

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 38 (1947)

Heft: 25

Artikel: Gewitterforschung in Schweden : Entwicklung und neuere Resultate

Autor: Norinder, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061461>

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: 21.02.2026

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

BULLETIN

REDAKTION:

Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 • Telephon 23 77 44
Postcheckkonto VIII 8481

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

38. Jahrgang

Nr. 25

Samstag, 13. Dezember 1947

Gewitterforschung in Schweden

Entwicklung und neuere Resultate

Vortrag, gehalten vor dem SEV am 15. Oktober 1946 in Zürich,
von H. Norinder, Uppsala

551 594.2

Schon 1918 entstand in Schweden der Plan, sich mit Gewitterforschung abzugeben, der von der königlichen Wasserfalldirektion von Anfang an tatkräftig unterstützt wurde. Es galt zunächst, sich darüber schlüssig zu werden, wo man mit systematischen Untersuchungen zu beginnen hatte, und geeignete Messapparate zu finden. Nach einigen Versuchen mit den Lichtenbergschen Figuren entschloss man sich bereits 1919 zur Anwendung des Kathodenstrahl-Oszilloskopographen (KO), der aber aus der Braunschen Röhre erst noch entwickelt werden musste. Für die Stromstärkemessung entschloss sich der Verfasser zur Methode der magnetisierten Stahlstäbchen.

1931 beschloss der schwedische Reichstag, mit Hilfe der 1918 gegründeten Anderssonischen Stiftung ein Institut für Hochspannungsforschung zu errichten, das sich mit Blitzforschung abgeben sollte, und das der Universität Uppsala angeschlossen wurde. Der Verfasser als Leiter dieses Institutes berichtet über Forschungsaufgaben und bis 1946 erreichte Ergebnisse auf dem Gebiet der Gewitterforschung.

En Suède, l'étude systématique des orages débuta en 1918, avec l'appui de la Direction Royale des chutes d'eau. Il s'agissait tout d'abord de savoir où ces études devaient commencer et de mettre au point des appareils de mesure appropriés. Après quelques essais à l'aide de figures de Lichtenberg, on se décida, dès 1919, à utiliser l'oscillographie à rayons cathodiques, qu'il s'agissait toutefois de développer en partant du tube de Braun. Pour la mesure de l'intensité du courant, l'auteur adopta la méthode des barreaux d'acier aimantés.

En 1931, le Reichstag suédois décida de créer, avec l'appui de la Fondation Andersson (organisée en 1918), un Institut de la haute tension, chargé d'entreprendre des recherches sur la foudre et rattaché à l'Université d'Uppsala. M. Norinder, directeur de cet institut, indique quelles furent les tâches fixées et les résultats obtenus jusqu'en 1946 dans le domaine de l'étude des orages.

Beginn der Gewitterforschung in Schweden

Schweden ist ein nördlich gelegenes Land mit verhältnismässig wenig Gewittern im Vergleich beispielsweise zu Ländern in Mitteleuropa. Es ist deshalb bemerkenswert, dass trotzdem die Blitzforschung in Schweden einen verhältnismässig grossen Umfang angenommen hat. Dies ist vor allem zwei Umständen zu verdanken. Der erste besteht im Interesse, welches die Königliche Wasserfalldirektion schon von Anfang an dieser Forschung entgegenbrachte. Als ich mich im Jahre 1918 an den damaligen Oberingenieur, nun Generaldirektor Waldemar Borgquist mit der Frage wandte, ob die Königliche Wasserfalldirektion Blitzforschungen unterstützen würde, bekam ich sofort eine zugesagende Antwort. Man begegnete damals in der Erforschung der Gewitterstörungen grossen Schwierigkeiten. Dies ist verständlich, wenn man bedenkt, wie wenig man eigentlich von der Elektrophysik des Gewitters um das Jahr 1918 herum wusste.

Es war eigentlich, dass nur einen Monat nach meiner Abmachung über Gewitterforschung ein anderes Ereignis eintrat, welches, wie sich später zeigte, in höchstem Grade die Gewitterforschung in Schweden befruchten sollte. B. John F. Andersson und seine Ehefrau schenkten im Mai 1918 der Universität Uppsala eine Geldsumme, die

sich z. Z. auf etwa eine Million Kronen beläuft. Nach den Bestimmungen sollten die Mittel für eine Professur für Elektrizitätslehre verwendet werden, mit dem besonderen Zweck der Blitzforschung und deren praktischen Folgen. Das Ziel sollte sein, durch Forschung die Voraussetzungen für einen wirksamen Blitzschutz zu schaffen. Diese grosse Schenkung, bemerkenswert in ihrer Art, konnte sich jedoch, wie man noch sehen wird, jahrelang nicht auswirken. In dieser Zeit schritten die von der Königlichen Wasserfalldirektion unterstützten Forschungen vorwärts. Als diese Forschungsarbeiten im Jahre 1918 begannen, fehlte es sozusagen an allen Ausgangspunkten für Blitzforschung. Es sei nur an die Erklärung von Steinmetz erinnert, der Blitz sei eine hochfrequente oszillatatorische Entladung von einer Frequenz von 6 MHz. Die physikalischen Grundlagen waren so unsicher, dass eine derartige Meinung ernsthaft vertreten werden konnte.

Zunächst richteten sich unsere Untersuchungen auf das Verhalten des elektrischen Feldes in Gewitterwolken. Ausser dem allgemeinen Verlauf der Feldstärke galt es zu untersuchen, ein wie grosser Teil der Wolkenladung sich in eine Blitzenladung umsetzte. Rückblickend mögen diese Fragen für jemanden, der die Elektrophysik des Gewitters er-

forscht, ziemlich unwesentlich erscheinen; 1920 spielte die elektrostatische Auffassung jedoch eine grosse Rolle, nicht zuletzt im Hinblick auf die Entstehung indirekter Gewitterüberspannungen, eine Frage, auf die ich später zurückkomme.

Es dauerte indessen nicht lange, so fanden wir es nötig, die Untersuchungen auf die von den Blitzentladungen verursachten raschen Feldänderungen im elektrostatischen Feld der Wolke auszudehnen. Denn diese Art von Feldänderungen musste bestimmenden Einfluss auf die Entstehung grosser Gruppen von Ueberspannungen auf den Leitungen haben.

Entwicklung und Konstruktion von geeigneten Messapparaten

Zweifellos konnte man die behauptete hochfrequente Entladung im Blitz von einer Frequenz von 6 MHz als höchst unwahrscheinlich ansehen, aber soviel wusste man auch, dass das Messgerät, welches in Betracht kommen konnte, einzig auf zwei verschiedenen Erscheinungen beruhen konnte: entweder auf den Lichtenbergschen Figuren, die später zur Konstruktion des Klydonographen führten, oder den Kathodenstrahlen. Nach einigen Voruntersuchungen mit Lichtenbergschen Figuren verliessen wir diese Messmethode bereits 1919. Wir beschlossen, an ihrer Stelle Kathodenstrahl-Oszillographen anzuwenden. Damals gab es erst ein verwendbares Instrument, die nach ihrem Erfinder, dem Nobelpreisträger *Braun*, genannte Braunsche Röhre.

Bei den ersten Untersuchungen mit Kathodenstrahl-Oszillographen galt es, die vom Blitz verursachten Feldänderungen in der Umgebung der Blitzbahn zu studieren. Die grössere und hauptsächliche Frage, nämlich die Untersuchung von Ueberspannungen auf Starkstromleitungen, schoben wir etwas auf, bis wir über hiefür passende Oszillographen verfügten.

