

Resultate der Gewittermessungen in den Jahren 1934/35

Von

K. Berger, Zürich

Sonder-Abdruck

aus dem Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Jahrgang 1936, No. 6

1 9 3 6

A.-G. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zürich

Resultate der Gewittermessungen in den Jahren 1934/35¹⁾.

Von K. Berger, Zürich.

621.316.93

Als Fortsetzung der in den Vorjahren veröffentlichten Aufsätze wird über die im Auftrag der KOK in den Jahren 1934 und 1935 an einer modernen Höchstspannungsleitung gewonnenen Resultate der Gewitterforschung berichtet. Die Messungen der Ueberspannungen mit Kathodenstrahl-Oszillographen sind ergänzt worden durch Messungen der Grösse und Aenderungsgeschwindigkeit der Blitzströme in den vom Einschlag betroffenen Masten. Die Grundlagen des Ueberspannungsschutzes konnten dadurch in mehrfacher Hinsicht gefestigt werden, nämlich bezüglich der an Ueberspannungsableiter zu stellenden Anforderungen, bezüglich der Masterdungen von Hochspannungsleitungen und bezüglich der Stossbeanspruchung von Freileitungsisolatoren bei Blitzeseinschlag. Als Nebenprodukt ergab sich eine Methode der Fehlerortsbestimmung auf Hochspannungsleitungen, deren prinzipielle Brauchbarkeit im Aufsatz erwiesen wird. Ferner lassen sich aus den erstmals gemessenen Aenderungsgeschwindigkeiten des Blitzstromes in den vom Einschlag betroffenen Objekten Bemessungsregeln für die Anordnung der Gebäude-Blitzableiter entnehmen.

Faisant suite aux articles publiés les années précédentes, ce rapport indique les résultats des mesures effectuées au cours des orages en 1934 et 1935, à la demande de la KOK, sur une ligne moderne à très haute tension. Les mesures des surtensions à l'aide d'oscillographes cathodiques ont été complétées par des mesures de la grandeur et de la vitesse de variation des courants engendrés par la foudre dans les pylônes atteints par les décharges atmosphériques. Les bases de la protection contre les surtensions ont pu être ainsi confirmées à plusieurs points de vue, surtout à celui des exigences auxquelles doivent satisfaire les appareils de protection contre les surtensions, des prises de terre des pylônes de lignes à haute tension, et des contraintes par choc que subissent les isolateurs de lignes aériennes lors des décharges atmosphériques. A côté, l'auteur a mis au point une méthode permettant de déterminer l'endroit avarié des lignes à haute tension; il démontre qu'on peut l'appliquer en principe. Enfin, on a mesuré pour la première fois les vitesses de variation du courant engendré par la foudre dans les objets atteints, dont on a déduit des règles pour le dimensionnement et la disposition des paratonnerres de bâtiments.

I. Beschreibung der beobachteten Leitungen.

In den Jahren 1934 und 1935 standen für die Messung atmosphärischer Ueberspannungen zwei Leitungen zur Verfügung:

a) Die eine dieser ist die über das Gebirgsmassiv des Gotthard führende Höchstspannungsleitung, die vorläufig mit 150 kV Drehstrom betrieben wird, deren Masten hingegen für den Betrieb mit mindestens 300 kV vorgesehen sind. Diese Leitung wird im folgenden kurz als «Gotthardleitung» bezeichnet. Sie führt vom Kraftwerk Piottino in Lavorgo²⁾ über die Alpen zur Schaltstation Amsteg.

Diese von der A.-G. Motor-Columbus im Jahre 1932 gebaute Leitung entspricht den modernsten Anschauungen über eine Hochgebirgsleitung³⁾. Die drei Leiterseile sind mit Rücksicht auf Seilschwingungen durch Eis- und Schneelast in der Horizontalen angeordnet. Der normale Abstand zwischen zwei Leiterseilen beträgt 9 m. Um bei Gewitter eine möglichst hohe Betriebssicherheit zu gewährleisten, wurde auf gute Erdung aller Masten grosse Sorgfalt gelegt. Da aber eine grosse Zahl Masten direkt auf dem Gotthardgestein stehen, das haupt-

sächlich aus Gneis und Granit besteht, konnten kleine Erdungswiderstände nicht immer erreicht werden. Eine dem Blitz besonders exponierte Teilstrecke wurde zur Erdungsverbesserung von Anfang an mit einem 760 m langen Bodenseil ausgerüstet, das die Füsse der Masten Nr. 15 bis 18 durchgehend im Boden verbindet. Die Leitung ist überdies mit zwei Erdseilen ausgerüstet. Die Isolation der Leitung besteht mit Rücksicht auf die enorme mechanische Beanspruchung einer Hochgebirgsleitung durchwegs aus Hängeketten mit Motor-Isolatoren. Normalerweise sind pro Kette 4 Elemente, auf Teilstrecken mit schlechter Erdung dagegen 6 Elemente in Serie verwendet worden. Alle Ketten sind mit Lichtbogenarmaturen versehen. Um schon beim jetzigen Betrieb der Leitung mit 150 kV den gleichen Höhenunterschied der Leiterseile gegenüber den Erdseilen zu bekommen, der später beim Ausbau auf höhere Spannung vorhanden sein wird, wurden die Ketten der Tragmasten über Eisenstäbe aufgehängt, welche die Länge der beim späteren Ausbau noch hinzukommenden Isolatoren besitzen.

Die Fig. 1 und 2 zeigen zwei typische Mastbilder.

Tabelle I gibt ein Bild von der Grössenordnung der beim Bau der Leitung im August bis November 1932 auf die übliche Weise mit Norma-Erdungsbrücke gemessenen Masterdungswiderstände.

¹⁾ Vgl. die Berichte pro 1930, Bull. SEV 1931, S. 421; 1931, Bull. SEV 1932, S. 289; 1932/33, Bull. SEV 1934, S. 213.

²⁾ Bull. SEV 1932, S. 661.

³⁾ Siehe z. B. die Druckschrift der Firma Motor-Columbus, Baden, z. T. auch Bull. SEV 1932, S. 672.

Tabelle I.

Erdungswiderstand des einzelnen Mastes	< 10 Ω	10 bis 19 Ω	20 bis 39 Ω	40 bis 100 Ω	> 100 Ω
Anzahl Masten	62	52	42	9	2

Siebneen führt. Während der Beobachtungsperiode war nur die Leitung nach Siebneen, und zwar auch nur zeitweise, zugeschaltet. Der Grossteil der Energie wird in Rathausen auf 50 kV transformiert; die Gewitterstörungen hinter diesem Transformator sind, wie sich deutlich gezeigt hat, für die Ueberspannungen auf der 150 kV-Leitung bedeutungslos. Wir verzichten daher auf weitere Netzbeschreibungen.

Das Schema der Gotthardleitung mit Eintragung der Leitungslängen und Transformatorenleistungen ist in Fig. 3 dargestellt.

b) Die zweite Versuchsleitung ist eine 80 kV-Leitung, die von Lavorgo über Bodio nach der italienischen Grenze (Ponte Tresa) zum italienischen Unterwerk Veveri führt. Wir bezeichnen diese Leitung kurz als «Leitung Süd».

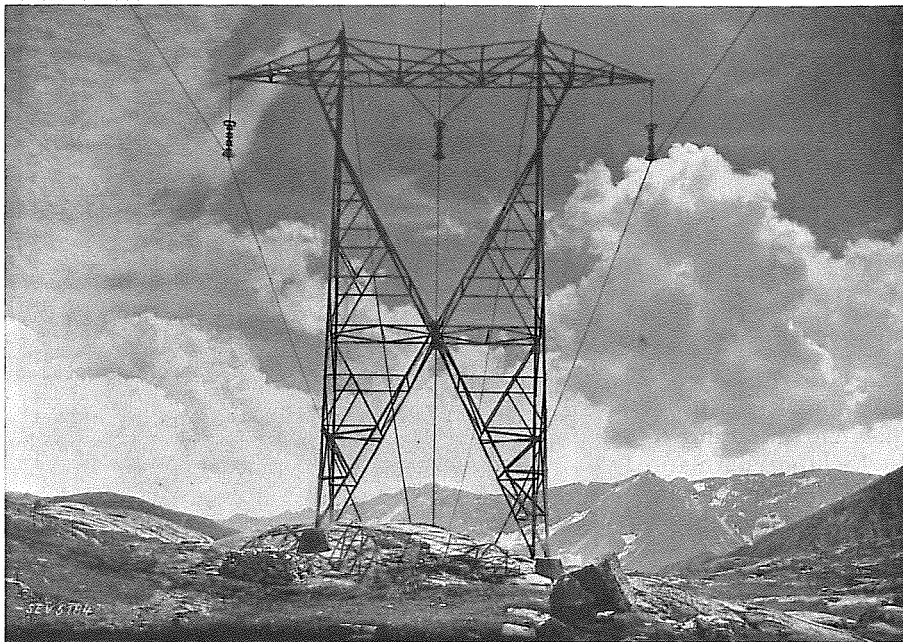


Fig. 1.

Tragmast der 150 kV-Gotthardleitung, mit 4gliedrigen Isolatorenketten.

Bedenkt man, wie ausserordentlich gebirgig die Gegend ist, so müssen diese Erdungen als recht gut bezeichnet werden.

Die Gotthardleitung besitzt als südliche Fortsetzung eine ca. 8,2 km lange Doppelleitung nach Bodio, wo die Leitung ausnahmsweise über einen 15 000 kVA - Transformator gespeist wird. Im Norden, im Schaltposten Amsteg, ist zeitweise eine Transformator-Generator-Gruppe von 13 000 kVA über einen Abzweig von einigen 100 m Länge an die Gotthardleitung angeschlossen. Die Fortsetzung der Leitung führt von Amsteg auf einem gemeinsamen Gestänge mit 4 fremden 66 kV-Einphasenleitungen mit drei Leitern nach dem 57,7 km von Amsteg entfernten Unterwerk Rathausen. Dort verzweigt sich die Leitung in zwei 150 kV-Aeste, von denen der eine nach Bickigen, der andere nach

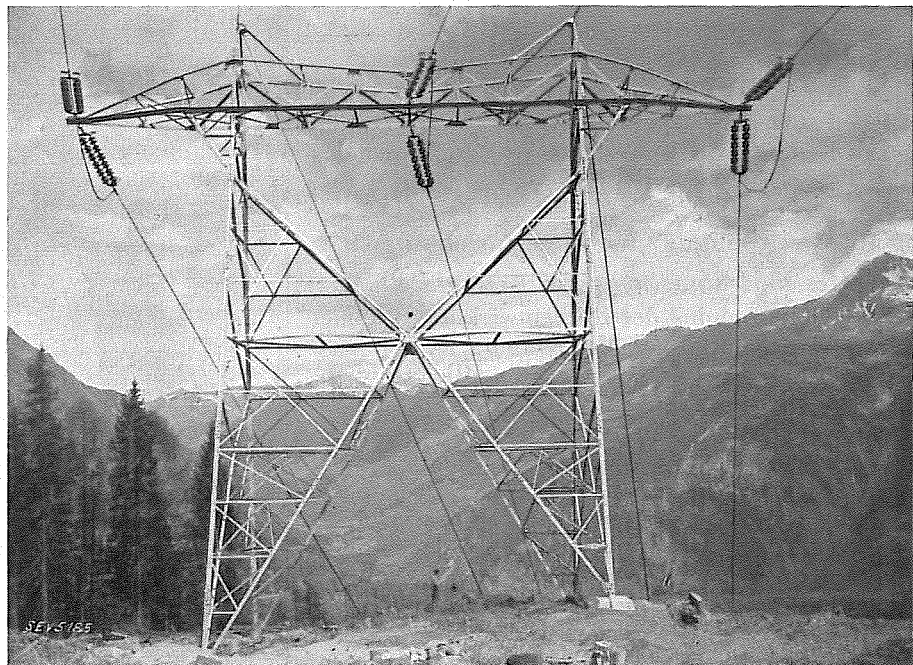


Fig. 2.

Winkel-Abspannmast der 150 kV-Gotthardleitung, mit 6gliedrigen Doppelketten.

Das Teilstück Lavorgo-Bodio ist mit der Fortsetzung der 150 kV-Gotthardleitung auf gemeinsamen Masten verlegt und hier ebenfalls für 150 kV

Betriebsspannung isoliert (4gliedrige Motorketten an Tragmasten, 5 Glieder an Abspannmasten). Die 80 kV-Leitung Süd (Bodio-Veveri) ist isoliert mit 6 Elementen OB (Bodio-Castione), bzw. 3 Motor-Ele-

meidung von Glas- und Porzellanröhren gelang es, zu erreichen, dass heute die Oszillographen auch auf der Bahnfahrt vollständig montiert und somit unter Vakuum bleiben können. Zugleich wurde die

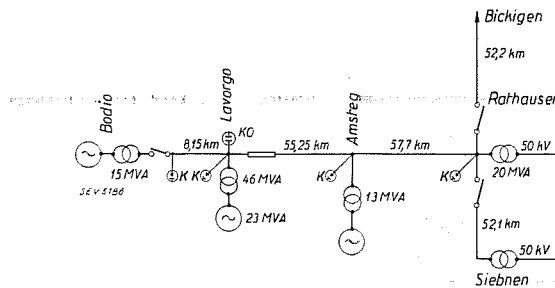


Fig. 3.
Prinzipschema des beobachteten 150 kV-Netzes.
K Klydonographen-Meßstation.
KO Kathodenstrahl-Oszillographen-Station.
— Mit Bodenseil ausgerüstete Leitungsstrecke.

menten (Reazzino-Rivera), bzw. im übrigen schweizerischen Teil mit 2 Motor-Elementen. Sie ist durchwegs auf Eisenmasten verlegt. Lichtbogenarmaturen sind hier nicht vorhanden, dagegen ein Erdseil.

