolatoren grosse praktische Bedeutung. Hier hat Bucksath bei der Porzellanfabrik Rosenthal viel vorgearbeitet.

Er zeigte bereits 1924, dass durch die Stossprüfung viele Isolatoren zerstört werden, die der heute üblichen Spannungsprüfung mit Normalfrequenz standhalten. Ferner zeigt er, dass es unendlich gute Isolatoren gibt, die sich auch durch 100 000 Stösse nicht zerstören lassen. Ich erwähne diese Versuche deshalb, weil sie durchweg grosse Uebereinstimmung mit unsern Beobachtungen bei Gewittern ergaben. In der Tat werden meistens die äussersten Teller von Hängeketten vom Blitz zerstört, wie das bei der Stossprüfung auch geschieht und nicht die bei Normalspannung am meisten beanspruchten Glieder. Ferner ist interessant, von Bucksath zu vernehmen, dass der einzige Isolator, der durch Stossspannungen überhaupt nicht zerstört werden kann, der Motor-Isolator ist. Nun haben gerade die auf denselben Masten wie unsere Messleitung verlaufenden Leitungen der E. O. S. 3-gliedrige Motorisolatoren. Auf diesen Leitungen kamen im vergangenen Sommer 3 Abschaltungen und 1 Erdschluss mit Zerstörung eines Trennmesserstützers durch Blitzschlag vor. Aber kein Motorisolator wurde dabei zerstört, während umgekehrt bei den Ueberschlägen der gewöhnlichen Tellerketten die Zerstörung einzelner, besonders der Randglieder die Regel bildet. Die Motor-Isolatoren erfüllen also bereits eine unserer Forderungen: Sie sind *stossicher*.

2. Zweitens müssen in Netzen mit Nullpunktserdung die Isolatoren-Ketten dem nachfolgenden Kurzschlussstrom, in Netzen ohne Nullpunktserdung dem nachfolgenden Erdschlussstrom, gewachsen sein, was *lichtbogensichere* Isolatoren bedingt.

3. Kleine Mast-Erdungswiderstände.

4. Grosse Distanzen zwischen den Phasen.

5. Dazu kommt ev. die weitere Forderung: *Verzögerungsfreie* Isolatoren. Das sind solche, bei denen der Ueberschlag auch bei sehr raschem Spannungsanstieg beim gleichen Spannungswert erfolgt, wie bei langsam ansteigender Spannung.

Die zwei Forderungen 2. und 5. lassen sich wahrscheinlich durch passende Lichtbogenarmaturen zusammen erfüllen. Diese müssen dazu wulstiger gehalten sein als die heutigen, um die Charakteristik einer Kugelfunkenstrecke zu besitzen und nicht die einer Spitzenfunkenstrecke. Vielleicht kann dieselbe Wirkung bei den

Motorisolatoren auch durch passende Gestaltung der Blechschirme erreicht werden. Hier bleibt der Isolatorentchnik ein dankbares Gebiet.

B. Schutzmassnahmen in den Stationen

bezwecken:

1. Schutz gegen die vom Gewitterherd eindringenden hohen und steilen Spannungswellen, die durch die Oszillogramme nachgewiesen sind, vor allem die Verhinderung von Ueberschlägen in den Anlagen selber. Der Hauptwert der Klydonographen-Messungen besteht wohl darin, dass sie die Dämpfung der Wellen längs der Leitungen haben erkennen lassen. Diese ist ausserordentlich stark, besonders für hohe Spannungen, wahrscheinlich infolge des starken Glimmeffektes. Bei unseren zwei Oszillogrammen, bei denen Leitungskurzschluss auftrat, zeigt sich bei einem Blitzschlag in die gemessene Phase in 150 km Distanz (Fig. 14) noch eine Spannung von 220 kV. Die Stossüberschlagsspannung der 7-gliedrigen Kette beträgt ca. 900 kV Spitzenwert, so dass die Wellenspannung auf dem langen Weg zum Leitungsendpunkt ungefähr auf $\frac{1}{8}$ gesunken ist. Das andere Oszillogramm (Fig. 8) gibt auf der nicht vom Kurzschluss betroffenen Phase bei 200 km Gewitterdistanz noch 70 kV durchlaufende Wellenspannung, also ca. $\frac{1}{13}$ der Ueberschlagsspannung.

Die Amerikaner haben bereits auch durch künstliche Spannungsstösse mit ihrem Blitz-Generator die Dämpfung so hoher Spannungen nachgemessen. Es ist daraus ersichtlich, dass in modernen Höchstspannungsnetzen mit durchwegs gleicher Isolation im allgemeinen nur Gewitter mit weniger als 40 km Distanz von Endstationen, oder mit weniger als 20 km Distanz von Durchgangsstationen für diese eine Gefahr darstellen. Für nahe Gewitter ist also ein Schutz gegen die eindringenden Spannungswellen zur Verhinderung von Stationsüberschlägen infolge von Reflexionen nötig. Er kann erreicht werden, indem man nach Matthias⁴⁾ die Stationsisolation stärker wählt als jene der Leitung oder indem man den Stations-Isolatoren eine genügend grosse Ueberschlagsverzögerung gibt gegenüber jenen der Leitung oder wenigstens gegenüber jenen vor der Leitungsabspannung. Oder aber man vermindert in den Stationen die Höhe der Ueberspannung, entweder durch Ableiter, Ventil- oder Widerstandsableiter, oder durch passende Kondensatoren. Die Versuche geben die Grundlagen für die Bemessung von Schutzapparaten.

2. Zu den Massnahmen in den Stationen gehört die Unschädlichmachung des einpoligen Leitungsüberschlags für die Betriebsführung.

Sofern der Sternpunkt des Netzes nicht geerdet ist, haben wir in der Löschspule ein Mittel zur Löschung des Erdschluss-Lichtbogens. Bis heute sind zwar Löschspulen für Netze sehr hoher Spannung wenig angewendet worden. Die Erfahrungen in solchen Netzen sind sehr interessant; sie sprechen nicht immer für die Löschspule. In Anlagen mit *starrer Nullpunktserdung*, wo sich jeder Erdschluss als Kurzschluss auswirkt, ist die Betriebsstörung infolge Gewitters dadurch zu vermeiden, *dass nur die vom Blitz betroffene, überschlagende Phase durch die Relais automatisch abgeschaltet wird*. Soviel sich voraussagen lässt, sind bei diesen lediglich einpoligen Kurzschlüssen nach Erde die andern gesunden Phasen in den meisten Fällen in der Lage, den Betrieb aufrecht zu erhalten, insbesondere das Aussertrittfallen paralleler Werke zu verhindern. Versuche in dieser Hinsicht fehlen leider heute noch⁵⁾. Im beschriebenen, durchaus erreichbaren und in manchen Anlagen schon erreichten Fall, wo die Leitung selber durch den Ueberschlag keine dauernde Beschädigung erleidet, kann die gestörte Phase innerhalb einer oder weniger Sekunden durch Wiedereinschalten wieder in Betrieb genommen werden. Durch eine solche relativ billige und einfache Anordnung in Verbindung mit den erwähnten Schutzmassnahmen auf der Leitung und in den Stationen *lässt sich eine Hochspannungsanlage nach*

⁴⁾ Matthias, ETZ, No. 41, 10. Oktober 1929.

⁵⁾ Einige Anhaltspunkte geben die amerikanischen Stabilitätsuntersuchungen, siehe R. Wilkins, AIEE Journal 1926, S. 142. — Evans & Wagner, AIEE Journal 1926, S. 376. — Diskussion von Lewes Stability AIEE 1926, S. 874.

den gewonnenen Erfahrungen nicht nur bezüglich indirekter, sondern sogar auch bezüglich direkter Einschlüsse „blitzsicher“ bauen in dem Sinne, dass weder Materialzerstörungen noch Betriebsunterbrüche infolge der Gewitter auftreten.

Es bleibt noch ein Wort zu sagen über den Wert des Erdseiles. Aus dem Verlauf der Gewitterspannungen geht hervor, dass das Erdseil die Blitzgefahr *vermindert*, nicht aber *verhindern* kann. Dies gilt für indirekte und direkte Blitzschläge. Durch die Abschirmung wird die Höhe der indirekten Blitzspannungen reduziert; durch die Anwesenheit eines weitem Leiters, eben des Erdseils, die Wahrscheinlichkeit des Blitzeinschlages in eine Phase verringert. Amerikanische Statistiken, die vom Overhead Systems Committee ausgearbeitet wurden⁶⁾ bestätigen diese Folgerung, indem sie bei Leitungen mit Erdseilen nur $\frac{1}{2} \div \frac{1}{4}$ der Schalterauslösungen infolge von Blitzen nachweisen gegenüber solchen ohne Erdseile.

Unsere Ausführungen stützen sich in erster Linie auf die Beobachtung, dass der Blitz bei den grossen Distanzen der Leiter auf Höchstspannungsleitungen und bei guter Erdung möglichst jedes einzelnen Mastes nur ein Seil in Mitleidenschaft zieht. Bis zu welchen Seildistanzen oder Netzspannungen herunter dies richtig bleibt, wissen wir noch nicht. Dies ist das Hauptziel weiterer Untersuchungen. Daneben bleibt noch viel zu tun, wobei man aber nicht auf den natürlichen Blitz angewiesen ist. Nachdem wir den von Blitzen bewirkten Spannungsverlauf ja heute kennen, kann dieser auch künstlich erzeugt werden. In diesen zweiten Teil gehören alle Untersuchungen über das Verhalten der Isolatoren, über den Schutzwert der Schutzanordnungen, Schutzapparate, Ableiter usw. gegenüber Spannungen mit ähnlichem Verlauf, wie bei den konstatierten Blitzspannungen. Wir sind durch die Versuche bereits zur Erkenntnis des Wesens der Gewitterspannungen und damit zu einem ganz bestimmten Standpunkt in der Bekämpfung der Gewitterstörungen, vor allem für Höchstspannungsnetze, gelangt.

3. Wanderwellenformen als Ueberspannungserreger an verschiedenen Leitungen.

Das grosse Interesse, das in den letzten Jahren den Wanderwellen auf Leitungen als Ueberspannungserregern entgegengebracht wurde, lässt die Vorführung einiger Wellenformen an praktischen Leitungen wünschenswert erscheinen.

Das Zustandekommen der Wanderwellenschwingung sei anhand einer Fig. 24 erläutert. Eine Leitung, z.B. die Fahrleitung der Forchbahn, besitze im Punkt A ein offenes Ende, wo der Oszillograph als Messinstrument aufgestellt sei. Der Draht ist seiner ganzen Länge nach auf das Potential V_0 aufgeladen. Ob es sich dabei um eine Gleichspannung oder um einen momentanen Wert einer Wechselspannung handelt, ist gleichgültig. Bei Punkt P trete ein Erdschluss oder Kurzschluss ein. Dann wird dort die Spannung V_0 sehr rasch zu Null werden. Die entferntern Leitungsteile bleiben aber zunächst noch unberührt vor der Störung. Diese breitet sich ganz genau gleich vom Ursprung P aus, wie z. B. eine Druckentlastung in einem wassergefüllten Gummischlauch oder in einer unter Druck stehenden Druckleitung, die bei Punkt P plötzlich geöffnet wird. Das Wasser, resp. die elektrische Ladung, entweicht aus dem Loch in Form eines Stromes, der als Welle immer weiter von P entfernte Schlauchteile vom Druck, resp. der Spannung entlastet. Bei Ankunft der Welle, die man an einem Gummischlauch gut verfolgen kann, im Endpunkt A der Leitung, fliesst im ganzen Schlauch ein Wasserstrom, der gerade soviel Wasser mit sich herausführt, dass der vorher vorhandene innere Ueberdruck im Schlauch verschwindet. Im Moment der Wellenankunft in A wäre somit die Druckentlastung vollständig durchgeführt, resp. die Leitung spannungslos. Aber es fliesst jetzt im ganzen Schlauch ein Wasserstrom, der infolge der Trägheit des Wassers, resp. beim elektrischen Strom infolge des mit dem Strom verknüpften magnetischen Feldes, nicht plötzlich verschwinden kann, da er Energie in sich birgt. Da beim Punkt A der Schlauch geschlossen ist, entnimmt der im Schwung befindliche Wasserstrom dort dem Schlauch

⁶⁾ W. W. Lewis. General Electric Review, 1926, No. 7, S. 375.

weitere Wassermengen nur, indem er ihn zusammenkrampft und einen innern Unterdruck erzeugt. Dadurch stoppt der Strom dort zugleich ab. Der Strom hört also zuerst von Punkt *A* ausgehend wieder auf zu fließen, dafür entsteht zugleich von *A* gegen *P* als Welle vordringend ein Unterdruck im Schlauch, der gerade so gross ist wie der zu Beginn des Vorganges vorhanden gewesene innere Ueberdruck. Beim Loch *P* angelangt, hat der Entleerungsstrom (Entladestrom) aufgehört zu fließen, aber der Schlauch hat seinen Ueberdruck mehr als ausgeglichen, so dass jetzt ein Wasserstrom rückwärts in den Schlauch hineinfließen muss, um den Unterdruck aufzuheben. Elektrisch gesprochen kehrt der Entladestrom um in einen Lade-

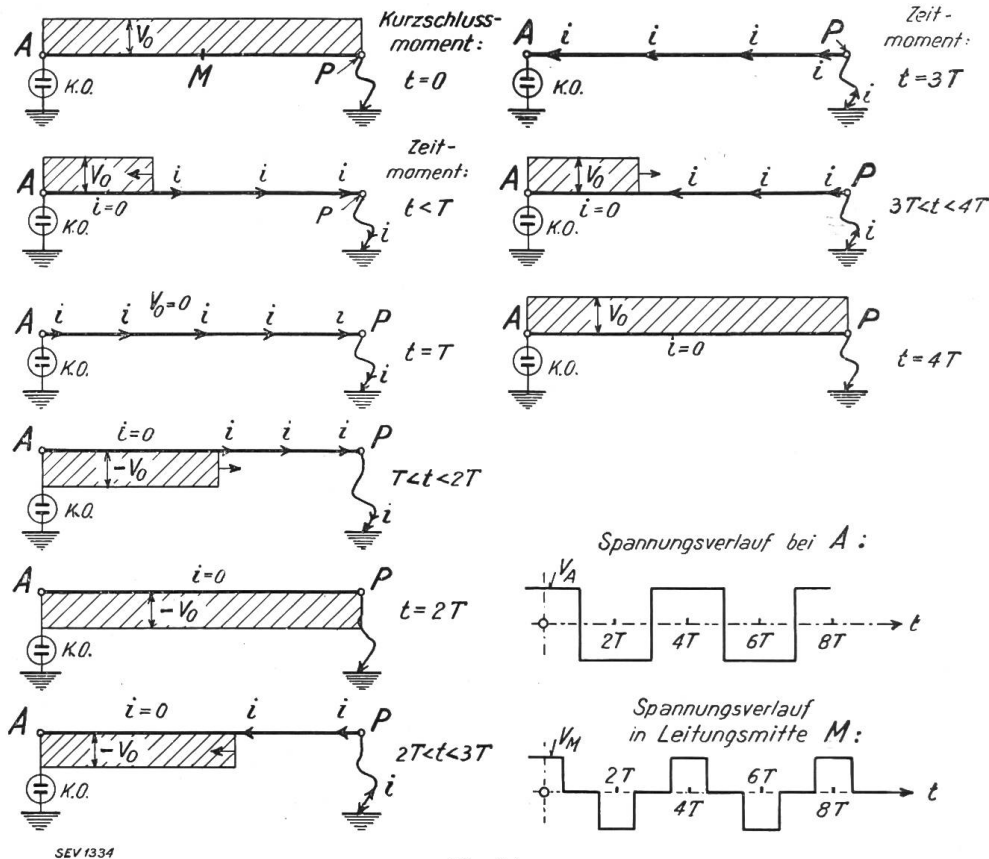


Fig. 24.