Die ersten oszillographischen Untersuchungen über die Blitzentladung zeigten bald, dass keinerlei hochfrequente Entladungen, sondern aufeinander folgende elektromagnetische Impulse vorlagen [1]¹⁾. Sie waren ausgesprochen aperiodisch oder halbperiodisch. Das allgemeine Ergebnis war: Der Blitz ist eine aperiodische Entladung, in der zeitlich aufeinander folgende Einzelentladungen nacheinander die Atmosphäre durchdringen. Als diese Erkenntnis damals veröffentlicht wurde, erweckte sie grosses Aufsehen, und in den USA wurde ich scharfer Kritik unterzogen. Aber es zeigte sich später, dass alle Ergebnisse bestätigt wurden.

Die vom elektrotechnischen Gesichtspunkt aus bedeutendste Forschungsaufgabe, durch Messungen die von Blitzen hervorgerufenen Ueberspannungen auf Starkstromleitungen zu erforschen, drängte immer mehr. Ich wollte mit Hilfe neuer Untersuchungsmethoden tiefer in die Elektrophysik der Blitzentladungen eindringen. Hier entstand allerdings eine gewisse Gegensätzlichkeit zwischen

Grundlagenforschung und Zweckforschung. Die Blitzforschung, die ich betrieb, wurde von einem Unternehmen der Wirtschaft unterstützt, und für dieses ging es in erster Linie darum, für den Betrieb wertvolle Ergebnisse zu erhalten. Dazu musste man in erster Linie das Studium von Ueberspannungen auf Starkstromleitungen rechnen, das den Angelpunkt für die Konstruktion eines wirksamen Schutzes gegen Ueberspannungen bildet.

Konstruktion eines geeigneten Kathodenstrahl-Oszillographen. Die ersten Oszillogramme einer Blitzüberspannung auf einer Fernübertragungsleitung

Nun galt es, das geeignete Messinstrument zu finden. Unsere Aufmerksamkeit richtete sich von Anfang an auf die Neukonstruktion des Kathodenstrahl-Oszillographen des Franzosen *A. Dufour*. Er hatte den photographischen Film in das Vakuum eingeführt und dadurch die Registriergeschwindigkeit auf die Grössenordnung gebracht, die erforderlich schien, um eine Analyse der Ueberspannungen auf Starkstromleitungen zu ermöglichen.

Bei einem persönlichen Besuch in Paris im Jahre 1921 versuchte ich, Dufour zu überzeugen, dass sein Oszillograph die grösste Bedeutung für die Elektrotechnik erlangen und dort ganz neue Wege der Forschung eröffnen könnte. Dufour hatte jedoch nur wenig Interesse für die praktischen Anwendungen übrig, die ich andeutete; er konnte nicht einmal einen geschickten Mechaniker zur Herstellung seines Instrumentes nennen. Er hatte seine Anordnung eigenhändig aufgebaut, ein typischer Beweis für die geringe Unterstützung, die eine so grosse Forschungsleistung seinerzeit erhielt.

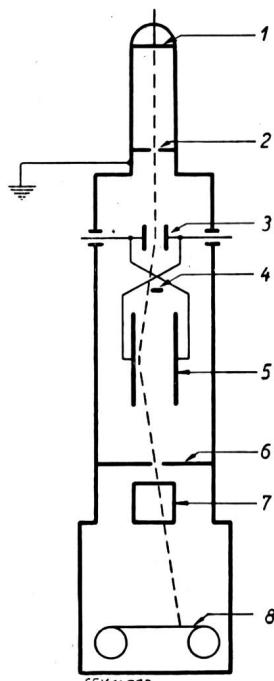


Fig. 1
Vom Verfasser entwickelte
Schaltung des Kathodenstrahl-
Oszillographen für 40 kV
Gleichspannung

- 1 Kathode
- 2 Anodenöffnung
- 3 Ablenkplatten
- 4 Sperrelektrode
- 5 Ablenkplatten
- 6 Schirmplatte
- 7 Zeitkreisplatte
- 8 Film

Es war also nötig, einen Kathodenstrahl-Oszillographen zu entwickeln, der für die Untersuchung auf Starkstromleitungen verwendet werden konnte.

¹⁾ siehe Literaturverzeichnis am Schluss.

Dabei verfolgten wir einen Weg, bei dem die Freigabe des Elektronenstrahles nach Art und Wirkungsweise eines Relais ausgebildet war [2]. Die Schaltung der Absperr- und Kopplungskreise im Kathodenstrahl-Oszillographen geht aus Fig. 1 hervor. Es war uns vergönnt, mit diesem Instrument im Jahre 1925 das erste Oszillogramm von Blitzüberspannungen auf einer Freileitung der der Wasserfalldirektion gehörenden Versuchsstation bei Uppsala aufzunehmen [3]. Die Messungen erfolgten auf einer im Betrieb befindlichen 20-kV-Leitung. Diese ersten Oszillogramme von 1925 sind in Fig. 2 etwas verstärkt gegenüber den

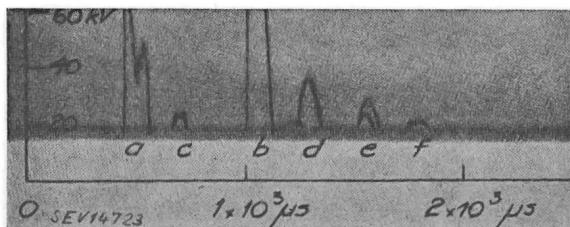


Fig. 2
Erste Ueberspannungoszilloscopie (1925) von einer unter Spannung stehenden Fernübertragungsleitung
(Erklärung im Text)

Originalen wiedergegeben. Man sieht zwei typische primäre Ueberspannungen bei *a* und *b* mit sehr steilen Fronten und typische, gedämpfte Reflexionen bei *c*, *d*, *e* und *f*. Die Gesamtdauer der primären Ueberspannungen lag nicht viel über 100 μ s. Weitere Ueberspannungen nahm man in den nächsten Jahren auf. Die Ergebnisse wurden in den folgenden Jahren an verschiedenen Stellen und zusammenfassend im Januar 1928 der Winterkonferenz der «American Institution of Electrical Engineers» vorgelegt [4].

Untersuchungen von Ueberspannungen in der Schweiz und in den Vereinigten Staaten von Amerika

Zu dieser Zeit waren indessen die Forschungen auf demselben Gebiet auch von anderer Seite vorwärts getrieben worden; ich erinnere an die wertvollen und umfassenden Messungen, die hier in der Schweiz von *K. Berger* [5] ausgeführt wurden, welche, soviel ich weiss, in Europa die einzigen Untersuchungen von atmosphärischen Ueberspannungen auf Freileitungen ausser den schwedischen, die zu positiven Ergebnissen führten, darstellen.

Mit dem Unternehmungsgeist, der die USA kennzeichnet, zögerte man dort nicht, Untersuchungen [6...12] grossen Umfangs in den Jahren 1929 bis 1930 in Gang zu setzen. Man hatte allen Grund zu der Hoffnung, durch die amerikanischen Untersuchungen ein vollkommen zuverlässiges und umfassendes Spektrum über die Struktur der Ueberspannung zu erhalten. Die Wirtschaftskrise der dreissiger Jahre, die mit grosser Heftigkeit in den USA ausbrach, brachte es jedoch mit sich, dass die seinerzeit so vielversprechende Forschungsarbeit abgebrochen wurde. Die grossen elekrotechnischen Firmen hörten plötzlich mit der Arbeit in den Versuchsstationen auf.

Stromstärkemessungen des Blitzes mit Stahlstäbchen

Zu dieser Zeit tauchte eine Ansicht unter den Ueberspannungs-Fachleuten sowohl in Europa, als auch vor allem in den USA auf, die sich immer mehr durchsetzte. Danach hatten die gefährlichen Blitzüberspannungen in den Anlagen ihre Ursache in direkten Blitz einschlägen in die Leitungen. Infolgedessen fing man allmählich an, die Aufmerksamkeit auf Messungen mit Stahlstäbchen zu konzentrieren, mit denen man die Stromstärken bei Blitz einschlägen in Masten, Erdleitungen und Erdseilen der Starkstromleitungen feststellt.