Das Schema dieser 80 kV-Leitung Süd ist in Fig. 4 samt den Leitungslängen und Transformatorenelei-

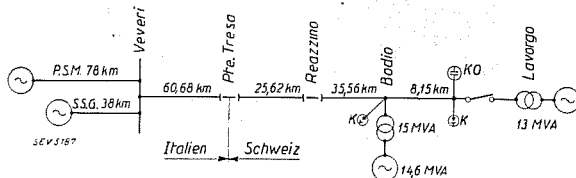


Fig. 4.
Prinzipschema des beobachteten 80 kV-Netzes.
K Klydonographen-Meßstation.
KO Kathodenstrahl-Oszillographen-Station.

stungen angegeben. In Lavorgo war die Leitung bei den Gewittermessungen stets offen, da der dortige Transformator nur als Reserve dient.

II. Beschreibung der Messeinrichtungen.

a) Messeinrichtungen an der Gotthardleitung.

Zur Untersuchung der Blitzeinwirkungen kamen folgende Messmittel zur Verwendung:

1. der dreipolige Kathodenstrahloszillograph des SEV, der wie in früheren Jahren im Bahnwagen eingebaut ist⁴⁾,
2. je ein Klydonograph in den Werken Bodio, Lavorgo, Amsteg und Rathausen,
3. Stahlstäbchen zur Messung des Höchstwertes von Blitzströmen, gemäss dem Vorgehen der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen in Berlin,
4. Steilheitsmesser zur Messung der grössten Steilheit $(di/dt)_{max}$ von Blitzströmen in Masten.

Zu 1.: Der Kathodenstrahloszillograph (KO) ist mit Ausnahme des Entladerohrs derselbe, der bei den Messungen der vorhergehenden Jahre benützt wurde. Die Entladerohre wurden umkonstruiert, um sie mechanisch robuster zu machen. Durch Ver-

4) Bull. SEV 1934, S. 214.

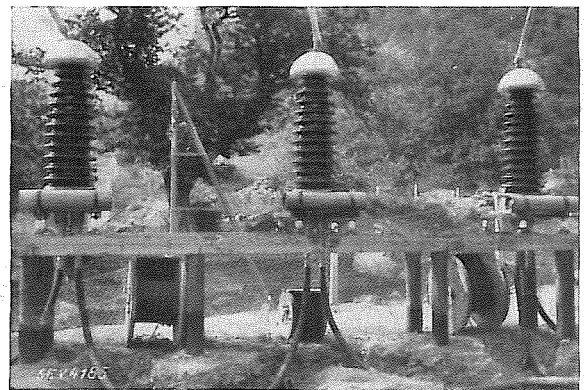


Fig. 5.
Ansicht der drei Spannungsteiler für 150 kV in Lavorgo.

Lebensdauer der Kathode auf etwa das 12fache gesteigert.

Als Spannungsteiler wurden wie früher kombinierte Teiler nach Gábor verwendet⁵⁾. Der Hochspannungsteil besteht aus Mannit-Widerstand (ca. 11 000 Ω) und einem ca. 25 m langen Oelkabel samt Endverschluss für 150 kV⁶⁾, der Niederspannungsteil aus einem Oelpapierkondensator und Me-

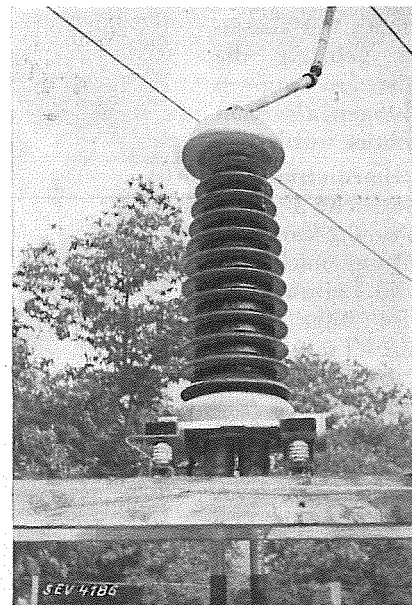


Fig. 6.
Ansicht eines 150 kV-Kabelendverschlusses in Lavorgo, mit anschliessendem Mannitwiderstand (oben).

tallwiderstand. Das dazwischen liegende Verzögerungskabel von 300 m Länge ist ein besonderes Bleikabel.

5) Bull. SEV 1933, S. 330.

6) P. E. Schneeberger: Bull. SEV 1934, S. 341.

Fig. 5 und 6 zeigen Ansichten des Hochspannungsteils der 150 kV-Spannungsteilung, deren Oelkabel uns in liebenswürdiger Weise von den Kabelwerken Brugg zur Verfügung gestellt und montiert wurden.

Zu 2.: Die Klydonographen sind mit besonderen, kapazitiven Spannungsteilern an die 150 kV-Leitung angeschlossen, wobei auch bei Ueberspannung Wert auf Vermeidung des Glimmens gelegt wurde.

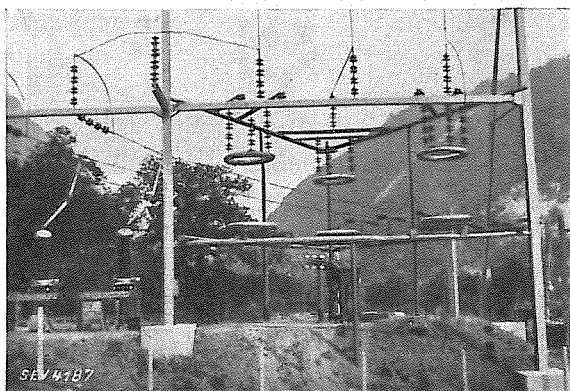


Fig. 7.
Klydonographen-Meßstation für 150 kV in Lavorgo
(links die KO-Spannungsteilung).

Aus diesem Grunde wurden als Elektroden blecherne Kreisringe mit ca. 1700 mm Ringdurchmesser und 200 mm Wulstdurchmesser gewählt.

Die Klydonographen-Spannungsteiler sind in den Figuren 7 und 8 samt dem Holzkasten für den Klydonographen deutlich ersichtlich.

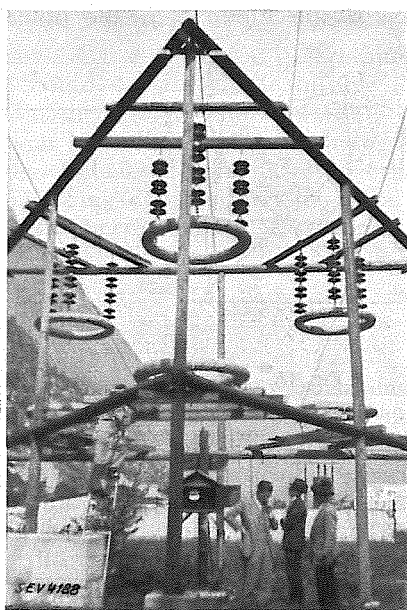


Fig. 8.
Klydonographen-Meßstation für 150 kV in Bodio.

Für die 80 kV-Messungen sind etwas kleinere Kreisringe aus Gasrohringen als Spannungsteiler benutzt.

Zu 3.: Für die Beschreibung der *Stahlstäbchen* zur Messung von Blitzstrommaxima sei auf die deutschen Arbeiten verwiesen⁷⁾. Die Methode geht auf Töpler zurück, der schon vor ca. 30 Jahren den Maximalwert des Blitzstromes aus der Stärke der Magnetisierung berechnete, welche z. B. Basaltgestein bei Blitzeinschlägen erfährt. Die Durchbildung der Methode verdanken wir der Deutschen Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen, welche durch genügend feine Unterteilung des benutzten Chromstahlstabes erreichte, dass die Magnetisierung der Drahtbündel durch kurzdauernden Magnetisierungsstrom (Blitzstrom) praktisch dieselbe ist wie durch Gleichstrom. Die Methode hat sich für die ungefähre Erfassung der Blitzstrommaxima als einfacher und billiger als die von uns

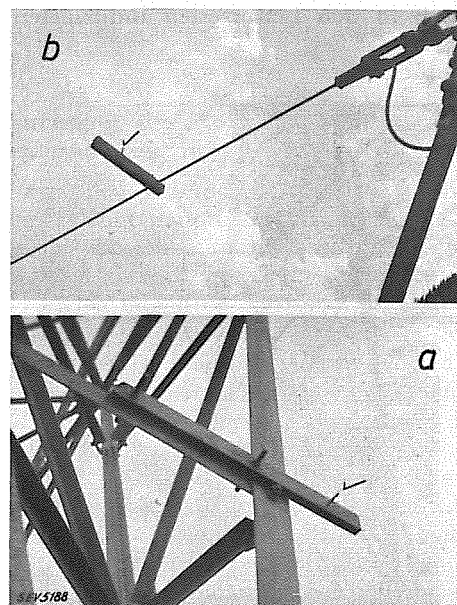


Fig. 9.
a) Befestigung eines «Stahlstäbchens» zur Blitzstrommessung am Mast.
b) Befestigung eines «Stahlstäbchens» zur Messung des Blitzstromes im Erdseil.

seit 1931 verwendete Methode der Mastfunkstrecke mit Hilfserdung erwiesen⁸⁾, da sie keine Hilfserdung benötigt. Sie ist für die Erfassung der ungefähren Blitzstromwerte sehr wertvoll geworden, wenn sie auch leider den Nachteil hat, dass bei mehrfachen Einschlägen die Auswertung kaum mehr zuverlässig möglich ist. In den Gewitterperioden 1934 und 1935 waren 100 Masten der Gotthardleitung mit total 400, bzw. 600 Stahlstäbchen ausgerüstet, von denen ein Teil zur Messung des zur Erdung fließenden Stromes, ein anderer Teil zur Messung des Stromes der Erdseile diente. Fig. 9a zeigt die Anordnung der Stäbchen am Mast, 9b am Erdseil.

Zu 4.: Die *Steilheitsmesser* bezwecken die Messung der grössten Anstiegsgeschwindigkeit des Blitz-

⁷⁾ Grünwald, ETZ 1934, S. 505. ATM V 327—2 (Dez. 1935).

⁸⁾ Bull. SEV 1934, S. 227.

stromes in den betroffenen Masten. Diese Grösse ist in dreifacher Hinsicht von Interesse: Sie bestimmt einmal die Art der für wirksamen Blitzschutz zweckmässigen Masterdungen, denn eine für Gleichstrom gute Masterdung muss nicht notwendig auch für Stoßstrom wirksam sein.

Zweitens ergibt sich aus der grössten Blitzstromsteilheit durch Multiplikation mit dem Masterdungswiderstand (Stosswert) die grösste Stossspannungsteilheit an den Leitungsisolatoren. Zur Beurteilung der Stoßsicherheit von Leitungsisolatoren ist die Kenntnis dieser praktisch vorkommenden Stossspannungsteilheit bei Blitzeinschlägen von hervorragender Bedeutung.

In dritter Linie ist die Blitzstromsteilheit in Masten von direkter Bedeutung für die Höhe der magnetisch in den Leiterseilen induzierten Spannungen⁹⁾.

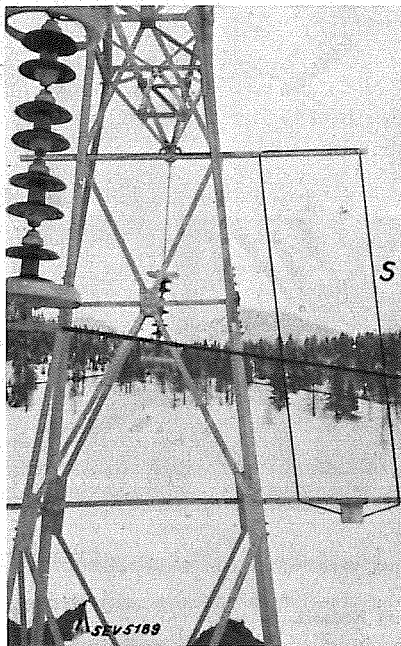


Fig. 10.
Drahtschleife mit Blitzstrom-Steilheitsmesser am Mast der Gotthardleitung.

Die zu diesem Zweck eingeführte und durchgebildete Methode beruht darauf, die vom Blitzstrom in einer am Mast angebrachten Drahtschleife induzierte Spannung von zwei parallel geschalteten, entgegengesetzt gerichteten, gekapselten Spitze-Platte-Funkenstrecken in Form Lichtenbergscher Figuren aufzeichnen zu lassen. Fig. 10 zeigt die Anordnung der induzierten Drahtschleife am Mast der Gotthardleitung mit dem unten in einem regendichten Kästchen angeschlossenen Steilheitsmesser. In den Jahren 1934 und 1935 waren an der Gotthardleitung 50 solcher Steilheitsmesser vorhanden, an andern Leitungen weitere 130 Apparate. Fig. 11

⁹⁾ V. Aigner, Induzierte Blitzüberspannungen und ihre Beziehung zum rückwärtigen Ueberschlag, ETZ 1935, S. 497.

zeigt die Lage der Blitzstrom-Messeinrichtungen an einem Mast.

Die Methode sei anhand der Fig. 12 erläutert.

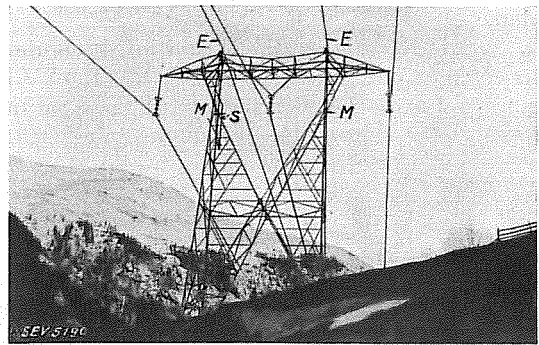


Fig. 11.
Bild eines mit «Stahlstäbchen» und Steilheitsmesser ausgerüsteten Tragmastes.

- E Erdseilstäbchen, zur Messung des Blitzstromes in den Erdseilen.
- M Maststäbchen, zur Messung des Blitzstromes in den 2 Mastseiten.
- S Drahtschleife mit Steilheitsmesser.