Erläuterung der Wanderwellenschwingung.

strom. Damit beginnt von *P* ausgehend wieder die erneute Spannungslosigkeit der vorher umgeladenen Leitung und zugleich ein Ladestrom usw. In diesem Beispiel ist der gleiche Vorgang wie beim Fallenlassen eines Pendels zu erkennen, oder wie beim Einschalten eines Schwingungskreises aus Kondensator und Drosselspeule. Die Leitung schwingt infolge ihres elektrischen und magnetischen Feldes genau gleich wie alle Systeme mit nur zwei sich gegenseitig umwandelnden Energieformen. Nur der Energieentzug durch Wärmeentwicklung bewirkt ein Abklingen, so dass ein Ruhezustand erreicht wird, der in unserem Fall der durchweg geerdeten Leitung entspricht. Der theoretische Druck- resp. Hauptverlauf im Punkt *A* ist durch die zweitletzte Kurve der Fig. 24 dargestellt. Der Spannungsverlauf z. B. in der Mitte der Strecke *A*—*P* durch die letzte Kurve.

Für die Spannung im Punkte *A* haben wir nun sehr viele Oszillogramme aufgenommen, und zwar an ganz verschiedenen Leitungen und bei sehr verschiedenen Distanzen *A*—*P*.

Die nach der Erklärung zu erwartenden anfänglichen Rechteckformen der Spannungskurven sind in Praxis nicht immer vorhanden, nicht nur wegen Ohmscher Dämpfung, sondern noch mehr wegen der Kapazität der Leitungsisolatoren und

der Stationsanlagen. Im folgenden erwähne ich nur wenige Beispiele solcher Wanderwellen-Schwingungen.

Fig. 25 zeigt, dass der theoretische Verlauf an gewissen Leitungen sehr angenähert vorkommt. Das Oszillogramm ist an einer 500 m langen Doppelleitung aus 8 mm Cu-Draht gemessen, die nirgends geerdet ist und plötzlich am einen Ende einen Kurzschluss erleidet. Die ersten zwei Kurven unterscheiden sich nur durch den Zeitmasstab. Die dritte Kurve gilt, wenn am Leitungsende, wo der Oszillograph die Spannung misst, zugleich der speisende Transformator an die Leitung angeschlossen ist.

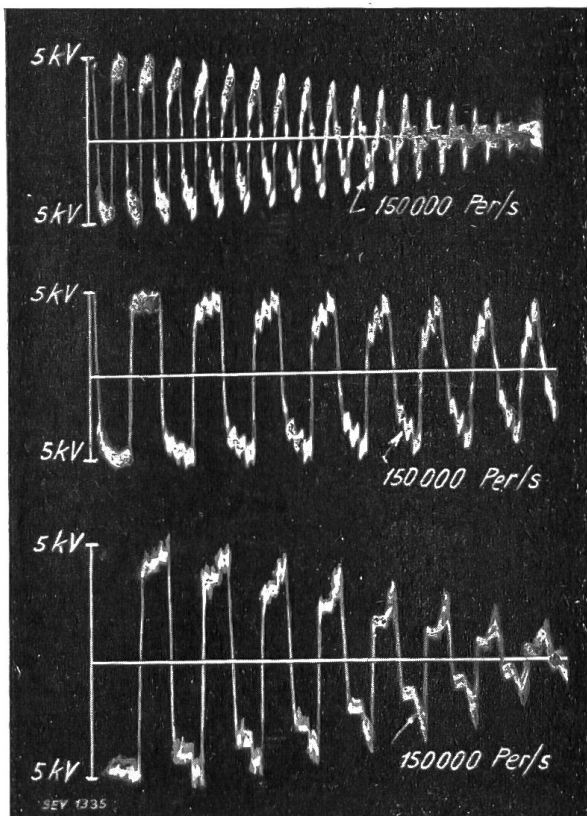


Fig. 25.
Entladeschwingung beim Kurzschluss einer 500 m-Freileitung.

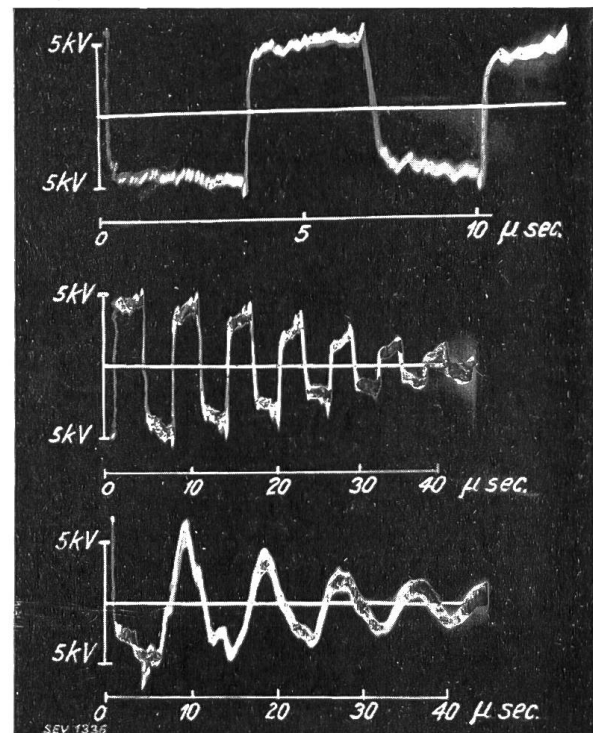


Fig. 26.

Fig. 26 gibt zunächst in sehr stark ausgezogenem Zeitmasstab nochmals den Beginn der Schwingung dieser 500 m-Leitung, die zweite Kurve ein längeres Zeitintervall. Die dritte Kurve entsteht, sofern eine Transformatorenklemme samt dem daranhängenden Leitungsdraht geerdet wird, und zwar am Transformatorenkübel. Die Schwingung ist viel stärker gedämpft. Während bei der nirgends geerdeten Leitung die Spannungsamplituden recht angenähert linear abnehmen, sinken diese bei einpolig geerdeter Leitung ungefähr exponentiell, d. h. nicht in arithmetischer, sondern geometrischer Reihe. Im ersten Fall ist offenbar die Dämpfung praktisch ausschliesslich im Funken zu suchen (etwa konstante Funkenspannung als Verlustquelle). Dagegen scheint bei einpolig geerdeter Leitung die Dämpfung mehr ohmscher Natur zu sein.

Fig. 27 zeigt die Wanderwellenschwingung eines Kabels, das aus zwei ungefähr gleichen Stücken zu je ca. 72 m zusammengesetzt ist. Die Schwingung ist ähnlich wie bei der ungeerdeten Luftleitung, aber wesentlich stärker gedämpft, sowohl bezüglich Abrundung der Wellenstirn als auch bezüglich Abnahme der Amplituden.

a) *Wanderwellen-Schwingungen einer 45 kV-Leitung.* Von den Wanderwellen-Schwingungen praktischer Hochspannungsleitungen erwähne ich hier nur jene der

Fig. 28 und 29, die noch aus einem andern Grund interessant sind. Beide Oszillogramme sind am Ende einer ca. 20 m langen 45 kV-Drehstromleitung aufgenommen, während am Leitungsanfang mittels eines Schalters ein Erdschluss in der gemessenen Phase eingeleitet wurde. Aus einem bestimmten Grund wurden diese Spannungswellen sowohl direkt bei der Leitungseinführung als auch an der Sammelschiene, das heisst hinter den Leitungstromwandlern und den in diesem Unterwerk vorhandenen klassischen „Schutzdrosselspul-

len“ gemessen. Letztere bestehen aus 35 Windungen Cu-Draht mit ca. 20 cm Spulendurchmesser. Die Veranlassung gab eine Gewitterstörung mit Blitzschlag auf der 20 km langen Leitung, wobei in der einen Anlage keine Ueberschläge entstanden, wohl aber an der 45 kV-Sammelschiene der durch Drosselspule „geschützten“ Anlage. Es wurde vermutet, dass vielleicht diese Drosselspulen eine Einwirkung auf die Wellen ausgeübt hätten, die als Eingangsschwingung bekannt ist. Aus den Oszillogrammen ist zu sehen, dass die Spannung vor und hinter den Drosselspulen genau dieselbe ist. Die ankommenden Wellen aus ca. 20 km Distanz sind bereits viel zu flach, um noch an den Drosselspulen gestaut zu werden. Entsprechend tritt

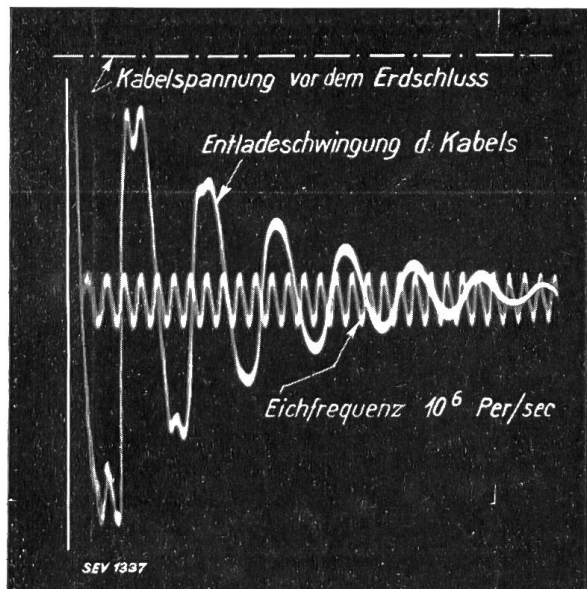


Fig. 27.
Entladeschwingung beim Erdschluss eines einpoligen Kabels.

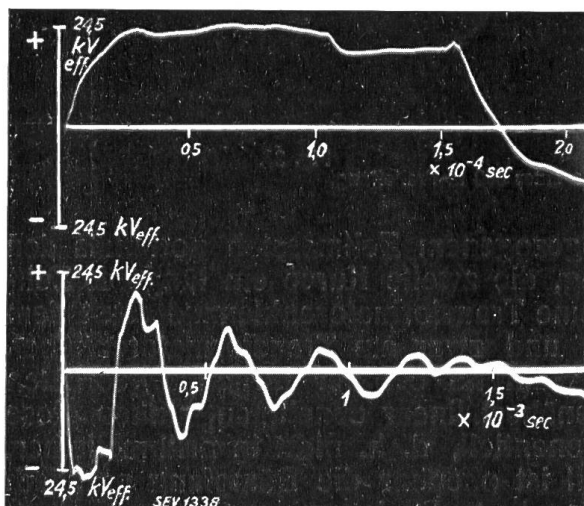


Fig. 28.
Entladeschwingung beim Erdschluss einer 45 kV-Leitung, gemessen auf der Leistungsseite (Fig. 28), bzw. Sammelschienenseite (Fig. 29) der Leitungstromwandler und „Schutzdrosselspulen“.

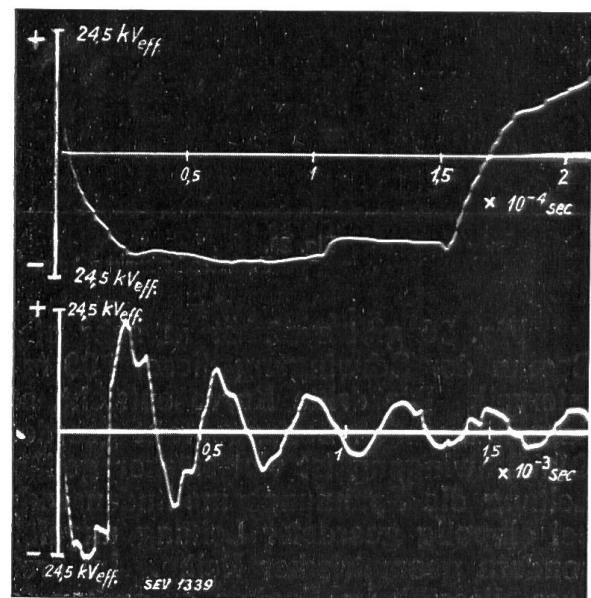


Fig. 29.

auch keine Eingangsschwingung auf. In der Front der sammelschienenseitig gemessenen Spannung erkennt man feine und unregelmässige Zacken, die wahrscheinlich von der Stromwandlerüberbrückung (Silit) herrühren.

b) *Wanderwellen in 8 kV-Netzen.* Durch das Entgegenkommen der E. K. Z. war es möglich, im 8 kV-Netz des Unterwerks Aathal eine grosse Reihe von Erdschluss-

versuchen durchzuführen. Die Resultate dieser Versuche werden in einem spätern Zeitpunkt verarbeitet und bekannt gegeben werden. Im Zusammenhang mit der Steilheit der Erdschlusswellen erwähne ich hier nur ein Resultat, das die Stromwandler und deren Ueberbrückungswiderstände betrifft. Es zeigte sich nämlich, dass Stromwandler grosser Primärströme von über 100 A nie eine Ueberbrückung nötig hatten. Es konnte kein naher oder entfernter Erdschluss gemacht werden, durch den zwischen den Primärklemmen eine nennenswerte Spannung erzeugt worden wäre. Parallel gelegte Glimmröhren mit ca. 300 V statischer Ansprechspannung kamen nur in kaum sichtbarem Mass zum Ansprechen. Dagegen entstanden an einem zur Messung des Erdschlussstromes von 4,5 A eingeschalteten Stromwandler für 5 A Primärstrom im Erdschlussmoment mehrere 1000 V zwischen den Primärklemmen, so dass dort lebhaft Funken auftraten, wenn nicht irgendwie überbrückt wurde. Eine Glimmlampe kam sehr lebhaft zum Aufleuchten, auch wenn durch Abschalten von Leitungen vom Versuchsbetrieb der Erdschlussstrom auf ca. 1 A reduziert wurde. Ein normaler Silitwiderstand von 500 Ω als Ueberbrückungswiderstand ergab Sprühen von weissglühenden Masseteilchen von beiden Fassungsstellen des Silitstäbchens aus.

Mit dem in einer frühern Arbeit untersuchten und beschriebenen Verhalten der Stromwandler bei Hochfrequenz lassen sich die im 8 kV-Netz Aathal beobachteten Erscheinungen erklären⁷⁾. Die Wicklungskapazität schützt Wandler grosser Primärströme genügend, so dass in Uebereinstimmung mit jenen Versuchen nur Stromwandler mit kleinem Primärstrom der Sprungwellengefahr stark ausgesetzt sind, auch bei steilsten Wellen. Dies ist ein Glück für die Ueberbrückung, indem diese als Ueberspannungsschutz an Stromwandlern grosser Ströme in Freileitungsnetzen nicht allzuhoher Spannung überhaupt weggelassen werden kann.

c) Wanderwellen auf der 132 kV-Leitung der Gewitterversuche. Es handelt sich hier durchweg um Einschaltwellen, die durch Schliessen von Trennern oder durch Einschalten der Leitung mit dem Leitungsschalter entstanden. Zunächst ist die Steilheit der Wellenfront bemerkenswert, wenn in 91 km Distanz, nämlich in Kerzers, zugeschaltet wird (siehe Fig. 30). Die Front ist ungefähr 1 km lang, entsprechend ca. 3millionstel Sekunden Anstiegsdauer. Die Welle ist so flach, dass z. B. vorgeschaltete Drosselspulen von weniger als 1 m H keine wesentliche weitere Verflachung bewirken würden.

Noch flacher sind natürlich die Wellenfronten, wenn in 158 km Distanz (Puidoux) oder in 216 km (Vernayaz) zugeschaltet wird (Fig. 31). Wird der Wellenkopf durch eine ansteigende Gerade ersetzt, so betragen deren Frontlängen für die Distanzen 91, 158 und 216 km 1,1, 1,5 und 1,65 km. Diese Zahlen scheinen recht theoretisch zu sein. Sie sind aber sehr bequem, weil sie z. B. über den Wert von Drosselspulen bezüglich der Möglichkeit von Reflexionen und Eingangsschwingungen ohne weiteres ein Urteil gestatten. Ferner beweisen sie, dass die Gewitterspannungen, die in Rapperswil z. T. nur wenig kleinere Frontsteilheiten wie diese Einschaltwellen aufwiesen, an ihrer Ursprungsstelle unter dem Blitz sehr steil sein mussten. — Die Steilheiten sind im übrigen dieselben, ob mit Schalter oder Trenner geschaltet wurde.