Man ging auf dem eingeschlagenen Weg in den USA weiter. Die «General Electric Company» baute eine Meßstation mit Oszillographen für die Analyse des zeitlichen Verlaufs der Blitzstromstärke bei Einschlägen in das Empire State Building [13, 14]. Die für solche Messungen nötige Messmethode wurde weiter entwickelt, und die «Westinghouse Electric and Manufacturing Company» führte u. a. schnell rotierende Magnetstäbchen ein, sogenannte Fulkronographen, die in die Erdleitungen von hohen Gebäuden eingebaut wurden (beispielsweise in der Cathedral of Learning der Universität Pittsburgh [15]), in Schornsteine, Brandtürme, Hochspannungsmasten und dergleichen.

Die Analyse des zeitlichen Verlaufs von Blitzüberspannungen auf Freileitungen kam anderseits nicht vorwärts. Diesen Umstand muss man beklagen. In Anbetracht der grossen Zahl von Ueberspannungsschutzvorrichtungen, die man in den Anlagen verwendet und die bei Gewitter oft unerklärlichen Schaden nehmen, muss man es immer noch als einen recht grossen Mangel ansehen, dass wir keine bessere Kenntnis vom zeitlichen Verlauf der Ueberspannungen besitzen.

Ich habe versucht, diese allgemein gehaltene Skizze der Entwicklung vorzutragen, besonders weil sie in hohem Grade auf gewisse Teile des Programms der schwedischen Blitzforschung eingewirkt hat.

Errichtung eines Instituts für Hochspannungsforschung in Schweden

Die Blitzforschung wurde im Jahre 1931 kräftig gefördert, als der schwedische Reichstag beschloss, mit Hilfe der bereits genannten Schenkung für Blitzforschung ein besonderes Institut für Blitzforschung mit dem offiziellen Namen «Institut für Hochspannungsforschung» zu errichten.

Das Institut wurde der Universität zu Uppsala angeschlossen. Gleichzeitig wurde eine besondere Professur für Elektrizitätslehre geschaffen. Um das praktische Interesse am Blitzschutz, welches der Donator wünschte, zu wahren, wurde etwas später dem Institut eine besondere Abteilung für Projektierung und Kontrolle von Gebäude-Blitzableitern angeschlossen.

Das ältere, von mir geleitete Versuchslaboratorium der Königlichen Wasserfalldirektion wurde mit allen Experimentier-Ausrüstungen dem neuen

Institut überlassen. Diese Lösung war besonders vorteilhaft im Hinblick auf eine Fortführung eines kontinuierlichen Forschungsprogramms.

Ein Forschungsunternehmen mit besonderer Richtung auf die Blitzforschung musste sowohl mit einer festen Ausrüstung in Form eines Hochspan-

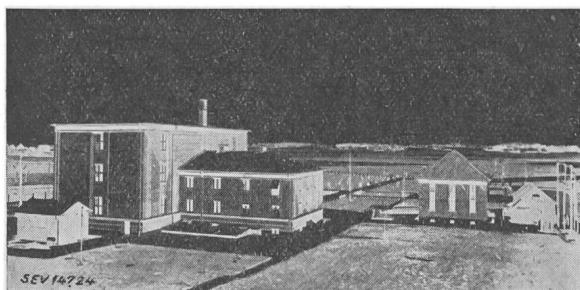


Fig. 3
Institut für Hochspannungsforschung der Universität Uppsala

nungslaboratoriums, als auch mit einer beweglichen Ausrüstung in Form von Feldstationen versehen sein. Einige Bilder geben einen Begriff von der Entwicklung. In Fig. 3 sieht man das gegenwärtige Institut für Hochspannungsforschung. Der Hochspannungsraum des Instituts hat folgende

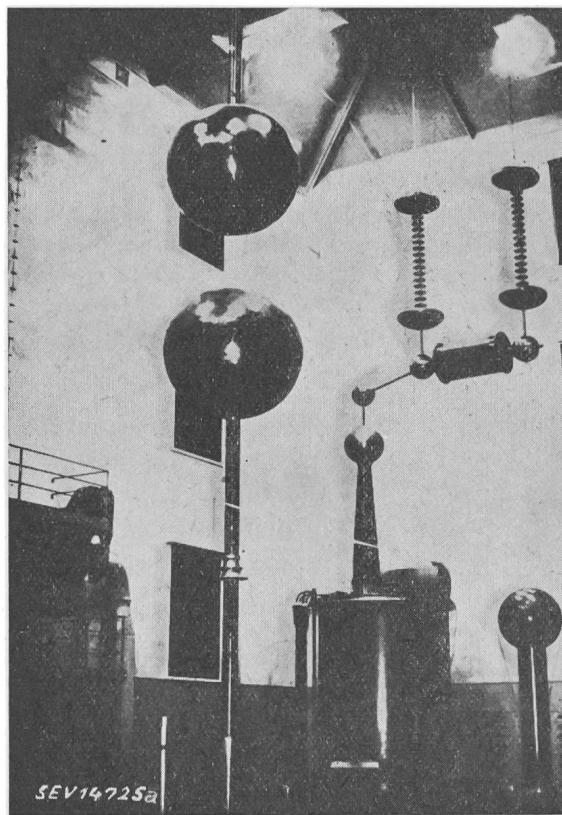


Fig. 4
Kugelfunkenstrecke mit Kugeln von 1,5 m Durchmesser und Hochspannungstransformator von 500 kV

Abmessungen: Länge 32 m, Breite 16 m, Höhe 18 m. Ein Teil der Ausrüstung zeigt Fig. 4. Zu den äusseren Anlagen des Instituts gehörte bis zum Kriegsausbruch eine 15 km lange Versuchsleitung,

die für 1 MV Impulsspannung gebaut war. Während des Krieges wurde dort ein Flugfeld angelegt, und so musste die Versuchsleitung abgebrochen werden. Die Frage der Wiedererstellung wird zur Zeit geprüft.

In den beweglichen Ausrüstungen spielt der Kathodenstrahl-Oszilloskop die wichtigste Rolle. Das Institut verfügt über 13 Oszilloscopes, von denen 2 in der Regel im Hochspannungsraum und 11 in den beweglichen Feldstationen verwendet werden. Alle Oszilloscopes eigener Konstruktion wurden samt den Hilfsaggregaten, bestehend aus Hoch- und Niedervakuumpumpen, Hochfrequenzkreisen, Verstärkern und Hochspannungsaggregaten, ausnahmslos in der Werkstatt des Instituts gebaut. Die Konstruktion der Kathodenstrahl-Oszilloscopes hat sich während nahezu zwanzig Jahren ohne wesentliche Änderungen bewährt. In den letzten Jahren sind einige Verbesserungen eingeführt worden, die eine kontinuierliche Expositionsduer für Messungen beispielsweise von Überspannungen während 30...40 Stunden ohne Neubestückung mit photographischem Papier oder Zwischenabzug erlauben.

Es verdient vielleicht erwähnt zu werden, dass eine grössere Zahl von Oszilloscopes derselben Konstruktion, die von der Westinghouse Co. hergestellt wurden, in der amerikanischen Hochspan-

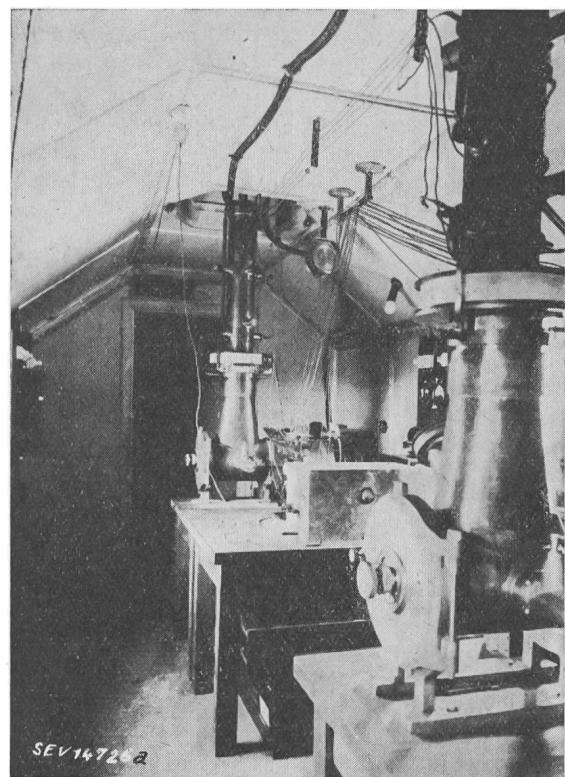


Fig. 5
Kathodenstrahl-Oszilloscopen mit Hilfsgeräten in beweglicher Feldstation

nungsforschung verwendet werden, allerdings wahrscheinlich nicht für Feldstationsarbeiten.