Die in der Drahtschleife S induzierte Spannung E_0 ergibt sich aus den Mastströmen aus der Grundgleichung:

$$E_0 = \sum_K M_K \frac{\partial i_K}{\partial t} = M_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} + M_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} + M_3 \frac{\partial i_3}{\partial t} + M_4 \frac{\partial i_4}{\partial t}$$

Darin bedeuten die Faktoren M_K die Gegeninduktivitäten der Strombahnen im Mastseilen und der induzierten Drahtschleife S, i_K die induzierenden

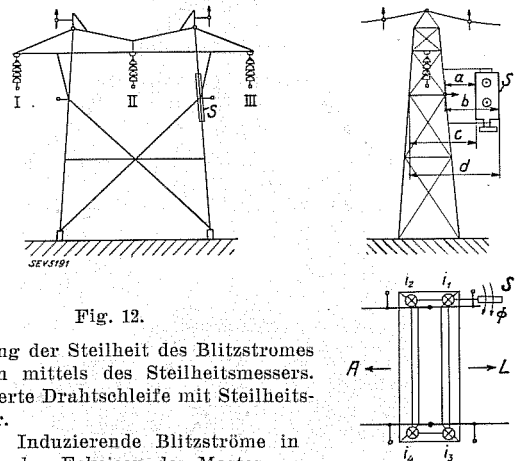


Fig. 12.
Berechnung der Steilheit des Blitzstromes in Masten mittels des Steilheitsmessers.
S Induzierte Drahtschleife mit Steilheitsmesser.
 i_1, i_2, i_3, i_4 Induzierende Blitzströme in den Eckeisen des Mastes.

Ströme im Mastseilen. Die Reihe wurde für den Fall der Gotthardleitung mit 4 Gliedern angesetzt, da in Höhe der Schleife S nur die 4 Masteckeisen Ströme in vertikaler Richtung führen. Wie man aus dem Grundriss erkennt, darf überdies die Induktionswirkung der beiden Ströme i_3 und i_4 auf S in erster Näherung gegenüber i_1 und i_2 vernachlässigt werden, weil ihr Magnetfeld die Schleife

nur zu einem sehr kleinen Teil durchsetzt. Somit gilt als Näherung:

$$E_0 \simeq M_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} + M_2 \frac{\partial i_2}{\partial t}$$

Infolge der kleinen Entfernung der beiden Eiskeisen 1 und 2 und der vielen Querverbindungen oberhalb des Messquerschnitts bei der Schleife S einerseits, und weil die Stromverteilung im Mastquerschnitt bei Blitzeinschlag sich weniger nach Ohmschen Widerständen von Verschraubungsstellen, sondern infolge des Stosscharakters der Blitzentladung mehr nach induktiven und kapazitiven Eigenschaften der Strombahn richtet, so begeht man keinen grossen Fehler, wenn $i_1 = i_2$ angenommen und gesetzt wird:

$$E_0 \simeq [M_1 + M_2] \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{i_1 + i_2}{2} \right) =$$

$$l \cdot \ln \left(\frac{b \cdot d}{a \cdot c} \right) \cdot 10^{-9} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (i_1 + i_2)$$

Dabei bedeuten: l die Länge der zum Masteckeisen parallelen Seiten der Drahtschleife in cm, a und c die Abstände der nähern Seite, b und d die Abstände der weitem Seite der Drahtschleife vom Masteckeisen Nr. 1 und 2.

Für die Masten der Gotthardleitung ergibt sich daraus folgendes mittlere Zahlenverhältnis:

$$E_0 \simeq 330 \cdot \ln \left(\frac{144 \cdot 376}{44 \cdot 276} \right) \cdot 10^{-9} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (i_1 + i_2)$$

$$\text{oder } \frac{\partial}{\partial t} (i_1 + i_2)_{\max} \simeq 2,05 E_0$$

wenn di/dt in $\text{kA}/\mu\text{s}$, E_0 in kV gemessen wird.

Der Einschlag des Blitzes liefert auch in den Eiskeisen 3 und 4 Ströme, die infolge der vielen Querverbindungen über- und unterhalb der Messschleife von derselben Grössenordnung sind wie jene in den Eiskeisen 1 und 2. Man erhält daher eine Abschätzung der Steilheit des gesamten vom Blitzeinschlag herrührenden Maststromes i_M durch Verdopplung:

$$\frac{\partial}{\partial t} (i_1 + i_2 + i_3 + i_4)_{\max} \equiv \left(\frac{\partial i_M}{\partial t} \right)_{\max} \simeq 4,1 E_0$$

Es soll dazu noch bemerkt werden, dass für einfachere, gedrängtere Mastquerschnitte die Berechnung der Blitzstromsteilheit genauer möglich ist als bei den ausserordentlich grossen Gebirgsmasten der Gotthardleitung. Man erhält auf diese Weise aus der Grösse der Lichtenbergschen Figur ein direktes Mass für die Steilheit des Blitzstromes im Mast. Um unbedingt gleiche Empfindlichkeit der Steilheitsmesser für positive und negative Stromanstiegsgeschwindigkeiten zu bekommen, wurden in jedem Apparat zwei gleiche Messelemente in entgegengesetzter Lage parallelgeschaltet.

Da sich die Lichtenbergschen Figuren kurz aufeinander folgender Spannungsstösse von den in einem Guss aufgezeichneten Figuren deutlich unter-

scheiden lassen, indem dann Ueberkreuzungen der Funkenäste vorkommen, können mehrfache Blitzeinschläge an der Aufzeichnung mehrfacher Figuren erkannt werden. Dies ist ein Vorteil gegenüber den zur Messung des *Strommaximums* benützten Stahlstäbchen. Dagegen lassen die Steilheitsmesser ohne Entwicklung des eingelegten Photopapierchens nicht erkennen, ob eine Aufzeichnung (ein Blitzeinschlag) stattgefunden hat oder nicht. Die beiden Methoden, nämlich Stahlstäbchen für die Messung des Strommaximums und Steilheitsmesser für die Messung der grössten Stromsteilheit ergänzen sich deshalb. Bei der Kontrolle der Gotthardleitung wurde denn auch stets so vorgegangen, dass bei der Kontrolle der Stahlstäbchen mit dem Kompass nicht nur die magnetisierten Stäbchen, sondern auch die an den betreffenden Masten angebrachten Steilheitsmesser ausgewechselt und ausgewertet wurden.

III. Häufigkeit des Auftretens atmosphärischer Ueberspannungen in einem festen Netzknoten.

Die mit dem *Kathodenstrahloszillographen* gemessenen Ueberspannungsmaxima der Gewitterperioden 1934 und 1935 sind in Fig. 13 graphisch dargestellt. Dabei ist als Ueberspannung definiert die kurzzeitige Variation der Spannung einer Phase gegen Erde, welche der momentanen Wechselspannung dieser Phase überlagert erscheint, d. h. die vom Blitz erzeugte, der momentanen Betriebsspannung überlagerte Spannungsveränderung. Die Addition dieser gemessenen Ueberspannungen zum Scheitelwert der Betriebswechselspannung ergäbe also ein zu schlimmes Bild von der gesamten Spannungsbeanspruchung, da die meisten Ueberspannungen nicht gerade im Augenblick des Höchstwertes der Betriebsspannung vorkommen, sondern nach einem Wahrscheinlichkeitsgesetz über die Periode der Wechselspannung verteilt sind. Dagegen geben die Kurven ein unmittelbares Bild von der Häufigkeit verschieden hoher atmosphärischer Ueberspannungen auf hochisolierten Leitungen. Die Abszisse stellt die Scheitelwerte der gemessenen Spannungsvariation in kV dar; als Ordinate ist die Zahl jener gemessenen Spannungen aufgetragen, deren Höhe den Betrag des Abszissenwertes erreicht oder übertrifft.

Aus dem Vergleich der Kurven ergibt sich einmal die relative Armut des 150 kV -Netzes an Ueberspannungen im Sommer 1934. Die Ursache ist in erster Linie darin begründet, dass der Sommer 1934 im Gotthardgebiet im allgemeinen recht gewitterarm war, in zweiter Linie darin, dass die Leitung sich in der zweiten Hälfte Juli ausser Betrieb befand, wobei Gewittermessungen nur auf einem Teilstück der Leitung möglich waren. Auffallend ist ferner der Reichtum an Ueberspannungen mittlerer Höhe auf der 80 kV -Leitung «Süd» im Sommer 1935, im Vergleich zur 150 kV -Gotthardleitung. Diese Erscheinung erklärt sich daraus, dass die Ueberspannungen der 80 kV -Leitung in einer Kopf-

station gemessen sind und deshalb reflektierte Ueberspannungen darstellen, während die 150 kV-Leitung im Messpunkt eine durchgehende Leitung ist, so dass theoretisch direkt die Scheitelwerte der nicht reflektierten Wellen gemessen werden. Praktisch verwischt sich dieser Unterschied allerdings stets dann, wenn die Dauer der Ueberspannungs-

der früher beobachteten 80 kV-Leitung, wobei zur Beurteilung in beiden Fällen zwei Beobachtungsjahre vorliegen.

Die mit Klydonographen gemessenen Ueberspannungen sind in den Fig. 14 und 15 zu Häufigkeitskurven ausgewertet, und zwar für die Werke Lavorgo und Bodio, wobei an beiden Orten in 80 und 150 kV registriert wurde. Die Zuverlässigkeit dieser Kurven ist viel kleiner als die jener, die mit dem Kathodenstrahloszillographen gemessen wurden (Fig. 13). Es wurde z. B. festgestellt, dass in einem Fall der Klydonograph 5- bis 7fache Ueberspannungen anzeigte, der Kathodenstrahloszillograph dagegen als Amplitude der Ueberspannung nur 3fache Normalspannung. Die Rolle des Klydonographen scheint einzig die eines Anzeigeinstrumentes für die ungefähre Häufigkeit von Ueberspannungen zu sein. Für quantitative Messungen ist er mit äusserster Vorsicht zu verwenden; im besonders sind die vom Klydonographen angezeigten sehr hohen Ueberspannungen mindestens zum Teil Falschmessungen.

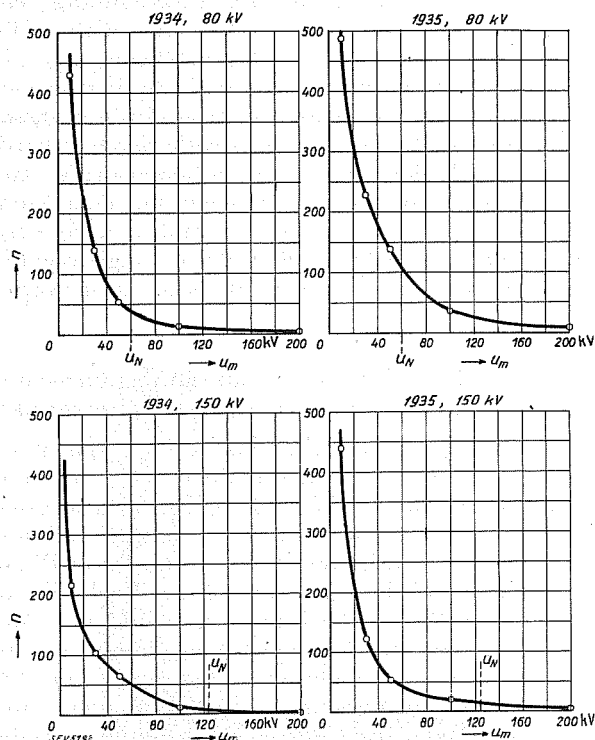


Fig. 13.

Häufigkeitskurven verschiedenen hoher atmosphärischer Ueberspannungen auf Grund der Messungen mit dem KO. in Lavorgo. 80 kV: Kopfstation; 150 kV: Durchgangsstation.

U_N Scheitelwert der normalen Betriebs-Sternspannung.

Abszisse u_m Höhe der vom Blitz der momentanen Betriebswechselspannung überlagerten Ueberspannung.

Ordinate n Anzahl jener Ueberspannungen, deren Höhe den Abszissenwert erreicht oder übersteigt.

wellen grösser ist als die Laufzeit einer Welle von Lavorgo zum Leitungsende Bodio und zurück (ca. 55 μ s). In diesem Fall überlagern sich nämlich primäre und reflektierte Wellen, wenn auch mit einer Zeitverschiebung von 55 μ s. Ein solches Beispiel wird später noch besprochen werden, siehe V. Kapitel, Fall a). Es heisst dies, dass die Entfernung des Leitungsendes der 150 kV-Leitung für lange Ueberspannungswellen bereits zu kurz ist, um Lavorgo als reine Durchgangsstation auffassen zu können. Dagegen ist die Dauer der hohen Ueberspannungen in der Regel zu klein, um der Ueberlagerung von Hin- und Rückwelle noch praktische Bedeutung zu verleihen (siehe V. Kapitel, Fall a), so dass ein Schutzwert des Leitungsschwanzes Lavorgo-Bodio tatsächlich für Lavorgo vorhanden ist.

Der Vergleich der Häufigkeitskurven mit jenen der Vorjahre¹⁰⁾ zeigt, dass atmosphärische Ueberspannungen mittlerer Höhe auf der Gotthardleitung und der Leitung Süd häufiger vorkommen als auf

¹⁰⁾ Bull. SEV 1934, S. 226.

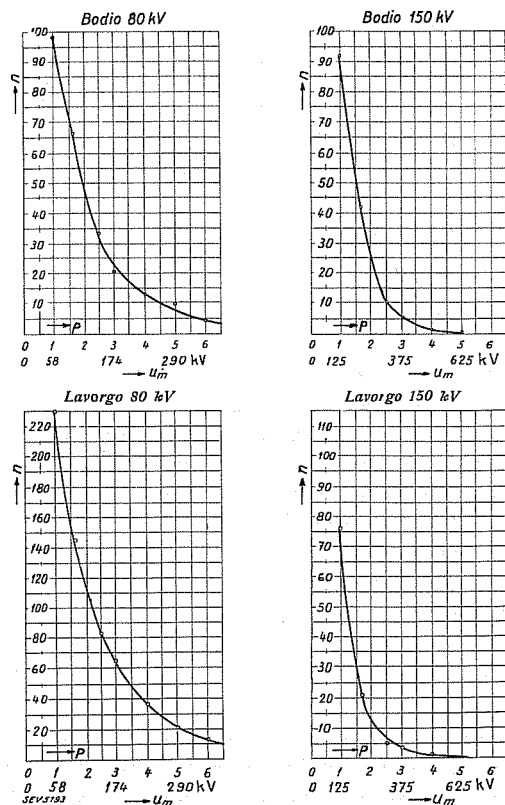


Fig. 14.

