

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band:	20 (1929)
Heft:	11
Artikel:	Zweiter Bericht des Ausschusses für die Arbeiten mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen : die ersten Beobachtungen des Verlaufes von durch Gewitter verursachten Spannungen in Mittelspannungsnetzen mittels des Kathodenstrahl-Oszillographen des S.E.V.
Autor:	Berger, K.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1060767

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: 16.02.2026

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

XX. Jahrgang
XX^e Année

Bulletin No. 11

Juni I 1929
Juin I

Zweiter Bericht des Ausschusses für die Arbeiten mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen¹⁾.

Die ersten Beobachtungen des Verlaufes von durch Gewitter verursachten Spannungen in Mittelspannungsnetzen mittels des Kathodenstrahl-Oszillographen des S.E.V.

Von K. Berger, Ingenieur des S.E.V.

Im vorliegenden Bericht werden zunächst die beiden Leitungen — die Fahrleitung der Forchbahn und ein Teil des 8 kV-Netzes der E.K.Z. — an denen die Messungen gemacht worden sind, beschrieben und deren wichtigste Daten angegeben. Dann wird die Messeinrichtung erklärt und eine Auslese aus den aufgenommenen Oszillogrammen reproduziert und erläutert. Aus den gemachten Beobachtungen werden Schlüsse gezogen auf zweckmässigen Schutz von Mittel- und Niederspannungsleitungsnetzen gegen Ueberspannungen, welche von Gewittern herühren.

Der vorliegende Bericht²⁾ enthält die Resultate der ersten, im Laufe des Sommers 1928 mittels eines Kathodenstrahl-Oszillographen an zwei Mittelspannungsnetzen durchgeföhrten Messungen von durch Gewitter verursachten Spannungen (im folgenden kurz „Gewitterspannungen“ genannt). Die Beschreibung des zu diesem Zwecke umgebauten Oszillographen ist im Bulletin S.E.V. 1928, No. 9 und 21 und in der Schweizerischen Bauzeitung 1929, Bd. 93, No. 8 enthalten. Den Direktionen der beiden Betriebe, welche ihre Netze und die nötigen Räume für die Versuche zur Verfügung stellten, sei auch hier der wärmste Dank ausgesprochen. Auch dem Depot-Chef und dem übrigen Personal der Forchbahn gebührt volle Anerkennung für die Mithilfe bei den Messungen, wie auch bei der Durchführung von abklärenden Netzversuchen.

I. Die Versuchsanordnung.

Die Lage der beiden Leitungsnetze, an welchen die Messungen vorgenommen wurden, ist in den Fig. 1 und 2 dargestellt. Es betrifft dies *erstens* die 1200 V-

¹⁾ Die Zusammensetzung des Ausschusses ist folgende: Präsident: Prof. Dr. B. Bauer-Zürich; Mitglieder: Prof. Dr. W. Kummer-Zürich, Dr. K. Sulzberger-Zürich, F. Tobler-Zürich, H. F. Zanger-Zürich; Mitarbeiter: Dr. H. Schait-Zürich.

²⁾ Erster Bericht siehe Bulletin S.E.V. 1927, No. 11, S. 652.

621.374.7:621.319.8(0068)
Dans ce rapport on trouvera d'abord la description et les caractéristiques principales des deux lignes — ligne de contact du chemin de fer Zurich-Forch et une partie du réseau à 8 kV des E.K.Z. — sur lesquelles ont porté les mesures. L'auteur explique ensuite le fonctionnement des appareils et reproduit, en les commentant, un choix des oscillogrammes relevés. Il tire des observations faites des conclusions relatives à la protection la mieux appropriée des réseaux aériens à basse et à moyenne tension contre les surtensions en temps d'orage.

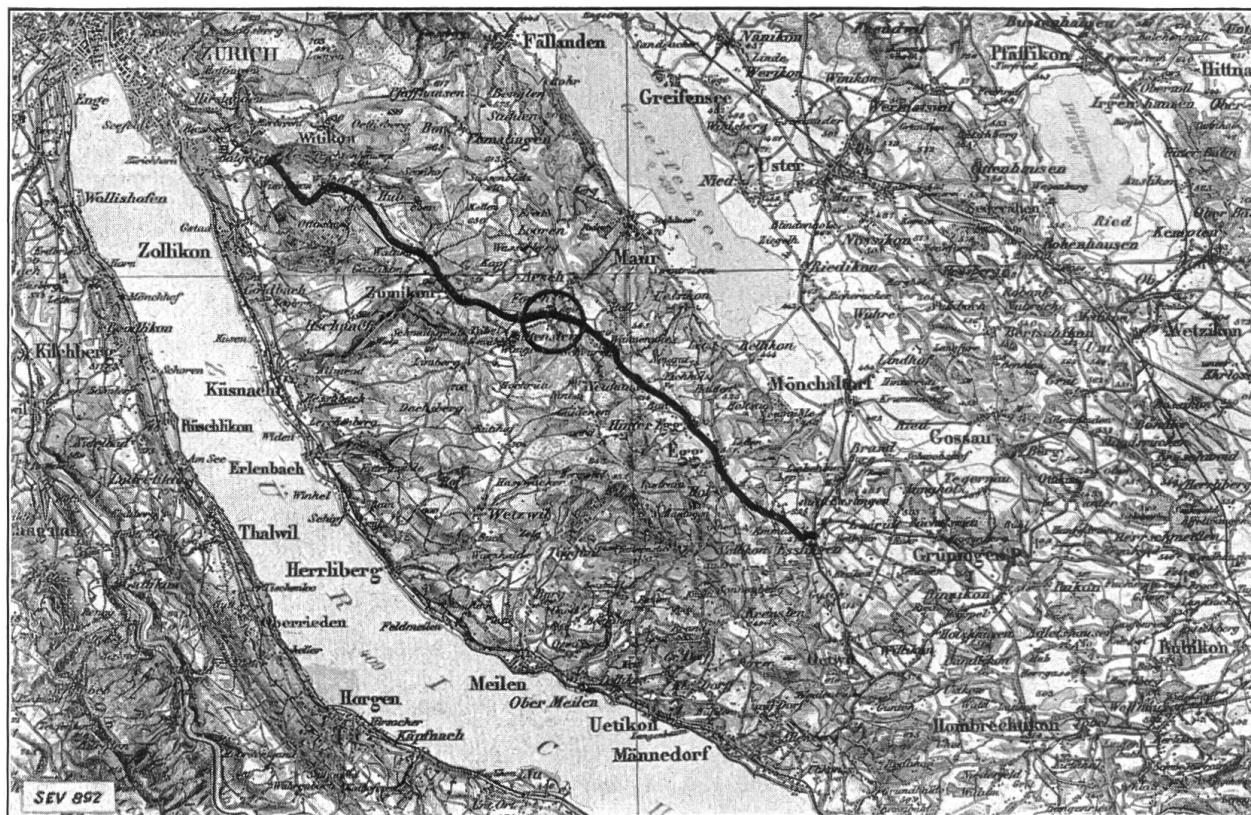


Fig. 1.

Fahrleitung der Forchbahn: Zürich/Rehalp-Forch (Mittelpunkt des Kreises)-Esslingen. (Reproduziert mit Bewilligung der Eidg. Landestopographie vom 8. Febr. 1929.)

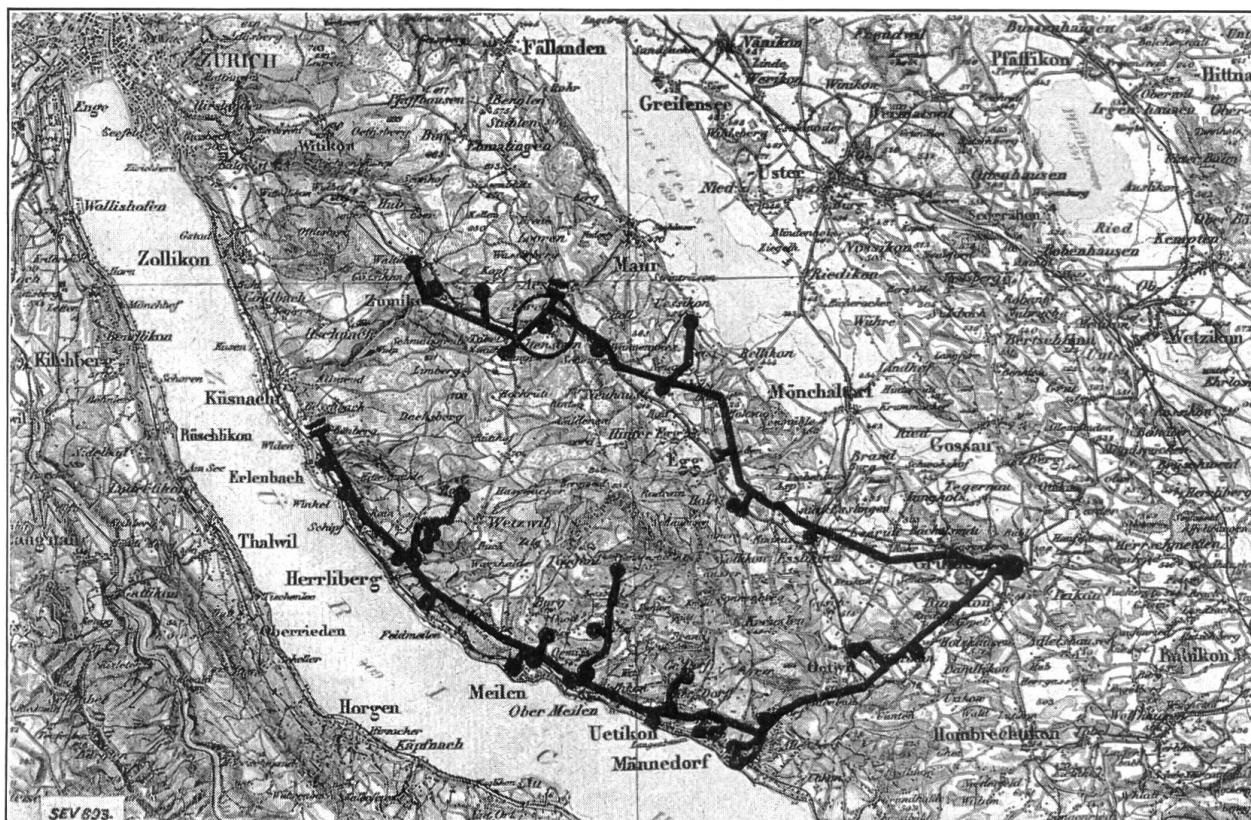


Fig. 2.

Abschnitt vom Netz der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (E. K. Z.). Im Mittelpunkt des Kreises ist die Forch. (Reproduziert mit Bewilligung der Eidg. Landestopographie vom 8. Febr. 1929.)

Gleichstrom-Fahrleitung der Forchbahn (F.B.), die von Zürich/Rehalp über das Hügelgelände des rechtsseitigen Zürichseeufers mit dem Höhepunkt Forch nach dem Zürcher Oberland zur Endstation Esslingen führt. Das Forchgebiet gilt nach der Statistik als gewitterreiche Gegend³⁾, ausserdem bot die exponierte Höhenlage besonderes Interesse. Einzelheiten können dem Kärtchen entnommen werden. Hoher Grundwasserspiegel kommt in Leitungsnähe wesentlich nur an einer Stelle vor, nämlich in der Mulde südwestlich des Stationsgebäudes Forch, im sogenannten Riet, in kleinerem Mass ferner in einem schmalen Strich längs der Bahn zwischen den Orten Zollikerberg und Waltikon.