Interesse hat noch die Wellenfront in unmittelbarer Nähe des Schaltfunken, wenn also in Rapperswil sowohl gemessen als geschaltet wird. Fig. 32 zeigt die Spannung am Anfang einer offenen Leitung nach Kerzers, wenn die Leitung samt einer Sammelschiene von der andern Leitung her durch Schliessen eines Trenners unter Spannung gesetzt wird. Die Figur überrascht zum Teil. Die Front ist gebrochen, sie besteht aus Stufen. Deren zeitliche Länge beweist, dass es sich um Eigenschwingungen des 25 m langen Kabelstückes handelt, das zur Spannungsteilung gehört. Die Steilheit der Einschaltwelle ist also jedenfalls so gross, dass sie auf weniger als 100 m Luftleitung schon den wesentlichen Spannungsanstieg enthält. Die Stufen zeigen, dass die Spannungsteilung nicht mehr genügt. Nun

⁷⁾ K. Berger, Ueber das Verhalten der Stromwandler bei Hochfrequenz, Bull. S.E.V. 1927, No. 11.

bleibt es aber nicht bei dieser einfachen Front, sondern eine Schwingung mit ca. 200 000 Per/s schliesst sich an. Es wurde nachgewiesen, dass es sich dabei nicht um einen Messfehler handelt. Die Schwingung tritt immer auf, wenn die abgehende Leitung unter Spannung gesetzt wird. Sie entsteht nicht, wenn nur die Spannungsteilung mit ihrem Trenner zugeschaltet wird (Fig. 32, zweite Kurve). In dieser Schaltung ist die Front selber im Oszillogramm allerdings nicht mehr zu sehen

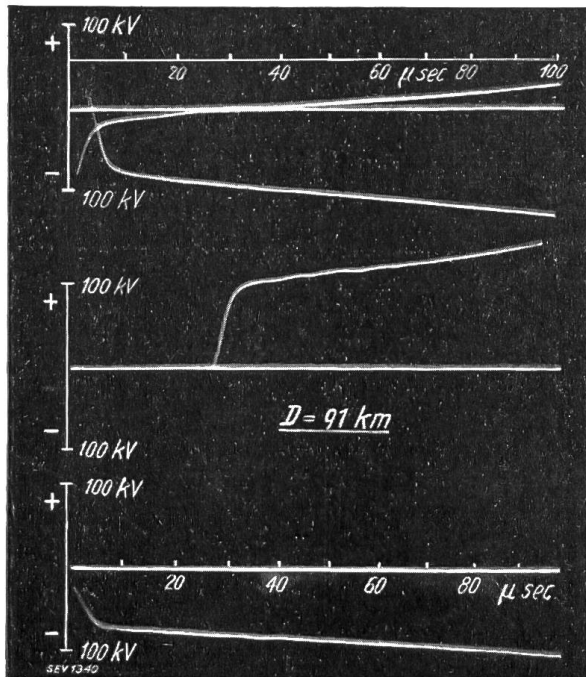


Fig. 30.

Fig. 30 bis 32.

Wellenfront auf einer 132 kV-Leitung bei verschiedener Länge der durchlaufenen Leitung.

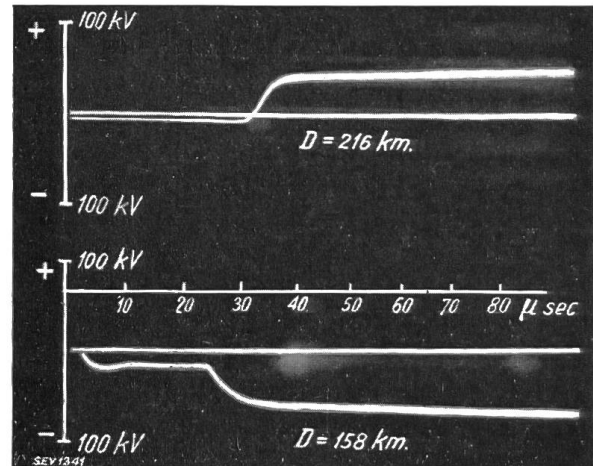


Fig. 31.

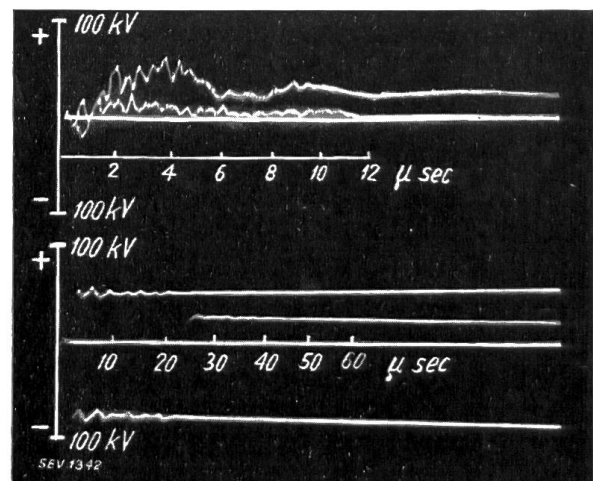


Fig. 32.

wegen zu kurzer Verzögerungsleitung für diese Anordnung. Die ganze Front ist innerhalb 150 Meter Luftleitung untergebracht, also sehr steil. Dass nicht etwa das 225 m lange Messkabel von der Spannungsteilung zum Kathodenstrahl-Oszillographen diese Schwingung verursacht, ist noch aus Fig. 33 zu ersehen, die die Wirkung eines dem Wellenwiderstand annähernd und genau gleichgemachten Dämpfungswiderstands zeigt (zweite und dritte Kurve des Oszillogramms). Die Eigenschwingungen des Kabels werden durch richtige Abstimmung des Dämpfungswiderstands vollständig unterdrückt. Solche sehr steile Wellen sind bereits von Binder⁸⁾ mittels seiner Schleifenmethode an Höchstspannungsleitungen und ebenso durch ein Oszillogramm der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen⁹⁾ nachgewiesen worden. Für die 5 kV-Welle des Oszillogramms der Fig. 26 ist die Front sogar nach Durchlaufen von 500 m Leitung nur ca. 15 m lang.

⁸⁾ L. Binder, Die Wanderwellenvorgänge auf exper. Grundlage, Dresden 1928.

⁹⁾ Gábor, Forschungshefte der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen Heft 1, 1927.

4. Wirkungen von Drosselspulen.

Wir haben bereits in den Wellenschwingungen der 45 kV-Leitung die Wertlosigkeit der dortigen Drosselspulen bei einigermaßen entfernten Erdschlüssen oder Blitzschlägen gezeigt. Wegen der grossen Bedeutung, die früher den Drosselspulen für die Bekämpfung der Ueberspannungen zugeschrieben wurde, lohnt sich eine kurze Bemerkung.

Drosselspulen wurden aus zwei Gründen empfohlen:

1. zum Zurückwerfen steiler Wellen,
2. zum Verflachen durchlaufender Wellen, was ungefähr dasselbe sagt. Solche Spulen wurden besonders den Transformatoren vorgeschaltet, wo die zwei Wirkungen erwünscht waren wegen der Sprungwellengefahr infolge steiler Wellen.

Die zwei Wirkungen sind tatsächlich vorhanden, aber leider auch noch andere, was aus der Fig. 34 zu sehen ist. Das Bild stellt zwei Spannungen dar, einmal jene am Ende eines Kabels von ca. 145 m Länge, wenn an dessen Anfang ein plötzlicher Erdschluss zwischen Seele und Bleimantel passiert, ferner die Spannung an der Eingangsklemme eines über eine sogenannte Schutzdrosselspule angeschlossenen Transformators. Man sieht zunächst, dass der Spannungsanstieg am Transformator etwas flacher ist als am Kabelende. Die ankommende Welle wird in der Tat von der Drosselspule verflacht. Der Vorgang ist aber damit nicht abgeschlossen. Die Spannung am Kabel macht in der Folge etwa dieselbe Entladeschwingung, die wir bereits in Fig. 27 gezeigt haben. Die Spannung am Transformator dagegen schwingt allmählich auf hohe Werte auf, die im schlimmsten Fall etwa das Vierfache des Spannungswertes vor der Drosselspule erreichen. Dieser Effekt tritt ein, sofern die Eigenschwingungszahl des Kreises aus der Drosselspule und einer gewissen Kapazität der Anfangswindungen des Transformators, der sogenannten Eingangskapazität, übereinstimmt mit der Entladewellenfrequenz des Kabels oder der Freileitung zwischen Erdschlussstelle und Transformator. Es tritt dann die vor-

geführte Resonanz der Entladeschwingung mit der sogenannten Eingangsschwingung ein. Auch wenn diese Resonanz nicht eintritt, so entstehen noch Ueberspannungen durch das sog. Ueberschwingen. Gerade im Fall steiler Wellen, wo die durchgelassene Wellenfront von der Spule tatsächlich verflacht wird, tritt nachfolgend unfehlbar die beschriebene Erscheinung auf. Die Schutzwirkung ist also direkt gefährlich. Flachere Wellen geben diese Eingangsschwingung nicht, werden aber

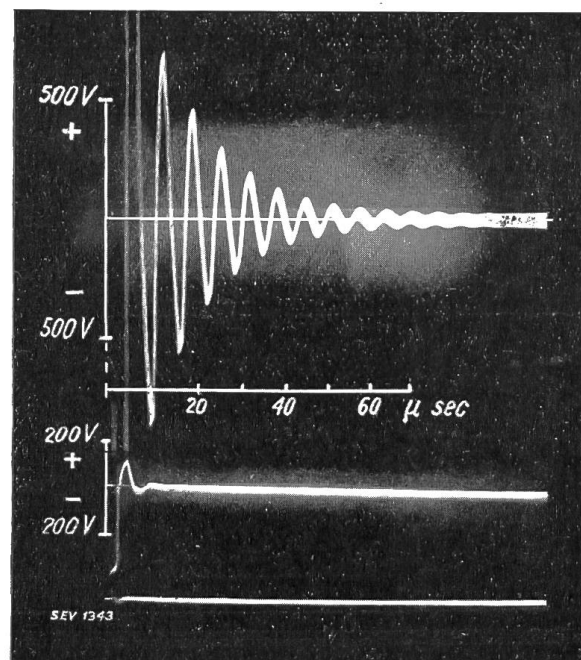


Fig. 33.
Dämpfung einer Wellenschwingung mit verschiedenen Widerstandswerten.

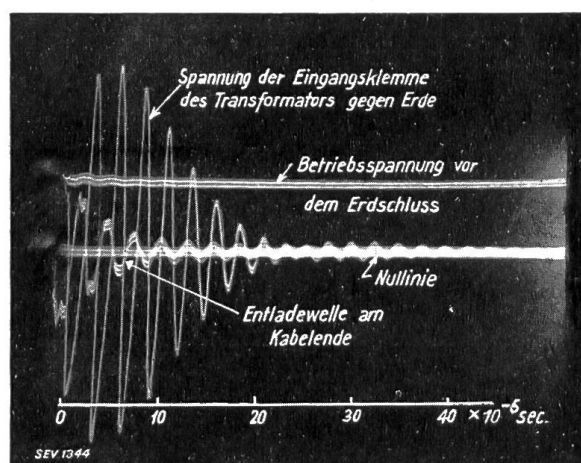


Fig. 34.
Entladewellenresonanz.

von der Drosselspule auch nicht mehr weiter verflacht; die Spule hat hier keine Wirkung. Ein Glück ist es, dass mit der praktisch meist verwendeten Grösse der Spulen (wenige Zehntel mH) diese fast nie zur Wirkung kamen, nämlich nur bei ganz nahen Erdschlüssen oder Blitzschlägen. Alle Wellen aus grösserer Distanz sind bereits zu flach. Sie werden von kleinen Spulen glatt durchgelassen.

Die angeführte Gefahr tritt nicht mehr auf, wenn mehrere parallele Leitungen am Transformator angeschlossen sind. Sie kann auch vermieden werden durch die Ueberbrückung der Drosselspule mit einem Widerstand, der höchstens den Wert

$$R \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \left[\begin{array}{l} L = \text{Spuleninduktivität, } C = \text{Eingangskapazität des oder} \\ \text{der Transformatoren (ca. } 200 \div 2000 \text{ cm pro Transformator)} \end{array} \right]$$

(Campos-Spulen) besitzt.

Fig. 35 ist ein Oszillogramm, welches an derselben Spule aufgenommen wurde, wie dasjenige der Fig. 24, wobei aber die Spule mit diesem Widerstandswert überbrückt war. Eine wesentliche Ueberspannung kommt nicht mehr zu Stand. Aber

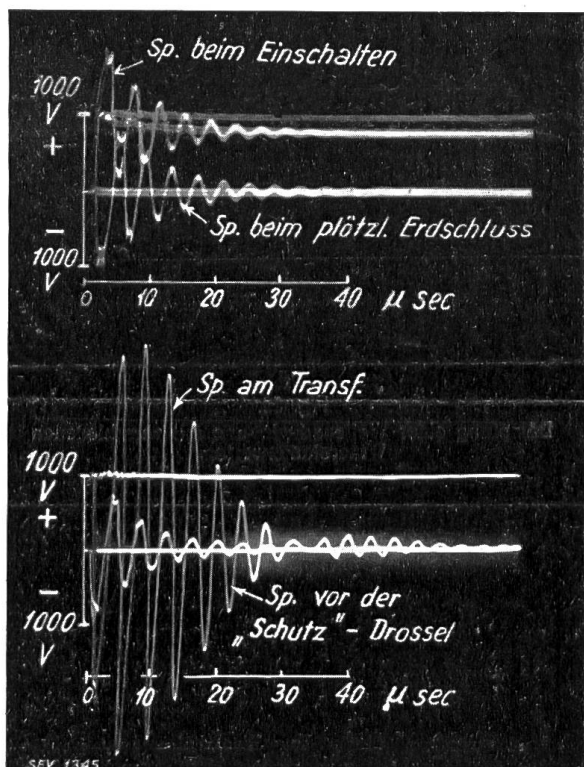


Fig. 35.

Verhinderung der Entladewellenresonanz mit Campos-Ueberbrückungswiderstand (oben) und Entladewellenschwebung (unten).

zugleich ist die verflachende Wirkung je nach der Grösse der Eingangskapazität auch kleiner geworden. Die zweite Kurve zeigt den Spannungsverlauf am Transformator, wenn die Resonanz nicht genau, sondern nur annähernd erfüllt ist. Man erkennt die bekannten Schwebungen in der Spannung. Spannungserhöhungen infolge Ueberschwingens entstehen hinter den Drosselspulen auch bei Gewitterspannungsstössen, was sich auch durch Oszillogramme zeigen lässt. Aus den beschriebenen Gründen ist es am besten, diese kleinen Drosselspulen, d. h. die sog. „Schutzdrosselspulen“ gegen Ueberspannungen überhaupt in jedem Fall wegzulassen. Diese Forderung wurde schon vor der Existenz eines Kathodenstrahl-Oszillographen aufgestellt; sie ist durch diesen in vollem Masse bestätigt worden.