Das Institut besitzt 6 bewegliche Feldstationen, von denen 2 auf gewöhnlichen Chassis von Last-

automobilen montiert sind. In Fig. 5 ist das Innere einer solchen beweglichen Station mit aufgestellten Kathodenstrahl-Oszillographen und Hilfsgeräten wiedergegeben. Eine Erweiterung der beweglichen Feldstationen wird z. Z. vorgenommen. Ihren Energiebedarf erhalten die Stationen aus Niederspannungsnetzen. Es hat sich jedoch als nötig erwiesen, sie bei Gewittern mit dreiphasigen Notstromaggregaten von 5...10 kW Leistung betreiben zu können. Ein Beispiel von der Aufstellung beweglicher Sta-

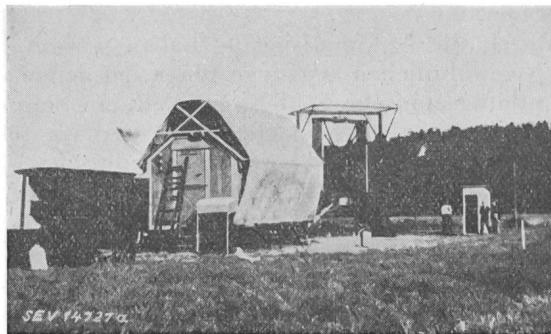


Fig. 6
Feldstation mit Rahmenantennen und Peilvorrichtung
für die Ortsbestimmung von Gewitterherden,
aufgestellt in Südschweden

tionen unter feldmässigen Verhältnissen ist in Fig. 6 wiedergegeben. Die Königlich Schwedische Eisenbahnverwaltung hat auch einen Eisenbahnwagen zur Verfügung des Instituts gestellt. Dieser Wagen ist als bewegliches Laboratorium eingerichtet.

Untersuchungen der Feldvariationsformen der Blitzentladungen in grösseren Abständen von Gewitterherden — die atmosphärischen Rundfunkstörungen — benötigen feste Feldstationen, aufgestellt an einem Ort, wo die Störungen durch Hochspannungsleitungen nur noch schwach sind. Das Institut verfügt über eine derartige Station, welche sich ungefähr in einem Abstand von 13 km vom Institut befindet.

Für Impulsprüfungen auf Hochspannungsleitungen und Stationen unter natürlichen Verhältnissen hat das Institut die Möglichkeit, einen der Königlichen Wasserfalldirektion gehörenden beweglichen Impulsgenerator von 1 MV Spannung für Normalimpulse zeitweise zu benutzen.

Eine Studienkommission für Blitz- und Ueberspannungsforschung in Schweden

Selbstverständlich verursacht eine umfassende Forschungsarbeit grosse Ansprüche an die Mittel des Instituts und an allgemeine Unterstützung. Eine gewisse Hilfe war in dieser Beziehung eine von der schwedischen Akademie der Ingenieur-Wissenschaften seit einigen Jahren ins Leben gerufene Studienkommission für Blitz- und Ueberspannungsforschung. Die Kommission ist mit ihren Fachmitgliedern in verschiedene Sektionen aufgeteilt, nämlich:

1. meteorologische Blitzforschung,
2. physikalische Blitzforschung,

3. Erforschung von atmosphärischen Ueberspannungen auf Hochspannungsleitungen,
4. Erforschung von atmosphärischen Ueberspannungen auf Niederspannungs-, Fernmelde- und Bahnleitungen,
5. Gewitterschutz für Sprengstoff-Fabriken.

Das Institut ist in allen Kommissionen vertreten. Diese Organisation ist ein Bindeglied zwischen Institut, staatlichen Unternehmen, privaten Kraftwerken und der schwedischen Industrie.

Forschungsaufgaben für Gewitterüberspannungen in Schweden

Eine der ersten Forschungsaufgaben des Instituts, viele Jahre vor der Entstehung der Studienkommission, war, das Vorkommen indirekter Ueberspannungen, deren Höhe und zeitlichen Verlauf zu untersuchen. Hiezu verwendeten wir die bereits erwähnte Versuchsleitung. Gleichzeitig mit den Untersuchungen wurden Beobachtungen über die Lage der Blitzbahnen, ihr Verhalten zur Versuchsleitung sowie die zeitliche Aenderung des Blitzstromes nach Methoden ausgeführt, über die ich später berichten will. Die Resultate sind in zwei Aufsätzen in den CIGRE-Berichten veröffentlicht worden [16, 17].

Eine andere wichtige Forschungsaufgabe war die Untersuchung der Erdwiderstände bei Impulsströmen mit hohen Stromstärken. Die Ergebnisse, wonach man mit weit niedrigeren Werten rechnen konnte als denjenigen, die sich durch die üblichen Messmethoden mit Brücken ergaben, wurden seinerzeit in den CIGRE-Berichten veröffentlicht [18]. Untersuchungen in den USA [19] und in der Schweiz [20] haben Ergebnisse von vollständig gleichartigem Charakter erzielt. Die Ergebnisse sind von besonderer Bedeutung im Hinblick auf Einsparungen teurer Erdleitungsverbindungen.

Für die schwedischen Kraftwerke waren die Untersuchungen von Ueberspannungen auf Hochspannungsleitungen eine der wichtigsten Aufgaben. Zu deren Bewältigung haben die schwedischen Kraftwerke mit der Wasserfalldirektion an der Spitze vor allem umfassende Stahlstäbchenmessungen ausgeführt, die teils in den Erdleitungen der Erdseile, teils an den Leitungsmasten, teils in den Erdleitungen von Ueberspannungsschutzgeräten vorgenommen wurden. So weit ich mich erinnere, konnten durch Herstellung und Vermittlung des Instituts etwa 15 000 Stahlstäbchen unter den Kraftwerken verteilt werden. Eine umfassende Organisation für die Montage der Stäbchen, ihre Behandlung und ihre Bewertung wurde durchgeführt [21]. Besonders auffallende Ergebnisse über die Höhe und die Verteilung der Ströme in Erdseilen und Stützen wurden nicht gewonnen. Sie stimmen mit Werten überein, die man an anderen Orten sowohl in Europa, als auch in den USA, erhalten hat.

Hingegen möchte ich einiges zu den Messungen der Ströme in den Ueberspannungsableitern bemerken. Wenn die Auffassung richtig sein sollte, dass nur *direkte* Blitz einschläge in die Leitungen niedriger und mittlerer Spannungen gefährlich sind, so müsste man sehr verschiedene Werte erwarten.

Vor allen Dingen müsste man eine Häufigkeitsverteilung bekommen, die derjenigen der Blitzströme oder der Ströme in den Erdleitungen entspricht. Das Ergebnis der Messungen mehrerer Jahre zeigte im Gegenteil recht bescheidene Ströme, bis höchstens 2000 A, oft unter 1000 A. In einer sehr umfassenden Messreihe haben wir zum Beispiel nur einmal eine Stromstärke von 4000 A in einem explodierten Ueberspannungsableiter gemessen, wahrscheinlich, weil die Leitung in diesem Fall von einem direkten Blitzeinschlag getroffen war.