Die Fahrleitungslängen betragen:

$$\begin{aligned} \text{Strecke Forch - Rehalp} &= 6,5 \text{ km,} \\ \text{Strecke Forch - Esslingen} &= 6,8 \text{ km.} \end{aligned}$$

Das *zweite Netz* gehört den Elektrizitätswerken des Kantons Zürich (E.K.Z.); es bildet jenen Teil des 8 kV-Drehstrom-Verteilnetzes, der hauptsächlich die Ortschaften des beschriebenen Hügelzuges, sowie einen Teil des rechten Zürichseeufers und die Forchbahn mit Energie versorgt, und zwar von der Transformatorenstation Grüningen aus, welche in einer Ebene mit hohem Grundwasserspiegel gelegen ist. Die Leitung ist naturgemäß stark verzweigt und enthält viele kleine Transfor-

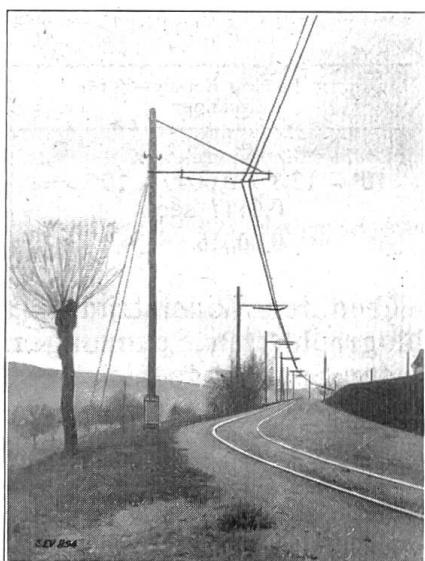


Fig. 3.
Fahrleitung der Forchbahn.

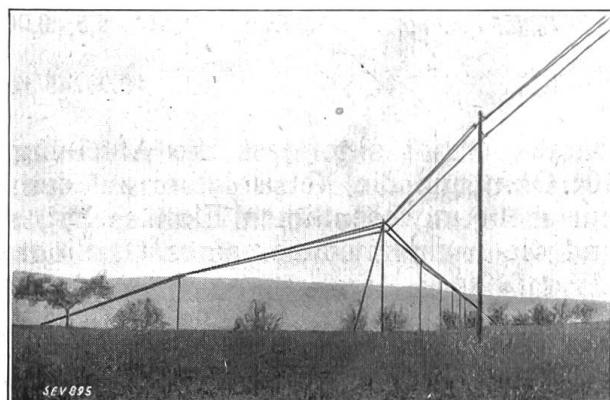


Fig. 4.
Leitungsanordnung im Versuchsnetz der E. K. Z.

torenstationen für Verbraucherspannung. Die Gesamtlänge des metallisch zusammengehängten 8 kV-Netzes beträgt ca. 45 km.

Die *Querprofile* der beiden Leitungen sind aus den Fig. 3 und 4 ersichtlich. Die *Fahrleitung der Forchbahn* (Fig. 3) besteht aus zwei parallelen Kupferprofildrähten von je 11 mm Durchmesser, in 6,5 m mittlerer Höhe über dem Boden. Die Bahn ist einspurig. Der Abstand beider Drähte auf freier Strecke beträgt 10 cm, auf den Stationen mehr, entsprechend der Distanz der Ausweichgeleise. Die Aufhängung des Fahrdrähtes an die Querdrähte geschieht mit Hilfe der gewöhnlichen Hartgummiisolierglocken, wie sie bei Trambahnen verwendet werden. Die Querdrähte sind mit Porzellanrillenisolatoren entweder an den hölzernen Masten und deren Auslegern oder an passenden Häusern abgespannt. Das Holzgestänge wird zugleich für das Bahntelephon benutzt, auf kurze Strecken auch für die Strassenbeleuchtung.

Fig. 4 zeigt die *Leitungsanordnung des 8 kV-Netzes* der E.K.Z. Die Leitung liegt durchschnittlich ca. 9 m über Boden auf Holzmasten. Phase „rot“ ist zu oberst, dann folgt „grün“ und unten „blau“. Der Drahtdurchmesser der Hauptstränge be-

³⁾ J. M. Maurer, *Landwirtschaftl. Jahrbuch der Schweiz* 1911, S. 194.

trägt 5,5, 7 und 8 mm, derjenige der Abzweige 4 mm, der Drahtabstand 700 resp. 800 mm. Von den Leitungskonstanten sollen an dieser Stelle nur der Isolationswiderstand und die entsprechende Ableitungszeitkonstante der Fahrleitung erwähnt werden. Der *Isolationswiderstand* der Fahrleitung gegen Erde (Ableitung) wurde bei 800 V Gleichspannung gemessen. Es ergaben sich bei ganz trockener und ganz nasser Leitung folgende Werte (Leitung allein):

	Trockene Leitung	Nasse Leitung
Leitung Forch-Rehalp	10 Megohm	75 000 Ohm
Leitung Forch-Esslingen	ca. 5 Megohm	90 000 Ohm

Um von diesen starken Schwankungen infolge der Witterung unabhängig zu sein, wurde bei den Messungen die betreffende Leitung über einen induktionsfreien Metallwiderstand von 100 000 Ohm geerdet, welcher zugleich einen Teil des Spannungsteilers bildete (siehe Fig. 7).

Die Zeitkonstante $T = RC$ der über diesen Metallwiderstand geerdeten Fahrleitung beträgt demnach mit $C = 0,0088 \mu F/km$:

	Leitung Forch-Rehalp oder Forch-Esslingen	Ganze Leitung Rehalp-Ford-Esslingen
$T_{trocken}$	$10^5 \cdot 6,5 \cdot 0,0088^{-6} = 0,0057$ sec	$10^5 \cdot 13,3 \cdot 0,0099 \cdot 10^{-6} = 0,0117$ sec
T_{nass}	0,00245 resp. 0,0027 sec	0,00516 sec

Daraus ergibt sich, dass die Ableitung von Ladungen über den Widerstand von 10^5 Ohm und die Netzisolation auf den Verlauf der oszillographierten Spannungen nur mehr unwesentlichen Einfluss hat, sofern die Dauer der Spannungsentstehung und die Aufnahmedauer eines Oszillogrammes $1/1000$ sec nicht erreicht.

Die *Ueberschlagsspannungen* der beiden Leitungen betragen:

für die Fahrleitung: an ihrer schwächsten Stelle (Station Forch) ca. 6500 V;
auf der Leitung (Blitzhörner-Einstellung) 10 000 V.

für das 8 kV-Drehstromnetz ca. 35 kV_{eff}, wenn von event. vorhandenen schwachen Stellen abgesehen wird.

Die Hörner des letztern Netzes in der Umformerstation Forch waren während des Sommers ausgeschaltet. Im übrigen Netz waren jedoch solche an vielen Stellen eingeschaltet; ihre Einstellung entsprach einer Ueberschlagsspannung von ca. 15 kV.

Sämtliche Messungen wurden im Stationsgebäude Forch der Forchbahn ausgeführt, d. h. am höchsten Punkt der Leitungen. Fig. 5 zeigt das Gebäude von der Seite der 8 kV-Drehstromzuleitung aus (Südwestecke des Hauses). Fig. 6 stellt die Zuführung der 1200 V-Fahrleitungen (Richtung Zürich und Richtung Esslingen) zur Station (Nordseite des Hauses) dar. Es sind darin auf dem Dach des Wagendepots zwei Wasserstrahlableiter sichtbar, welche sich nur während Gewittern in Betrieb befinden. Durch das Entgegenkommen der Betriebsleitung der Forchbahn wurde es möglich, mit Hilfe zweier Trenner diese Ableiter wahlweise anzuschliessen, so dass zu Zeiten, wo auf einer der beiden Teilstrecken keine Wagen fuhren, diese Strecke gänzlich ausser Spannung gesetzt und gegen Erde isoliert werden konnte. Die abgetrennte, spannungslose Fahrleitung bildete dann eine Antenne, auf der jede andere Art der Spannungsentstehung als die durch Gewitter verursachte, ausgeschlossen war. Die Gegenüberstellung dieser Messungen mit denjenigen während des Betriebes (mit 1200 V mittlerer Fahrdräht-Spannung und Wasserstrahlableiter) gestattet dann einen wertvollen Vergleich.

Fig. 7 gibt ein Schema der Anlage in der Station Forch und des *Anschlusses der Messeinrichtung*. Letzterer geschah an beiden Netzen mittels kombinierter

Widerstand- und Kondensatorspannungsteilung. Als Widerstände kamen zweilagige bifilare Manganinwiderstände zur Verwendung, die in den Werkstätten des S.E.V. hergestellt wurden, als Kondensatoren solche aus Hartpapier der Firma Micalfil in Altstetten. Bei raschen Spannungsänderungen besorgt die Kapazität durch die entstehenden Verschiebungsströme die Spannungsteilung; bei langsamen Änderungen übernehmen die Widerstände diese Aufgabe. Durch passende Wahl der Grösse der nicht bezifferten Kondensatoren in Fig. 7 wurde das gleiche

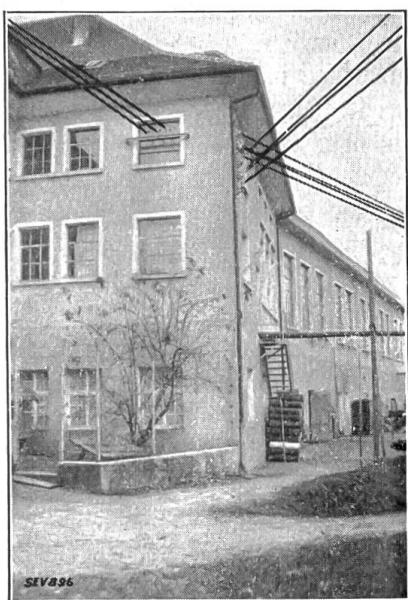


Fig. 5.

Einführung der 8 kV-Drehstromleitung in das Versuchsgebäude (Station Forch).

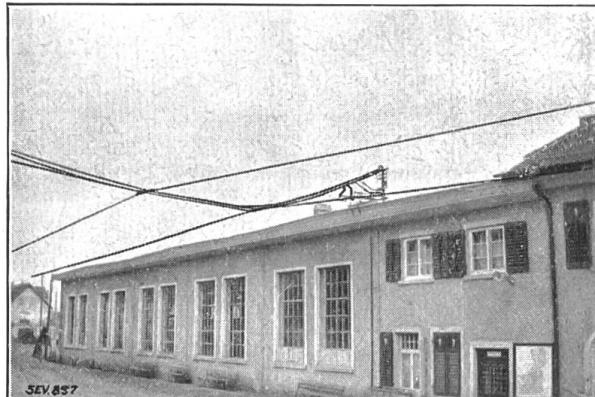


Fig. 6.

Zuführung der 1200 V-Fahrleitung zum Versuchsgebäude (Station Forch).

Spannungsteilverhältnis für Widerstand und Kapazität eingestellt. Fig. 8 zeigt den *Spannungsteiler* in der 8 kV-Drehstromanlage, der für eine Spannungsübersetzung von 1:20 benutzt wurde. Er war zwischen Erde und Phase „rot“ angeschlossen, welche auf der Freileitung überall zu oberst liegt. Auf dem rechts danebenstehenden Kondensator ist ein dritter Belag sichtbar, der die Anstosskapazität zum Kipprelais bildet⁴⁾, während die zwei andern Beläge zur Spannungsteilung benutzt sind. Die gesamte Kapazität von ca. 150 cm vergrössert nur unwesentlich die Anlagekapazität, so dass eine wesentliche Verzerrung durch die Messeinrichtung nicht zu erwarten ist.

Ganz analog ist die Spannungsteilung für den Anschluss der 1200 V-Gleichstromfahrleitung ausgeführt. Der Zweck des Teilers bestand hier in der Fernhaltung der grossen Leistung vom Oszillographen bei Messungen während des Bahnbetriebes und in der Herstellung einer witterungsunabhängigen Leitungserdung mit passender Ohmzahl bei Messungen an der ausser Betrieb befindlichen Leitung; bezüglich der Reduktion der Netzspannung für den Oszillographen (Uebersetzung 1:4) wäre sie nicht nötig gewesen.