In diese Betrachtung gehören auch die Reaktanzspulen zur Begrenzung des Kurzschlussstromes in elektrischen Anlagen. Natürlich wirken auch diese wesentlich grösseren Spulen erst recht im gezeigten Sinn, d. h. sie können als Ueberspannungserreger recht gefährlich sein. Es ist mir ein sehr lehrreicher Fall bekannt aus dem vergangenen Sommer,

wo wegen Ueberschlagens einer solchen Spule infolge eines Blitzschlages ein ganzes Kraftwerk für mehr als 20 Minuten buchstäblich stillgelegt wurde. Ähnliche Störungen sind auch in andern Anlagen mit rel. grossen Drosselspulen vorgekommen, z. T. ausgesprochen immer auf der von der Drosselspule zu schützenden Seite. Ueberbrücken mit dem richtigen Widerstandswert ist bei grossen Anlagen nicht immer möglich wegen der Wärmeverluste im Ueberbrückungswiderstand. In diesem Fall erfordert direkt die Drosselspule einen Ueberspannungsschutz. Ueberdies muss auf deren Isolation äusserste Sorgfalt gelegt werden, besonders wenn es sich um Luftdrosselspulen handelt, die an Freileitungen angeschlossen werden. Es wäre zu empfehlen, an solchen Spulen die sinngemäss übertragenen Proben bezüglich Ueberschlagsspannung und Sprungwellenprüfung zu machen, die man an Transformatoren ausführt.

Einschalterschwingungen verschieden langer 132 kV-Leitungen beim Schalten mit Trennmesser und Schalter.

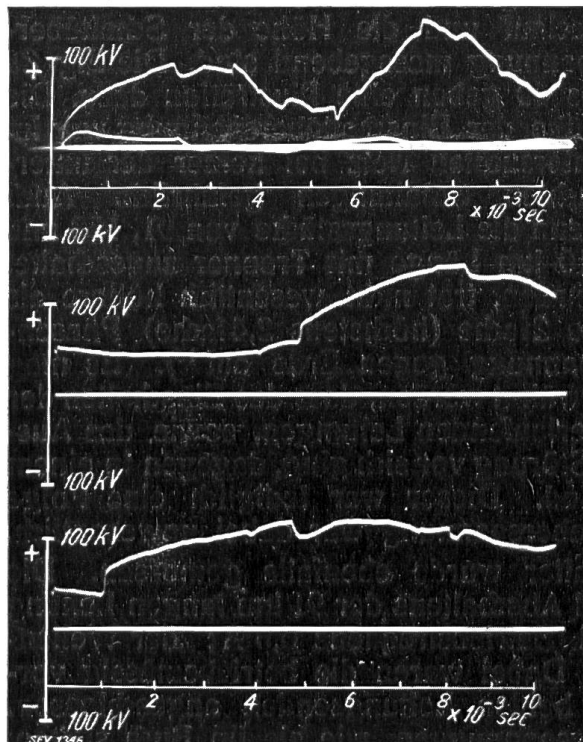


Fig. 36.

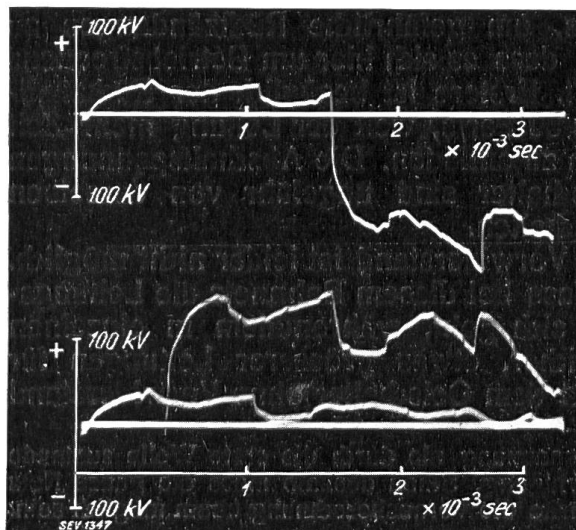


Fig. 37.

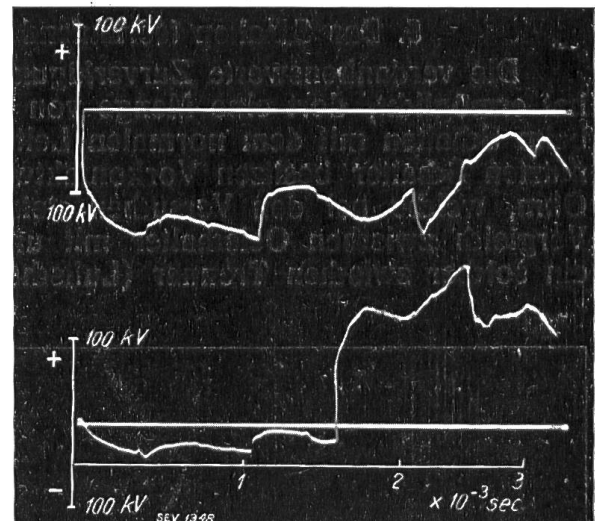


Fig. 38.

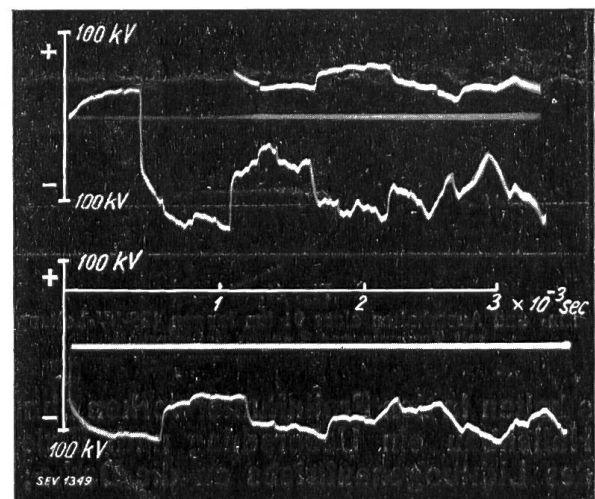


Fig. 39.

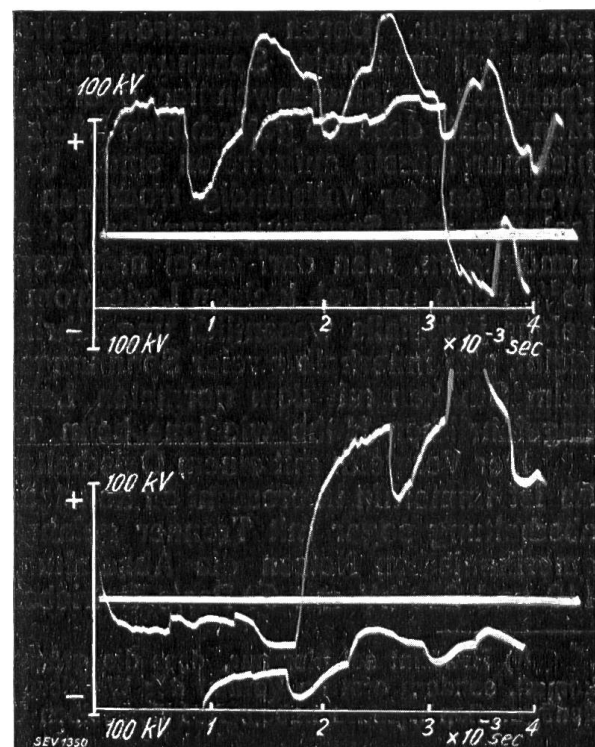


Fig. 40.

5. Das Schalten leerlaufender Leitungen und Transformatoren.

Die verdankenswerte Zurverfügungstellung der 132 kV-Leitungen der S.B.B. hat ermöglicht, dort eine Menge von *Einschaltsschwingungen* aufzunehmen, sowohl beim Schalten mit dem normalen Leitungsschalter als auch mit Trenner. Alle benützten Schalter besitzen Vorkontaktwiderstände von der Grösse einiger tausend Ohm, welche bei den Versuchen stets eingebaut waren. Es ergibt sich also kein Vergleich zwischen Oelschalter mit und ohne Vorkontakt-Widerstand, wohl aber ein solcher zwischen Trenner (Luftschalter) und Schalter mit Vorwiderstand. Die

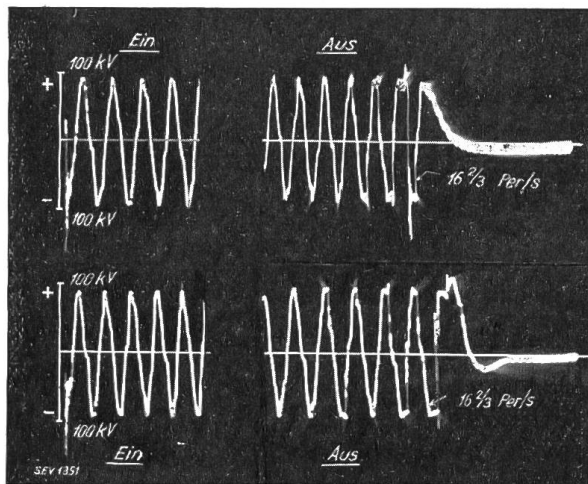


Fig. 41.

Ein- und Ausschalten einer 91 km langen 132-kV-Leitung mit Trennmesser. Langes Zeitintervall.

Oszillogramme, von denen wir nur wenige Beispiele anführen, zeigen, dass ausser dem Schaltmoment auch die ganze Netzkonfiguration, d. h. vor allem die Anzahl und Lage der parallel geschalteten, bereits unter Spannung stehenden Leitungen und Transformatoren für den Verlauf und die Höhe der Schaltüberspannung massgebend sind. Die Fig. 36 bis 40 geben eine Illustration dazu. Die Höhe der Einschaltüberspannung war im untersuchten Netz bei keiner der untersuchten Schaltungen gefährlich. Auch wenn die Leitungsstücke von 91, 158 und 216 km Länge mit Trenner zugeschaltet wurden, trat nicht wesentlich höhere als die 2fache (höchstens 2,4fache) Phasenspannung gegen Erde auf¹⁰⁾. Es mag erwähnt werden, dass das Einschalten der

leerlaufenden Leitungen, sowie das Ausschalten in den Freiluftunterwerken ohne jede Störung vor sich ging, dagegen in einem Hallenbau ein Ueberschlag nach Erde entstand. Dieser war lediglich eine Folge des Lichtbogenauftriebs an die Decke; die Ueberspannung war dabei unwesentlich.

Das *Ausschalten* mit Trenner oder Schalter wurde ebenfalls gemessen. Die Fig. 41 zeigt zwei Oszillogramme des Ein- und Abschaltens der 91 km langen Leitung mit Trenner. Deren Ladestrom beträgt bei Betriebsfrequenz 6,5 A; der Wellenstrom bei maximaler Spannung ca. 130 A_{eff}. Dabei waren die betriebsmässig vorhandenen Spannungswandler nach Erde an beiden Leitungsenden angeschlossen. Man sieht, dass die gefürchteten Rückzündüberspannungen, wie sie im Buch stehen, hier nur mässig aufgetreten sind. Das erste Bild ist an der teilweise nassen, das zweite an der vollständig trockenen Leitung aufgenommen. Die Ableitung über Isolation und Spannungswandler ist zu gross, um gefährliche Rückzündungen zu ermöglichen. Man darf dabei nicht vergessen, dass es sich hier um Betriebsfrequenz $16\frac{2}{3}$ Per/s und rel. kleinen Ladestrom handelt. Erstere ist bezüglich der Rückzündgefahr jedenfalls wesentlich ungefährlicher als 50 Per/s, weil der Leitung mehr Zeit bleibt, sich innerhalb zweier Spannungsmaxima zu entladen. Die Abschaltspannungen beim Schalten mit dem normalen Leitungsölschalter sind ungefähr von derselben ungefährlichen Höhe wie jene beim Trennerschalten.

Der Vergleich mit einem Oelschalter ohne Vorwiderstand ist leider nicht möglich. Es ist immerhin interessant zu konstatieren, dass bei diesem Bahnnetz die Leitungsabschaltung sogar mit Trenner gefahrlos vor sich geht, währenddem in einzelnen amerikanischen Netzen die Abschaltung ähnlicher, etwas grösserer Leitungen für 110 und 220 kV mit 60 Per/s Betriebsfrequenz dem Oelschalter ohne Vorwiderstand

¹⁰⁾ Erwähnt sei hier nur, dass die grösste Ueberspannung nie durch die erste Welle zustande kommt, sondern erst im Verlauf der Wanderwellenschwingung. Schon deshalb muss die ganze Netzkonfiguration Einfluss haben. Aus demselben Grund dürfte die Vorausberechnung kaum möglich sein.

grosse Mühe macht. Wir müssen auch daraus schliessen, dass sich verschiedene Netze bezüglich der Leerschaltüberspannungen verschieden verhalten. Dementsprechend gibt es vielleicht Fälle, wo ein Vorkontaktwiderstand wünschenswert erscheint, wenn dies auch im allgemeinen nicht der Fall zu sein scheint. Darüber können schliesslich nur Versuche im betreffenden Netz Aufschluss geben.

Auch bezüglich der beim Abschalten leerlaufender Transformatoren auftretenden Ueberspannung lässt sich ein allgemeines Urteil nicht geben. Währenddem an einem 9000 kVA-Transformator für $16\frac{2}{3}$ Per/s die Ueberspannung beim Ein- und Ausschalten mit Oelschalter ohne Vorwiderstand nicht über das Zweifache der normalen Phasenspannung hinausging, wurde an einem 4000 kVA-Transformator für 50 Per/s Spannungen bis zum Fünffachen des normalen Wertes gegen Erde konstatiert. Verschiedene Transformatorentypen scheinen sich sehr verschieden zu verhalten. Festgestellt wurde, dass im gefährlichen Fall die Ueberspannungen sich erst im Verlauf mehrerer in der letzten Abschalthalbwelle vorkommender Rückzündungen im Schalter entwickelten.

6. Ueberspannungen beim Abschalten von Kurzschlüssen in Hochspannungsnetzen.

Es sei auf die diesbezügliche Veröffentlichung im Bulletin S.E.V. 1929, No. 20, Seite 681 verwiesen.

7. Die Sprungwellen in Transformatorenwicklungen.

Es möge hier genügen, das Durchlaufen einer Sprungwelle durch eine 20 kV-Wicklung durch einige Bilder (Fig. 42 bis 47) zu illustrieren. Die Sprungwelle wurde durch den Ueberschlag einer Hochspannungsklemme nach Erde erzeugt, wobei der Sternpunkt fest geerdet war. Der einmalige Ueberschlag der Oberspannungsklemme ist dabei durch das Einschalten der Unterspannungsseite des Transformators bewirkt. In den Oszillogrammen erscheint daher sowohl die Sprungwelle infolge des Klemmenüberschlags als auch die durch den Kurzschluss bedingte Transformator-Eigenschwingung. Auch die Sprungwellenbeanspruchung bei einigermaßen entfernten Kurzschlüssen wurde an einer besondern, von den E. K. Z. zur Verfügung gestellten Leitung untersucht. Der Versuchstransformator mit 55 Anzapfungen wurde von der Maschinenfabrik Oerlikon gratis zur Verfügung gestellt.

Die Schlussfolgerungen der durchgeführten Sprungwellenversuche sind, soweit sie nicht nur konstruktives, sondern allgemeines Interesse bieten, etwa die folgenden:

1. Die Dauer der Beanspruchung der Windungsisolation durch Sprungwellen ist von der Grösse weniger μ s. Dies mag der Grund sein, warum trotz der grossen Beanspruchung die Isolation doch relativ gut Stand hält.

2. Die Verflachung der Sprungwelle ist bereits in der ersten Teilspeule schon sehr stark. Im Wickleinsinnern treten weniger steile Ausgleichspannungen auf, die zum Teil eine beträchtliche Höhe und grössere Dauer besitzen als in den Eingangsspeulen.

3. Beim Klemmenüberschlag treten die grössten Windungsbeanspruchungen beim ersten Durchlaufen der Welle durch die Wicklung auf. Die Welle wird am offenen oder geerdeten Wickleinsende mit positivem oder negativem Vorzeichen reflektiert. Dies bedingt die bekannte Spannungserhöhung vor dem Wickleinsende. Die Dämpfung der Welle ist nicht sehr gross, so dass beim untersuchten Transformator etwa 3 Schwingungen gut zu erkennen sind. Bei grösseren Transformatoren dürfte die Dämpfung noch geringer sein.