Häufigkeitskurven verschiedenen hoher Ueberspannungen jeglicher Ursache auf Grund der Messungen mit dem Klydonographen in Lavorgo und Bodio im Jahre 1934.

Abszisse u_m Höhe der Ueberspannung gegen Erde, absoluter Wert in kV, und als Vielfaches der normalen Betriebs-Sternspannung (p).

Ordinate n Anzahl jener Ueberspannungen, deren Höhe den Abszissenwert erreicht oder übersteigt.

Aus den Kurven ist die starke Häufung kleiner und mittlerer Ueberspannungen bis ca. 70 kV Amplitudenwert deutlich ersichtlich. Glücklicherweise sind heute schon die meisten Freileitungen so isoliert, dass solche Spannungen stossweise ertragen

werden, wie Stossmessungen an Freileitungsisolatoren gezeigt haben. Man erkennt weiter einen fast knickartigen Verlauf der Häufigkeitskurven bei 80 bis 120 kV. Spannungen über ca. 200 kV Scheitel-

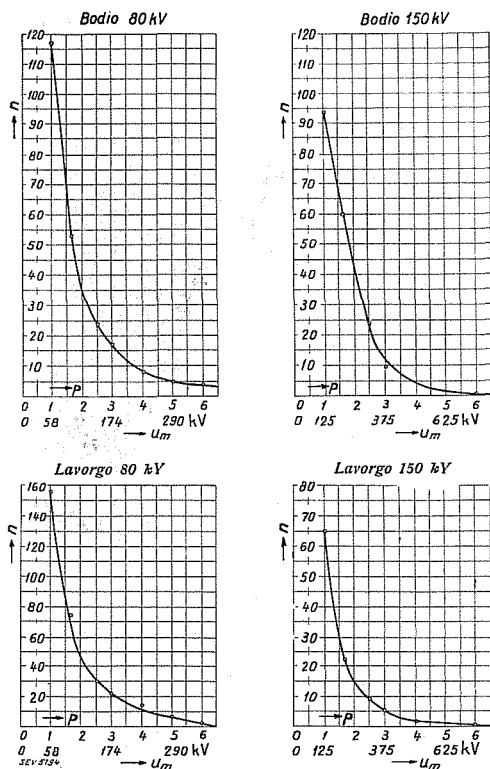


Fig. 15.
Wie Fig. 14, aber im Jahr 1935.

wert oder mehr sind auf allen beobachteten Leitungen bereits relativ selten, d. h. sie kommen an einem fixen Messpunkte an Höchstspannungsleitungen noch wenige Male pro Gewitterperiode vor.

der Blitzeinwirkung auf eine Leitung mit Eisenmasten Isolatoren zum Uberschlag kommen oder nicht. Diese Frage ist aus dem Oszillogramm mit Sicherheit zu beantworten. Zieht man auch diese Erfahrung zu Hilfe, so erkennt man, dass atmosphärische Ueberspannungen von mehr als ca. 200 kV Scheitelwert auch auf der Leitung nur noch einige Male pro Jahr und 100 km Leitungslänge vorkommen, und zwar nähern sich die Zahlen der Ueberschlagshäufigkeit stark der Zahl der direkten Blitzeinschläge in die Leitung. Auch daraus ist ersichtlich, dass Ueberspannungswellen infolge kapazitiver Blitzeinwirkung auf Leitungen die Höhe von ca. 150 bis 200 kV Scheitelwert nicht überschreiten. Dies kann für normale Leitungen ziemlich allgemein gesagt werden, weil der schützende Einfluss eines Erdseils bei Leitungen hoher Betriebsspannung zum Teil wieder aufgehoben wird durch die grössere Höhe solcher Leitungen über dem Boden, da die Höhe der kapazitiven, d. h. durch indirekte Blitzschläge erzeugte Ueberspannungen bekanntlich proportional mit der Leitungshöhe über Boden zunimmt. Eine moderne Festlegung des Sicherheitsgrades elektrischer Freileitungen und Anlagen müsste auf diese Erscheinungen in erster Linie Rücksicht nehmen. Grössere Ueberspannungen als ca. 200 kV werden nur noch vom direkten Blitzeinschlag in die Leitung oder die Masten erzeugt, diese Fälle beanspruchen erneut besonderes Interesse und werden im folgenden noch besprochen.

IV. Resultate der Blitzstrom- und Steilheitsmessungen.

a) Die Resultate der Blitzstrommessungen mit Stahlstäbchen sind in der Tabelle II enthalten.

Alle angeführten Blitzeinschläge kamen im Sommer 1935 vor, und zwar mit Ausnahme eines ein-

Tabelle II.

Maststrom kA	5...10	10,1...20	20,1...30	30,1...40	40,1...50	> 50	—	—
Anzahl Masten	6	5	1*)	1	0	0	—	—
Erdseilstrome kA	1...5	5,1...10	10,1...20	> 20	—	—	—	—
Anzahl Messungen	35*)	10	0	0	—	—	—	—
Blitzströme kA	< 10	10,1...20	20,1...30	30,1...40	40,1...50	50,1...60	60,1...70	> 70
Anzahl Blitze	?	3	2*)	1	0	0	1	0

Nun ist zu sagen, dass bei dieser Häufigkeit naturgemäss auch die Dämpfung der Wellen von ihrem Entstehungsort unter der Gewitterwolke bis zum Messpunkt eine grosse Rolle spielt. Man darf nicht ohne weiteres die gemessenen Spannungen vom Messpunkt auf die ganze Leitung übertragen. Dagegen scheint eine Uebertragung für relativ langdauernde Spannungswellen, deren Höhe unter der Glimmspannung der Leitung liegt, mit einiger Vorsicht möglich, weil hier die Dämpfung der Wellen beim Durchlaufen der Leitung am kleinsten ist. Einen sichern Grenzwert für die Höhe der grössten Spannung gewinnt man aus dem Kriterium, ob bei

zigen Falles auf der Gotthardleitung. Letzterer ist in jenen Kolonnen der Tabelle enthalten, die mit einem *) bezeichnet wurden.

Die Resultate decken sich ungefähr mit den in Deutschland und den Vereinigten Staaten von Nordamerika mit der gleichen Messmethode gewonnenen¹¹⁾. Besonders zu erwähnen ist, dass die Maxima in beiden Mastschmalseiten nach Fig. 12 nicht immer gleich gross sind, offenbar als Folge des grossen Mastquerschnittes, denn in der Höhe, wo die Stäbchen eingebaut sind (siehe Fig. 12), be-

¹¹⁾ H. Grünwald, CIGRE 1935, Bericht Nr. 326.
W. Lewis, CIGRE 1935, Bericht Nr. 315.

trägt dieser $8,5 \times 2,5 \text{ m}^2$ für Abspannmasten und $8,5 \times 1,7 \text{ m}^2$ für Tragmasten. So wurden z. B. gemessen:

Tabelle III.

In Mastseite 1—2 (Mastseite rechts) = 4600	12500	12500	6500	A
In Mastseite 3—4 (Mastseite links) = 5800	3000	22500	2500	A

Ein Zusammenhang der Lage des grösseren Stromanteiles mit der Lage der vom Blitz gestörten Phasen konnte nicht festgestellt werden.

Die 7 Mastströme von mehr als 10 kA stammen: in 6 Fällen von der Entladung einer gegen Erde negativ geladenen Wolke, in keinem Fall von der Entladung einer positiv geladenen Wolke, in einem Fall war die Polaritätsbestimmung unsicher.

Dagegen wurden infolge zweier Blitzeinschläge aus positiv geladenen Wolken Mastströme unter 10 kA gemessen.

b) Die Resultate der *Steilheitsmessungen des Blitzstromes in Masten* sind in Tabelle IV zusammengestellt. Der Messbereich war so eingestellt, dass grösste Stromsteilheiten von ca. 7 bis 60 kA/ μ s registriert werden konnten.

Tabelle IV.

Grösste Stromsteilheit im Mast kA/ μ s	7...10	10,1...20	20,1...30	30,1...40	> 40
Anzahl 1934	(4+1)	(3+2)	0	0	0
Masten 1935	(7+2)	(3+2)	(3+0)	(3+0)	0

In Tabelle IV bedeutet die erste Zahl die Zahl der Fälle, wo die grösste Stromsteilheit im Mast negativ war $[(di/dt)_{\max} < 0]$. Entsprechend bedeutet die zweite Zahl jeweils die Zahl der Fälle, wo die maximale Stromsteilheit im Mast positiv war $[(di/dt)_{\max} > 0]$. Die grossen Blitzstromsteilheiten kommen bei negativen Blitzströmen vor.

In 6 Fällen (Masten Nr. 18, 116, 117, 119, 120, 126) wurden von den Steilheitsmessapparaten mehrfache Klydonographenfiguren aufgezeichnet, die entweder von nicht rein stossartigen Blitzen oder von mehr als einem, während der Exponierung desselben Photopapiers erfolgten Blitzeinschlag herkommen. Es muss angenommen werden, dass in diesen Fällen die magnetische Strommessung mit Blitzstäbchen z. T. zu kleine Maststrommaxima anzeigt, da eine Aufeinanderfolge von Stromstössen entgegengesetzter Polarität den vom grössten Stoss erzeugten remanenten Magnetismus nur schwächen kann.

Die Steilheitsmessapparate lassen einen Blitzeinschlag ausserordentlich scharf lokalisieren, indem in der Regel nur die Messapparate auf dem betroffenen Mast oder die Apparate der benachbarten zwei Masten einer betroffenen Spannweite grosse Steilheit aufzeichnen. Fig. 16 zeigt einige Beispiele der von den Steilheitsmessern aufgezeichneten Lichtenberg-Figuren. Fig. 17 gibt schliesslich die

Häufigkeitskurven positiver und negativer Blitzstromsteilheiten der Jahre 1934 und 1935.

Nebenbei hat diese Methode auch gezeigt, dass gelegentlich auch induzierte Spannungen aufgezeichnet werden, ohne dass die Stahlstäbchen einen hohen Blitzstrom erkennen lassen. Da statische Aufladungen der Steilheitsmesser infolge deren Kon-

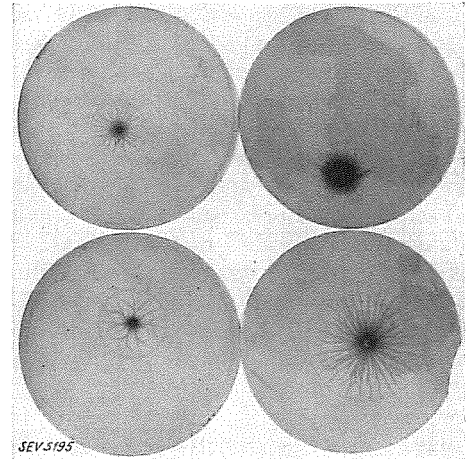


Fig. 16.

Beispiele von Lichtenberg-Figuren aus Steilheitsmessern. Obere Figuren: Induzierte Spannung entsprechend positivem Blitzstromanstieg. Untere Figuren: Induzierte Spannung entsprechend negativem Blitzstromanstieg.
a zur Blitzstörung Fall a), Kapitel V, Mast Nr. 17.
b zur Blitzstörung Fall c), Kapitel V, Mast Nr. 126.

struktion nicht in Frage kommen, muss angenommen werden, dass auch stromschwache Blitze mit Strömen von wenigen 1000 A und evtl. weniger als 1000 A in Masten vorkommen, die mit den Stäbchen nicht mehr sicher wahrgenommen werden.

Einen *Anhaltspunkt über die mittlere Steilheit* des Blitzstromes ergeben ferner jene Fälle, in welchen Ueberschläge von Holzstangen infolge Blitzeinschläge in gemischten Leitungen vorkommen.

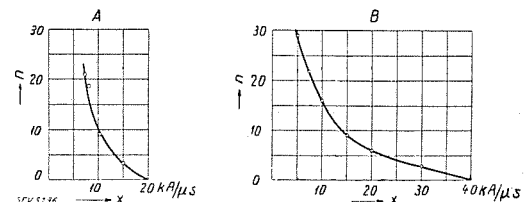


Fig. 17.

Häufigkeitskurven verschieden hoher Blitzstromsteilheiten in Masten.

A Positive Blitzstromsteilheiten im Mast.
B Negative Blitzstromsteilheiten im Mast.
Abszisse x Gemessene Maststromsteilheit (Maximalwert).
Ordinate n Anzahl Messungen mit einem den Abszissenwert erreichenden oder übersteigenden Steilheitswert.

Die Entfernung zwischen der betroffenen Holzstange und dem nächsten Eisenmast gibt die Zeit an, welche während des Blitzstromanstieges bis zum Ueberschlag der Holzstange höchstens verstreichen konnte. Denn für längere Zeitenintervalle würde sich der Ausgleich nicht mehr über die Holzstange nach Erde, sondern über die Leitung und den näch-

sten Eisenmast nach Erde vollziehen, weil Eisenmasten für Stoßspannungen stets viel schwächere Punkte darstellen als Holzstangen. Zum Vergleich mit diesen Steilheitsmessungen sei deshalb ein Blitzeinschlag vom Frühling 1935 in eine Holzstangenleitung für 50 kV Betriebsspannung bei Magadino erwähnt. Durch den Blitzeinschlag kam es an 10 Stangen (Nr. 28 bis 37) zur Splitterbildung (Fig. 18). Die letzte dieser Stangen (Nr. 28) ist 355 m

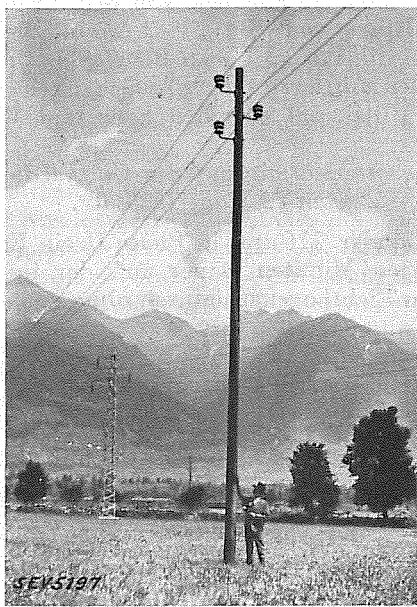


Fig. 18.