Das Ergebnis der schwedischen Untersuchung ist daher eine überzeugende Bestätigung der wichtigen Rolle der indirekten Ueberspannungen für Uebertragungsleitungen niedriger Spannung.

Messungen von Gewitterüberspannungen mit Kathodenstrahl-Oszillographen

Als wichtige Aufgabe der schwedischen Untersuchungen musste ein umfassendes Programm für Messungen von Ueberspannungen mit Kathodenstrahl-Oszillographen aufgestellt werden. Das Institut hatte diese Arbeit durchzuführen. Die Feldstationen wurden an Orten aufgestellt, die nach Ansicht der Betriebsleute ausgesprochene Ueberspannungsherde darstellen. Ich kann hier allerdings die Bemerkung nicht unterdrücken, dass sich Betriebsingenieure hinsichtlich Ueberspannungen sehr irren können.

Meine erste Enttäuschung in dieser Beziehung erlebte ich vor ungefähr 20 Jahren. Die Westinghouse Company hatte nach einigen Untersuchungen über solche Gewitterherde einen Platz in Tennessee an einer 135-kV-Leitung ausgesucht. Zwei meiner Oszillographen waren dort in einer Feldstation aufgestellt. Im Herbst kam ein Brief von einem Westinghouse-Direktor. Er fing an: «Ihre Oszillographen haben sich als besonders wertvoll erwiesen.» Länger las ich nicht, denn es schoss mir durch den Kopf: «Hier haben wir endlich wertvolle Ergebnisse.» Nun kam aber die traurige Fortsetzung: «Seitdem die Oszillographen an den Leitungen angeschlossen sind, kommen keine Ueberspannungen mehr vor.» Er fuhr fort: «Ihre Oszillographen kann man also als ausgezeichneten Ueberspannungsschutz betrachten.» Später sollte ich noch oft solche traurige Wirklichkeit erfahren. Die Anschlüsse der Oszillographen an Leitungen in Schweden in Gegenden mit übermäßig starken Gewitterschäden, soweit sie der Statistik zu entnehmen waren, haben zwei Jahre lang nur eine beschränkte Zahl von Ueberspannungen gegeben. Nach diesen Erfahrungen habe ich gefunden, dass der einzige gangbare Weg ist, die Zahl der Feldstationen zu erweitern und die Anlagen in möglichst grossem Umfang zu automatisieren. Wenn auch vollständig selbst registrierende Stationen mit den vorhandenen Oszillographen recht gut eingerichtet werden können, so kann man sich doch fragen, ob sie empfehlenswert sind. Denn leider gehört es z. B. zu den Tücken des Objektes, dass gerade im interessantesten Augenblick die speisende Spannung auszubleiben pflegt.

Als Physiker fällt es mir ausserdem schwer, den Zusammenhang zwischen den Ueberspannungen und deren physikalischen Voraussetzungen zu vernachlässigen. Ideal sind Doppelmessungen, wobei die eine Feldstation den zeitlichen Verlauf des Blitzes analysiert und die andere die auf der Leitung entstehende Ueberspannung. Solche Messungen haben wir schon durchgeführt, und zwar früher mit Hilfe der bereits genannten Versuchseinrichtung. Die künftigen Messungen sollten meiner Meinung nach in dieser kombinierten Messung bestehen.

Durch die Automatisierung haben wir mit unseren gewöhnlichen Oszillographen, bei denen sich die photographische Schicht im Vakuum befindet, solche Fortschritte gemacht, dass wir, wie schon erwähnt, einen Vorrat von photographischem Papier für ungefähr 30stündige ununterbrochene Exposition im Vakuum am Lager haben.

Hier wäre noch etwas von den Messergebnissen zu erwähnen. Die herabgesetzte Gewitterhäufigkeit während einer Folge von «mageren» Jahren hat keine reichhaltigen und aufsehenerweckenden, aber doch interessante Ergebnisse gezeitigt. Die meisten Oszillogramme zeigen Ueberspannungen jener Art, die man früher kannte und die mit solchem Abstand vom Ursprungsort des Blitzes erhalten wurden, dass die Dämpfung den Spannungsanstieg schon stark beeinflusste. Eine Ueberspannung möchte ich aber besonders hervorheben (Fig. 7). Sie zeigte nämlich eine geradezu verblüffende Dauer von ungefähr 1000 μ s. Ueberspannungen von solcher Dauer findet man selten. In den Referaten vor der AIEE im Jahre 1928, in welchen die in den Jahren 1925...1927 in Uppsala gewonnenen Ergebnisse gezeigt wurden, kommt eine Ueberspannung vor, deren Dauer in die gleiche Grössenordnung fällt, nämlich von etwa 500 μ s. Die nun kürzlich gemessene Ueberspannung von 1000 μ s Dauer stammt wahrscheinlich von einem

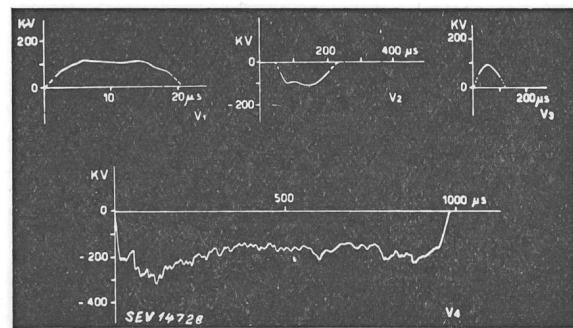


Fig. 7
Beispiel einer aufgenommenen Ueberspannung von
rund 1000 μ s Dauer

Blitz, der unmittelbar in der Nähe einer Leitung durchging. Es ist möglich, dass der Hauptteil der Entladung seine Bahn über einen Mast genommen hat und nur ein schwacher Ast in die Leitung schlug. In mehreren meiner Veröffentlichungen habe ich darauf hingewiesen, dass es möglich ist, unter gewissen Voraussetzungen den Verlauf einer

Ueberspannung zu berechnen, wenn man den zeitlichen Verlauf des Blitzstromes kennt. Bei einer solchen Berechnung gibt es allerdings einige schwer berechenbare Faktoren, die das Ergebnis beeinflussen können. Von einer in systematischer Weise durchgeführten Berechnung kann man immerhin sehr interessante Schlüsse auf die allgemeine Genesis der Ueberspannungen ziehen. Es liegt in der Natur der Sache, dass Ueberspannungen mit einem zeitlichen Verlauf, der bedeutend vom Normalimpuls 1/50 abweicht, ein besonders grosses Interesse in Anspruch nehmen, wenn es sich um Fragen des Ueberspannungsschutzes handelt. Vielleicht kann man auch hier zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Formen unterscheiden, so wie man zwischen nicht zündenden («kalten») und zündenden («warmen») Blitzeinschlägen unterscheidet. Ich komme auf dieses Problem in einem anderen Zusammenhang zurück.

Ich erwähnte früher, dass eine Unterabteilung der Studienkommission die Aufgabe hatte, Ueberspannungen in Niederspannungsnetzen, Telefonleitungen und Bahnleitungen zu studieren. Für die letzte Gruppe hat die Königliche Eisenbahnverwaltung dem Institut die schon erwähnten Drehgestellwagen zur Verfügung gestellt.

Eine besondere Strommessmethode für Niederspannungs- und Telefonleitungen

Für Massenuntersuchungen in Niederspannungsnetzen und auf Telefonleitungen habe ich während des Krieges eine besondere Messmethode [23] ausgearbeitet. Sie beruht darauf, mit Stahlstäbchen von besonderer Konstruktion die Höchstwerte der Störströme, die von Ueberspannungen herrühren, auf den Leitungen selbst zu messen. Es zeigte sich, dass die Messungen nicht mit Hilfe der gewöhnlichen Stahlstäbchen ausgeführt werden konnten.