4. Die Sprungwellen, die in elektrischen Anlagen auf Transformatoren auftreten und von diesen ausgehalten werden müssen, sind wesentlich höher als die bei der heutigen Sprungwellenprüfung angewendeten. Bei Gewittern müssen Wellen mit der Höhe der Gewitterwellen schadenlos ertragen werden. Das sind Spannun-

Beanspruchung eines 20 kV-, 200 kVA-Transformators
bei der Sprungwellenprobe.

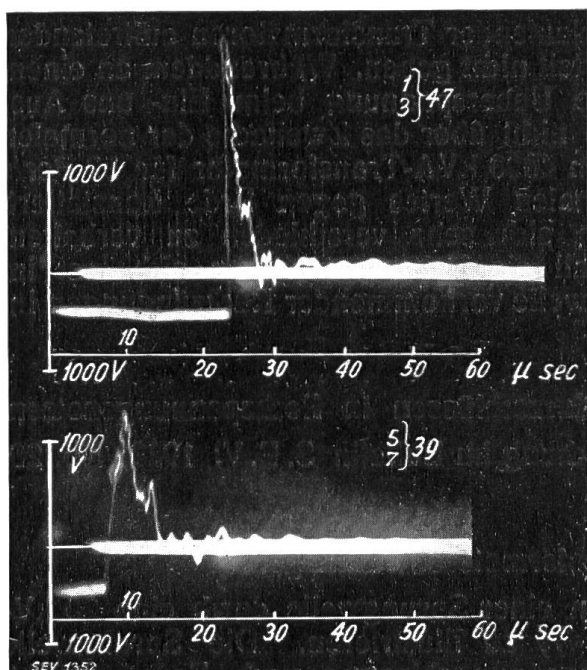


Fig. 42.

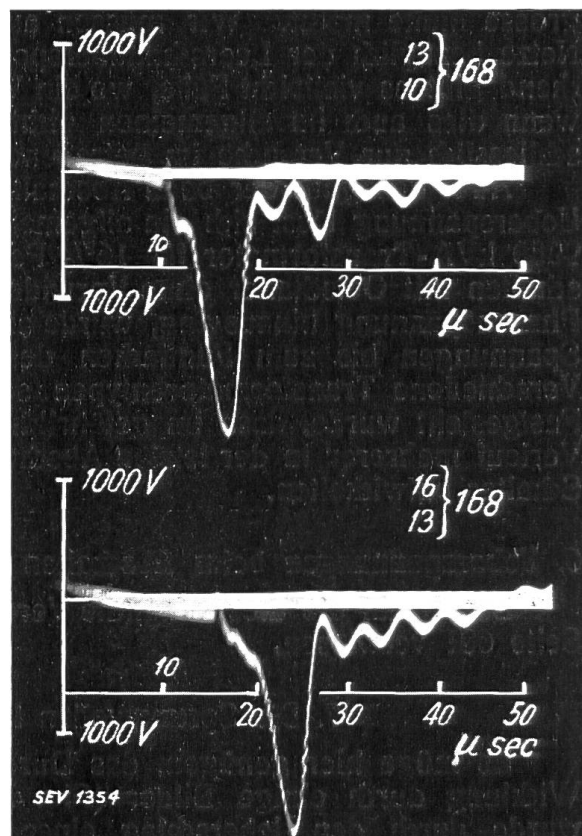


Fig. 44.

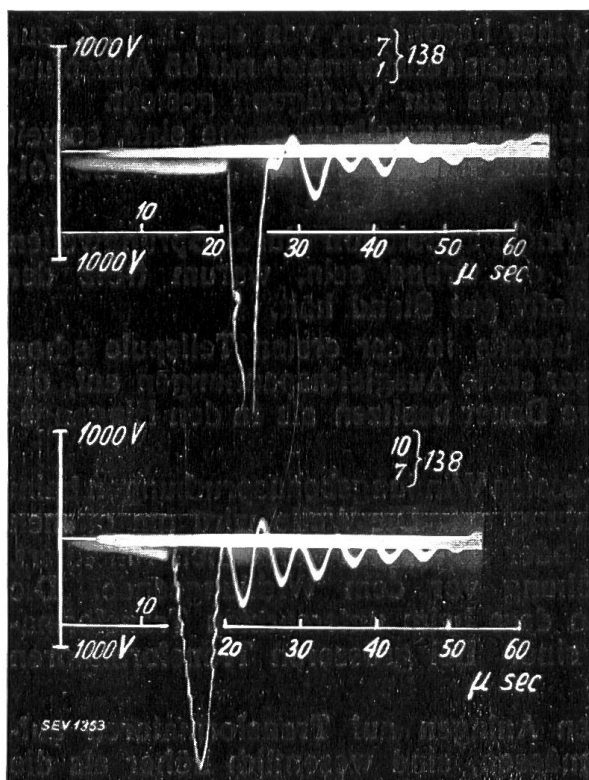


Fig. 43.

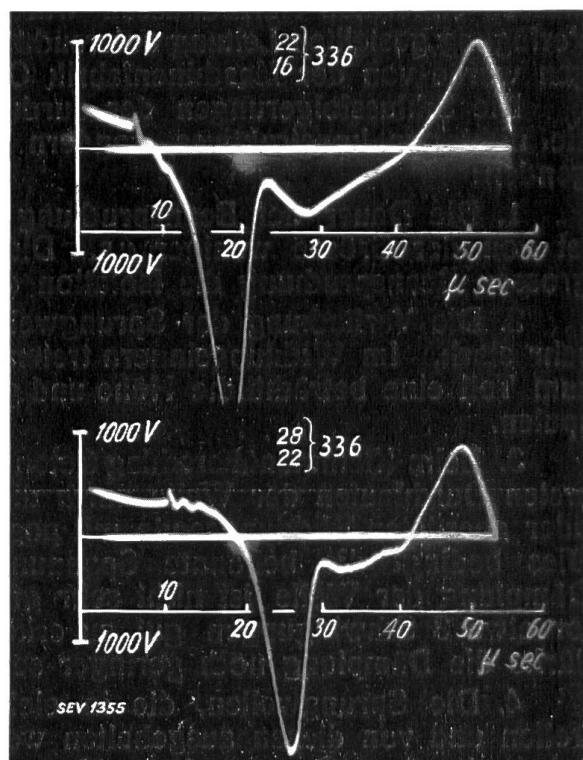


Fig. 45.

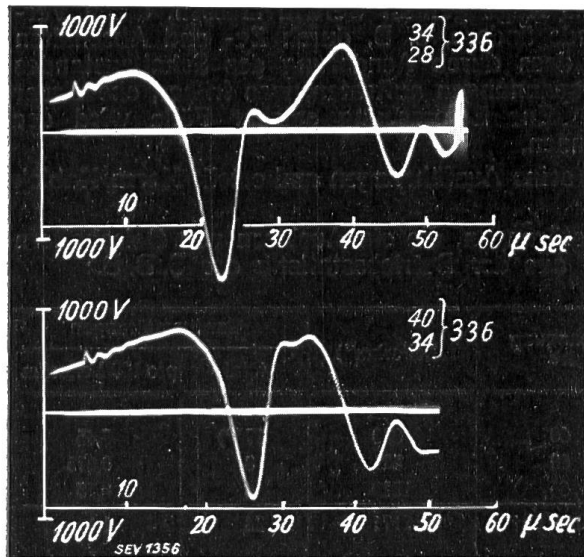


Fig. 46.

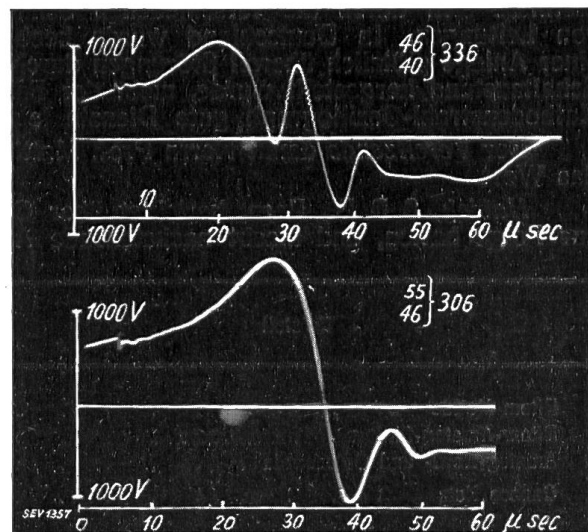


Fig. 47.

Beanspruchung eines 20 kV-, 200 kVA-Transformators bei der Sprungwellenprobe.

gen, die infolge ihrer kurzen Dauer sogar etwas höher sein können als die bei Normalfrequenz bestimmte Ueberschlagsspannung der Isolatoren. Soll daher die Sprungwellenprüfung ein Urteil über die Betriebssicherheit von Transformatoren geben, so muss sie mit wesentlich höherer Spannung als der heute vorgeschriebenen durchgeführt werden. Sprungwellen von der Höhe der Klemmenüberschlagsspannung müssen schadenlos ausgehalten werden, wenn der Transformator gegen Windungsschlüsse sicher sein soll. In Wirklichkeit halten die meisten unserer heutigen Grosstransformatoren dieser Beanspruchung bereits Stand, so dass die aufgestellte Forderung keine wesentliche Erhöhung der Isolation bedingt.

5. Schliesslich mag noch erwähnt werden, dass es der General Electrical Company bereits gelungen sein soll, durch passende Abschirmungen die Spannungsverteilung über die Wicklung auch bei steilen Sprungwellen einigermaßen gleichförmig zu gestalten. Ob diesem Weg praktische Bedeutung zukommt, bleibt abzuwarten. Nachdem sich die heutigen Transformatoren im ganzen als recht sprungwellensicher bewährt haben, scheint die Notwendigkeit solcher Konstruktionen fraglich. Wichtiger ist vorderhand wohl eine richtig bemessene Sprungwellenprobe.

Der Vorsitzende dankt dem Referenten für seinen Vortrag und eröffnet die Diskussion.

Prof. A. Matthias, Direktor der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen, Berlin, dankt dem S. E. V. für seine Einladung zur heutigen Diskussionsversammlung und beglückwünscht Berger zu seinem Referate, insbesondere zu seinen Versuchsergebnissen. Die Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen arbeitet seit einiger Zeit auf dem gleichen Gebiete wie der Referent und ist dabei auf Grund ihrer Versuche zu analogen Schlüssen gekommen wie dieser. So hat sie z. B. auch feststellen können, dass indirekte Blitzschläge für Anlagen im allgemeinen ungefährlich sind und dass vor allem die direkten Blitzschläge als Ursache von hohen Ueberspannungen in Anlagen betrachtet werden müssen.

Der Sprechende kommt sodann auf die gegen Ueberspannungen anzuwendenden Schutzmittel zu sprechen und schliesst sich den Ausführungen des Referenten an, wonach der beste Schutz darin besteht, die Ueberspannung am Ort ihrer Entstehung durch Ableitung nach Erde unschädlich zu machen. Dies kann geschehen, indem man die Isolatorenketten so dimensioniert, dass sie durch Ueberspannungen überschlagen werden. Die Isolatoren müssen aber die Eigenschaft besitzen, durch den beim Ueberschlag entstehenden Lichtbogen nicht zerstört zu werden. Das Angeführte gilt insbesondere für europäische Verhältnisse, wo Höchstspannungsanlagen meistens ungeerdet ausgeführt werden. In Amerika ist die Nullpunktserdung üblich, und da in diesem Falle jeder Ueberschlag gegen Erde einem Kurzschluss in der Anlage gleichkommt, tendieren die Amerikaner auf eine solche Isolation ihrer Anlagen und Leitungen, dass auch bei den höchst auftretenden Ueberspannungen kein Ueberschlag eintritt. Allgemein kann zur Frage der Schutzmittel gegen Ueberspannungen gesagt werden, dass diese heute noch nicht genügend geklärt ist und dass es noch vieler Versuche und Untersuchungen bedürfen wird, bis dies der

Fall sein wird. Insbesondere werden auch Anlagen ins Auge gefasst werden müssen, deren Verhältnisse sich durch die verschiedenen Schaltzustände ändern, z. B. durch Zu- und Abschalten von Leitungen. In Deutschland wurde beobachtet, dass durch Aenderung des Schaltzustandes einer Anlage plötzlich überall Störungen durch Ueberspannungen auftraten, was früher, ehe dieser Schaltzustand hergestellt wurde, nicht der Fall war. Zur Erforschung solcher Fälle wird der Kathodenstrahl-Oszillograph gute Dienste leisten können.

Der *Vorsitzende* dankt Herrn Prof. Matthias für seine Ausführungen und erteilt Herrn Habich das Wort.

Habich, S. B. B., Bern, berichtet über Gewitterstörungen, die ein Auslösen von Oelschaltern zur Folge hatten, und macht nachstehende Angaben aus der Betriebsstatistik der S. B. B.:

Netzteil	Spannung kV	Leiterkm *)	Gewitterstörungen	
			total	pro 100 Leiterkm
Ritom-Melide	60	330	17 **)	5,45
Ritom-Amsteg-Sihlbrugg-Emmenbrücke	60	521	3	0,575
Amsteg-Nord- und Ostschweiz	66	1320	4	0,33
Ganzes Netz	60 + 66	2171	24	1,1

*) Leiterkm ist das Produkt aus Trassé-Länge der Leitung mal Anzahl der Leiter.
 **) Von den 17 Störungen im Abschnitt Ritom-Melide sind 10 am 6. August 1929 vorgekommen.

Zu der Frage, sollen Hochspannungsleitungen so hoch isoliert werden, dass Ueberschläge der Isolatoren infolge von atmosphärischen Ueberspannungen überhaupt nicht mehr vorkommen können, oder sollen Ueberschläge an Isolatoren bei wesentlich über der Betriebsspannung liegenden Ueberspannungen zugelassen werden, äussert sich der Sprechende folgendermassen: Die Vermeidung jeglicher Isolatorenüberschläge setzt die sichere Kenntnis der grössten vorkommenden Spannung voraus; diese besitzen wir, trotz vieler interessanter Messungen, heute noch nicht. Aber selbst diese Kenntnis vorausgesetzt, scheint es mir heute noch sehr fraglich, ob die Mehrkosten, die eine entsprechende Isolation einer Leitung erfordern würde, gerechtfertigt wären. Dem Sprechenden scheint der zweite Weg, wenigstens für europäische Verhältnisse, der richtigere, nämlich der, die Isolatoren mit tauglichen Schutzarmaturen zu versehen, die imstande sind, Ueberschläge infolge von Ueberspannungen angemessener Höhe ohne Beschädigung des Isolators abzuleiten.

Prof. B. Bauer, E. T. H., Zürich, stellt folgende Fragen: Haben die Anordnung der Leitungen auf den Masten und die Verwendung eines Erdseiles einen Einfluss auf die Entstehung von Ueberspannungen bei Gewittern? Wie geschieht die Ableitung der Ueberspannungen bei Leitungen auf Holzmasten? Wird hier der Ausgleich durch Ueberschlag zwischen Phase und Phase herbeigeführt?

A. Kleiner, Kraftwerke Oberhasli, Innertkirchen, erkundigt sich, ob die vom Referenten angewendete Spannungsteilung zur Entnahme der Registrierspannung keinen Einfluss auf das aufgezeichnete Oszillogramm hat. Ferner scheint ihm die Forderung nicht verständlich, wonach beim Auftreten von Ueberspannungen der Ueberschlag möglichst verzögerungsfrei erfolgen soll; eine Verzögerung ist seiner Ansicht nach eher von Vorteil, da sich dann in dieser Zeit die Spannungswelle etwas abflachen kann. Wo der Ueberschlag eingeleitet werden soll, ob in der Anlage selbst oder irgendwo an einem Isolator der Freileitung, ist schwierig zu sagen. Von Vorteil ist es sicherlich, wenn die Ueberschlagstelle zugänglich und ständig kontrollierbar ist. Aus diesem Grunde ist es vielleicht besser, die Ueberspannungen in der Anlage selbst zur Auswirkung kommen zu lassen.