Es ist noch zu bemerken, dass die Anschlüsse an beide Netze möglichst kurz gewählt wurden. Die betriebsmässigen Zuführungsleitungen (gummisiolerte Leiter ohne Metallmantel) zwischen Fahrleitung und Gleichstromsammelschiene sind je etwa 25 m lang. Die kurz vor dem Ende dieser Zuführungskabel angeschlossenen Messdrähte zum Oszillographen sind insgesamt je ca. 15 m lang. Durch Benutzung von Leitern ohne Metallmantel konnte der Wellenwiderstand dieser Verbindungen ungefähr auf der Höhe desjenigen der Fahrleitung gehalten werden, wodurch zusätzliche Reflexionen („Verschlucken“ von Wanderwellen) möglichst verhindert wurden. Sofern nur eine Fahrleitungshälfte (Richtung Zürich/Rehalp oder Esslingen) zur Messung angeschlossen war, stellte somit der Oszillograph (resp. die Spannungsteilung) ein offenes Leitungsende dar, wo die Reflexion der Welle eintrat (Forch

⁴⁾ D. Gábor, Forschungshefte der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen, Heft 1, Sept. 1927.

ist Kopfstation). Sofern beide Leitungen (nach Zürich/Rehalp und Esslingen) zur Messung angeschaltet waren, stellte die Abzweigung zum Oszillographen die Mitte der gesamten Fahrleitung dar (Forch ist Durchgangsstation). Die Abzweigung

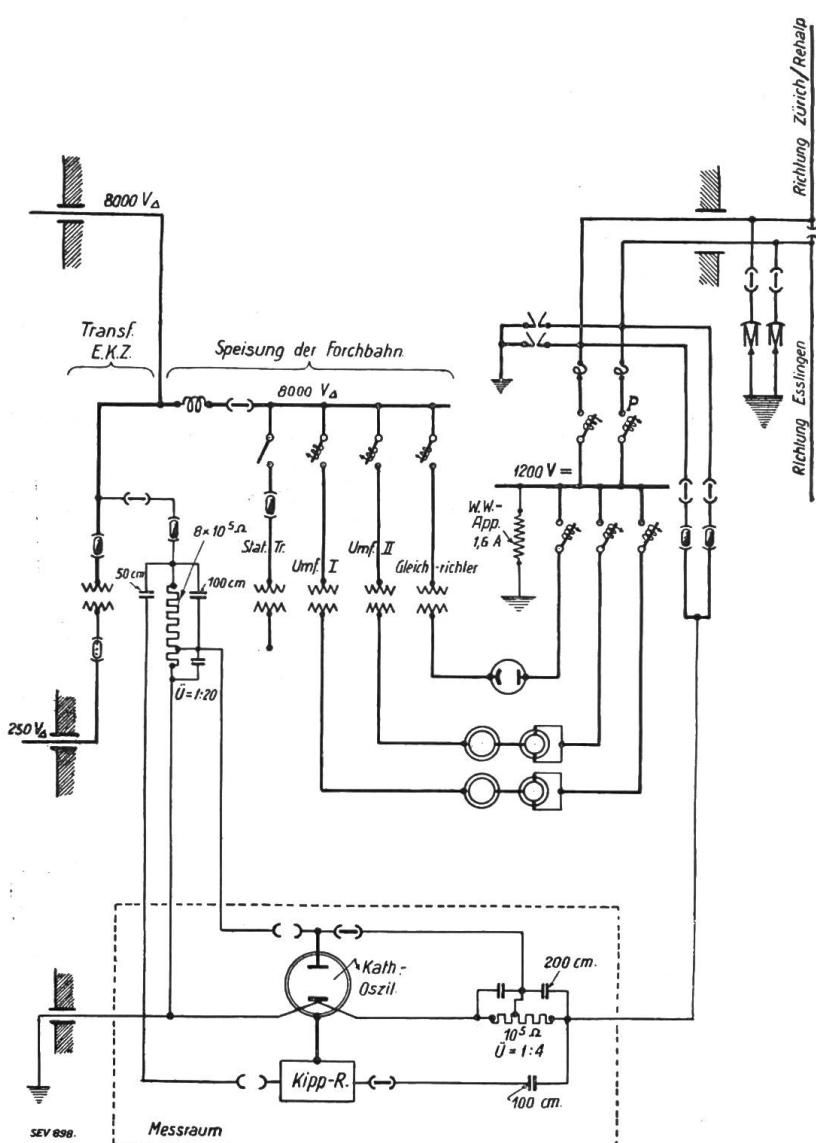


Fig. 7.
Schema der Schaltungsanlage in der Station Forch und des Anschlusses der Messeinrichtung.

einige Male wiederkehrt, wobei er allerdings die Form ändert, überzeugt man sich auch aus den beigegebenen Oszillogrammen davon, dass nichts überaus Wesentliches in dieser ersten Millionstelsekunde verloren geht. Der Verlust dieser Millionstelsekunde könnte durch Vergrösserung der Messleitungslänge zwischen Kipprelais und Oszillograph zurückgewonnen werden. Dadurch würde aber der Messfehler vergrössert.

Eine Verhinderung der Reflexion am Ende der Messkabel durch einen dem Wellenwiderstand gleichgemachten Ableitwiderstand kam nicht in Frage, da der dazu erforderliche kleine Widerstandswert einseitig eine von praktischen Verhältnissen stark abweichende Ableitung nach Erde ergeben hätte und anderseits die Höhe der zu messenden Spannung auf oszillographisch schlecht messbare Werte vermindert worden wäre. Demgegenüber ist bei der benutzten Anschlussseinrichtung die Rückwirkung auf die zu messenden Vorgänge verschwindend; eine merkliche Veränderung derselben durch die Messanordnung findet nicht statt.

hinter den Anschlussicherungen der Versuchseinrichtung zum Oszillographen hat eine Länge von ca. 10 m. Auf diesem Leitungsstück können zusätzliche Wellen entstehen, deren Frequenz aber $5 \cdot 10^6$ Per/sec übersteigt. Unter dieser Frequenzgrenze gibt der Oszillograph die Spannung in Leitungsmitte richtig wieder, und zwar mit und ohne Spannungsteiler. Frequenzen bis zur Grössenordnung von einer Million Per/sec dürfen also einwandfrei den Oszillogrammen entnommen werden. Die gesamte Entfernung des Oszillographen vom Anschluss des 8 kV-Netzes ist noch kleiner als beim 1200 V-Netz. Der Spannungsteiler steht senkrecht unter der Freileitungseinführung; seine Entfernung vom Oszillographen beträgt knapp 10 m.

In den Oszillogrammen fehlt infolge der Auslösezeit des Kipprelais durchwegs die erste Millionstelsekunde der Vorgänge. Diese Zeitstrecke wird in den Oszillogrammen Fig. 9 bis 24 je nach Maßstab durch eine Länge in der Grössenordnung von $1/20$ bis $1/2$ mm der Zeittaxe dargestellt. Da der Vorgang auf der Leitung infolge der Reflexion an deren Enden stets

Als Erdung für die Versuchseinrichtung wurde eine separate Erdplatte ausserhalb des Gebäudes benutzt; an dieser Erdplatte waren früher die Hörnerableiter des 8 kV-Netzes angeschlossen. Diese wurden während des Sommers abgetrennt, um keine unerwünschten Störungen über die Erdung befürchten zu müssen. Sämtliche Apparate waren an diese eine Erdung mit möglichst kurzen Verbindungen angeschlossen. Der Oszillograph selber und seine Zubehör wurden bereits früher beschrieben⁵⁾; es ist nicht nötig, hier nochmals darauf einzugehen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die gesamte Messeinrichtung erlaubt, den Spannungsverlauf im 8 kV-Drehstromnetz, sowie an der 1200 V-Fahrleitung (Messtelle als Kopf- oder Durchgangsstation) zu registrieren, wobei Spannungsveränderungen mit Frequenzen bis über eine Million Per/sec noch zuverlässig den Oszillogrammen entnommen werden dürfen. Der Spannungsverlauf ist dabei mindestens anfangs derselbe, wie er an den Klemmen eines ungeerdeten Transfornators vorkäme, wenn dieser an Stelle der Messeinrichtung am Netz angeschlossen wäre.

II. Beobachtungen und Schlüsse bezüglich Ueberspannungsschutz⁶⁾.

Während der Gewitterperiode 1928 konnten etwa 240 Oszillogramme aufgenommen werden. Eine Anzahl davon (Fig. 9 bis 24) ist in der Tabelle I beschrieben.

Vorerst sei zur Erklärung der Oszillogramme folgendes bemerkt: Die auf den meisten Oszillogrammen ersichtliche Sinuslinie wurde lediglich zur Bestimmung des Zeitmaßstabes mittels eines Röhrengenerators für beliebige Frequenzen aufgezeichnet.

In vielen Oszillogrammen sind mehrere Gewitterspannungskurven nebeneinander ersichtlich. Diese sind so entstanden, dass entweder mehrere Blitze erfolgten, bevor das Filmband weiter bewegt wurde, oder aber es sind bei einem Gesamtblitzschlag mehrere Teilschläge (Teilblitze) rasch hintereinander erfolgt. Die Messeinrichtung arbeitet rasch genug, um mehrere solche Teilblitze automatisch festzuhalten. Die Existenz der Teilblitze ist durch die vielen Blitz-Photographien von B. Walter⁷⁾ mit bewegter Photokamera nachgewiesen. In der Tabelle I ist angegeben, wie viele Gesamtblitze auf einem Oszillogramm dargestellt sind. Ferner ist auf den Oszillogrammen angegeben, ob die Aufnahme an der im Betrieb befindlichen oder an der abgetrennten Fahrleitung erhalten wurde. Alle Oszillogramme der Spannungen im 8 kV-Netz sind an der im Betrieb befindlichen Leitung aufgenommen worden. Hier sind die Gewitterspannungen der Betriebswechselspannung zwischen Phase „rot“ und Erde überlagert, während auf den Oszillogrammen der Fahrdrähtleitung die Nulllinie der Gewitterspannung eine Gerade ist, welche bei Ausserbetriebsaufnahmen beim Spannungswert 0 und bei Inbetriebsaufnahmen bei ca.

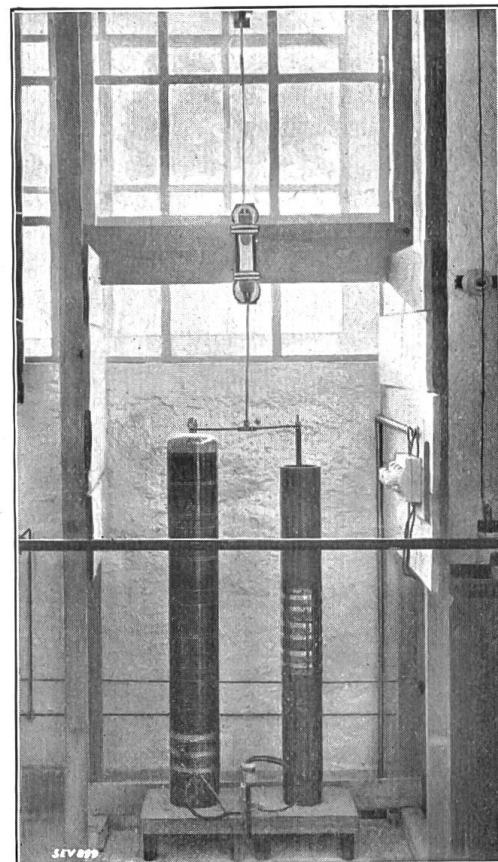


Fig. 8.
Spannungsteiler in der 8 kV-Anlage.

5) K. Berger, Bulletin S.E.V. 1928, No. 9 und 21.