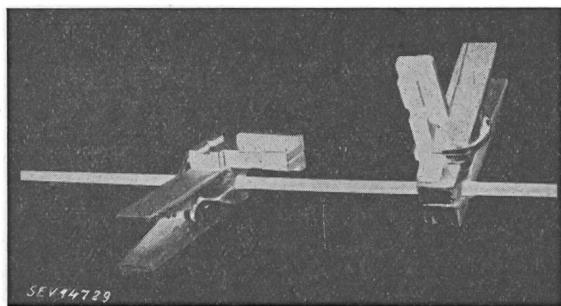


Fig. 8
Stahlstäbchen in Kunstharzfassung auf Telefon- oder Niederspannungsleitung aufgesetzt

Ihre Dimensionen und demgemäß ihre in der Umgebung von Stromleitern verursachten Feldstörungen waren zu gross. Infolgedessen wurden im Institut eine Art Zwergstäbchen konstruiert, die aus nur 8 mm langen Drähten von 0,2 mm Durchmesser bestanden. Diese werden in einem besonderen Halter aus Kunstharz befestigt, wie Fig. 8 zeigt. Die Anordnung ist sehr bequem. Mit einem Handgriff und einer Isolierstange kann man für die Messung die Stäbchen selbst auf Leitungen unter

Spannung befestigen. Die Feststellung der die Magnetisierung verursachenden Stromstärke geschieht mit Hilfe eines rotierenden Spulensystems, eines Verstärkers und eines Kathodenstrahl-Oszillographen. Nach der Exposition entweder auf Niederspannungsleitungen oder auf Telefonleitungen werden die Stäbchen in Kästchen aus Weicheisen eingesandt, damit sie gemessen werden können.

Eine Untersuchung von 773 Niederspannungsinstallationen zeigte während einer Gewittersaison, dass ungefähr 10 % der Installationen atmo-

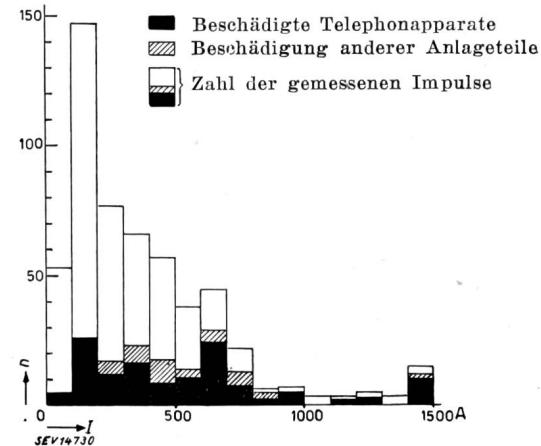


Fig. 9
Störströme in A auf schwedischen Telefonleitungen im Jahre 1943

sphärischen Ueberspannungen ausgesetzt waren. Die untere Messgrenze der Stäbchen lag bei 200 A, und in 53 % der Fälle lagen die Stromstärken zwischen 200 und 1000 A, davon 23 % zwischen 200 und 500 A. Die Stromstärken zwischen 1000 und 2000 A kamen in 27 % der Fälle vor, während Stromstärken höher als 2000 A in 3 bzw. 8 % der Fälle gemessen wurden. Dass derartig hohe Stromstärken festgestellt wurden, dürfte darauf beruhen, dass das Netz während eines heftigen Gewitters mehreren direkten Blitzeinschlägen ausgesetzt war, von denen einer zu einem Brand eines Gehöftes führte, weil der Blitz auf der Niederspannungsleitung in das Haus eingedrungen war. Die Messmethode ist sehr leicht anwendbar und hat zu bemerkenswerten Ergebnissen geführt, da mehrere 1000 Stäbchen auf schwedischen Niederspannungsnetzen angebracht waren. Von besonderem Interesse ist, die Störströme eines Blitzeinschlags zu untersuchen, der in der Installation Schäden verursachte. In einem solchen Fall müssen die Indikatoren unmittelbar nach dem Schadenereignis abgenommen werden. In einem Niederspannungsnetz wurde eine Anzahl Stahlstäbchen nach einem systematischen Plan montiert, in der Absicht, genauere Auskünfte über die Stromverteilung in einem solchen Schadenfall zu erhalten. Es ist uns gelungen, hierüber bereits Ergebnisse zu erhalten; ein solcher Fall befindet sich zur Zeit in Bearbeitung.

Die Messmethode ist auch in grossem Umfang von der Königlich Schwedischen Telegraphenverwaltung auf Telefonleitungen angewandt worden. Fig. 9 zeigt etwas von den Ergebnissen. Auch bei

diesen Untersuchungen hat man immer mehr begonnen, die von einzelnen Gewittern verursachten Störungen zu studieren.

Physikalische Vorgänge bei Blitzentladungen

Für den praktisch arbeitenden Elektrotechniker bedeutet die Ueberspannungsforschung einen wichtigen Teil der Blitzforschung. Man bemüht sich, möglichst rasch Untersuchungsergebnisse zu bekommen, in der Erwartung, hieraus praktisch wertvolle Richtlinien für den Blitzschutz zu erhalten. Zweifellos betreibt man dadurch eine Forschung mit eng begrenztem Ziel. Es ist aber gefährlich, den praktischen Nutzen allzu sehr hervorzuheben, denn im grossen gesehen ist es das elektrophysikalische Phänomen der Blitzentladung, welches die Ueberspannungen auf den Stark- und Schwachstromleitungen, bei diesen sowohl auf Telephonleitungen als auch auf Antennen, bestimmt. Diesen Standpunkt hatten wir immer vor Augen, wenn es galt, allgemeine Richtlinien für die Blitzforschung aufzustellen. Ich habe schon früher erwähnt, dass es wünschenswert ist, gleichzeitig mit der Untersuchung einer Ueberspannung auf einer Hochspannungsleitung auch die Blitzentladung, die ja die Ursache der Störung ist, zu untersuchen. Ich möchte nun einige Ergebnisse in dieser Richtung erwähnen, die mehr allgemein den physikalischen Vorgang der Blitzentladung behandeln.

Mit Rücksicht auf bereits Gesagtes finde ich es nötig, etwas eingehender über die allgemeinen elektrophysikalischen Eigenschaften des Blitzes zu sprechen. Ich beschränke mich auf die Untersuchung der durch die Blitzentladungen bewirkten Änderung des elektromagnetischen Feldes.

Eigenschaften der durch Blitzentladungen bewirkten Änderungen des elektrischen Feldes

Die Untersuchungen über die Elektrophysik des Blitzes wurden früher ausnahmslos durch Messungen der elektrischen Feldstärke von Linearantennen ausgeführt [21]. Die bei den Untersuchungen mit Linearantennen angewandte Messmethode und ihre theoretischen Bedingungen und Beziehungen sind die folgenden:

Bezeichnet man mit E die Feldstärke in V/m , mit h die Höhe der Antenne in m , mit C deren Kapazität in F , mit R_1 den Dämpfungswiderstand in Ω , mit R_2 den Messwiderstand in Ω und mit u die vom Oszillographen aufgezeichnete Spannung in Volt, so gilt:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{R_1 + R_2}{h R_2} \left\{ \frac{du}{dt} + \frac{1}{(R_1 + R_2) C} u \right\} \quad (1)$$

oder für $R_1 \ll R_2$, wo dann $R_2 = R$ gesetzt wird:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{h} \left\{ \frac{du}{dt} + \frac{1}{R C} u \right\} \quad (2)$$

Bei kleinem R kann man im allgemeinen den ersten Summanden in der Klammer, weil er gegenüber dem zweiten klein wird, vernachlässigen, so dass man erhält

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{h R C} u$$

oder

$$E = \frac{1}{h R C} \int u dt \quad (3)$$

Diesen Fall bezeichnet man als die $\frac{dE}{dt}$ -Methode.