Der Sprechende empfiehlt sodann, auch Abschaltversuche in Drehstromnetzen durchzuführen und besonders die Vorgänge zu studieren, die sich bei dem vorgeschlagenen Abschalten nur einer Phase einstellen.

Zur Bemerkung Berger betreffend das Abschalten von leerlaufenden Leitungen mittels Trennmesser erklärt er, dass ein solches Abschalten vielleicht bei 16% Perioden noch möglich ist; bei höheren Frequenzen treten, wie seine Erfahrungen gezeigt haben, sicherlich Schwierigkeiten auf, so dass man hier vorsichtig sein muss.

Berger beantwortet die von den Diskussionsrednern gestellten Fragen.

Die *Polarität der Leitungen* hat nach den bisherigen Beobachtungen keinen Einfluss auf das Auftreten von Gewitterstörungen. Oszillogramme, wo der Blitz in eine Leitung schlug, zeigen, dass im Moment des Blitzschlages die betroffene Phase gleiche oder entgegengesetzte Polarität haben kann wie die Ladung des Blitzes.

Ein Einfluss der *Leiteranordnung* auf den Masten konnte bei den Versuchen nicht nachgewiesen werden. Es sind auf allen Leitern des Mastes Ueberschläge infolge von Blitzen vorgekommen, nicht nur auf den obersten, sondern auch auf den untenliegenden. Ein Ueberwiegen der Anzahl der Ueberschläge auf den westlich gelegenen, dem Wetter besonders ausgesetzten Leitungsseilen liess sich auch nicht nachweisen.

Ueber den Wert von Erdseilen geben die Versuche nur dahin Auskunft, dass trotz des durchweg vorhandenen Erdseils Ueberschläge infolge von Blitzen vorkommen können. Ein Vergleich des Verhaltens der Leitung mit und ohne Erdseil war aus betriebstechnischen Gründen natürlich nicht möglich. Dagegen lässt sich aus dem gemessenen Spannungsverlauf und der engen Begrenzung der Blitzwirkung folgern, dass Erdseile die Anzahl der Störungen *vermindern* können. Dies wird bestätigt von den im Referat erwähnten amerikanischen Statistiken¹¹⁾, wonach Erdseile die Anzahl der Abschaltungen infolge von Gewittern auf etwa die Hälfte reduzieren. *Ein Kriterium für die Erkennung direkter oder indirekter Blitzschläge* erblickt der Sprechende in der Aenderung des Vorzeichens der erzeugten Gewitterspannung auf der Leitung. Es hat sich gezeigt, dass während eines und desselben Gewitters alle oder fast alle Blitzspannungen auf der Leitung dieselbe Polarität aufweisen. Bei dem beobachteten direkten Einschlag dagegen war die Polarität umgekehrt als jene der vorher und nachher gemessenen Blitzspannungen. Daraus wäre zu schliessen, dass die Ladung einer Gewitterwolke ihr Vorzeichen während eines Gewitters beibehält. Falls sich diese Beobachtung bestätigt, hätte man eine Möglichkeit, in den Oszillogrammen direkte und indirekte Blitzschläge zu unterscheiden. Bei *Freileitungen auf Holzmasten* kann sich der Ausgleich nach Erde nicht gut vollziehen. Es entsteht am Gewitterherd ein Isolatorüberschlag mit Aufladung des ganzen Mastkopfes und Leitungskurzschluss, oft mit Zerstörung einiger Holzstangen. Hier ist schwierig zu helfen; wenigstens sollten weitere Ueberschläge in den Stationen verhindert werden, was durchaus möglich scheint. Bezüglich der letztern Frage sowie jener über den Wert von Erdseilen können am besten genaue Störungsstatistiken Aufschluss geben, deren Führung heute sehr erwünscht wäre.

Zur *Frage von Kleiner* verweist der Sprechende auf die Messungen von Gábor, der bereits früher die angewendete Spannungsteilung untersucht hat. Es können nach seinen Feststellungen Wellen mit mindestens 100 m Frontlänge richtig gemessen werden. Die praktisch vorkommenden Wellen weisen meistens eine grössere Frontlänge auf; nur die in unmittelbarer Stationsnähe entstehenden Fronten können noch steiler sein, was bei der Beschreibung der Schaltwellen gezeigt wurde. Die wertvolle Warnung von Kleiner bezüglich der *Abschaltung leerlaufender Leitungen mittels Trennmesser* wird vom Sprechenden bestens verdankt. Bei den oszillographischen Versuchen handelte es sich um die Betriebsfrequenz 16%. Bei grösserer Periodenzahl sind grössere Schwierigkeiten zu erwarten. Dies ergibt sich deutlich aus den Oszillogrammen. Die Zeit, in welcher die leerlaufende Leitung nach dem Stromunterbruch ihre Spannung verliert, beträgt danach nämlich ca. $\frac{1}{10}$ s (Fig. 41). Während einer halben Periode der Frequenz 16%, das heisst, während einer $\frac{1}{33,3}$ s hat die Leitung schon ungefähr ihre halbe Spannung verloren; entsprechend ist auch die Gefahr einer nochmaligen Zündung am Trennmesser kleiner geworden. Würde dieselbe Leitung mit 50 Per/s betrieben, so ergäbe sich nach einer halben Periode, d. h. $\frac{1}{100}$ s nach erfolgtem Stromunterbruch, noch die fast volle Restspannung auf der Leitung. Die Folge wäre Spannungsverdopplung am Trennmesser und entsprechend grössere Gefahr einer nochmaligen Zündung. Die Isolation der Leitung nach Erde ist also derart, dass bei 50 resp. 60 Per/s die Leitung gewissermassen sich noch als annähernd reine Kapazität verhält, bei 16% Per/s dagegen nicht mehr. Entsprechend ändert sich die Gefahr der bekannten Rückzündungen beim Abschalten der Kapazität.

Von Herrn Kleiner ist auch die prinzipielle Hauptfrage aufgeworfen worden, *wo der Ausgleich nach Erde stattfinden soll*. Es ist kein Zweifel, dass es angenehmer wäre, alle Ueberspannungswellen von ihrem Entstehungsort zu den Stationen zu führen, um sie dort in Ableitern usw. zu vernichten. Nun liegt aber die Entscheidung dieser Frage gar nicht in unserer Willkür. Es hängt nur von der Raschheit des Spannungsanstieges ab, ob die Leitung imstande ist, Ueberspannungen vom Entstehungsort gegen die Stationen abzuführen. Ist das Entstehungstempo der Ladungen sehr gross, so ergibt sich eine Stauung, die bei genügender Spannungshöhe oder bei entsprechend schwacher Leitungsisolation (nämlich weniger als 14gliedrige Ketten) zum dortigen Leitungsüberschlag führt. Die Oszillogramme zeigen nun in der Tat, dass der Spannungsanstieg bei allen jenen Blitzen, die zum Leitungsüberschlag führten, ganz ausserordentlich rasch erfolgt. Ob wir wollen oder nicht, die Leitung wird aus den angeführten Gründen ganz in der Nähe der betroffenen Gewitterstelle nach Erde überschlagen, wahrscheinlich am nächstgelegenen Mast, vielleicht auch beim übernächsten. Durch Höherisolieren eines schlecht zugänglichen Mastes ist es vielleicht möglich, den Ueberschlag von ihm fern zu halten und auf die nächsten Masten zu schieben. Dagegen scheint es ganz ausgeschlossen, den Ausgleich nach Erde bis in die Station vorzuschieben, so wünschenswert dies auch wäre. Ohne die entsprechende stoss- und lichtbogen-sichere Ausführung der Leitung kommt man also schlechterdings nicht herum, sofern man nicht nach amerikanischem Vorschlag die Leitung so hoch isolieren will, dass sie überhaupt nicht mehr überschlägt, was aber Ketten von mehr als 14 Gliedern erfordert.

Die *Forderung verzögerungsfreier Isolatoren* will der Sprechende in erster Linie auf die vor der Station liegenden Leitungsisolatoren angewendet wissen. Es wird damit eine Begrenzung der Ueberspannungshöhe infolge naher Gewitter bezweckt. Auf den von den Stationen entfernten Leitungsteilen hat die Verzögerung der Isolatoren, wie Herr Kleiner erwähnte, den Vorzug der Verminderung der Anzahl Ueberschläge.

Kopeliowitsch, B. B. C., Baden, führt folgendes aus:

Ich möchte mich zunächst den Worten der Herren Vorredner anschliessen, um dem schönen

¹¹⁾ Lewis, Gen. El. Rev., Juli 1929.

Erfolg, welchen Herr Berger mit seinen Arbeiten bereits erzielt hat, zu huldigen. Die Fülle des Materials, die uns vorgeführt wurde, zeugt von unermüdlicher Arbeit, die wir wohl zu schätzen wissen.

Der Herr Referent betonte mit Recht, dass die Isolation der Freileitungen «stoßsicher» sein muss und schrieb der Prüfung mit Stoßspannung grosse Bedeutung zu, welche Auffassung ich auch teile. Die Frage ist nun, wie soll man diese Stossprüfung gestalten, welche Wellenstirn muss man wählen und was soll von den Isolatoren verlangt werden? Bekanntlich hat das amerikanische Committee on Protective Devices (J. A. I. E. E., Nov. 1928, p. 793) die Wellensteilheit für die Stossprüfung von Blitzableitern normalisiert, indem man die Apparate für 11 kV Nennspannung mit Wellen von $100 \text{ kV}/\mu\text{s}$ Stirnsteilheit, solche von 22 kV Nennspannung mit $200 \text{ kV}/\mu\text{s}$ usw. prüfen soll. Für 66-kV-Anlage ergibt sich ein Spannungsanstieg von $600 \text{ kV}/\mu\text{s}$, was, verglichen mit den Kathoden-Oszillographaufnahmen, die wir gesehen haben, und mit den Angaben des Herrn Referenten (ca. $300 \text{ kV}/5\mu\text{s} = 60 \text{ kV}/\mu\text{s}$), welche, wenn ich richtig verstanden habe, sich auf indirekte Blitzschläge beziehen, eine etwa zehnfach grössere Steilheit der Wellenfront darstellt. Die eingehenden Untersuchungen mit der Stossprüfanlage, die im Forschungslaboratorium der A.-G. Brown, Boveri durchgeführt wurden, zeigen jedoch, dass die Höhe der Spannung, welche man dem Isolator vor dem Ueberschlag aufdrücken kann, stark von der Steilheit der Wellen abhängt. Es ergeben sich Ueberschlagsspannungen, die z. B. für eine 6gliedrige Kette im Verhältnis 1 zu 1,45, d. h. $600 \text{ kV} : 870 \text{ kV}$ steigen können. Es wäre deshalb sehr wertvoll, wenn es Herrn Berger möglich wäre, an Hand der gemachten Aufnahmen anzugeben, welche Wellenstirn bei direkten Blitzschlägen zu erwarten ist.

Von Herrn Prof. Bauer wurde die Frage der Schutzwirkung eines Erdseiles aufgeworfen. Ich möchte in diesem Zusammenhang einige Zahlen aus einer aufschlussreichen Statistik nennen, welche kürzlich in einem Bericht des «Overhead Systems Committee of the Great Lakes Engineering Section», N. E. L. A.¹²⁾ veröffentlicht wurde und vielleicht unbeachtet blieb. Diese Statistik bezieht sich auf die Hochspannungsleitungen (100 kV und mehr), die sämtlich in der Gegend der Great Lakes verlaufen und eine totale Länge von 2295 Meilen besitzen.

- a) Davon sind 1576 Leitungsmeilen mit 1 bis 2 Erdseilen versehen bei einer Mastenhöhe, die meistens 80 Fuss, im Minimum 57,5, im Maximum 86,5 Fuss, beträgt. Die Isolatorenketten sind meistens aus 9 und 10, bei einigen Leitungen auch aus 8 Gliedern zusammengesetzt.
- b) Die Leitungen ohne Erdseile umfassen eine Länge von 719 Meilen, haben meistens eine Mastenhöhe von 51 Fuss, einzelne Leitungen eine solche bis 84 Fuss. Die Anzahl der Glieder pro Kette beträgt grösstenteils 10, bei einer Leitung 8, bei 4 Leitungen 9 und bei einer 10 und 11 Glieder.

Bezüglich elektrostatischer Beeinflussung sind die Leitungen ohne Erdseile günstiger daran, da die Mastenhöhe meistens nur 62,5 % derjenigen der Leitungen mit Erdseilen erreicht.

Die Anzahl der Abschaltungen, verursacht durch Blitzschläge, betrug bei Leitungen nach

- a) 8,13 pro 100 Meilen im Jahre 1928; 7,43 pro 100 Meilen während der ganzen Registrierperiode;
- b) 16,82 pro 100 Meilen im Jahre 1928; 14,5 pro 100 Meilen während der ganzen Registrierperiode.

Das Verhältnis ist somit $\frac{16,82}{8,13} = 2,06$, und $\frac{14,5}{7,43} = 1,95$, d. h., *die Leitungen ohne Erdseile weisen trotz des gleichen Isolationsgrades und kleinerer Masthöhe doppelt so viele Abschaltungen infolge Gewitter als solche mit Erdseilen auf.*

Der Einfluss der Masthöhe, der Leitungslänge oder der Anzahl der Kettenglieder kann aus den Zahlen nicht eindeutig ersehen werden. Es hat aber doch den Anschein, als ob die Leitungen mit 8gliedrigen Ketten mehr unter den Gewitterstörungen zu leiden hatten. Bemerkenswert ist auch, dass eine der Leitungen b), welche im Jahre 1927 4 Abschaltungen zufolge Blitzschlägen verursachte, nur eine solche im Jahre 1928 hatte, nachdem die Ketten des oberen Leiters zwei und diejenigen des mittleren Leiters ein zusätzliches Glied erhielten. Es ist auch allgemein bekannt, dass Leitungen für höhere Spannungen seltener als solche mittlerer Spannungen zu Abschaltungen Anlass geben. Zu bemerken ist noch, dass nur in 15 bis 20 % der Fälle bei Doppelleitungen beide abgeschaltet wurden.

Diese Statistik, welcher selbstverständlich eine allgemeine Gültigkeit nicht zugeschrieben werden darf, kann aber dahin gedeutet werden, dass es möglich ist, durch geeignete Isolation der Leitungen und durch Verlegung der Erdseile die Anzahl der Abschaltungen infolge Ueberschläge in günstigem Sinne zu beeinflussen. Damit ist auch die Frage der Zweckmässigkeit einer künstlichen Erleichterung der Ueberschläge an der Leitung meines Erachtens beantwortet. Ich stimme dem Referenten zu, dass es wahrscheinlich nicht gelingen wird, Freileitungen gegen die Ueberschläge infolge Gewitterüberspannungen zu immunisieren. Ich sehe jedoch nicht ein, wie die Isolatorenarmatur gebaut werden sollte, damit die Ueberschläge möglichst ohne Verzug auftreten: Ueberschlagsversuche bei Stoßspannung an 6gliedrigen Ketten, versehen mit dünnen und dicken Ringarmaturen, haben keinen nennenswerten Unterschied in der Spannungshöhe ergeben. Die Verzögerung beim Ueberschlag könnte nur bei Anwendung genügend grosser Kugelfunkentrecken aufgehoben werden; die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anordnung ist aber zweifelhaft.

Will man Ueberschläge an schwer zugänglichen Leitungsstrecken nach Möglichkeit verhindern, so empfiehlt es sich, diese Leitungsteile höher zu isolieren und mit zusätzlichen Erdseilen zu ver-

¹²⁾ Transmission Line Performance, El. World, Aug. 17th 1929, p. 323.

sehen¹³⁾. Um die Schaltstationen gegen die atmosphärischen Wanderwellen zu schützen, werden die Leitungen öfters auf einer Länge von einigen Kilometern vor den Stationen schwächer isoliert. Die Auffindung der Ueberschlagsstelle wird dadurch erleichtert. Im übrigen erlauben die modernen Reaktanzrelais durch Angabe der Auslösezeit die defekte Stelle sehr schön einzugrenzen, wodurch die Reparatur ganz bedeutend beschleunigt wird.