Bild der Ansplitterung von Stange Nr. 29, ca. 400 m von einem geerdeten Eisenmast derselben Leitung entfernt.

von einem Eisenmast derselben Leitung entfernt (Nr. 21). An diesem konnten keinerlei Ueberschlagsspuren entdeckt werden. Weitere 1978 m von Mast 21 war die Leitung zur Zeit des Blitzeinschlages geerdet, da sie ausser Betrieb stand. Rechnet man mit 5 Millionen Volt Ueberschlagsspannung der Holzstangen und 200Ω Wellenwiderstand der Leitung pro Stromrichtung, also 100Ω resultierenden Wellenwiderstand, so ergibt sich ein minimal nötiger Blitzstrom von 50 kA. Da zum Ausgleich über den Eisenmast mindestens $2,4 \mu s$ Zeit erforderlich sind ($2 \times 355 \text{ m}$), muss die Blitzstromsteilheit mindestens $50/2,4 = 21 \text{ kA}/\mu s$ betragen haben. Gegenüber diesem mittlern Wert der Anstiegsgeschwindigkeit über $2,4 \mu s$ kann deren Maximalwert schätzungsweise $40 \text{ kA}/\mu s$ betragen haben. Dies ist in der Tat ein Wert, der den gemessenen grössten Steilheiten gleichkommt.

Nebenbei mag erwähnt werden, dass bei diesem Blitzeinschlag in die 50 kV-Leitung die in 17 m Abstand parallellaufende 80 kV-Leitung «Süd» störungslos blieb.

Eine direkte praktische Folge aus obigen Zahlen liegt darin, dass der immer wieder gelegentlich auftauchende Vorschlag, einzelne Masten von Weitspannleitungen etwas stärker zu isolieren als andere,

um Ueberschläge an die Nachbarmasten abzuwälzen, zu keinem Erfolg führen kann. Auch bei einem Isolationsverhältnis von 5000/200 kV würde bei 700 m Spannweite der hochisolierte Mast zum Ueberschlag kommen können, wenn er vom Blitzeinschlag betroffen wird.

V. Beschreibung einiger typischer Gewitterstörungen.

a) Gewitterstörung der Gotthardleitung vom 10. Juli 1935, 0³⁵.

Blitzeinschlag in den 17. Mast oberhalb Lavorgo mit Ansprechen der Grobschutzfunkenstrecke am Leitungsende in Bodio.

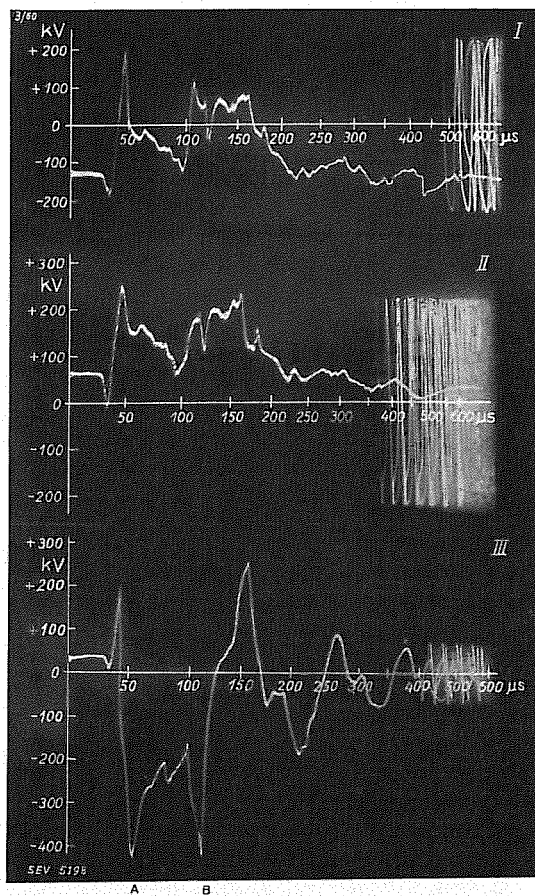


Fig. 19.

Oszillogramm zum Blitzstörungsfall a).

Mit I, II, III sind die Phasen des Drehstromnetzes bezeichnet.

Sowohl auf dem Mast Nr. 17 als auch am Leitungsende in Bodio wies die Lichtbogenarmatur der Phase III Brandspuren auf; überdies wurde der Ueberschlag in Bodio vom Personal des Unterwerks direkt beobachtet. Der 150 kV-Betrieb erlitt einen vorübergehenden Erdschluss, der ohne weitere Folgen blieb und wieder von selbst verschwand.

Die in Lavorgo zwischen den 3 Leitungsphasen und Erde gemessenen Ueberspannungen sind aus den Oszillogrammen Fig. 19 ersichtlich. Phase III zeigt in Lavorgo eine Ueberspannungswelle von der Amplitude 450 kV und der Halbwertdauer ca. $50 \mu s$.

Am Mast 17 war zum Ueberschlag der dortigen 6-gliedrigen Isolatorenkette aus Motorisolatoren eine Stoßspannung von ca. 1,1 Millionen Volt erforderlich (Schlagweite ca. 1,75 m).

Nach dem ersten Durchlauf der Ueberspannungswelle (Amplitude bei A) überlagert sich die aus Bodio zurückkehrende reflektierte Welle bei B, so dass eine zweite Spitze von wiederum ca. 450 kV entsteht. Diese bricht bei B infolge des in Bodio

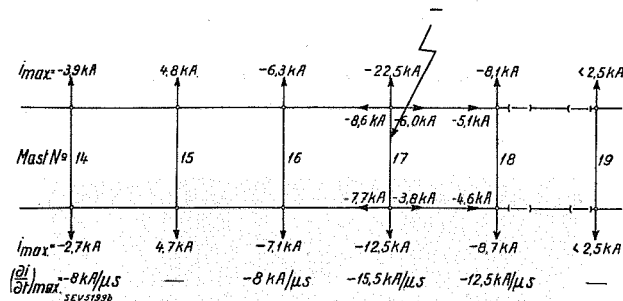


Fig. 20.

Blitzstromverteilung zum Störfall a).

Stromangaben in Kiloampere (kA).

Querpfleile: Ueber beide Mastseiten zur Masterdung abfließende Ströme.

Längspfeile: Ueber beide Erdseile abfließende Ströme.

erfolgten Ansprechens der Grobschutzfunkenstrecke plötzlich zusammen, so dass von dort an die reflektierte Welle am Rücken der direkten, abklingenden Welle gespiegelt wird. Das anschliessende Wellenspiel beweist das Vorkommen eines Leitungsüberschlages. Ausserdem lässt sich aus der Frequenz, bzw. Periode der anschliessenden Schwingung die Entfernung Bodio-Mast Nr. 17 bestimmen. Mit einer Wellengeschwindigkeit auf der Leitung gleich der Lichtgeschwindigkeit (300 000 km/s, bzw. 300 m/μs) ergibt sich eine Entfernung von 16 km. Da die wahre Entfernung 13,67 km beträgt, folgt eine mittlere Wellengeschwindigkeit der Erdschlusswelle von 255 m/μs. Der Leitungsschwanz Lavorgo-Bodio hat in diesem Fall zweifellos einen Ueberschlag im Werk Lavorgo verhindert. Die Messung der Blitzstromstärke mit Stahlstäbchen ergab folgendes Bild der Stromverteilung (Fig. 20). Die Strecke von Mast 15 bis Mast 18 ist mit einem durchgehenden Bodenseil («Gegengewicht») ausgerüstet. Der Erdungswiderstand von Mast 17 betrug beim Bau der Leitung, gemessen ohne Erdseile, aber mit Erdungsband von 176 m Länge, 2 Ω.

Die Erdseilanordnung ist identisch mit der, welche Fig. 1 zeigt. Dagegen waren zur Zeit des Einschlages beide Erdseile zwischen Mast 18 und 19 beim Mast 19 geöffnet (siehe Figur 20). Es konnte daher dort kein Strom von den Erdseilen zu höheren Mastnummern abfließen.

Die Steilheitsmesser zeigen einen Blitzeinschlag in Mast 17 oder in eine Leitungsphase in unmittelbarer Nähe von Mast 17. Die grösste Maststromsteilheit beträgt — 15,5 kA/μs, entsprechend dem raschen Anstieg der Entladung einer negativen Wolke über dem Mast. Der Maststrom von 35 kA benötigte somit zu diesem Anstieg mindestens 35/15,5 ~ 2,25 μs, schätzungsweise aber ungefähr

das Doppelte, da die gemessene Steilheit deren Maximalwert darstellt.

Wird der Blitzstrom aus der Summe der über Mast 17 und über die beiden Erdseile abfließenden Ströme berechnet, so folgt ein Scheitelwert von 61,1 kA. Dieser Wert stellt das Maximum der Strommessungen des Sommers 1935 dar. Dagegen war die maximale Stromsteilheit bei drei andern Einschlägen mit kleinerem Blitzstrom grösser. Die Amplitude der stromstarken Blitze scheint sich demnach nicht so rasch aufzubauen wie der Strom mittelstarker Blitze von 10...40 kA. Möglicherweise entstehen die extrem hohen Blitzströme im Gegensatz zu den mittleren durch Aufschaukeln des Stromes im Blitzkanal zwischen Erde und Wolke¹²⁾.

b) Gewitterstörung auf der Gotthardleitung vom 12. Juni 1935, 0⁴⁴.

An Mast Nr. 116 trat in Phase II ein Erdschluss von einigen Minuten Dauer auf, der infolge der günstigen Lichtbogenarmaturen ohne grosse Brand-

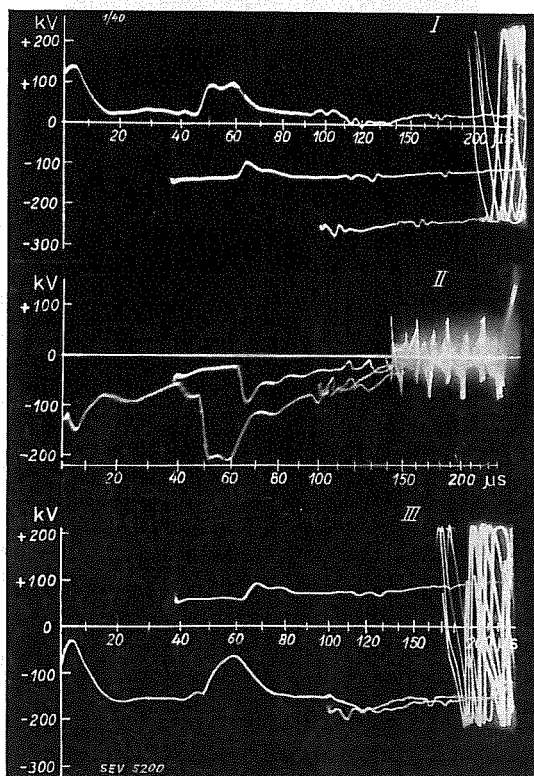


Fig. 21.

Oszillogramm zum Blitzstörungsfall b).

Mit I, II, III sind die Phasen des Drehstromnetzes bezeichnet.

spuren und für den 150 kV-Betrieb ohne Folgen blieb.

Die Oszillogramme der in Lavorgo gemessenen Ueberspannungen dieses Blitzeinschlages sind in Fig. 21 reproduziert. Auch in der von der Ueberspannung am meisten betroffenen Phase II ist in Lavorgo infolge der Dämpfung beim Durchlaufen

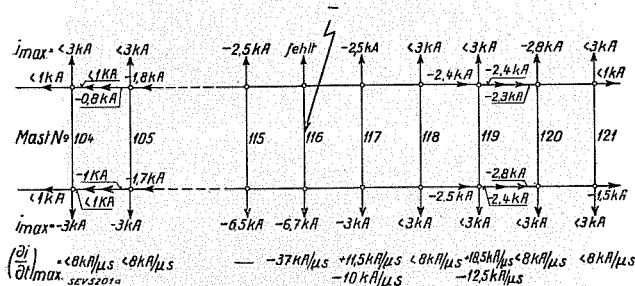
¹²⁾ K. Berger, CIGRE 1935, Rapport 350.

der 37,40 km langen Strecke nur noch eine Amplitude von ca. 150 kV bzw. 210 kV Summenspannung der direkten und der aus Bodio rücklaufenden Welle vorhanden.

Aus dem Oszillogramm der Phase II lässt sich mit dem dort gewählten Zeitmaßstab die Entfernung des Fehlers von Lavorgo gerade noch zu ca. 40 km abschätzen, sofern als Wellengeschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit ($300 \text{ m}/\mu\text{s}$) angenommen wird. Man sieht, dass die wahre Wellengeschwindigkeit wieder einige % kleiner ist.

Die Blitzstromverteilung auf den Masten und Erdseilen geht aus Fig. 22 hervor. Leider waren damals die Erdseile bei Mast 116 nicht mit Stäbchen versehen, so dass das Bild nicht so vollständig ist, wie erwünscht wäre.

Die Steilheitsmesser zeigen bei Mast 116 eine maximale Anstiegsgeschwindigkeit von $37 \text{ kA}/\mu\text{s}$, und zwar handelt es sich wieder um das Ansteigen eines Blitzstromes infolge der Entladung einer negativ geladenen Wolke. Dies ist die grösste im Sommer 1935 gemessene Stromsteilheit des Blitzstromes



Wie Fig. 20, aber zu Störfall b).

im Mast. Der Strom im Mast Nr. 116 von ca. 14 kA ist somit in einer Zeitspanne entstanden, die mindestens $14/37 \sim 0,4 \mu\text{s}$, wahrscheinlich ca. $1 \mu\text{s}$ betrug.

Die Messung des Masterdungswiderstandes ergab beim Bau der Leitung, ohne Erdseile gemessen, 14Ω (erreicht mit 51 m langer Banderdung).

Auch eine seitherige Erhöhung des Widerstandes auf das Doppelte (Austrocknung des Bodens) lässt einen Rücküberschlag der Isolatorenkette bei 14 kA ebensowenig wie im Beispiel a) erklären.

c) Gewitterstörung der Gotthardleitung vom 2. Juli 1935, 17⁰⁰.