6) Eine ausführliche Beschreibung der Messungen, besonders im Hinblick auf den elektrischen Vorgang beim Entstehen der von Gewittern herrührenden Ueberspannungen, wurde als Dissertation an der Eidg. Techn. Hochschule eingereicht.

7) B. Walter, Annalen der Physik 1903, Bd. 10; Meteorologische Zeitschrift 1911, Bd. 28; Physikalische Zeitschrift 1918, Bd. 19.

+ 1250 V liegt. Weiter sei erwähnt, dass sich in den Oszillogrammen die Eigenschwingung der untersuchten Leitung stets mehr oder weniger deutlich bemerkbar macht. Am deutlichsten ist die Erscheinung bei den Aufnahmen an der nicht in Betrieb befindlichen Fahrleitung. In diesem Fall wandert die Gewitterspannung mehrmals über die Fahrleitung hin und her, wobei sie allmählich ihre Energie in Wärme umsetzt und ausklingt. Die Wanderwellenfrequenz beträgt an der Messstelle Forch stets ca. 19000 Per/sec, gleichgültig, ob die halbe oder die ganze Fahrleitung zur Messung angeschaltet war (Station Forch als Kopfstation oder als Durchgangsstation in Mitte der ganzen Leitung). Diese Fahrleitungs-Eigenschwingung deckt sich daher ungefähr mit der Frequenz der Eichsinuslinie von 21400 Per/sec. Die Leitungs-Eigenschwingung wurde nachträglich auch künstlich durch Erdschlüsse an verschiedenen Stellen der Leitung hervorgerufen. Der Wert von ca. 19000 Per/sec ist dadurch vielfach bestätigt worden. Die Fig. 25 und 26 zeigen zwei Beispiele der durch künstlichen Erdschluss hervorgerufenen Leitungs-Eigenschwingung.

Die Station Forch ist der Speisepunkt der Fahrleitung; dort wird die Spannung von der Gleichrichtergruppe diktiert. Die Ergiebigkeit dieser Stromquelle, sowie die Erdkapazität der Anlage verschlucken in diesem Falle an kommende Wanderwellen fast vollständig, so dass der Wanderwellencharakter im Speisepunkt Forch bei den Aufnahmen während des Betriebes praktisch verschwindet.

Im 8 kV-Drehstromnetz kommt die Eigenschwingung der Leitung ebenfalls in einer stets wiederkehrenden Frequenz von wenigen 1000 Per/sec zum Ausdruck, entsprechend der grösseren Leitungslänge. Doch darf dieses Netz infolge der vielen Abzweigungen zu Verbraucher-Transformatoren nicht als einfache Leitung betrachtet werden. Die Front einer irgendwo entstehenden Wanderwelle wird bei jeder Abzweigung verflacht. Die Spannungskurven verlaufen deshalb in den Oszillogrammen im Gegensatz zu denjenigen der Fahrleitung recht flach und abgerundet. Dieselbe Erscheinung konnte später bei Versuchen mit künstlichen Erdschlüssen stets beobachtet werden. Es ist deshalb bei einer stark verzweigten Leitung viel schwieriger, auf die reine Gewitterspannung zu schliessen, weil der verflachende Einfluss des Netzes zwischen Gewitterherd und Meßstelle viel stärker zum Ausdruck kommt als bei einer unverzweigten Leitung.

Aus den Gewitter-Oszillogrammen, deren Gesamtzahl für den Sommer 1928 ca. 240 beträgt, ergibt sich nun folgendes:

a) Ein direkter Blitzschlag in die untersuchten Leitungen wurde während des ganzen Sommers nie beobachtet; entsprechende Zerstörungen kamen nicht vor.

b) Die Dauer der Spannungs-Entstehung während eines Teilblitzschlages beträgt in fast allen Fällen knapp $1/1000$ sec. Eine andere als die jeweilige Leitungs-Eigenfrequenz ist in den Oszillogrammen nicht ersichtlich. Nach den bisher ausgeführten Messungen ist die Art der Spannungsentstehung im ganzen als aperiodischer Stoss zu bezeichnen. Ob bei weiteren Versuchen auch Spannungen mit Frequenzen, die auf den Blitz zurückzuführen sind, nachgewiesen werden können, bleibt abzuwarten⁸⁾.

c) Die Grösse der von Blitzschlägen auf den untersuchten Leitungen erzeugten Spannungen ist in den meisten Fällen nicht mehr als wenige 1000 V. Diese Beobachtung gilt voraussichtlich nicht für sehr hoch isolierte Leitungen. Sie erreichten *an der ausser Betrieb befindlichen, über 100 000 Ohm geerdeten Fahrleitung* in 4 beobachteten Fällen den Ueberschlagswert der Anlage von ca. 6500 V. Ein solcher Fall ist in Fig. 20 dargestellt. *An der in Betrieb befindlichen Fahrleitung* wurden Gesamt-Spannungswerte gegen Erde von 3000 V (Fig. 11) und 2000 V (Fig. 24) nur unwesentlich überschritten. Von diesen beiden Oszillogrammen ist jedoch nur das Oszillogramm in Fig. 24 als unmittelbare Gewitterüberspannung anzusehen,

⁸⁾ Ueber „Blitzfrequenzen“ siehe z. B. R. Rüdenberg, Elektrische Schaltvorgänge, S. 53, Auflage 1926. Die amerikanische Bezeichnung „Blitzfrequenz“ für die Frequenz der Sinuslinie mit gleicher max. Steilheit wie der steilste Teil der Blitzspannungskurve hat viel Verwirrung angerichtet; die Bezeichnung „Frequenz“ sollte für nicht periodische Vorgänge nicht angewendet werden.

während beim Oszillogramm in Fig. 11 die Erscheinung wesentlich durch den zu jener Zeit schwach belasteten Gleichrichter beeinflusst wurde, wie Versuche zeigten. Wir können auf diese besondere Erscheinung hier nicht eingehen. An der im Betrieb befindlichen Phase „rot“ des 8 kV Drehstromnetzes wurden als grösste Ge- witterspannungen 8 kV_{eff}, ca. 13 kV_{eff} und ca. 15 kV_{eff} festgestellt. Diese Spannungen erscheinen dem momentanen Wert der normalen Spannung gegen Erde überlagert. Es ist wohl möglich, dass der Spannungsanstieg im Oszillogramm der

Tabelle I.

Oszillo-gramm	Fig.	No.	Datum der Aufnahme	gemessen an Leitung	Leitung war	Zustand der Leitung	Oszillograph ist ausgelöst durch	Anzahl Auslös resp. Zahl der aufgetreft. Teilblitze	Lage des Blitzes		Witterung
									Richtung	Distanz von Forch	
9	1/3	15. VII. 20 ⁰⁵	8 kV	in Betrieb	trocken	1 Blitzschlag	2	SSW	3,3 km		Heiss u. trocken. Erstes, sehr ausgedehntes Sommergewitter. Wenige Regentropfen.
10	1/4	15. VII. 20 ⁰⁷	8 kV	in Betrieb	trocken	1 Blitzschlag	3	SSW	2,3 km		
11	4/7	12. VIII. 19 ⁴²	Rehalp-Esslingen	in Betrieb m. W'strahlerder	überwiegend trocken	2 Blitzschläge	je 1	SW	1,7 km		Ganzer Tag gewittrig, etwas Hagel, kurze Regenschauer, trocken.
12	4/26	12. VIII. 20 ⁰⁵	8 kV	in Betrieb	überwiegend trocken	1 Blitzschlag	1	SE	ca. 4 km		
13	4/48	15. VIII. 3 ⁰⁸	Forch-Essl.	auss. Betrieb	trocken	1 Blitzschlag	1	SSE	3 km		
14	4/55	15. VIII. 4 ¹⁰	Forch-Essl.	auss. Betrieb	trocken	1 Blitzschlag	3	SE	ca. 2 km		
15	4/56	15. VIII. 4 ¹¹	Forch-Essl.	auss. Betrieb	trocken	1 Blitzschlag	3	SE	ca. 1,5 km		
16	4/64	15. VIII. 4 ²²	Forch-Essl.	auss. Betrieb	trocken	1 Blitzschlag	3	SSE	ca. 1,5 km		
17	5/2	15. VIII. 16 ⁰¹	Forch-Rehalp	auss. Betrieb	überwieg. trocken	1 resp. 4 ¹⁾ Blitzschläge	vermutl. 4	W	ca. 2 km		Gewitter hoch in Wolken, einzelne kurze Regenschauer.
18	5/14	15. VIII. 16 ⁴³	Forch-Essl.	auss. Betrieb	überwieg. trocken	1 Blitzschlag	3	SE	8 km		
19	5/33	20./21. VIII. 23 ⁴⁰	Rehalp-Essl.	auss. Betrieb	überwieg. trocken	1 Blitzschlag, event. 2	max. 5	WNW	0,7 km		
20	5/35	20./21. VIII. 23 ⁴¹	Rehalp-Essl.	auss. Betrieb	überwieg. trocken	1 Blitzschlag, event. 2		WNW	1 km		Kurze, heftige Regenschauer.
21	5/38	20./21. VIII. 23 ⁴⁴	Rehalp-Essl.	auss. Betrieb	überwieg. trocken	1 Blitzschlag	max. 3	WNW	1 km		
22	7/8	26. VIII. 1 ⁰⁷	Rehalp-Essl.	auss. Betrieb	nass	1 Blitzschlag	3	W	2,7 km		Einzelne starke Regengüsse.
23	7/54	28. VIII. 5 ⁵⁸	Forch-Rehalp	auss. Betrieb	nass	1 Blitzschlag ²⁾	2	N	10-12 km		
24	7/83	28. VIII. 6 ²⁵	Rehalp-Essl.	in Betrieb	nass	1 Blitzschlag	1÷2	SW	0,3-0,6 km		Anhaltender Regen.

¹⁾ 1 Blitz gesehen, 4 Auslösungen, Blitze schlecht sichtbar.

²⁾ Starke gleichzeitige Lichtschwankung, d. h. Erd- oder Kurzschluss im 8 kV-Netz, resp. dessen Speiseleitung 45 kV. Die Einschlagstelle des Blitzes konnte genau ermittelt werden. Ihre Distanz von der Fahrleitung betrug 10 bis 12 km.

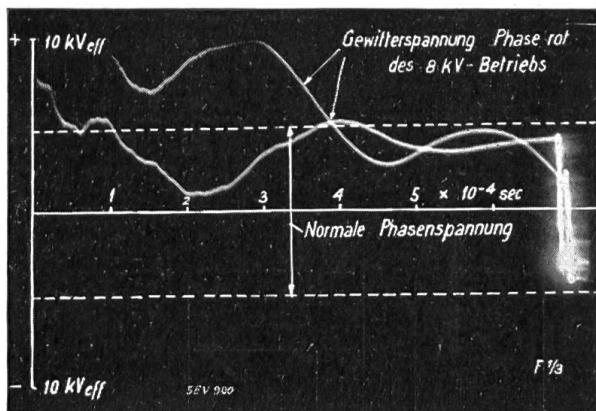


Fig. 9.

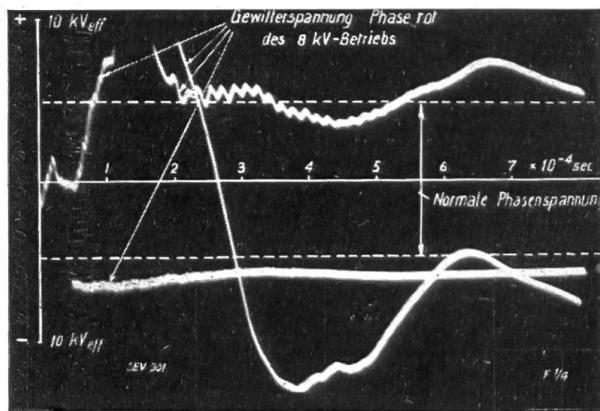


Fig. 10.