Auf einige weitere Fragen werde ich mir erlauben später einzugehen.

Prof. A. Matthias kommt auf die Frage der durch direkte und indirekte Blitzschläge erzeugten Ueberspannungen zurück. Auch indirekte Blitzschläge können sich nachteilig auswirken, besonders in Unterspannungsanlagen. Von ca. 15 kV an aufwärts machen sich aber infolge der höhern Isolation der Anlagen die indirekten Blitzschläge nicht mehr so geltend, und für diese müssen hauptsächlich die direkten Blitzschläge als gefährlich angesehen werden.

Zur Frage des verzögerungsfreien Ueberschlages an Isolatoren ist der Sprechende der gleichen Ansicht wie Kopeliowitsch, d. h. Isolatoren weisen immer eine Verzögerung auf. Immerhin sollte durch entsprechende Isolation der Freileitungen dafür gesorgt werden, dass ihre Isolatoren verzögerungsfreier arbeiten als diejenigen der Schaltanlagen, d. h. dass der Ueberschlag nicht in der Anlage, sondern an der Isolatorenkette erfolgt. Es ist zweckmässiger, den Ueberspannungen an Ort und Stelle ihrer Entstehung Gelegenheit zu ihrer Ableitung nach Erde zu geben, als diese erst in der Anlage unschädlich zu machen.

Zu der von Berger gemachten Bemerkung betreffend Kriterium für direkte und indirekte Blitzschläge mahnt der Sprechende zur Vorsicht. Um hierüber entscheiden zu können, müsste zahlreicheres Versuchsmaterial vorliegen. Auch bezweifelt er, dass die Polarität der Leitung auf die Einwirkung des Blitzes keinen Einfluss besitzt. An einem Versuchsmodell einer Freileitung durchgeführte Versuche, wo künstliche Blitze erzeugt wurden, haben gezeigt, dass das Vorzeichen der an die Freileitung angelegten Spannung für die Häufigkeit der Blitzeinschläge eine wesentliche Rolle spielt.

Rump gratuliert Berger zu seiner Arbeit, aus der der Praktiker wertvolle Schlüsse ziehen kann. Früher war man für die Studie von Ueberspannungserscheinungen auf Untersuchungen und Statistiken über Störungen in Anlagen und darauf aufgebaute Theorien angewiesen. Heute kann man mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen die Vorgänge genau verfolgen. Dadurch wird die Untersuchung der Störungen in den Anlagen nicht überflüssig, indem sie die Forschungen mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen wertvoll ergänzt und vor allem zeigt, welche Erscheinungen für die Anlage von praktischer Bedeutung sind.

Interessant ist, dass die aus der von B. B. C. geführten Statistik und Untersuchungen sich ergebenden Schlussfolgerungen mit den Versuchsergebnissen mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen sich wenigstens in der Hauptsache decken¹⁴⁾.

Die früheren Untersuchungen haben ergeben, dass die damals allgemein verwendeten Blitzschutzapparate einen zweifelhaften Schutzwert bieten. Der Sprechende stellt sodann die Frage, welche Charakteristik ein eventueller Blitzschutz aufweisen muss, damit er seinen Zweck erfüllt.

Marty, B. K. W., Bern, berichtet über einen Versuch, wo eine leerlaufende 100-kV-Freileitung von 25 km Länge bei 80 kV Betriebsspannung und 50 Per/s einwandfrei durch Trennmesser abgeschaltet werden konnte; für betriebsmässige Schaltungen sollten jedoch Oelschalter verwendet werden.

Zur Frage der Spannungsprüfung bittet der Sprechende den Vorstand des S. E. V., dass in die S. E. V.-Normen für Spannungen und Spannungsprüfungen auch die Stossprüfung eingeführt wird, welche seinerzeit bei der Aufstellung dieser Normalien noch nicht genügend abgeklärt war. Diese Prüfung ist, wie aus den Ausführungen Berger hervorgeht, für die Isolatoren notwendig, und in diesem Sinne sollte die M. P. des S. E. V. auch eine Einrichtung besitzen, um diese Prüfung vornehmen zu können. Ebenso sollte die in den S. E. V.-Spannungsnormen für Transformatoren vorgesehene Prüfung revidiert werden, da nach Mitteilung des Referenten bei Störungen so hohe Spannungen auftreten können, dass die Luftstrecke zwischen den Anschlussklemmen überschlagen wird. Es wäre hier vielleicht angezeigt, die bei der Sprungwellenprobe verwendete Prüfspannung auf einen grössern Wert als den 1,3fachen Wert der Nennspannung festzulegen.

Wettstein, E. K. Z., Zürich, macht einige Angaben über die die letzten 3 Jahre umfassende Betriebsstörungsstatistik der E. K. Z. für ihre 8-kV-Netze, welche ca. 1000 km Freileitungen umfassen. Das Stangenbild ist überall das gleiche; die Leiter bilden auf den Masten ein gleichseitiges Dreieck von ca. 70 cm Kantenlänge. Von den Leiterstützpunkten sind nur ca. 3 % geerdet. Die 8-kV-Netze zerfallen in zwei Teile: das eine Netz ist mittels Löschspulen geerdet und sämtliche Blitzschutzapparate sind ausgeschaltet, während die anderen Netze nicht geerdet sind; dagegen sind in allen grösseren Transformatorenstationen Blitzschutzvorrichtungen (Hörnerableiter) eingeschaltet. In 3 Jahren wurden in dem Netze mit Löschspulen 10, 23 und 8, in den ungeerdeten Netzen 66, 70 und 54 Abschaltungen pro Jahr infolge Gewitterstörungen registriert. Auf die Stranglängen bezogen, ergeben sich für diese 3 Jahre insgesamt 45 Abschaltungen für das ungeerdete und 41 für das geerdete Netz. Aus diesen Zahlen kann der Schluss gezogen werden, dass den Blitzschutzvorrichtungen in 8-kV-Netzen keine grosse Bedeutung zuzumessen ist. In den meisten Fällen konnte die Stelle der Störung nicht ermittelt werden, obgleich die E. K. Z.

¹³⁾ Lewis, Gen. El. Rev., Juli 1929, p. 364.

¹⁴⁾ Bull. S. E. V. 1926, S. 407.

eine genaue Kontrolle führen. In dem ungeerdeten Netze der E. K. Z. sind zur Kontrolle der Erdschlüsse Erdschlußsignaleinrichtungen mit Zeitverzögerung eingebaut, d. h. ein Erdschluss wird nur signalisiert, wenn dieser mehr als 5 sec dauert. In dem Netze mit Löschspule ist in die Zuleitung zur Löschspule ein Ampèremeter eingebaut zur Kontrolle des nach der Erde abfließenden Stromes. Je nach den Verhältnissen zeigt dieses Instrument Stromstärken von 1 bis 5 Ampère an. Es wurde festgestellt, dass nicht nur bei Gewittern Spannungsunsymmetrien der einzelnen Phasen gegen Erde entstehen, sondern dass dies auch an gewitterlosen Tagen eintreten kann. Von 328 bzw. 268 bzw. 395 registrierten Unsymmetrien entfallen 203 bzw. 197 bzw. 288 ausserhalb der Zeit von Gewittern. Ein Unterschied besteht freilich in der Häufigkeit der Unsymmetrien; werden an gewitterlosen Tagen pro Tag 1—2 registriert, so können bei Gewittern 10—20 pro Stunde auftreten.

In den Netzen der E. K. Z. sind Doppelleitungen auf demselben Gestänge nur vereinzelt vorhanden. Es sind dies Leitungen, die vom gleichen Unterwerk aus eine Strecke weit auf dem gleichen Gestänge montiert sind und dann getrennt weiterführen. Bei Gewitterstörungen wurde in der Regel immer nur die eine der beiden Leitungen abgeschaltet. Nur in einem einzigen Falle wurden beide Leitungen des gemeinschaftlichen Gestänges gleichzeitig abgeschaltet. Die Längen dieser beiden Leitungen betragen 16,3 und 8 km; das gemeinschaftliche Stück beträgt 4,6 km. Die Störungsstelle konnte in diesem Falle nicht ermittelt werden.

Kopeliowitsch: Herr Berger hat in seinen Schlussfolgerungen hervorgehoben, dass bei Stromwandlern für 100 A und mehr Nennstrom auch ohne Ueberbrückung mit Widerstand keine Klemmenüberschläge auftraten, hingegen war eine solche bei Stromwandlern für 50 A Nennstrom nötig. Demgegenüber haben wir bei Kurzschlussversuchen bei 30 kV festgestellt, dass bei unüberbrückten Stromwandlern für Nennströme über 50 A Ueberschläge zwischen den Klemmen infolge Entladewellen zustande kommen können. Demnach dürften wohl die Schlussfolgerungen von Herrn Berger nicht für alle Stromwandlerkonstruktionen und besonders nicht für alle Spannungen gelten.

Weilich von den Ueberbrückungswiderständen spreche, sei anschliessend kurz die Frage der Resonanzüberspannungen an den Reaktanzdrosselspulen zur Begrenzung der Kurzschlussströme gestreift. Die Auffassung, dass diese Spulen die Quelle gefährlicher Ueberspannungen bilden, ist theoretisch gewiss begründbar, da die Hochspannungsnetze aus Schwingungskreisen bestehen, die unter Umständen zu Resonanzspannungen Anlass geben können, wenn Belastungs- oder Ueberbrückungswiderstände entsprechender Grösse nicht vorhanden sind. Diese Spulen befinden sich jedoch meistens hinter den Sammelschienen, deren Kapazität bedeutend grösser als die Eingangskapazität von Transformatoren ist und haben ausserdem 10- bis 20mal höhere Induktivität als die kleinen Drosseln, welche für den Ueberspannungsschutz meistens verwendet werden. Die Eigenfrequenz, gebildet aus den Reaktanzspulen und der Sammelschienenkapazität, liegt deshalb bedeutend tiefer, ausserdem braucht dieser Kreis viel mehr Energie, um auf hohe Spannung gebracht zu werden. Die Erfahrung lehrt, dass die Resonanzüberspannungen im Zusammenhang mit Reaktanzspulen wohl zu seltenen Ausnahmefällen gehören. Wir haben z. B. in einem 30-kV-Netz die Spannungen an den Reaktanzspulen bei verschiedenen Leitungslängen, mit mehreren Funkenstrecken, gleichzeitig gemessen. Nach mehreren hundert von Versuchen konnten wir nur Spannungen feststellen, welche theoretisch durch Betrachtung der Wanderwellenvorgänge, also ohne Resonanzerscheinungen, vorausszusehen waren (bis $2 E_v$ über die Spule). Die in den letzten 3 Jahren von Brown, Boveri gebauten Drosselspulen werden auch im allgemeinen einer Sprungwellenprobe mit dreifacher verketteter Spannung unterworfen und haben seitdem die in verschiedenen Betrieben an sie gestellten Anforderungen störungsfrei ausgehalten.

Zur Frage der Abschaltung von leerlaufenden Freileitungen mit Trennmessern möchte ich nur bemerken, dass die entstehenden Lichtbogenlängen von der Grösse der Spannung und der Länge der Leitung, d. h. von der Abschaltstromstärke abhängen. Nach den in J. A. I. E. E.¹⁵⁾ erschienenen Berichten erfolgt die Abschaltung langer Leitungen sogar mit Oelschaltern manchmal nicht ohne Schwierigkeiten.

Einige Worte noch zur Anregung des Herrn Vortragenden betreffend einer Verschärfung der Sprungwellenprobe an Transformatoren. Nach S. E. V.-Normen wird diese mit $1,3 E_v$ mit 50 Per/s während 10 sec durchgeführt. Es muss zunächst betont werden, dass diese Prüfung nicht zur Nachahmung der im Betrieb höchstmöglichen Beanspruchung geschaffen wurde: dazu wäre ja eine Prüfspannung gleich der höchsten Ueberschlagspannung der Isolatoren notwendig! Die Sprungwellenprüfung im Sinne der S. E. V.-Normen soll vielmehr eine Werkprobe zur Kontrolle der Wicklungsisolation sein, ein Mittel zur Aufdeckung von schwachen Stellen oder Fabrikationsfehlern. Im übrigen erzeugt man während 10 sec 1000 Sprungwellen, jede von einer viel grösseren Dauer als die Spannungsspitzen, welche wir in den Oszillogrammen des Vortragenden gesehen haben (20 bis 40 μ /s). Die Durchbruchspannung fester und flüssiger Isolierstoffe hängt aber von der Beanspruchungsdauer ab und erreicht bei sehr kurzen Zeiten bedeutend höhere Werte. Diese Methode hat sich auch bewährt, da nach ihrer Einführung die Isolation mancher Transformatorentypen verstärkt werden musste. Die auf diese Weise verbesserten (stationären) Leistungstransformatoren weisen nach der Störungsstatistik von Brown, Boveri der 6 letzten Jahre mit einer Totalleistung von ca. 6 000 000 kVA überhaupt keine Wicklungsdurchschläge auf. Anfangs hat man begreiflicherweise die Wicklungen sogar zu stark isoliert, was ausser der Verteuerung sich noch in einigen anderen Beziehungen nachteilig auswirkte: Es sind zunächst die Abkühlungsver-

¹⁵⁾ Wilkins & Grellin, J. A. I. E. E. 1927, Déc., p. 1340.

hältnisse für das Kupfer ungünstiger, so dass höhere Cu-Temperaturen bei gleicher Ausnützung des Materials zugelassen werden sollten. Weiter ist der Aufbau der Wicklung und die Verteilung der Windungskapazität ungünstiger. Erst nach eingehenden Versuchen und unter Berücksichtigung der Betriebsergebnisse wurde die richtige Bemessung der Wicklungsisolierung erzielt. Eine Verschärfung der Sprungwellenprobe wird möglicherweise uns zu dem Ausgangspunkt zurückführen und vielleicht eine Verteuerung der Transformatoren und auf alle Fälle eine Komplikation des Prüfverfahrens nach sich ziehen. Berücksichtigt man aber die oben erwähnten günstigen Betriebsergebnisse, so kann dies in keiner Weise gerechtfertigt werden.

Zum Schlusse möchte ich darauf hinweisen, dass die Idee «nicht schwingender» Transformatoren, die kürzlich in J. A. I. E. E.¹⁶⁾ beschrieben wurden, nicht neu ist: Bereits im Jahre 1921 wurde diese Frage in Japan aufgeworfen¹⁷⁾, indem man die Wicklung mit Kapazitäten in der Weise zu versehen suchte, dass die Wicklungssäule nicht mehr schwingen konnte. Auch die Formeln zur Bemessung der Kapazitäten wurden später angegeben¹⁸⁾. Die Anordnung der Kapazitäten und ihr Anschluss an die Wicklung bilden zweifellos eine beträchtliche Komplikation. Die Erfahrung wird zeigen, ob die mit dieser Anordnung erreichten Vorteile die erwähnten Nachteile überwiegen. Es darf nicht vergessen werden, welche Schwierigkeiten bei der Ausführung der Hochspannungstransformatoren mit Anzapfungen zu überwinden waren, um die gleiche Isolationsicherheit wie bei einfachen Wicklungen zu erreichen. Im übrigen verwendet Brown, Boveri einen Pressring, der so ausgebildet ist, dass durch Abschirmung die Beanspruchung der Eingangswindungen günstig beeinflusst wird. Die bereits erwähnten Betriebsergebnisse zeigen, dass mit schwingungsfähigen, aber im Aufbau einfachen Transformatoren durchaus genügende Betriebssicherheit erreicht wird.