Bei dieser Störung entstand sofort ein dreiphasiger Kurzschluss auf der Leitung.

Die Blitzstäbchen und Steilheitsmesser ergaben innert der Kontrollperiode zwei Blitzeinschläge, nämlich in Mast 126 und in die Spannweite zwischen den Masten 119 und 120 (Fig. 16).

Der letzte Einschlag soll als Beispiel eines Einschlages in Spannweiten angeführt werden (Fig. 23).

Vom Blitzeinschlag wurden in diesem Fall beide Erdseile in der Spannweite erfasst und vermutlich

auch die Phasenseile, weshalb es zum dreiphasigen Kurzschluss kam.

Die Steilheit des Blitzstromansteigens ist in beiden anliegenden Masten 119 und 120 sehr gross ($20,5$ bzw. $35 \text{ kA}/\mu\text{s}$). Dies macht den Kurzschluss in der 435 m langen Spannweite wahrscheinlich.

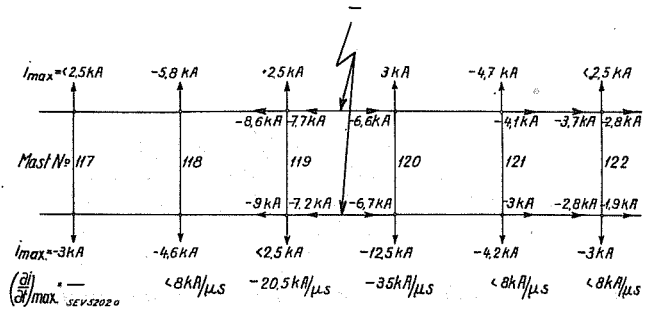


Fig. 23.

Wie Fig. 20, aber zu Störfall c).

Die Erdungswiderstände ohne Erdseile betrugen: für Mast Nr. 119: 10Ω (93 m Erdungsband), » » » 120: 15Ω (133 m Erdungsband).

Beide Masten stehen in einer dünnen Humusschicht auf Fels. Die gemessenen Maststromwerte würden bei diesen Widerständen nicht zu Rücküberschlägen an Mast 120 führen. Infolge des wahrscheinlichen Kurzschlusses in der Spannweite war der Blitzstrom vermutlich wesentlich grösser als der Summe der 4 über die Erdseile überfliessenden Ströme ($28,2 \text{ kA}$) entspricht, da auch die Phasenseile an der Stromabfuhr beteiligt waren. Infolge der schlechten Zugänglichkeit der Spannweite war eine direkte Seilkontrolle nicht möglich.

d) Gewitterüberspannung auf der in Bodio und auf dem Gotthard geerdeten Gotthardleitung vom 3. August 1934, 17¹³.

Als Beispiel einer relativ hohen induzierten Blitzüberspannung auf der in 8,2 und 38,9 km Ab-

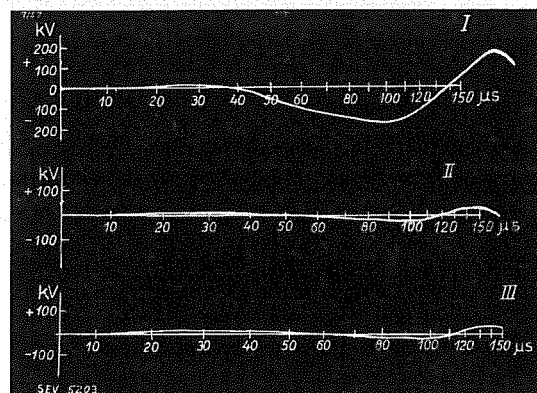


Fig. 24.

Oszillogramm zum Blitzstörfall d).

stand vom Messpunkt Lavorgo, nämlich in Bodio und am Mast Nr. 120 geerdeten Gotthardleitung sei Fig. 24 angeführt. Infolge eines zwischen beiden Erdungspunkten der Leitung befindlichen Gewitters

entstand auf der Phase I eine Welle von ca. 180 kV Höhe, die nach Rückkehr vom Erdungspunkt Bodio mit umgekehrtem Vorzeichen nochmals im Oszillogramm erscheint.

Auffallend ist der grosse Unterschied der Ueberspannungen der 3 Phasen. Vermutlich fand die Blitzeinwirkung längs eines Abhanges auf der Ostseite des Tales oder dann in der grossen Spannweite (1494 m) statt.

e) Gewitterstörung der 80 kV-Leitung «Süd» vom 12. Juni 1935, 2²⁵.

Während eines Gewitters mit Sturm entstanden auf der 80 kV-Leitung Süd wiederholt Erdschlüsse auf Phase I («grün»). Das Oszillogramm Fig. 25 zeigt, dass es sich dabei nicht um Blitzüberspannungen handelte, sondern um eine Wirkung des Sturmwindes auf das Erdseil. Das Oszillogramm wird hier angeführt, weil sich aus der ersichtlichen

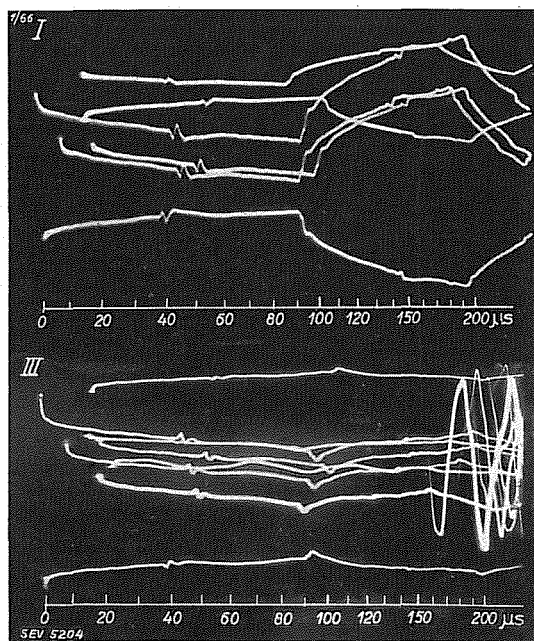


Fig. 25.
Oszillogramm zum Blitzstörfall e).

Wellenschwingungsperiode ohne weiteres die Entfernung des Fehlers vom Leitungsende Lavorgo ablesen lässt. Mit Annahme der Lichtgeschwindigkeit als Wellengeschwindigkeit folgt eine Entfernung von ca. $0,5 \times 93 \times 0,3 \sim 14$ km. Dort berührte vermutlich das Erdseil den Phasenleiter «grün», was jedesmal zur Aufzeichnung eines gleichen Oszillogrammes führte. Ein Betriebsunterbruch entstand dadurch nicht; die Erdschlüsse verschwanden jedesmal von selbst.

f) Gewitterstörung der 80 kV-Leitung «Süd» vom 24. September 1935, 6⁴⁵.

Bei einem heftigen Herbstgewitter zwischen Bellinzona und Locarno schlug der Blitz in die 50 kV-Holzstangenleitung Bodio-Reazzino, wobei er sechs Stangen (Nr. 650 bis 655) zum Teil von oben bis

unten ansplitterte. Trotzdem war an der Eintrittsstelle des Blitzstromes in den Boden nicht die geringste Spur festzustellen. Die beobachtete 80 kV-Leitung läuft mit der vom Blitz gestörten 50 kV-Leitung in einem Abstand von ca. 140 m parallel. Die Oszillogramme der in Lavorgo gemessenen Ueberspannungen am 80 kV-Leitungsende sind in Fig. 26 dargestellt.

Es ist zu erwähnen, dass der Zeitmaßstab für die folgenden Oszillogrammbeispiele anders ist, indem an Stelle der bisher üblichen raschen Hin- und langsamen Rückwärtsbewegung des Kathodenstrahls eine dauernde, sinusförmige

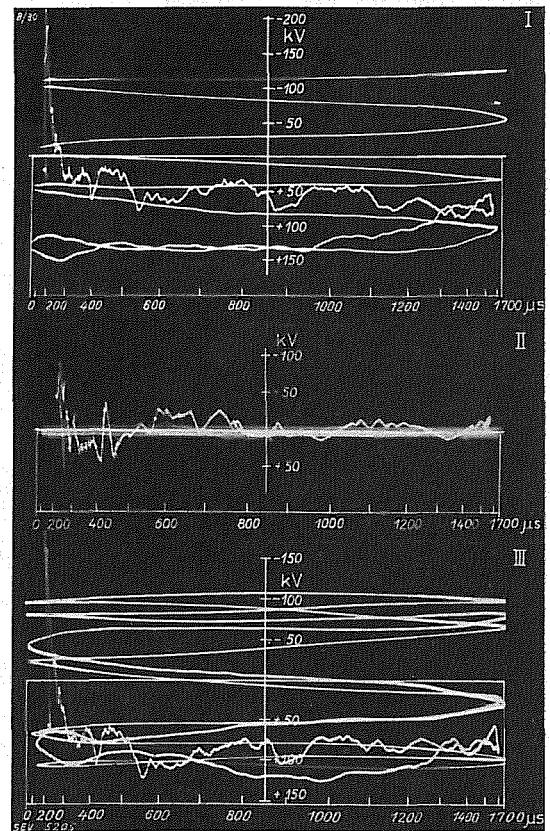


Fig. 26.
Oszillogramm zum Blitzstörfall f).

Hin- und Herbewegung mit einer Hilfsspannung der Frequenz 295 Per./s benützt wurde. Zur Erreichung der nötigen Unabhängigkeit vom beobachteten Netz wird diese durch einen besonderen Frequenzumformer erzeugt.

Der Zeitmaßstab von 1700 μs pro Hin- oder Rückwärtsbewegung des Strahls erscheint deshalb an beiden Enden der Zeitachsenstrecke gedrängt. Es ist so möglich, eine längere Zeitspanne auf ein Oszillogramm zu schreiben. Dies war erwünscht, um aus den Oszillogrammen auch das Ablesen grosser Fehlerentfernungen zu ermöglichen. Infolge des sehr angenäherten Verhältnisses 6 von Hilfsfrequenz zu Netzfrequenz wird in einer Periode der 50-Perioden-Spannung die Zeitachsenstrecke 6mal hin und zurück überschrieben. Nach ca. $\frac{1}{50}$ s sperrt der KO den Strahl wieder von der Aufnahmeschicht ab.

Aus Fig. 26 sind in den Phasen I und III («grün und blau») Ueberspannungsspitzen von 180 und 220 kV Höhe und ca. 20 μs Halbwertdauer ersichtlich. Die Phase II («rot») zeigt kleinere Ueberspannung,

mit sofortigem Erdschluss, der während der registrierten Periode der Netzfrequenz bestehen bleibt. Eine Betriebsunterbrechung ist durch diesen Erdschluss, der von selber wieder löscht, nicht entstanden. Aus der Periode der nur schwach ausgeprägten Schwingung von ca. $300 \mu\text{s}$ ergibt sich mit $300 \text{ m}/\mu\text{s}$ Wellengeschwindigkeit eine Entfernung des Erdschlusses von ca. 45 km . Die wahre Entfernung beträgt 42 km , entsprechend einer Wellengeschwindigkeit von ca. $280 \text{ m}/\mu\text{s}$.

g) Gewitterstörung der 80 kV -Leitung vom 26. August 1935, $18^{\text{h}00}$.

Bei einem allgemeinen Gewitter im Tessin entstand das Oszillogramm Fig. 27, das die Entstehung eines Erdschlusses auf Phase III («blau») infolge einer hohen, aber sehr kurzen Blitzüberspannung zeigt (Halbwertdauer ca. $5 \mu\text{s}$). Die beiden andern Phasen hatten nur unwesentliche Ueberspannung; vermutlich handelt es sich um einen direkten Einschlag in Phase III. Dessen Entfernung von Lavorgo ergibt sich aus der Entladeschwingung der

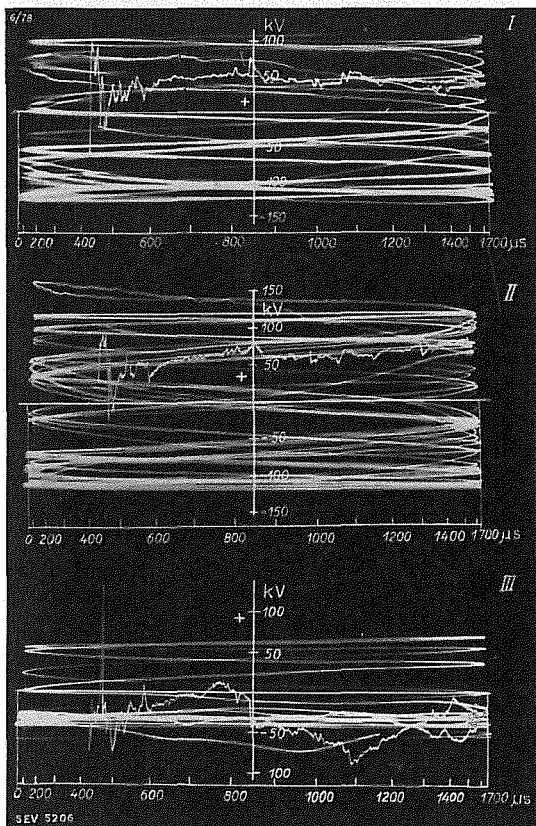


Fig. 27.
Oszillogramm zum Blitzstörfall g).

Phase III zu 48 km , bzw. ca. 44 km , je nach Annahme der Lichtgeschwindigkeit oder der in andern Fällen beobachteten wahren Erdschluss-Wellengeschwindigkeit. Die Erdschlußstelle lag dementsprechend bei Reazzino-Monte Ceneri.

h) Gewitterstörung der 80 kV -Leitung vom 18. Juli 1935, $18^{\text{h}04}$.