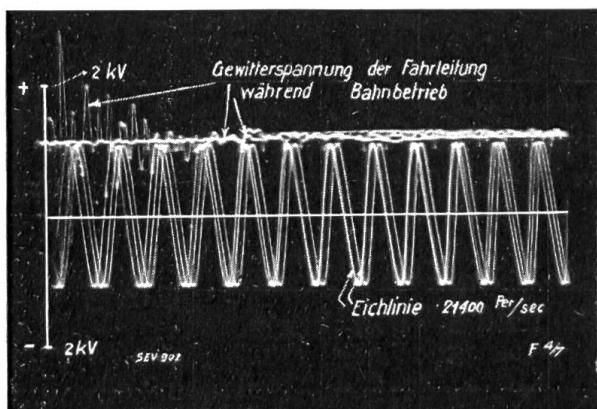


Fig. 11.

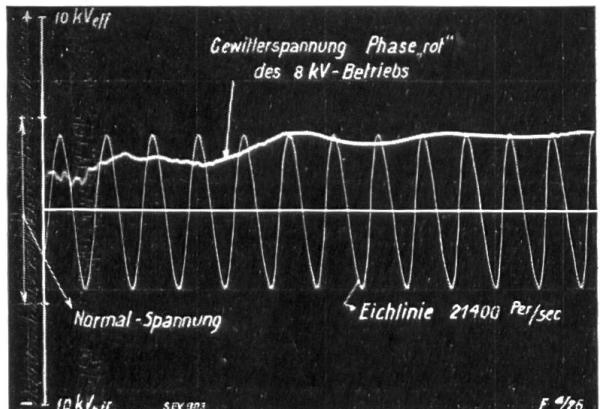


Fig. 12.

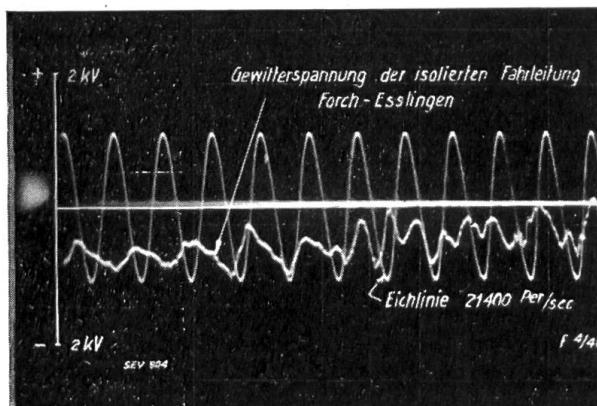


Fig. 13.

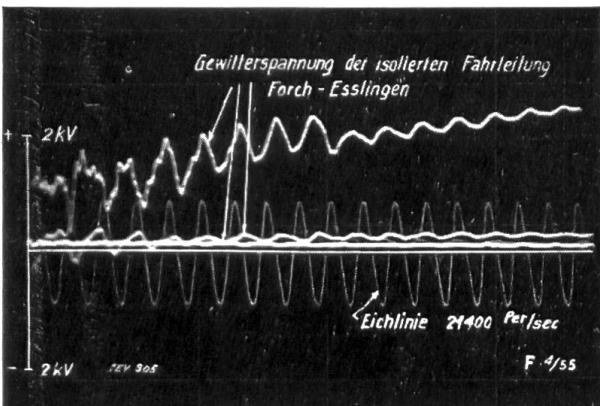


Fig. 14.

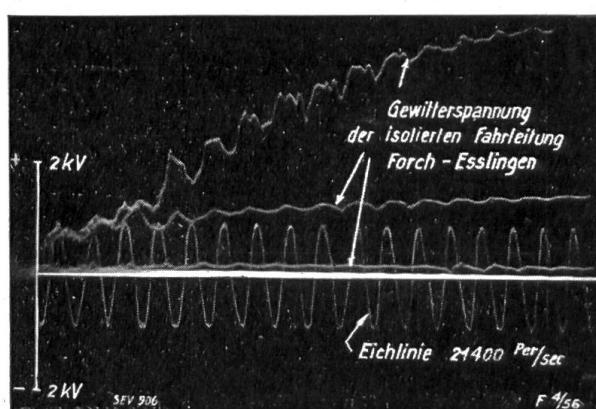


Fig. 15.

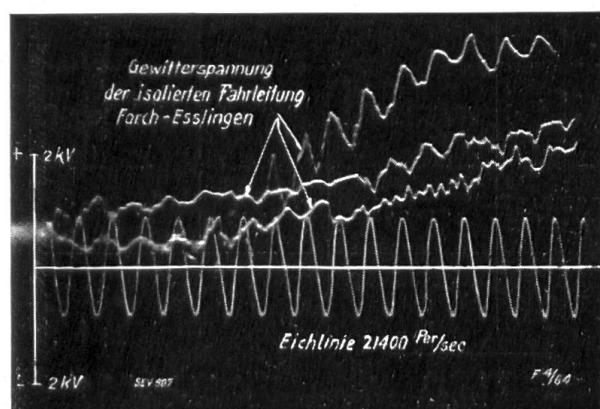


Fig. 16.

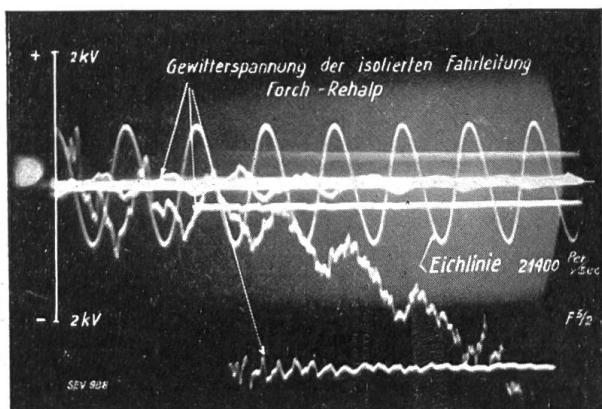


Fig. 17.

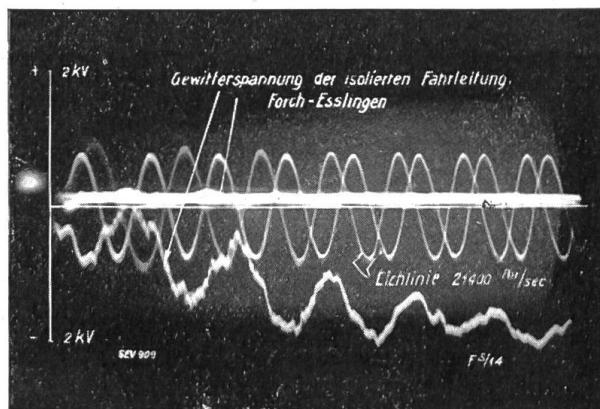


Fig. 18.

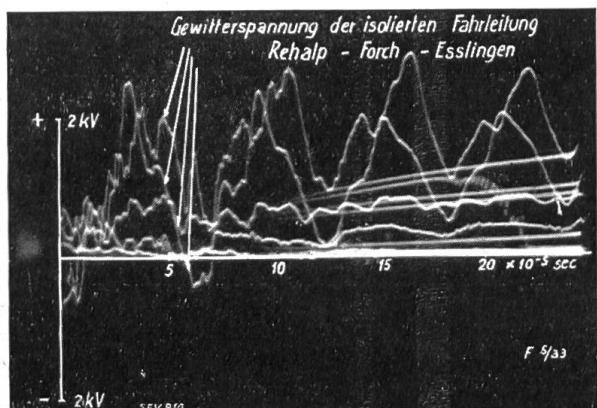


Fig. 19.

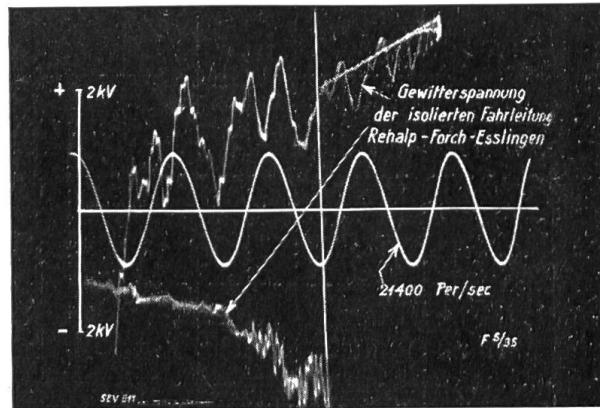


Fig. 20.

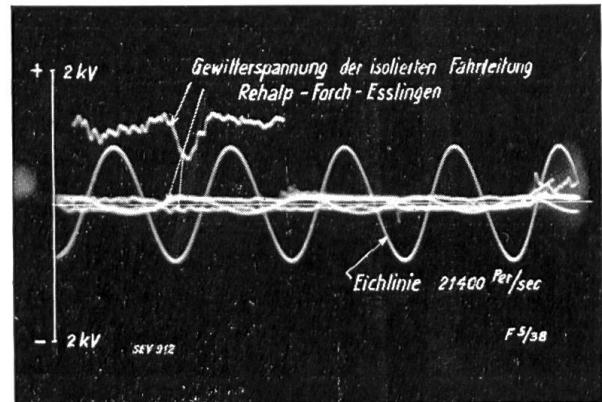


Fig. 21.

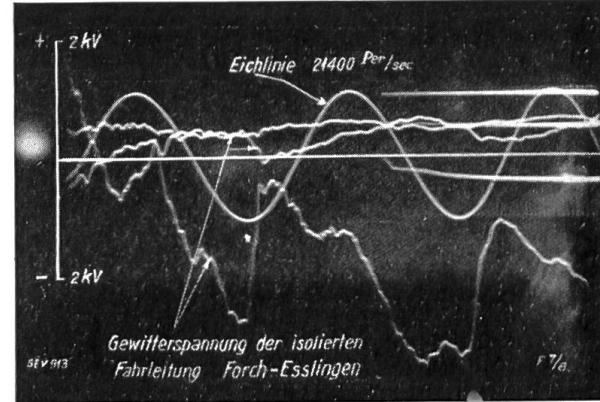


Fig. 22.

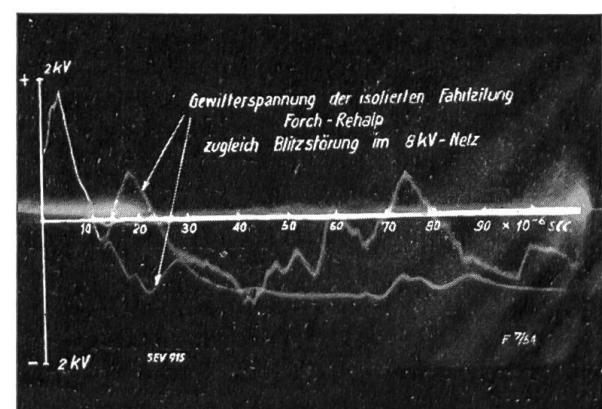


Fig. 23.

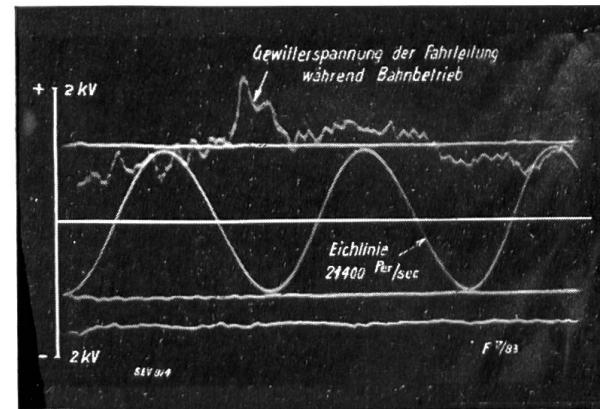


Fig. 24.