Leuch, E. W. Zürich, schliesst sich den Ausführungen Wettsteins an. Netze niedriger Spannung und deren Betrieb leiden stärker unter den durch Gewitter hervorgerufenen Ueberspannungen als Netze höherer Betriebsspannung. Eine sich über 7 Jahre erstreckende Statistik des E. W. Z. für ihre 50-kV-Leitungen mit total über 600 Strang-km zeigt im Mittel pro Jahr 2,3 durch Gewitter verursachte Abschaltungen (1929 Minimum 0; 1928 Maximum 5). Das Verhältnis von Betriebs- zu Ueberschlagsspannung ist durch die Isolatoren (-Vorschriften) gegeben. Die Freileitungen sind deshalb vom Standpunkt der Isolationsbeanspruchung, je nach ihrer Betriebsspannung, ungleich empfindlich. Die Leitungen und Anlagen sind in ihrer Gesamtheit schwingungsfähige Gebilde, deren Konstanten durch Schalthandlungen verändert werden. Eine allgemeine Regel, wie den durch Gewitter entstehenden Ueberspannungen zu begegnen ist, liess sich bisher nach Ansicht des Sprechenden nicht aufstellen, weil einerseits die Kenntnis der absoluten Werte der Gewitterspannungen fehlte, und andererseits, weil die von Naturerscheinungen in den Netzen, je nach deren augenblicklicher Schaltung, verursachten Folgeerscheinungen zu wenig bekannt und oft schwer voneinander zu scheiden waren.

Für jede Anlage ist zu entscheiden, ob die Ableitung von Ueberspannungen durch Ueberschläge an Freileitungsisolatoren oder durch Ueberschläge in Werken und Schaltknotenpunkten willkommener ist oder ob sich die Aufstellung besonderer Ueberspannungsschutzapparate empfiehlt.

Zum Votum Kleiner macht der Sprechende darauf aufmerksam, dass die Ueberschlagsgefahr auf schwer zugänglichen Freileitungstrecken (Gebirge) durch streckenweises Erhöhen der Isolation) vermindert werden kann.

Der Sprechende teilt sodann mit, dass kürzlich vom E. W. Z. durchgeführte Messungen an einer Weitspannleitung ergeben haben, dass durch ein Erdseil der resultierende Erdungswiderstand auf ca. $\frac{1}{5}$ des ursprünglichen Wertes erniedrigt und zugleich die Kapazität der Leitung bedeutend erhöht werden kann. Diese Vergrösserung der Erdkapazität mag der Grund der günstigen Wirkung der Erdseile in bezug auf das Auftreten von Gewitterueberspannungen auf Freileitungen sein.

Berger beantwortet die von Kopeliowitsch gestellten Fragen und führt folgendes aus:

Die *Steilheit der durch direkte Blitzeinschläge* entstehenden Ueberspannungen hoffen wir in weitem Versuchen noch zu bestimmen, sofern wir die zur Durchführung weiterer Versuche nötigen Geldmittel erhalten werden.

Dem Vorschlag, *schwer zugängliche Leitungstrecken durch Erdseile zu schützen*, ist leider ein absoluter Erfolg nicht beschieden. Die Pennsylvania Power & Light Company hat ein 32 km langes Stück ihrer 220-kV-Leitungen (14gliedrige Kettenisolatoren) mit 2 Erdseilen ausrüsten lassen zum Schutz der dortigen Kathodenstrahl-Oszillograph-Meßstation. Trotzdem sind gerade auf diesem «geschützten» Stück noch Ueberschläge infolge von Blitzen vorgekommen. Vielleicht ist es möglich, auf diese Weise einen einzelnen Mast zu schützen, schwerlich aber eine grössere Leitungstrecke. Im übrigen muss vor zu raschen Schlüssen, wie sie durch Vergleich der Störungsziffern von nur 2 aufeinanderfolgenden Jahren entstehen, gewarnt werden. Auch bei unveränderter Leitung ändern diese Zahlen von Jahr zu Jahr stark.

Die Ausführungen von Wettstein sind sehr wertvoll, weil sie einmal die grosse Anzahl von Erdschlüssen in 8-kV-Netzen zeigen. Für die Gewittererscheinungen ist das Verhältnis der Anzahl Abschaltungen durch Gewitter zur Anzahl Erdschlüsse bei Gewitter interessant; dieses ändert zwischen 1 : 1 und 1 : 2. Für die überwiegend auf Holzmasten bestehenden 8-kV-Leitungen machen

¹⁶⁾ K. K. Paluëff, J. A. I. E. E., 48, 1929, S. 357.

¹⁷⁾ Risaburo Torikai, I. E. E., J. vol. 59, No. 303, pp. 740–750, July 1921.

¹⁸⁾ Risaburo Torikai: On the Protection of Transformer Coils the selected Papers from the Journal of the Institute of E. E. of Japan, No. 17, July 1928.

demnach die Kurzschlüsse einen Prozentsatz von 33 bis 50 % aller Gewittereinwirkungen aus; das ist recht viel.

Der Sprechende kommt auf die von Rump gestellte Frage betreffend die *günstigste Charakteristik für Ueberspannungs- und Blitzschutzvorrichtungen* zu sprechen. Bis diese Frage beantwortet werden kann, werden noch zahlreiche Versuche gemacht werden müssen.

Zur Bemerkung von Kopeliowitsch bezüglich der *Stromwandler-Ueberbrückungen* teilt er mit, dass es sich um Versuche in einem 8-kV-Freileitungsnetze handelte. Mit höherer Betriebsspannung steigt auch die Sprungspannung über dem Stromwandler gleichzeitig an, so dass in der Tat die Grenze des Nennstromes, oberhalb welchem keine Ueberbrückung nötig ist, mit der Betriebsspannung steigt. Auch die Konstruktion spielt eine Rolle. Auf Grund der früheren Untersuchungen mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen ist es heute möglich, diese Grenzen zu berechnen¹⁹⁾.

Zur Bemerkung betreffend *Reaktanzspulen* ergänzt der Sprechende, dass es sich bei den von B. B. C. beschriebenen Versuchen um solche in einem Kabelnetz handelte, wo atmosphärische Spannungen nicht vorkommen. Die schlimmsten Wellen bei den genannten Kurz- und Erdschlüssen sind durch die Betriebsspannung festgelegt; die Gewitterwellen sind dagegen wesentlich höher und nur durch die Ueberschlagsspannung der Leitung begrenzt. — Wie bereits im Referat gesagt wurde, besteht die Gefahr nur in seltenen Fällen in eigentlicher Resonanz; sondern meistens einzig im *Ueberschwingen* des Eingangskreises. Bei atmosphärischen Ueberspannungen ist dieser Vorgang schon gefährlich, wie der genannte Störfall des vergangenen Sommers, sowie eine Reihe ganz analoger Fälle in 25- und 50-kV-Anlagen gezeigt haben. Theoretisch ist die Gefährdung der Generator-Reaktanz-Drosseln kleiner als jene der Spulen in den abgehenden Leitungen. Der Störfall des vergangenen Sommers bezieht sich auf den letzteren Fall. Dem Vortragenden sind aber auch analoge Störungen bekannt an relativ grossen Drosseln zwischen Transformatoren und Sammelschienen. Nachdem sich dort bei Gewitter die gleichen Ueberschläge während mehrerer Jahre wiederholt hatten, wurden diese Spulen kurzgeschlossen; damit verschwanden die Störungen. Wenn die Firmen auf Grund ihrer Erfahrungen eine Sprungwellenprobe ihrer Drosselspulen heute schon durchführen, so ist der Zweck der diesbezüglichen Ausführungen erreicht. Der dreifache Wert der verketteten Spannung dürfte als Prüfspannung etwa genügen. Diese Massnahme ist wertvoll und zeugt für den fortschrittlichen Geist der Firma B. B. C.

Für die *Sprungwellenprobe* erachtet es der Sprechende als richtiger, wenn die in der Praxis wirklich auftretenden Beanspruchungen bei der Prüfung möglichst nachgeahmt werden. Dies besonders, weil zwischen Beanspruchungsdauer und Durchschlagsspannung kein einfacher Zusammenhang besteht. Es fragt sich hier vor allem, was wir mit der Sprungwellenprobe bezwecken: Werkprobe oder Probe auf Betriebstüchtigkeit? Viele Betriebsleute neigen zur letzteren Auffassung.

Die Behauptung, die Dauer der Beanspruchung jedes einzelnen Stosses bei der Sprungwellenprobe sei grösser als bei den Gewitterwellen, ist kaum aufrecht zu erhalten, da die Beanspruchung der Windungen gegeneinander noch kürzer dauert als die Gewitterspannung.

Tatsache ist, dass bei der Sprungwellenprobe keine Defekte zum Vorschein kommen. Andererseits sind heute bei modernen Transformatoren Windungsschlüsse als Folge von Gewittern sehr selten geworden, wie Kopeliowitsch mit Recht erwähnt. Da wir also wissen, dass die Transformatoren heute schon viel mehr aushalten als das Mass der jetzigen Sprungwellenprobe, scheint dem Vortragenden eine Revision der Prüfspannungshöhe angebracht. Entweder kommt man dazu, die Prüfung wegzulassen, weil sie nichts sagt, oder dann prüft man derart, dass aus der Prüfung ein Urteil auf das Verhalten im Betrieb gewonnen werden kann. Nach den heutigen Erfahrungen der Betriebe und Fabriken schaden auch Klemmenüberschläge modernen Transformatoren nichts. Es handelt sich also nicht darum, die Isolation zu verstärken, sondern lediglich richtig zu prüfen. In diesem Sinne kann sich der Sprechende den Ausführungen von Kopeliowitsch nicht anschliessen.

Prof. Dr. Wyssling, Wädenswil, spricht als Delegierter der eidgenössischen Stiftung zur Förderung schweizerischer Volkswirtschaft seine Befriedigung aus, dass die von dieser Stiftung den Arbeiten mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen zur Verfügung gestellten Geldmittel in nützlicher Weise verwendet worden sind. Die eidgenössische Stiftung zur Förderung schweizerischer Volkswirtschaft gibt an direkt Interessierte nur dann Beiträge, wenn der Interessentenkreis, welcher einen Beitrag fordert, sich selbst auch finanziell an der Arbeit beteiligt. Dies ist auch geschehen, indem der S. E. V., die Elektrizitätswerke sowie einige Fabrikationsfirmen die Arbeiten mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen unterstützt haben. Diese Arbeit soll auch fernerhin fortgesetzt werden, und es ist die eidgenössische Stiftung zur Förderung schweizerischer Volkswirtschaft bereit, wiederum einen Beitrag zu leisten, wenn auch die andern Interessentenkreise die Arbeit weiterhin unterstützen. In diesem Sinne richtet er einen warmen Appell an alle Anwesenden, insbesondere an die Elektrizitätswerke.

Als alter Betriebsmann und Kollege der Werksvertreter beglückwünscht er sodann die jüngere Generation, der es ermöglicht ist, sich auf dem Gebiete der Elektrotechnik besser ausbilden zu lassen, als dies früher der Fall war, wo man über das Wesen und Wirken der Elektrizität noch nicht so orientiert war. Aus diesem Grunde ist es auch verständlich, wenn es manchmal zwischen der älteren und jüngeren Generation zu Meinungsverschiedenheiten kommt; es

¹⁹⁾ 1. Bericht des Ausschusses, Bull. S. E. V. 1927, No. 21.

sollten dabei aber die Veteranen der Elektrotechnik nicht immer den Standpunkt einnehmen, nur ihre Ansicht sei die richtige, denn es kann auch einmal ein Vertreter der jüngern Generation auf einem Gebiete, besonders wenn es sich um ein Spezialgebiet handelt, worüber man früher nichts erfuhr, gute Gedanken haben. Dies eingestehen zu müssen, ist keine Schande, denn bei dem heutigen Stande der Technik ist es begreiflich, dass man nicht auf allen Gebieten Fachmann sein kann. Die jüngere Generation soll aber auch verstehen, dass die ältere nicht die gleiche Schulung hat genießen können wie sie. Zur Frage der Spannungsnormalen des S. E. V. muss zugegeben werden, dass die in diesen vorgesehenen Prüfmethode einer Revision bedürfen. Vorher sollten aber noch zahlreiche Versuche unter möglichst verschiedenen Bedingungen und in verschiedenen Netzen über auftretende Ueberspannungen mittels des Kathodenstrahl-Oszillograph vorgenommen werden, um so für die Revision möglichst allgemeine Gesichtspunkte sammeln zu können. Darnach erst, aber möglichst bald dann, werden auch die S. E. V.-Leitsätze betreffend Ueberspannungsschutz behandelt werden müssen.

(Fortsetzung folgt.)

Technische Mitteilungen. — Communications de nature technique.

Coupe-circuit avec sectionneur pour le neutre.

621.316.923

La maison S. A. Gardy, Genève, nous écrit:

Les prescriptions relatives à l'établissement, à l'exploitation et à l'entretien des installations électriques intérieures, établies par l'Association

Suisse des Electriciens en 1927, imposent la mise à terre des récepteurs de courant (voir comme principal avantage de remplacer deux § 18). Pour satisfaire à ces nouvelles exigences, il a été créé des nouveaux modèles de coupe-circuit avec sectionneur pour le neutre, ayant

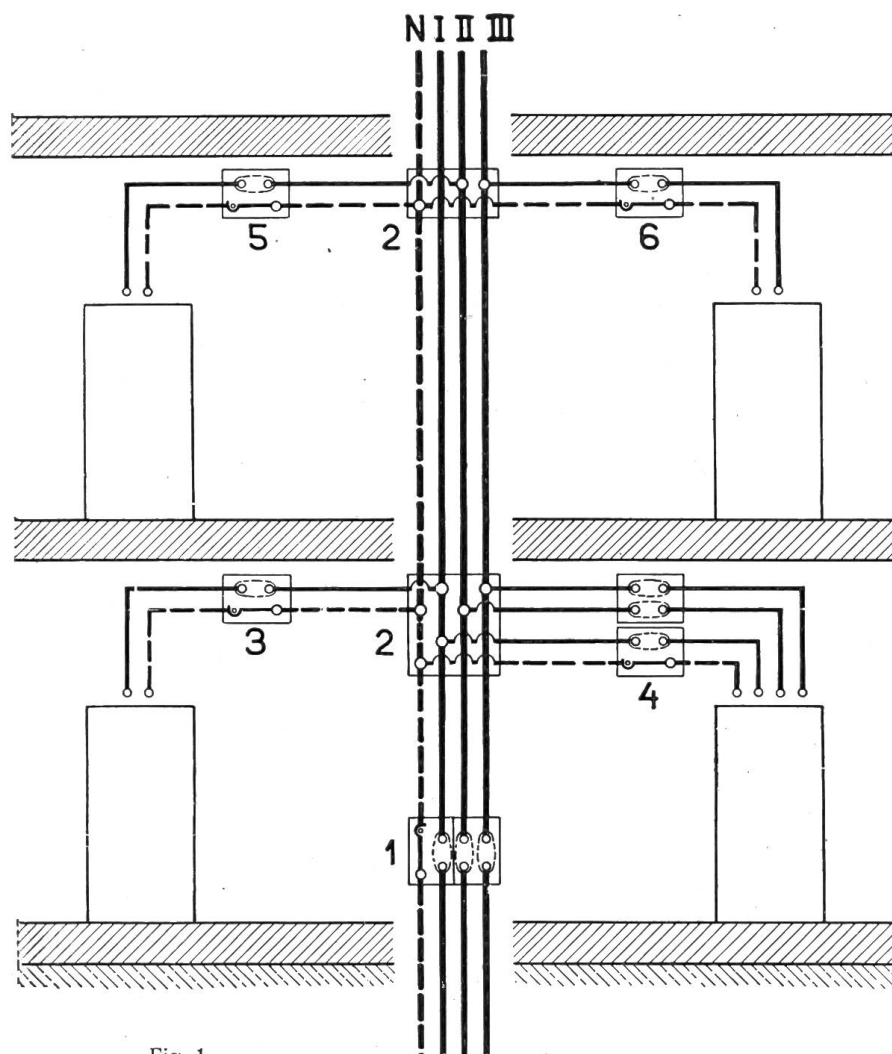


Fig. 1.

- 1 Coupe-circuits principal
- 2 Boîte de dérivation
- 3, 4, 5 et 6 Coupe-circuits d'abonné.

← Arrivé du réseau public avec neutre à la terre.