Bei sehr grossem R kann man den zweiten Summanden in der Klammer vernachlässigen, und man erhält

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{h} \frac{du}{dt}$$

oder

$$E = \frac{1}{h} u \quad (4)$$

Diesen Fall bezeichnet man als die E -Methode.

In der Praxis erweist es sich häufig als schwierig, R auf einem solchen Wert zu halten, dass die Formeln 3 oder 4 streng gültig sind. Dies gilt besonders, wenn man die Störungen mit der $\frac{dE}{dt}$ -Methode

messen will, und die Feldstärkeveränderungen am Messort ganz klein sind. In diesem Falle ist man darauf angewiesen, verhältnismässig grosse Widerstände, d. h. R -Werte, zu verwenden. Es ist dann möglich, Korrekturfaktoren einzuführen, welche die richtige Berechnung der entsprechenden Feldstärkewerte erlauben.

Die Verwendung der $\frac{dE}{dt}$ -Methode bedeutet, dass die vom Oszillographen aufgezeichneten Kurven integriert werden müssen, bevor man die Feldstärkewerte in V/m erhält, während die E -Methode die Werte ohne diesen Umweg liefert.

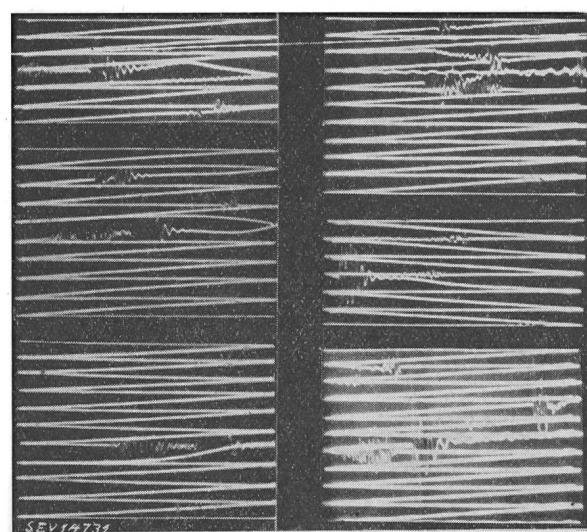


Fig. 10
Oszillogramme von entfernten Blitzentladungen

Mit den Oszillogrammen Fig. 10...12 sind einige Ergebnisse bei Anwendung der erwähnten E -Methode illustriert. In Fig. 10 sind die Feldver-

änderungen einiger entfernter Blitzentladungen oszillographiert. Diese Blitzentladungen zeigen sehr typische Vor- und Hauptentladungen, welche in einem deutlicheren Zeitmaßstab in Fig. 11 wie-

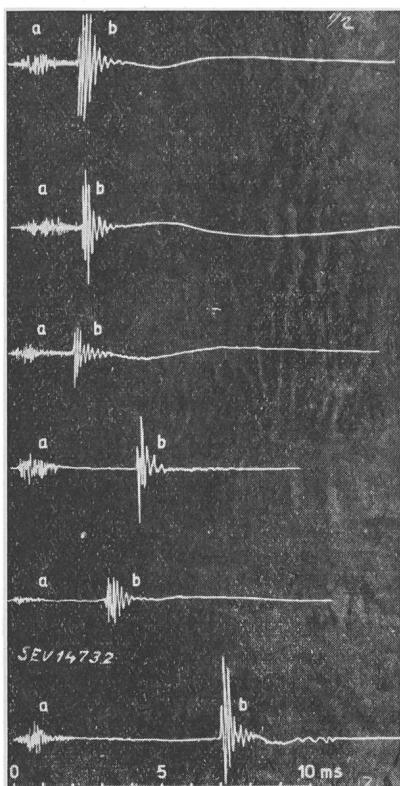


Fig. 11

Die Aufzeichnungen von Fig. 10 in deutlichem Zeitmaßstab
 a Vorentladung
 b Hauptentladung

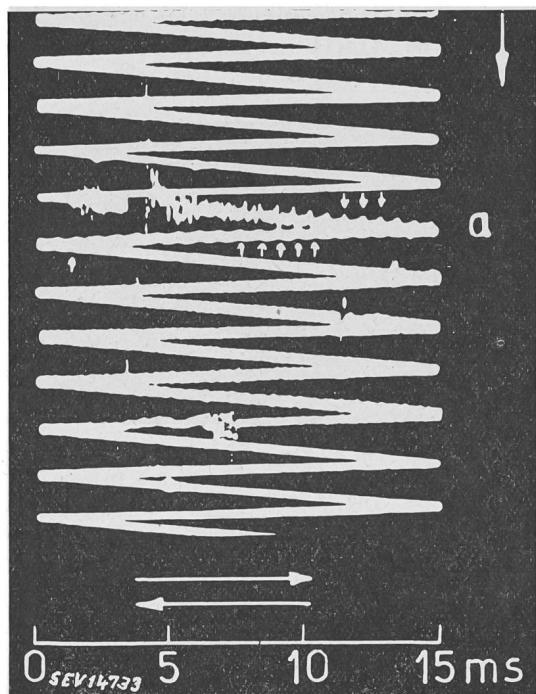


Fig. 12

Oszillogramme einer Blitzentladung mit typischer Vorentladung und Hauptentladung
 Die Pfeile markieren Reflexionen an der Ionosphäre

dergegeben sind und wo *a* die Vorentladungen und *b* die Hauptentladungen bezeichnen. Ohne weiteres sieht man den ausgeprägten Zeitunterschied in Millisekunden zwischen den zwei charakteristischen Entladungsvorgängen der Blitze. In Fig. 12 ist eine typische Blitzentladung aufgenommen, wo man sowohl die Vorentladung als auch die Hauptentladung sieht. An den im Oszillogramm mit Pfeilen markierten Stellen findet man eine Reihe von typischen Variationen, welche nichts anderes als Reflexionen der Blitzentladung an den ionosphärischen Schichten sind.

Eigenschaften der durch Blitzentladungen bewirkten Änderungen des magnetischen Feldes

Die Methoden mit Linearantennen sind bequem, aber begrenzt, und zum Teil empfindlich für lokale elektrostatische Störungen. Ich habe diese Störungen im elektrischen Felde zum Anlass genommen, um die elektromagnetische Untersuchung der Blitzentladungen mit einer ganz anderen Methode anzupacken, bei der man die magnetischen Feldveränderungen in einer Blitzentladung misst. Ich hatte damit auch eine ganz besondere Absicht. Es ergab sich dadurch die Möglichkeit, die Stromvariationen des Blitzes, besonders für offene, nicht gestörte Feldverhältnisse, näher kennen zu lernen.

Für derartige Untersuchungen werden gewöhnliche Rahmenantennen mit einigen Windungen verwendet. Das allgemeine Prinzip der Messungen