Fig. 10 durch das Ansprechen eines Hörnerableiters im 8 kV-Netz begrenzt wurde. Der Blitzschlag hätte in diesem Fall zu einem kurzzeitigen Erdschluss am Horn geführt, der infolge seiner kurzen Dauer von keiner Erdschlussanzeigeeinrichtung angezeigt wurde. Der Vergleich dieses Oszillogrammes mit andern, bei künstlichen Erdschlüssen aufgenommenen, macht diese Erklärung wahrscheinlich.

d) Die Steilheit der Gewitterspannungswellen ist, wie die Höhe der erreichten Gewitterspannungen selbst, sehr verschieden. Die Erscheinung ist nicht ganz einfach, weil der Anstieg oft nicht gleichmässig, sondern in vielen rasch aufeinanderfolgenden Stößen erfolgt. Relativ steile Wellen sind mit einer Ausnahme (Fig. 23) nur bei nahen Gewittern entstanden. Solche steile Wellen zeigen die Oszillogramme in Fig. 19 und Fig. 20, ferner in Fig. 10. Die Spannung steigt in den ersten zwei genannten Oszillogrammen an der Meßstelle innerhalb ca. 10^{-5} sec um 3000 V, d. h. mit einer Zunahme von ca. $3 \cdot 10^8$ V/sec. Aehnliche Anstiegs-Geschwindigkeiten ergeben sich aus dem Oszillogramm in Fig. 10 (11000 V in $5 \cdot 10^{-5}$ sec, d. h. $2,2 \cdot 10^8$ V/sec), ferner aus dem Oszillogramm in Fig. 23 (ca. 2000 V in $5 \cdot 10^{-6}$ sec, d. h. ca. $4 \cdot 10^8$ V/sec).

Diese Werte stimmen mit den von Heyne in Dresden auf andere Weise gemessenen gut überein⁹⁾; sie entsprechen den steilsten Wellen jener Beobachtungen auch bezüglich der Distanz des Blitzschlages von der Meßstelle. Bemerkenswert ist noch, dass bei andern, ebenfalls nahen Gewittern der Spannungsanstieg langsamer erfolgte, wie z. B. in den Oszillogrammen der Fig. 14, 15, 17, 18, wo die Anstiegs-Geschwindigkeit der Spannung ca. 10^7 V/sec beträgt. – Im Gegensatz dazu erfolgte bei Oszillogramm Fig. 23 der Blitzschlag mindestens 10 km nördlich der untersuchten Fahrleitung. Die Einschlagsstelle konnte in diesem Falle deshalb genau ermittelt werden, weil der Blitz die 45 kV-Speiseleitung des 8 kV-Betriebes direkt traf, was sich auch durch gleichzeitige Lichtschwächung und Brummen der Motoren der Versuchseinrichtung bemerkbar machte. Trotz dieser grossen Distanz erzeugte der Blitzschlag auf der vollständig abgetrennten Fahrleitung einen steilen Spannungsschlag von ca. +2000 V. Ein Zusammenhang zwischen Blitzdistanz, Spannungsgröße und Spannungssteilheit kann daher aus den Messungen kaum allgemein konstatiert werden. Es scheint eher, dass es einzelne Blitze gibt, die gegenüber andern ausserordentliche Fernwirkung besitzen. Doch ist dieses Oszillogramm (Fig. 23) vorläufig das einzige dieser Art, so dass es zu gewagt erscheint, weitere Schlüsse zu ziehen.

Von praktischem Interesse ist der Vergleich der Steilheit der Wellenfront einer Gewitterspannungswelle mit der Front einer Spannungswelle, die z. B. beim plötzlichen Erdschluss oder Kurzschluss der Leitung entsteht.

Um einen solchen Vergleich zu ermöglichen, wurden Erdschlussoszillogramme aufgenommen. Die Erdschlüsse wurden dadurch erzeugt, dass die Fahrleitung der Forchbahn in verschiedenen Distanzen von der Station Forch plötzlich mit den Schienen kurzgeschlossen wurde. Die Figuren 25 und 26 zeigen den Spannungsverlauf bei Station Forch, wenn der Gleichrichter ausgeschaltet und die Leitung über einen Widerstand von ca. 30000 Ohm mittels einer Gleichstrommaschine auf Spannung gehalten wurde. Beide Figuren zeigen typische Entladeschwingungen der Leitung. Die Steilheit der ersten Wellenfront ist bei diesen künstlichen Erdschlüssen grösser, die Steilheit der zweiten (nach einmaliger Reflexion der Wellen auf der Leitung) etwa gleicher Grösse wie jene der steilsten Gewitterspannungswellen. Die Gewitter sind also imstande, Wellen von annähernd derselben Steilheit auf Leitungen zu erzeugen, wie solche bei Erd- und Kurzschlüssen entstehen. Diese Beobachtung konnte auch bei den bereits erwähnten späteren Versuchen mit künstlichen Erdschlüssen im 8 kV-Netz bestätigt werden. Man hat es demzufolge in der Hand, diese Art der Spannungsgefährdung durch Erdschlussversuche auf ihre Bedeutung nachzuprüfen, wobei aber bei Gewittern als Sprungwellenhöhe die Ueberschlagsspannung der Leitung in Erscheinung treten kann, nicht nur die bei Erdschlüssen

⁹⁾ Heyne, Diss. Dresden, siehe L. Binder, ETZ 1928, Heft 13.

ohne äussere Ueberspannung vorkommende Spannung nach den heutigen Prüfnormalien des S. E. V.¹⁰).

Besonders zu erwähnen ist der zackige Verlauf der Spannungskurve im Oszillogramm der Fig. 20 vor dem Erreichen der Ueberschlagsspannung. Wenn auch eine regelmässige Schwingung nicht vorliegt, so könnte doch das lebhafte Auf- und Abspringen der Spannungswerte eine erhöhte Ueberschlagsgefahr, wie sie in analoger

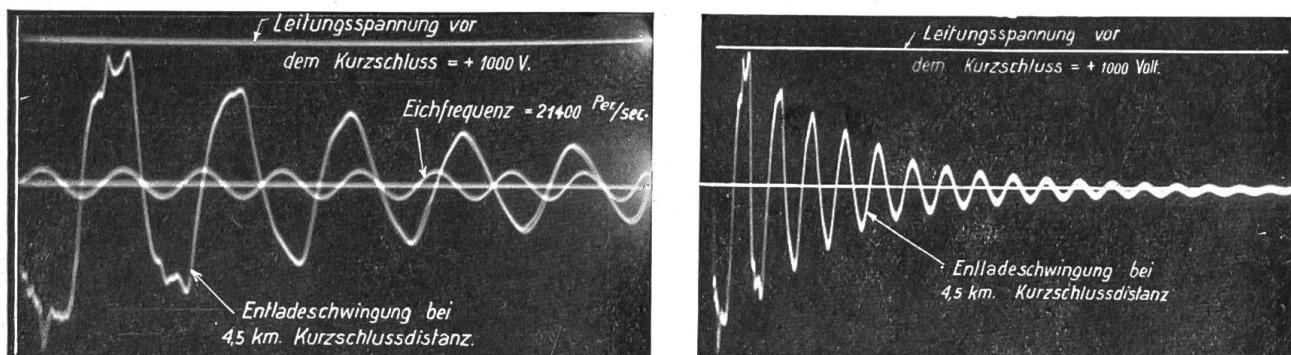


Fig. 25.

Spannungsverlauf in der Station Forch bei Erdschluss der Fahrleitung in 4,5 km Distanz. Links grosser, rechts kleiner Zeitmasstab.

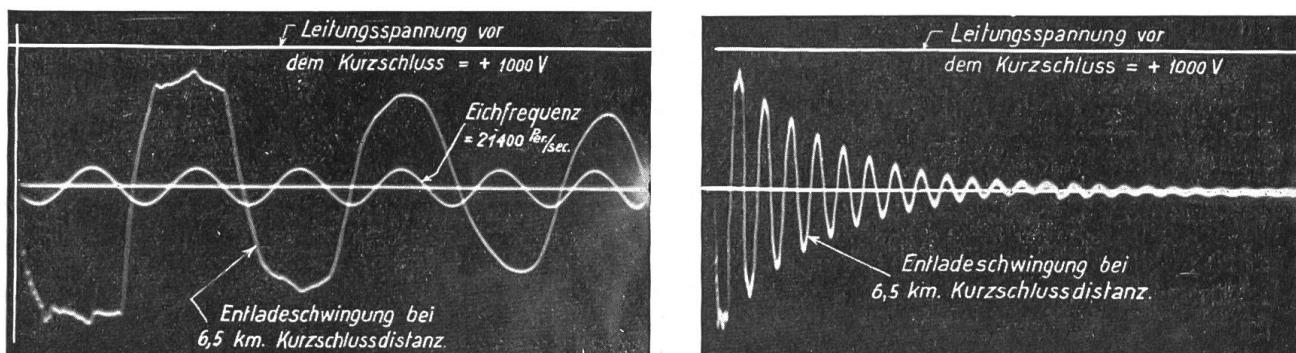


Fig. 26.

Spannungsverlauf in der Station Forch bei Erdschluss der Fahrleitung in 6,5 km Distanz. Links grosser, rechts kleiner Zeitmasstab.

Weise bei hochfrequenter Beanspruchung auftritt, in Anlagen mit sich bringen, falls die Erscheinung sich in stärkerem Masse wiederholen sollte. Der aus diesem Oszillogramm ersichtliche Ueberschlag erfolgte in wenigen Metern Distanz vom Oszillographen an einem Schalter der abgehenden Fahrleitung nach Esslingen bei Punkt P der Fig. 7. Ferner ist aus dem Oszillogramm in Fig. 21 die Schwächung der Isolation infolge des kurz vorher erfolgten Ueberschlags (Fig. 20) zu ersehen: Die Ueberschlagsspannung der Anlage wurde infolge eines Kriechweges von 6500 auf ca. 1300 V heruntergesetzt.

Die Gefahr der Gewitter für elektrische Anlagen kann erstens in der Höhe der gegen Erde erzeugten Spannungen bestehen und zweitens in der Raschheit ihres Auftretens, oder mit andern Worten, in einer örtlichen Ueberspannung unter der Gewitterwolke und einer damit verbundenen steilen Wellenfront beim Abfliessen dieser örtlichen Spannung über die Leitung.

1. *Die Grösse der in einem grossen Netz auftretenden Gewitterüberspannung* ist viel kleiner, als sie sich bei oberflächlicher Betrachtung aus den heute bereits vorliegenden zahlreichen Antennen-Messungen ergibt. Diese haben bekanntlich gezeigt, dass während Gewittern elektrische Felder von 100, ja sogar bis 300 kV pro m Höhe über dem Boden vorkommen. Die Versuche am Monte Generoso¹¹⁾

¹⁰⁾ Siehe Bulletin S. E. V. 1923, No. 8, Seite 461.

¹¹⁾ Brasch, Lange u. Urban, Forschungen und Fortschritte, Febr. 1928.

bilden wohl die schönste Bestätigung früherer, in kleinerem Umfang durchgeföhrter Antennenmessungen¹²⁾. Würden solche Spannungen auf elektrischen Leitungen auftreten, so wäre eine elektrische Energieübertragung während Gewittern wohl direkt ausgeschlossen. Die Ursache, warum bei den hochisolierten Antennen solche Spannungen auftreten, bei elektrischen Freileitungen dagegen nicht, liegt in der verschieden starken Isolation (Ableitung) gegen Erde. Wie die Messungen am Monte Generoso gezeigt haben, entstanden dort die riesigen Spannungen von einigen Millionen Volt nicht im Moment von Blitzschlägen, sondern in ziemlich regelmässigem Zeitabstand von ca. 1 sec. Es handelt sich dort um allmähliche, relativ langsame Aufladungen der Antennen aus der Atmosphäre (mit ca. $2 \cdot 10^6$ V/sec mittlerer Spannungszunahme bei den erwähnten Versuchen), wobei die Antenne die Spannung ihrer Umgebung anzunehmen sucht, bis dadurch ihre Spannung gegen den Erdboden den an der Funkenstrecke eingestellten Begrenzungswert erreicht und der Ausgleich gegen Erde durch den Ueberschlag erfolgt.