Bei einem Gewitter in der Gegend von Ponte Tresa und in Norditalien entstand ein Leitungskurzschluss, vermutlich nicht weit südlich der

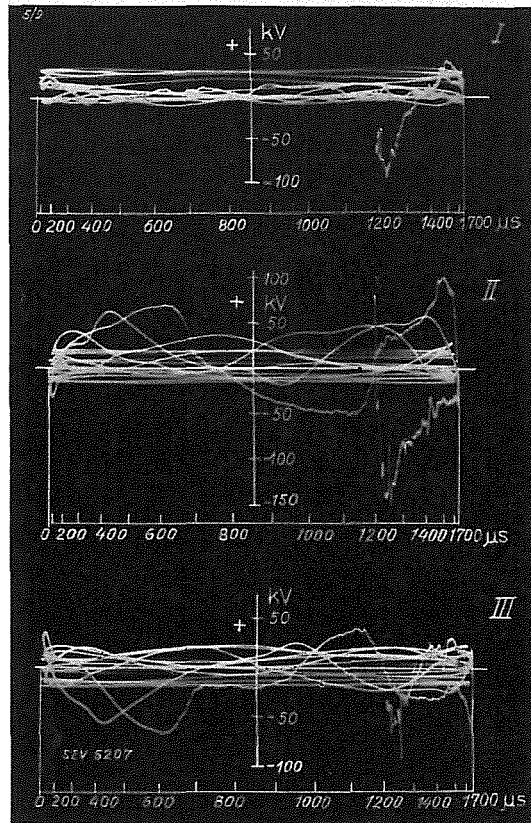


Fig. 28.
Oszillogramm zum Blitzstörfall h).

Grenze Schweiz-Italien. Die in Lavorgo gemessene Ueberspannung ist in Fig. 28 dargestellt. Die Ueberspannung ist infolge der grossen Entfernung des Fehlers nicht mehr hoch; ihre Halbwertdauer beträgt ca. $130 \mu\text{s}$. Aus der stark reduzierten Bandbreite des Oszillogramms ist die während des Kurzschlusses stark reduzierte Spannung der Phasen zu erkennen. Aus der Wellenschwingung, die besonders in Phase II deutlich in Erscheinung tritt, berechnet sich eine Fehlerentfernung von ca. 75 km .

i) Gewitterstörung der 80 kV -Leitung vom 4. August 1935, $8^{\text{h}19}$.

Bei einem heftigen Gewitter in der Gegend des Unterwerkes Veveri (Italien) entstand dort ein Kurzschluss mit Isolatorendefekten, der einen Betriebsunterbruch des 80 kV -Betriebes von $1\frac{1}{2}$ Stunden zur Folge hatte.

Die in Lavorgo gemessenen (reflektierten) Ueberspannungen sind in Fig. 29 gezeigt.

Die Ueberspannung erreicht in Phase III rund 5fache Phasenspannung oder 300 kV gegen Erde;

die Halbwertdauer der Ueberspannungen beträgt $130 \mu\text{s}$.

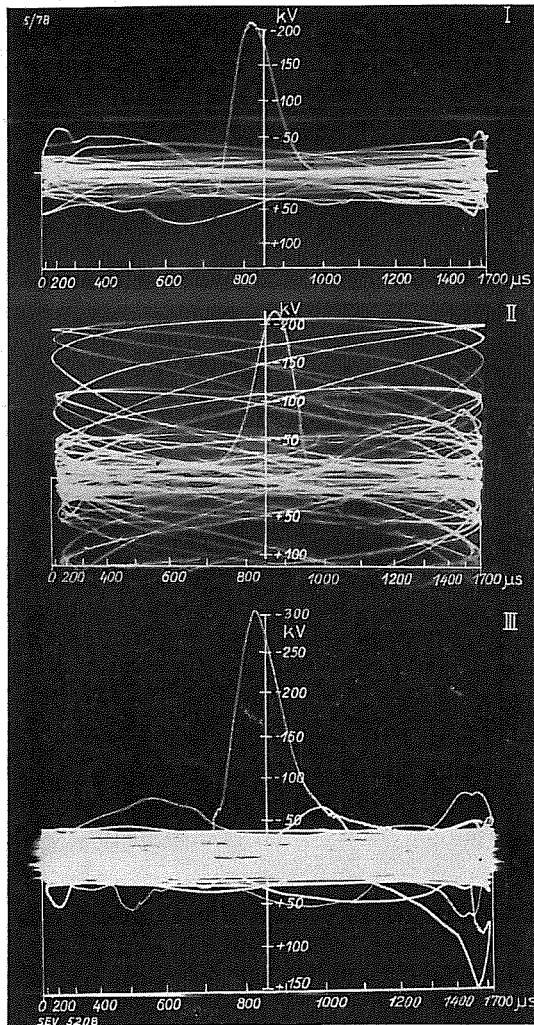


Fig. 29.
Oszillogramm zum Blitzstörfall i).

k) Gewitterüberspannungen, die nicht zu Betriebsstörungen führten, sind in den Fig. 30 bis 33 abgebildet.

Das erste Bild entstand am 4. August 1935 um 6²⁵ beim gleichen Gewitter wie im Fall i). Die übrigen drei Bilder wurden am 24. September 1935 bei einem starken Gewitter zwischen Bellinzona und Locarno aufgezeichnet, von welchem bereits bei Punkt f) die Rede war. Der Stosscharakter der Gewitterüberspannungen und der schwingende Verlauf der dadurch angestossenen Netzeigenschwingung kommt in allen Bildern zum Ausdruck.

l) Gewitterstörung hinter einem 150/50 kV-Transformator vom 24. August 1935, 3²⁷.

Ein letztes Oszillogramm-Beispiel (Fig. 34) soll zeigen, welcher Art die beim Abschalten eines Kurzschlusses hinter einem Transformator entstehenden Wellen auf der 150 kV-Leitung sind. Infolge eines

Gewitters hinter dem Transformator in Siebnen (Fig. 3) löste der 150 kV-Schalter in Rathausen aus.

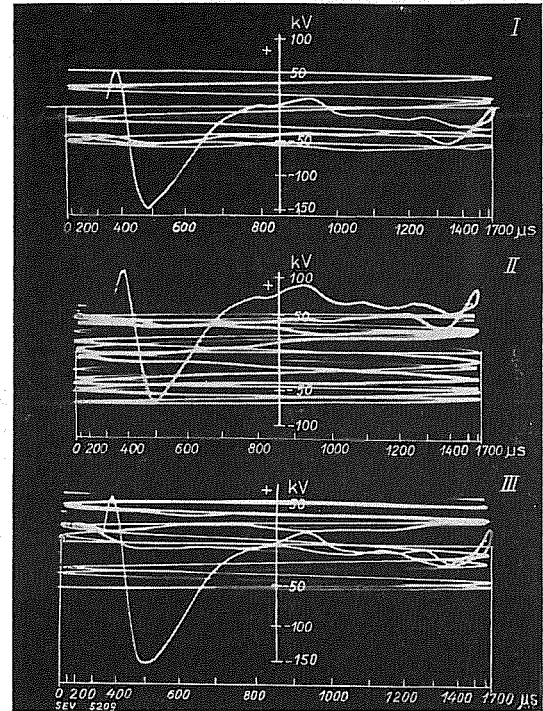


Fig. 30.
Erstes Oszillogrammbeispiel einer Blitz-Ueberspannung ohne anschliessende Betriebsstörung.

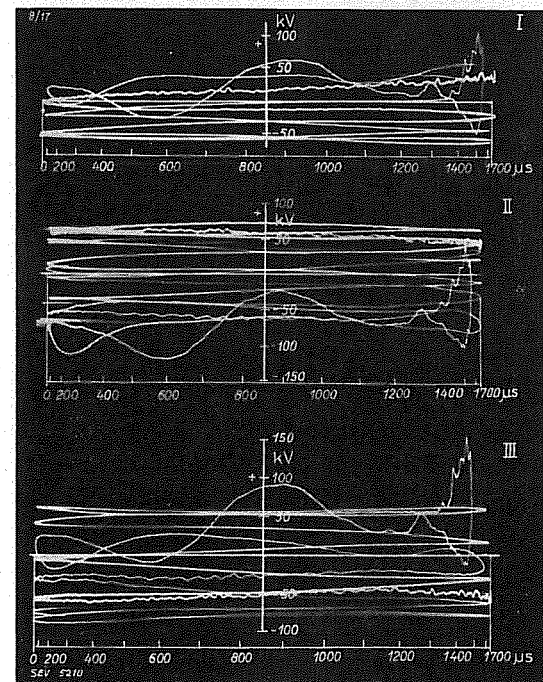


Fig. 31.
Zweites Oszillogrammbeispiel einer Blitz-Ueberspannung ohne anschliessende Betriebsstörung.

Das Bild zeigt, dass auf der Gotthardleitung Wellen entstehen, deren Dauer wesentlich grösser ist als

bei Gewitterüberspannungen; hingegen ist ihre Höhe unbedeutend. Im Verlauf der Abschaltung entsteht

eine ganze Menge Wellen, deren Einzelhöhe aber, in Lavorgo gemessen, nie die Sternspannung übersteigt.

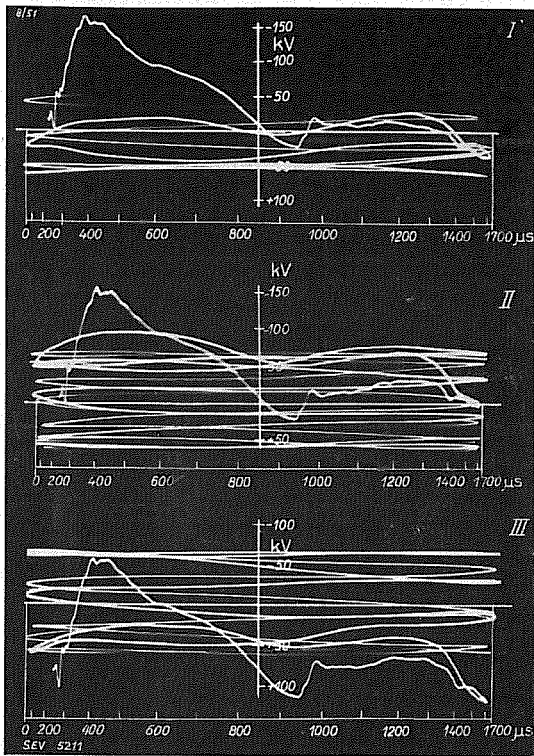


Fig. 32.

Drittes Oszillogrammbeispiel einer Blitz-Ueberspannung ohne anschliessende Betriebsstörung.

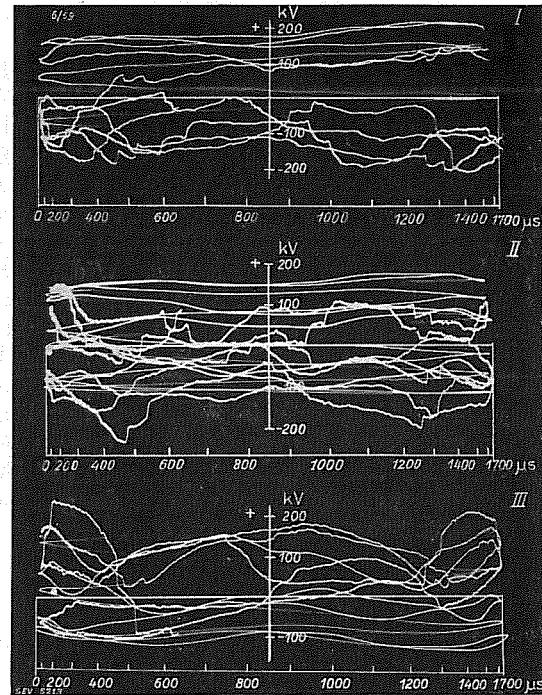


Fig. 34.

Oszillogramm der Schaltwellen beim Abschalten eines Kurzschlusses infolge Blitzschages hinter einem Transformator in Sieben.

VI. Folgerungen und Ausblick.

a) Masterdungen.

Berechnet man den Spannungsabfall, den der Blitzstrom in der Masterdung erzeugt, unter der Annahme, dass der bei Stoss wirksame Erdungswiderstand gleich gross sei wie der auf die übliche Weise mit Erdungsmessbrücken gemessene Wert, so hätte in keinem Fall der konstatierten Gewitterstörungen (Fälle *a*, *b*, *c*) ein Rücküberschlag stattfinden können. Scheiden wir Fall *c* aus, wo ein Einschlag vermutlich in die Spannweite erfolgte, so bleiben die Störungen an den Masten Nr. 17 und Nr. 116. Es müsste in diesen Fällen ein Einschlag in die mittlere Phase beim Abspannmast Nr. 116 und in eine äussere Phase beim Tragmast Nr. 17 stattgefunden haben.

Durch Anbringen von Stahlstäbchen, auch an den Phasen, oder auf der geerdeten Seite der Isolatorenketten, könnte diese Frage beantwortet werden. Der direkte Einschlag in Phasen scheint aber in beiden Fällen unwahrscheinlich, wenn man das Mastbild betrachtet. Demnach scheint es, dass die bei Stoss wirksamen Erdungswiderstände grösser sind als die auf die übliche Art gemessenen Werte. Zwei Gründe für eine Abweichung des bei Stoss wirksamen Wertes von jenem, der bei Niederfrequenz gemessen wird, sind vorhanden:

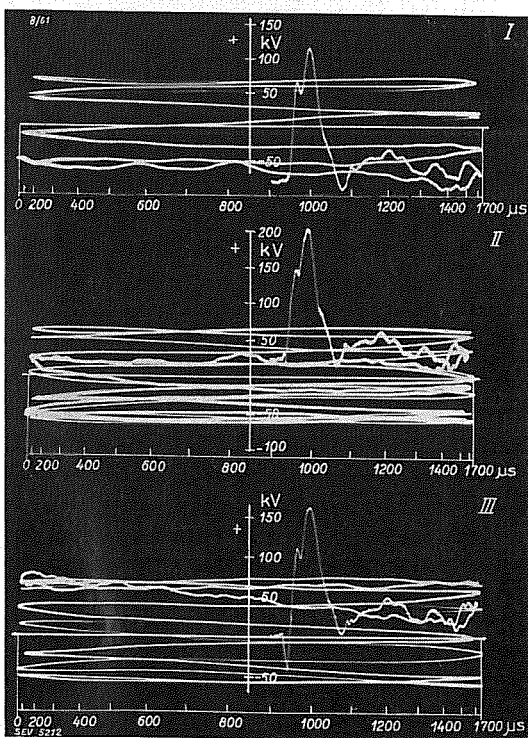


Fig. 33.