Solche Aufladungen sind nur bei entsprechend hoher Isolation möglich oder, genauer gesagt, bei genügend grosser Zeitkonstante aus Isolation und Kapazität der Antenne gegen Erde. Bei schwächerer Isolation (kleinerer Zeitkonstante) können die auf der Antenne sich ansammelnden Ladungen schon im Verlauf ihrer Entstehung (d. h. kurz nach ihrer Ankunft aus der geladenen umgebenden Atmosphäre) nach der Erde abfliessen, womit die Entstehung der hohen Spannung gegen Erde verhindert wird. Bei technischen elektrischen Leitungen handelt es sich nun gerade um diesen letztern Fall relativ schlechter Isolation (starker Ableitung nach Erde).

Nach Matthias¹³⁾ betragen die massgebenden Zeitkonstanten praktischer Hochspannungsanlagen $1/10\,000$ bis $1/100$ sec; bei der untersuchten Fahrleitung mit Messwiderstand war sie ebenfalls einige Tausendstelsekunden. Erfolgen wesentliche Spannungsänderungen in der die Leitung umgebenden Atmosphäre langsamer als in diesem Tempo, so sind sie für die Leitung gefahrlos, weil diese die aus der Atmosphäre ihr zuströmenden Ladungen rechtzeitig über die Isolation nach Erde abführen kann. Dies gilt insbesondere dann, wenn die gesamte zusammenhängende Leitung im Vergleich zur Ausdehnung des von Raumladungen (Gewitterwolken) umgebenen Leitungsabschnittes gross ist. Im ungünstigsten Fall, wenn die Leitung nicht länger als eine über ihr befindliche Gewitterwolke ist, können auf diese Weise auf der Leitung rechnungsgemäss nur Spannungen von einigen hundert Volt gegen Erde entstehen, wenn die angenommene Leitung eine Zeitkonstante gegen Erde von $1/10\,000$ sec hat (Niederspannungsleitung).

Diese langsam entstehenden Spannungen („statischen Ladungen“) haben bei einigermassen ausgedehnten in Betrieb befindlichen Netzen praktisch kaum Bedeutung, wie die Versuche durchaus bestätigt haben. Die Feststellung gilt für Netze aller Spannungen, weil für Hochspannungsnetze wohl die Isolations-Zeitkonstante grösser ist und damit auch der Absolutwert der möglichen statischen Spannung wächst; prozentual bleiben aber diese Spannungen ungefährlich. *Wie die Versuche gezeigt haben, sind wesentliche Spannungen auf den untersuchten Leitungen ausschliesslich im Moment von Blitzschlägen entstanden.* Hier liegt der durch die Höhe der Isolation gegen Erde bedingte prinzipielle Unterschied zwischen Antennen und elektrischen Uebertragungsleitungen.

2. Der im Moment von Blitzschlägen entstehenden *Spannungsbeanspruchung* kommt hingegen praktische Bedeutung durchaus zu, wie die Versuche zeigen.

a) Es ist zwar nicht möglich, ein abschliessendes, für alle Anlagen beliebiger Spannung gültiges Urteil aus den Messungen während des einen Sommers zu geben. Dazu sind noch mehr Messungen an verschiedenen Orten und in verschiedenen Netzen notwendig. Doch lassen sich heute schon einige Schlüsse ziehen, die im folgenden angeführt sind und besonders für Netze niedriger Spannung bis zu einigen kV Bedeutung haben.

¹²⁾ Norinder, El. World 1924.

¹³⁾ Matthias, E T Z 1927.

b) Abgesehen von den vier beobachteten Blitzschlägen im Sommer 1928, welche die 1200 V-Anlage zum Ueberschlag brachten und bei welchen wir deshalb die Höhe der Gewitterspannung, die ohne Ueberschlag erreicht worden wäre, nicht kennen, sind gewöhnlich nur Spannungen von wenigen tausend Volt entstanden (Ueberschlagsspannung ca. 6500 V). Die genannten vier Ueberschläge kamen alle an der ausser Betrieb befindlichen Leitung vor; einer derselben ist aus dem Oszillogramm in Fig. 20 ersichtlich. — Die Oszillogramme zeigen, dass diese relativ kleinen Spannungen innerhalb 10^{-5} bis 10^{-3} sec entstanden sind, so dass die unter dem Gewitterherd freiwerdende Ladung genügend Zeit hatte, während ihrer Entstehung wenigstens teilweise auf beide Seiten der Leitung abzufließen und dadurch die Entstehung hoher *örtlich* begrenzter Spannungsdifferenzen unter der Gewitterwolke zu verhindern. *Gewitterspannungen solcher Art können daher, falls sie überhaupt als gefährlich erachtet werden, durch „Verschlucken“ in Kapazitäten oder durch Ableitung nach Erde an irgend einer Netzstelle unschädlich gemacht werden.*

Die vom Gewitter in diesem Fall auf der Fahrleitung innerhalb der angegebenen Zeit befreite Ladung betrug höchstens ungefähr:

$$Q = V C = 10^4 \cdot 10^{-7} = 10^{-3} \text{ Coulomb},$$

die darin enthaltene Energie:

$$A = \frac{1}{2} V^2 C = \frac{1}{2} \cdot 10^8 \cdot 10^{-7} = 5 \text{ Joule (5 Watt sec)},$$

der mittlere Gewitterladestrom:

$$J = \frac{V C}{T} = \frac{10^{-3}}{10^{-4} \div 10^{-3}} = 1 \div 10 \text{ A.}$$

Die Verminderung der entstandenen Gewitterspannung der isolierten Leitung durch „Verschlucken“ in der Anlagekapazität ist deutlich in den Oszillogrammen ersichtlich, die am 8 kV-Drehstromnetz aufgenommen wurden. Die Erdkapazität dieses Netzes ist ca. dreimal grösser als jene der Fahrleitung; es treten daher meistens kleinere Gewitterspannungsstösse auf, die durch die genannten Gewitterladungen entstanden sind. Höhere Gewitterspannung, nämlich ca. 15 kV zeigt das Oszillogramm der Fig. 10.

Wollte man die gemessene atmosphärische Spannung eines der Fahrleitungsanlage ähnlichen Netzes durch künstliche Kondensatoren in den Stationen verkleinern, so müsste die Grösse dieser Kondensatoren in der Grössenordnung der Erdkapazität des untersuchten Fahrleitungs-Netzes selber liegen, also mindestens 0,1 Mikrofarad betragen. Will man die gemessenen Ladungen nach Erde ableiten, so genügt dazu ein Ableiter, der ohne störende Spannungserhöhung des Netzes die oben genannten Ströme in der genannten Zeit nach Erde abführt. Als Ableiter kommt in erster Linie die Netzikolation in Betracht. Ob diese zusammen mit Erdungsdrosselpulsen, Sternpunktterdungen usw. genügt, mit der Netzkapazität zusammen diese Art atmosphärischer Ladungen unschädlich zu machen, muss in jedem Falle besonders entschieden werden, wobei die obigen Zahlen bis zu weiteren Messungen an andern Leitungen vorläufige Anhaltspunkte geben.

c) Als erstes Beispiel sei die untersuchte Fahrleitungsanlage gewählt (s. Fig. 7). Die Kapazität der gesamten Anlage gegen Erde beträgt ca. $0,12 \mu F$. Der Isolationswiderstand der Fahrleitung in trockenem Zustand (ungünstigster Fall) beträgt ca. 5 Megohm. Eine wesentliche Ableitung über Isolation ist daher nicht vorhanden, weil die Zeitkonstante der trockenen, ausser Betrieb befindlichen Leitung $R C = 5 \cdot 10^6 \cdot 10^{-7} = 0,5$ sec beträgt. Neben dieser Ableitung über die Isolation ist im Betrieb auch noch eine andere möglich, nämlich diejenige über den Gleichrichter und die dazugehörigen Transformatorenwicklungen (6-Phasenwicklung – Saugdrossel-Spule – Erde). Nun spielt der Gleichrichter als elektrisches Ventil eine interessante Rolle bei den Gewittererscheinungen. Sofern er nämlich gar nicht oder nur schwach belastet ist, existiert in ihm ein nur schwacher Lichtbogen. Für positive starke Gewitteraufladungen der an die Kathode angeschlossenen Fahrleitung stellt daher, wie leicht einzusehen ist, der unbelastete Gleichrichter ein undurchlässiges

Ventil dar, d. h. ein offenes Leitungsende. Wenn die Fahrleitung unter Spannung steht, aber unbelastet ist, besteht daher für positive Ladungen keine Ableitung über den Gleichrichter, sofern deren Wellenströme die Grösse einiger Ampères überschreiten; es wirkt nur die Netzisolation ladungsabführend. In diesem Betriebszustand wird also die Gewitterladung und ihre Spannung voll zur Entstehung kommen und während der Dauer von annähernd 1 sec (Zeitkonstante der Isolation) auf der Leitung bestehen bleiben, sofern nicht vorher ein Ueberschlag und Kurzschluss erfolgt. Will man diese Spannungen in ihrer Entstehung vermindern, so ist ein ohmscher Ableiter nach Erde das einfachste Mittel dazu. Diesen Zweck übernimmt in der besprochenen Anlage ein elektr. Warmwasserspeicher (1,6 A), der aus andern Gründen in der Anlage eingebaut ist, und ferner der am Anfang erwähnte, während Gewitterzeit eingeschaltete Wasserstrahlableiter (1 bis 2 A). Wie die Oszillogramme bestätigen, verhindern diese beiden Ableiter zusammen weitgehend die Entstehung von Gewitter-Ueberspannungen. Sie verhindern vor allem durchaus die langsame Leitungsaufladung in ca. 10^{-3} sec. In der Tat soll der Betrieb seit der Einführung von Warmwasserspeicher und Wasserstrahlableitung während Gewittern wesentlich ruhiger sein als früher, was mit Rücksicht auf die geringe Ueberschlagsspannung der Anlage nicht erstaunlich ist. Das Beispiel ist auch deshalb interessant, weil hier ein zu ganz andern Zwecken vorgesehener Apparat (Warmwasserapparat) für die Verhinderung von Gewitterüberspannungen von wesentlichem Einfluss ist.

d) Kurzes Wechselspannungsnetz kleiner Spannung (Sekundärnetz). Bei einem normal isolierten Wechselstromnetz ähnlicher Grösse wie das besprochene Fahrleitungsnetz lässt die Ableitung nach Erde bei ungeerdeten Transformatorensternpunkten ebenfalls die besprochenen Gewitterspannungen voll entstehen. Falls eine Reduktion dieser Spannungen von einigen kV gewünscht wird, kommen vor allem Erdungsdrosselpulnen als Ableiter in Betracht. Eine Ueberschlagsrechnung zeigt jedoch, dass die gewöhnlich verwendeten Typen zu grosse Induktivitäten besitzen und daher zu träge sind, um genügend Ladung während ca. 10^{-4} sec nach Erde abzuführen. Hingegen genügt z. B. die Sternpunktserdung einiger kleiner Leistungstransformatoren meistens, um diese Spannungen zum Verschwinden zu bringen.

e) Die bisher genannten Gewitterspannungen können bezüglich Ueberspannungsschutz als irgend eine Zwischenform zwischen sehr raschen Spannungsstößen (steilen Wanderwellen, z. B. erzeugt durch Erd- oder Kurzschluss) und den durch die fortwährenden relativ langsam Veränderungen des atmosphärischen Feldes erzeugten Spannungen („statische Ladungen“) aufgefasst werden. Auf die Wichtigkeit der genügenden Ableitung nach Erde sei nochmals ausdrücklich hingewiesen. Doch sind Gewitterspannungen nicht durch statische Ladungen verursacht, sondern durch infolge von Blitzschlägen freiwerdende Ladungen. Dadurch erklärt sich ihre kurze Entstehungsdauer (ca. 10^{-5} bis 10^{-3} sec). Der Schreibende hat oft vor, während und nach Gewittern minutentang den Beobachtungsschirm des Oszillographen betrachtet, ohne jemals an einer der beiden Leitungen statische Aufladung wahrgenommen zu haben. Diese bleiben vermutlich auf Antennen und kurze, hochisolierte Netze beschränkt, deren Ableitungszeitkonstante mehr als $1/100$ sec beträgt. In diesem Sinne modifizieren die Versuchsresultate die bisherige Auffassung von der Gefahr der sog. „statischen Ladungen“. Gegen diese sind Schutzmassnahmen nur in den seltensten Fällen nötig (kurze, hochisolierte Leitungen und Anlagen). Hingegen erfordern die im Moment von Blitzschlägen freiwerdenden Ladungen („Influenz-Ladungen“, resp. Spannungen infolge indirekter Blitzschläge) Schutzmassnahmen, deren Art mit derjenigen gegen die „statischen Ladungen“ übereinstimmt (Ableiter nach Erde), deren Ableitfähigkeit aber grösser sein muss, als dies für „statische Ladungen“ nötig wäre.

Bei genügender Ableitung über die Netzisolation und event. zusätzliche Stromwege nach Erde ist ein anderer Anlageschutz gegen indirekte Blitzschläge auf Grund der bisherigen Versuchsresultate nicht zu empfehlen, ein Resultat, das der prin-

ziuellen Auffassung, weitere Schutzapparate seien möglichst zu vermeiden, wie sie in den „Wegleitungen der S.E.V. für den Schutz von Wechselstromanlagen gegen Ueberspannungen“ und „Wegleitungen für den Schutz von Gleichstromanlagen gegen Ueberspannungen“¹⁴⁾ niedergelegt sind, durchaus entspricht.

Durch diese im Augenblick des Blitzschlages auftretenden Influenz-Ladungen lässt sich das Schwanken der Voltmeter an Erdungstransformatoren bei Blitzschlägen erklären. Ihre relativ lange Dauer ermöglicht in besonderen Fällen ohne weiteres auch ihre Hochtransformierung aus Niederspannungs- in Hochspannungsnetze über die Wicklungen der Transformatoren, was Finkh durch Versuche an oberspannungsseitig vom Netz abgetrennten, mit Funkenstrecken versehenen, unterspannungsseitig hingegen am Verteilnetz angeschlossenen Stationstransformatoren nachgewiesen hat¹⁵⁾. Diesem Vorgang kommt jedoch kaum praktische Bedeutung zu, weil die Ladungen dieser Gewitterspannungen relativ klein sind und deshalb von der oberspannungsseitigen Kapazität (angeschlossene Leitungen) ohne gefährliche Spannungserhöhung absorbiert werden. Die Versuchsbedingungen bei Finkh entsprachen infolge Fehlens einer oberspannungsseitigen Kapazität (Leitung) nicht den praktischen Verhältnissen.

f) Die *Steilheit* der im Moment von Blitzschlägen entstehenden Gewitterspannungsstöße auf Leitungen scheint nach den bisherigen Messungen gefährliche Werte erreichen zu können; ein grosser Unterschied gegenüber der Steilheit von Wanderwellen, welche durch Erdschlüsse in einigen km Distanz von der Station verursacht sind, besteht jedenfalls nicht. Es können daher bei indirekten Blitzschlägen auch die Gefährdungen durch Wanderwellen-Reflexion an den Enden von schwach oder gar nicht verzweigten Leitungen, d. h. vor allem an den Transformatoren, eine Rolle spielen, sei es durch Ueberschlag der Transformatorklemmen oder durch Windungsschlüsse. Solche Störungen sind durch die deutsche Gewitterstörungs-Statistik nachgewiesen¹⁶⁾; doch müsste man aus den Oszillogrammen schliessen, dass die Anzahl solcher gefährlicher Blitzschläge für ein bestimmtes Netz nicht sehr gross ist. Eines der Oszillogramme (Fig. 23) scheint aber darauf hinzuweisen, dass für elektrische Anlagen ganz besonders gefährliche Blitze existieren. Bei diesem Oszillogramm wurde nämlich noch in 10—12 km minimaler Entfernung des Blitzes von der Leitung ein Spannungsstoss von fast 2 kV auf der isolierten Fahrleitung erzeugt, mit einer Anstiegs- und Abfalldauer des Maximums von je ca. $5 \cdot 10^{-6}$ sec. Die Einschlagstelle dieses Blitzen konnte nachträglich in der das 8 kV-Netz speisenden 45 kV-Leitung ermittelt werden.

Die Gefährdung durch einen solchen Spannungsstoss ist anderer Art als die der häufigen Gewitterspannungen kleiner Höhe. Es handelt sich hier um eine sehr hohe, aber kurzzeitige wanderwellenartige Beanspruchung, deren Existenz durch die Resultate der Klydonographie in Amerika bereits behauptet wird. Infolge der raschen Entstehung solcher Spannungsstöße auf der Leitung ist ihre künstliche Ableitung in den Stationen ausgeschlossen. Eine ähnliche Beanspruchung ist zu erwarten bei direkten Blitzschlägen.

Es scheint in diesen relativ seltenen Fällen unmöglich, ein- oder mehrpoligen Erdschluss und damit Kurzschluss an der betreffenden Leitungsstelle unter dem Gewitterherd oder bei der Einschlagsstelle zu verhüten. Wahrscheinlich bieten auch Erdseile keinen genügenden Schutz gegen die Entstehung solcher Spannungen. Es kann aber vielleicht sogar grössere Vorteile bringen, die Ueberschlagsspannung für rasche Spannungsstöße auf der Leitung im Vergleich zu denjenigen anderer Anlageteile relativ klein und verzögerungsfrei zu halten, damit dadurch die Begrenzung der Gewitterspannung bei ihrer Entstehung auf der Leitung rasch und bei relativ ungefährlichen Spannungen für das Netz zustande kommt.

¹⁴⁾ Bulletin S.E.V. 1923, No. 6, S. 301 und Bulletin S.E.V. 1926, No. 6, S. 205.

¹⁵⁾ Finkh, El. Wirtschaft, Band 25, 1926.

¹⁶⁾ Matthias, ETZ, 1927.

Dagegen dürfen Ueberschläge in den Stationen, sowie Beschädigungen von Maschinen und Apparaten nicht vorkommen. In den Stationen müssen deshalb die notwendigen Vorkehren getroffen werden:

1. Zum Schutz gegen hohe und steile Front der Gewitterspannungswelle von ca. 1,5 km Frontlänge;
2. Gegen die von Erd- und Kurzschlüssen herrührende Wellenstirn;
3. Zur raschen Abschaltung des Kurzschlusses.

Die Punkte 1 und 2 verlangen dieselben Schutzvorkehren. Dabei ist schon heute sicher, dass die Vermeidung von Windungsschlüssen in diesen kritischen Momenten nur möglich ist, wenn die Wicklungen der entstehenden Sprungwellenbeanspruchung auch bei dieser Spannung, die sich durch die Netzüberschlagsspannung bei kurzen Spannungsstössen ergibt, standhalten.

Die Entscheidung dieser letzten Frage wird erst sicher möglich sein, wenn es gelingt, durch weitere Versuche an Leitungen möglichst hoher Spannung eine grössere Anzahl besonders gefährlicher Blitze zu oszillographieren. Wenn es auch vielleicht nicht möglich sein wird, alle Gewitterstörungen auf Leitungen zu verhüten, so scheint es doch, dass es gelingen wird, deren Anzahl auf ein Minimum zu reduzieren und die verbleibenden Störungen durch Anwendung der angedeuteten Schutzanordnungen auf gewöhnliche Leitungskurzschlüsse zu begrenzen, die lediglich eine kurzdauernde Abschaltung, aber keine Materialzerstörung mehr zur Folge haben.

Miscellanea.

Prof. Dr. A. Stodola Zürich, beginn am 10. Mai d. J. seinen 70. Geburtstag. Freunde und ehemalige Schüler widmeten dem weltbekannten Gelehrten und hochgeschätzten Menschen eine reich ausgestattete Festschrift, mit einem Vorwort von Prof. Dr. A. Rohn, Präsident des Schweizerischen Schulrates, einer Biographie von Oberingenieur W. G. Noack und wissenschaftlichen Arbeiten von 62 Ingenieuren und Vertretern der Wissenschaft¹⁾. Die Technische Hochschule Prag ehrte Prof. Dr. A. Stodola durch Verleihung der Würde eines Doctor honoris causa; die Technische Hochschule Stuttgart ernannte ihn zu ihrem Ehrenbürger.

Den Gratulanten schliesst sich der Schweizerische Elektrotechnische Verein an und entbietet seinem langjährigen, verehrten Mitglied seine herzlichsten Wünsche.

Totenliste.

Val. A. Fyn, gestorben am 20. März d. J. im Alter von 58 Jahren in St. Louis U. S. A., absolvierte seine Studien am Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich in den Jahren 1888—1893. Nach Praxis in der Firma Brown, Boveri & Cie., Baden und in London, siedelte er 1898 nach Amerika über, wo er als beratender Ingenieur der Wagner Electric Manufacturing Co. in St. Louis wirkte. Sein Name wurde bekannt als Verfasser zahlreicher technischer Abhandlungen und als Inhaber einer sehr grossen Anzahl von Patenten, die sich hauptsächlich mit dem Gebiete

des Einphasenkollektor-Motors befassten. Für die Schweiz und ihre Berge bewahrte der Verstorbene zeitlebens ein warmes Interesse.

Der Verband Deutscher Elektrotechniker (V. D. E.) hält vom 7. bis 9. Juli 1929 in Aachen seine XXXIV. Jahresversammlung ab.

Die Einladung kündigt folgende Vorträge an: «Der Weltfernsprechverkehr» von Dr.-Ing. E. L. Craemer, Brückeburg; «Kathodenoszillograph und Ueberspannungen» von Prof. Dr. Rogowsky, Aachen; «Der Zusammenschluss grosser Netze im Lichte der Elektrizitätswirtschaft» von Dr.-Ing. E. L. Frank, Berlin; «Verhalten der Kraftwerke und Netze beim Zusammenschluss» von Prof. Dr. Rüdenberg, Berlin, und «Wirkungen des Zusammenschlusses auf den Betrieb» von Dr.-Ing. Piloty, Berlin. Außerdem sind Fachberichte, Besichtigungen und gesellschaftliche Veranstaltungen vorgesehen. Die Tagung vom 8. Juli wird unter Beteiligung des Königl. Holländischen Institutes für Ingenieure, Abt. Elektrotechnik, des Elektrotechnischen Vereins in Wien und des ungarischen Elektrotechnischen Vereins als *Ferntagung* durchgeführt werden.

Geschäftsstelle ist: «Elektrotagung» des Verbandes Deutscher Elektrotechniker, Aachen, Theaterplatz 10/12.

Der Jahresbericht 1928 des Schweizerischen Technikerverbandes (S. T. V.) ist erschienen. Er gibt einen guten Ueberblick über die derzeitige wirtschaftliche Lage des schweizerischen Technikerstandes und die vielseitige Tätigkeit des Verbandes.

¹⁾ Festschrift, Prof. Dr. A. Stodola zum 70. Geburtstag überreicht von Freunden und Schülern. Herausgegeben von Dr. E. Honegger. Zürich 1929, Verlag Art. Inst. Orell Füssli. Preis geh. Fr. 30.—, geb. Fr. 32.—.