Viertes Oszillogrammbeispiel einer Blitz-Ueberspannung ohne anschliessende Betriebsstörung.

1. Die gemessene enorme Steilheit des Blitzstromanstieges im Mast und somit in der Erdung, welche eine Ausbildung der Masterdung nach Hochfrequenzgesichtspunkten bedingt¹³⁾.

2. Die Lage der Masten auf isolierendem Fels. Wenn nämlich auch eine relativ gute Verbindung des Mastfusses mit den in der Nähe liegenden leitenden Oberflächenschichten erreicht werden kann, so wäre es möglich, dass diese Oberflächenschichten selber keinen Zusammenhang mit weitabliegenden Humusschichten haben. Da der Fels selber annähernd als Isolator betrachtet werden muss, wäre so der Unterschied der mit Hilfssonden in 20 bis 40 m Entfernung vom Mast gemessenen Widerstände gegenüber den bei Blitz wirksamen erklärlich. Dann käme nämlich das ganze angeschlossene Mastfussgebiet unter Spannung gegenüber «Erde», infolge des weitabliegenden Seriewiderstandes zur Masterdung. Eine Abklärung dieser Frage der Masterdungen auf Fels wäre für Gebirgsleitungen sehr wünschenswert. Sie ist wohl nur dadurch möglich, dass die zu untersuchenden Masterdungen mit hohen Stoßströmen beschickt werden.

b) Bodenseil.

Der Ueberschlag (vermutlich Rücküberschlag) an Mast Nr. 17 entstand trotz des von Mast Nr. 15 bis Mast Nr. 18 verlegten Bodenseiles. Da die amerikanischen Erfahrungen mit Bodenseilen sehr günstig zu sein scheinen, sollte vorerst in allen Fällen von Störungen an Bodenseilstrecken zuverlässig festgestellt werden, ob ein Einschlag in Phasen oder Erdseile und Masten vorliegt.

Auf Grund der vorliegenden Steilheitsmessungen von Blitzströmen und Untersuchungen über den Schutzwert von Bodenseilen scheint es möglich, dass in vielen Fällen (z. B. Fall a) das Bodenseil eine wirksame Erdungsverbesserung darstellt. In den Fällen grosser Steilheit, z. B. 35 kA/ μ s, muss der Wert des Bodenseiles in einer andern Wirkung als in der Herabsetzung des Erdungswiderstandes liegen, evtl. in der Einschirmung der Leitung¹⁴⁾.

c) Stossbeanspruchung von Freileitungs-Isolatoren.

Die Steilheitsmessungen von Blitzströmen liefern durch Multiplikation mit dem wirksamen Erdungswiderstand ohne weiteres die ungefähre Steilheit des Spannungsanstieges an den Freileitungsisolatoren, wenn ein Blitz den Mast oder das Erdseil trifft.

Bei einer Stromsteilheit von 35 kA/ μ s und einem wirksamen Erdungswiderstand von 20 Ω steigt das Potential des Mastes mit einer grössten Anstiegeschwindigkeit (Steilheit) von 700 kV/ μ s. Da die an den Isolatorenketten auftretende Spannungsdifferenz infolge der kapazitiven Schutzwirkung des

oder der Erdseile 10...30 % kleiner ist, beträgt die grösste Steilheit der die Isolatoren beanspruchenden Spannung bei 20 Ω Erdungswiderstand ca. 500...600 kV/ μ s. Rechnet man mit dem vereinzelt Vorkommen doppelt so hoher Stromsteilheiten, so sind grösste Steilheiten von 1000 kV/ μ s bei Masterdungen mit 20 Ω wirksamem Widerstand möglich. Dieser Wert stellt die steilste Tangente an die Front der Stoßspannungskurven dar, weil die Steilheitsmesser stets dieses Maximum registrieren. Der Steilheitswert nach der Definition des CEI-Entwurfes für Stossprüfungen beträgt schätzungsweise die Hälfte dieses Maximalwertes. Somit ist die Beanspruchung bei Blitzeinschlag in Masten in erster Näherung durch eine Stossprüfung nach CEI mit einer Steilheit von ca. 500 kV/ μ s ersetzbar. Die grosse Stromsteilheit tritt, wie die Steilheitsmessungen deutlich zeigen, nur am blitzbetroffenen Mast auf. Schon die Nachbarmasten haben bereits wesentlich flachere Stromstösse zu erleiden. Für den genaueren Wert ist nicht nur eine noch grössere Zahl von Steilheitsregistrierungen, sondern auch eine genauere, nicht mehr quasistationäre Rechnung der elektromagnetischen Wechselwirkung des Maststromes auf das Leitungsseil nötig. Dabei sind ausser dem genauen ohmschen Spannungsabfall und ausser der kapazitiven Schirmwirkung der Erdseile auch magnetisch induzierte Spannungen möglich; eine einwandfreie Rechnung steht zur Zeit noch aus¹⁵⁾.

Für Blitzeinschläge in Leitungsseile von Eisenmastleitungen sind die Steilheiten der Isolatorenspannung noch grösser, indem sich dort die Spannungssteilheit aus der Blitzstromsteilheit und dem wirksamen Wellenwiderstand der Leitung errechnet. Es sind dann grösste Werte von etwa 5000 kV/ μ s möglich. Diese enormen Steilheiten lassen die explosionsartigen Zerstörungswirkungen, die gelegentlich an Freileitungsisolatoren beobachtet werden, verstehen.

d) Gebäude-Blitzschutz.

Die Kenntnis der Steilheit des Blitzstromes gibt die Möglichkeit, die Entfernungen zwischen Metallteilen von Gebäude-Blitzschutzanordnungen zu schätzen, die beim Blitzeinschlag in einen dieser Metallteile von Funken überschlagen werden.

Es seien z. B. zwei vertikale, parallele Ableitungen in einem Abstand von a Meter angenommen, die am Boden direkt metallisch verbunden sind. Schätzen wir den «Wellenwiderstand» eines vertikalen Leiters über Boden zu 200 Ω , so entsteht beim Blitzeinschlag eine Spannungswelle von der max. Steilheit von 40×200 kV/ μ s, d. h. von 8 Mill. Volt auf 300 m Leiterlänge, oder 800 kV auf eine Höhe des Blitzableiters über Boden von 30 m. Bis zur Rückkehr der Erdungswelle erreicht diese Span-

¹³⁾ F. Ollendorff, Erdströme, Verlag Springer, Berlin 1928.

¹⁴⁾ Siehe z. B. V. Aigner, Das Verhalten gestreckter Erder bei Stossbeanspruchung, ETZ 1933, S. 1233.

¹⁵⁾ Siehe V. Aigner, ETZ 1935, S. 497. Der Verfasser gibt eine Berechnung der magnetisch induzierten Spannungen auf Grund der Annahme periodischer Ströme.

nung an der Spitze des Blitzableiters $2 \times 800 = 1,6$ Mill. Volt. Ohne Rücksicht auf die elektromagnetische Kopplung beider vertikaler Blitzableiter würde somit ein Funke zwischen beiden auftreten, wenn ihre Distanz a weniger als ca. 2,5 m beträgt. Mit Berücksichtigung der Kopplung beider Blitzableiter sinkt diese Entfernung schätzungsweise auf $\frac{2}{3}$, d. h. ca. 1,7 m Abstand der Ableiterspitzen.

Für kleinere Höhe der Auffangspitzen über dem Boden sinkt die Funkenschlagweite ungefähr linear ab, so dass z. B. 10 m über dem Boden Ueberschlagsfunken zwischen Metallteilen möglich sind, wenn sie sich auf weniger als ca. 60 cm nähern. Voraussetzung ist dabei die metallische Verbindung der Metallteile am Boden (gemeinsame Erdung). Für durchwegs getrennte oder an verschiedene Erdungen angeschlossene Leiter kann diese Distanz naturgemäß viel grösser sein, indem dann in analoger Weise wie beim Rücküberschlag von Masten die Spannungsabfälle des Blitzstromes zwischen den Erdungen in Betracht kommen. Es ist daraus ersichtlich, dass durch die Verbindung aller Blitzableiterteile an ein und dieselbe Erdung (z. B. Wasserleitung) die Gefahr von Ueberschlägen zwischen oberirdischen Teilen der Schutzanlage weitgehend vermieden werden kann.

e) Stossform beim Blitzeinschlag.

Das in 5 km Abstand vom Blitzeinschlag an Mast Nr. 17 aufgenommene Oszillogramm Fig. 19 lässt in der vom Ueberschlag betroffenen Phase III eine Spannungskurve erkennen, die von der normalen Stossform abweicht. An Stelle der vom Nullwert der Ueberspannung anspringenden steilen Front ist nämlich zunächst ein Spannungssprung positiver Polarität von ca. halber Höhe mit anschliessendem negativem Stoss erkennbar. Woher diese erste Spitze stammt, ist nicht leicht einzusehen. Der negative Stoss hat eine Form, die sich von der von der CEI im Entwurf normalisierten Stossform $1/50 \mu s$ nur durch etwas flachere Front unterscheidet, ihr aber in der Dauer recht gut entspricht.

Es wäre interessant, noch mehr Bilder naher Blitzeinschläge in die Leitung oszillographieren zu können, um zu sehen, ob die gebrochene Front häufiger vorkommt, ob sie mit dem Rücküberschlag am Mast zusammenhängt, oder ob sie uns vielleicht noch genauere Einzelheiten vom Vorgang beim Blitzeinschlag anzeigen kann.

Vielleicht sind auch die in einem Fall zugleich gemessenen positiven und negativen Steilheitswerte des Blitzstromes im Mast ($+12,5 \text{ kA}/\mu s$, $-15,5 \text{ kA}/\mu s$) auf eine Einzelheit beim Blitzeinschlag zurückzuführen, nicht auf mehrere nacheinander folgende Blitzeinschläge.

f) Wellenfortpflanzung auf Leitungen.

Zwei Erscheinungen haben sich auch an der Gottshardleitung deutlich gezeigt: Die etwa 10 % unter

der Lichtgeschwindigkeit liegende Wellengeschwindigkeit der Erdschlusswellen, und die Bildung von Wellengruppen auf der Leitung bei Blitzeinschlägen. Besonders die Oszillogramme der Fälle a) und b) zeigen, wie mit der durch den Blitzeinschlag in eine Phase bedingten hohen negativen Spannungswelle stets weniger hohe positive Spannungswellen der beiden andern Phasen verbunden sind. Beim Anstossen einer Phase bilden sich mit dem Durchlaufen der Leitung infolge Aufteilung der elektrischen Ladung der Stossstelle und der Influenzwellen stets Wellengruppen¹⁶⁾. Die eine Gruppe wandert als symmetrische Welle mit Lichtgeschwindigkeit längs der Leitung (ein Seil negativ, die andern zwei mit halber positiver Spannung geladen). Die zweite Gruppe pflanzt sich mit etwas kleinerer Geschwindigkeit als Welle zwischen Leitung und Erde fort und verläuft so, wie wenn die Leiterseile parallelgeschaltet wären. Die theoretische Behandlung der zweiten Gruppe ist leider immer noch nicht auf dem Stand angelangt, der für die Erfassung des Vorganges nötig ist.

g) Ausblick.

Die Beobachtungen der atmosphärischen Ueberspannungen konnte in den Beobachtungsjahren 1934 und 1935 wesentlich erweitert werden. Es hat sich gezeigt, dass alle Störungen der 150 kV-Gottshardleitung ausschliesslich durch direkte Blitzeinschläge in die Leitung verursacht wurden. Sämtliche Ueberspannungen, die zu Ueberschlägen der 150 kV- und 80 kV-Leitung führten, sind negativer Polarität. Ihre Dauer ist sehr verschieden; sie schwankt zwischen ca. 10 und 120 μs Halbwertszeit.

Für die Abklärung der Schutzwirkung von Masterdungen und Bodenseilen scheint es für die Zukunft sehr wertvoll, festzustellen, ob jeweils ein Phasenseil oder ein Erdseil oder ein Mast vom Blitz getroffen wurde. Die Beantwortung dieser Frage scheint heute durch die Ausrüstung auch der Isolatorenketten, bzw. der Phasenleiter mit den Stahlstäbchen der Deutschen Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen möglich zu sein. Für die nähere Aufklärung der Beanspruchung von Freileitungsisolatoren und Masterdungen und zur Abklärung des noch nicht einwandfrei festgestellten Schutzwertes von Bodenseilen ist ferner die Ausdehnung der Steilheitsmessungen von Blitzströmen erwünscht. Nachdem relativ billige und einfache Messanordnungen für diese Zwecke erprobt sind, bieten diese Messungen keine prinzipiellen Schwierigkeiten mehr.

Sodann wird es Aufgabe der Zukunft sein, zu prüfen, wie weit Freileitungsisolatoren entsprechend den festgestellten Stoßsteilheiten bei Blitzeinschlägen geprüft werden sollen, und wie sich Masterdungen der verschiedensten Hochspannungsleitungen bei künstlichen Stromstössen dieser Steilheiten ver-

¹⁶⁾ L. V. Bewley, Traveling Waves on Transmission Lines, 1933.

halten. Eine fahrbare Stossanlage hoher Stossleistung ist erstes Erfordernis zur Lösung der zweiten Aufgabe.

Nur die einwandfreie Messung hat bisher erlaubt, Licht in die Blitzerscheinungen zu bringen, und nur sie wird in Verbindung mit der theoretischen Verarbeitung imstande sein, die noch schwebenden Fragen der genauen Einschlagslokalisierung und der Erdungen restlos aufzuklären.

Der Bericht soll nicht abgeschlossen werden, ohne der Betriebsleitung der Officine Elettriche Ticinesi und des Kraftwerks Piottino sowie dem Personal der beteiligten Werke und den Leitungswärtern der Gotthardleitung für ihre zuvorkommende und tatkräftige Unterstützung bei den Gewittermessungen herzlich zu danken. Ohne diese Mithilfe wären insbesondere die Blitzstrommessungen an den Masten kaum möglich gewesen.