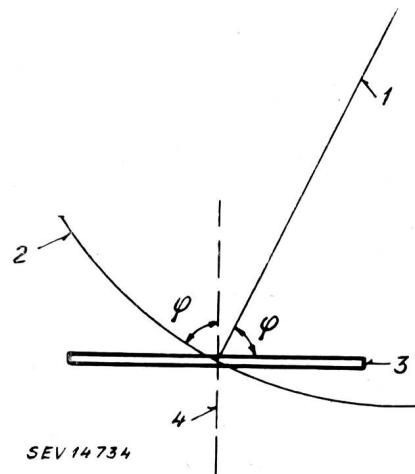


Fig. 13

Prinzip der Messungen mit der Rahmenantenne

- 1 Blitzbahn
- 2 Magnetfeldlinie
- 3 Rahmen
- 4 Rahmenachse

geht aus Fig. 13 hervor. Man beschränkt sich auf typisch vertikale Blitzentladungen zwischen Wolke und Erde. Man beobachtet den Abstand zwischen Rahmenantenne und der Blitzbahn und auch den Winkel φ . Es wird später gezeigt, wie man die erwähnten Messungen ausnutzen kann. Bei den Messungen traten ausserordentlich grosse experimentelle Schwierigkeiten auf, weil sie besondere Ansprüche an die Abschirmung des elektrischen Feldes stellten. Beachtet man dies nicht, dann schleichen

sich leicht Fehler in das Ergebnis ein. Es wird gezeigt, wie man bei den ausgeführten Messungen solche Schwierigkeiten umging. Es erwies sich als nötig, eine aufgeteilte und symmetrisch geerdete Abschirmung einzuführen. Eine andere Schwierigkeit ist prinzipieller Natur. In unseren früheren Messungen wurde die erste Ableitung des magnetischen Feldes nach der Zeit, d. h. es wurden die so genannten $\frac{dH}{dt}$ -Kurven aufgenommen. Hiedurch

wurde der langsame Verlauf der Blitzentladung teilweise unterdrückt. In unseren neueren Untersuchungen gingen wir dazu über, mit Hilfe eines integrierenden Stromkreises das Feld selbst durch die sogenannten H -Kurven aufzunehmen. Bei Berücksichtigung des erwähnten Winkels φ und der Stärke H des magnetischen Feldes erhält man mit der Windungsfläche A (in cm^2) der Rahmenantenne eine induzierte Spannung E nach der Gleichung

$$E = A \frac{dH\varphi}{dt} 10^{-8} \text{ (Volt)} \quad (5)$$

Es ergibt sich, wenn $R \gg \frac{1}{pc}$, ein Strom $I = \frac{E}{R}$; dieser Strom wird den Kondensator C auf das Potential V aufladen nach den folgenden Beziehungen:

$$V = \frac{1}{C} \int_0^t I dt = \frac{1}{RC} \int_0^t E dt = \frac{10^{-8}}{RC} \int_0^t A \frac{dH\varphi}{dt} dt = \frac{A \cdot 10^{-8}}{RC} \int_0^t H dt = \frac{A \cdot 10^{-8}}{RC} H \varphi \text{ (Volt)} \quad (6)$$

Die allgemeine Bedingung, dass eine richtige Integration stattfindet, ist, dass $R \gg \frac{1}{pc}$, oder mit an-

deren Worten: die dem Kondensator aufgedrückte Spannung muss sehr klein sein im Vergleich mit der Spannung über dem Widerstand R . Diese Spannung ist angenähert die gleiche, welche im Rahmen induziert wird. Man muss unbedingt mit aperiodischen Verstärkern arbeiten, um eine Registrierung der H -Kurven zu erhalten.

Eine neue Methode für Stromstärkeuntersuchungen des Blitzes

Eine recht grosse Schwierigkeit bereitet die Berechnung des zeitlichen Verlaufes des Stromes in der Blitzbahn aus solchen H -Kurven. Wir haben für diese Frage eine strengere mathematische Analyse durchgeführt, und ich verweise auf die detaillierten Berechnungen in den Originalaufsätzen. Bei den Berechnungen kann man so vorgehen, dass man in erster Annäherung die Biot-Savartsche Gleichung verwendet. Man bezeichnet für eine derartige Berechnung mit I_1 die Stromstärke in kA, mit h die Höhe des vertikalen Blitzes in km, mit r ihren Abstand von den Rahmenantennen in km und mit H die magnetische Feldstärke in 10^{-3} Gs. Mit

der Biot-Savartschen Gleichung erhält man die einfache Beziehung:

$$I_1 = \frac{rH}{2} \cdot \frac{\sqrt{r^2 + H^2}}{h} \quad (7)$$

Derart berechnete Kurven werden in Fig. 14 und 15 mit I_1 bezeichnet. Bei Durchführung einer strengeren Analyse unter Anwendung der Maxwell'schen Gleichungen und bei Berücksichtigung der Einflüsse der Strahlung je nach Abstand von der Blitz-

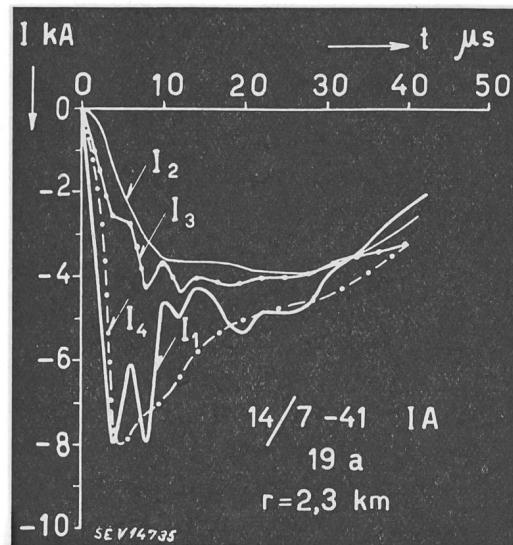


Fig. 14
Vergleich verschiedener Methoden der Berechnung von Blitzstromstärken
(Erklärung im Text)

bahn kommt man zu sehr komplizierten Berechnungsresultaten, wo man u. a. auf eine Reihe von sich folgenden Integrationen der Originalkurven angewiesen ist. Die Berechnungsresultate sind in Fig. 14 und 15 mit I_2 und I_3 bezeichnet.

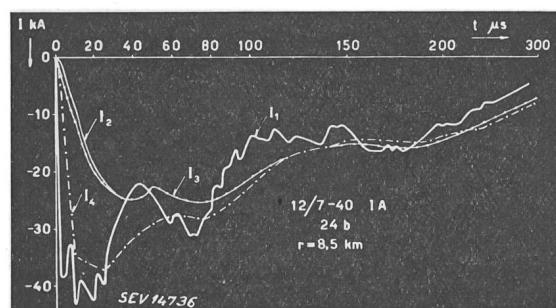


Fig. 15
Vergleich verschiedener Methoden der Berechnung von Blitzstromstärken
(Erklärung im Text).

Wird auch die exponentielle Herabsetzung der Fortbewegungsgeschwindigkeit der Hauptblitzentladung mit zunehmendem Abstand von der Erde in die Rechnungen einbezogen, so erhält man die Kurven, die mit I_4 bezeichnet sind. Eine Anzahl Oszillogramme sind für verschiedene Blitzabstände durchgerechnet worden, und in Fig. 14 und 15 sind einige Beispiele wiedergegeben. Ein Vergleich zeigt,

dass die Methoden I_1 und I_4 nicht grosse Unterschiede zeigen. Daraus ergibt sich, dass man als erste Annäherung für senkrechte Blitzbahnen in

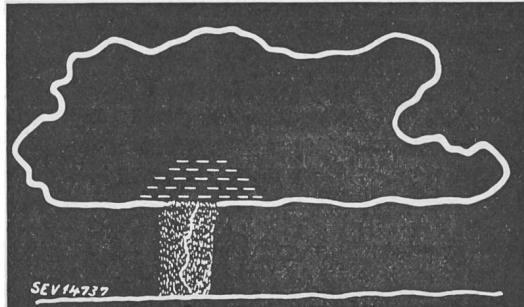


Fig. 16

Einleitende Entwicklung eines Blitzes von einer negativ geladenen Wolke zur Erde

einem Abstand von 2...7 km vom Beobachtungspunkt aus die Biot-Savartschen Gleichungen mit kleinem Fehler anwenden kann, um aus den registrierten H -Kurven die Stromstärke zu berechnen.

Allgemein spielt sich eine vertikale Blitzentladung zwischen einer negativ geladenen Wolke und der Erde folgendermassen ab. Als eine Vorbereitungsstufe kann Fig. 16 betrachtet werden. Zwischen einem beschränkten Gebiet der Wolke und der Erde entwickelt sich eine ausgeprägte Ionisa-

geschwindigkeit beträgt. Der entsprechende Teil des Stromanstieges ist sehr steil. Mit zunehmendem Vordringen wächst der Widerstand der Hauptent-

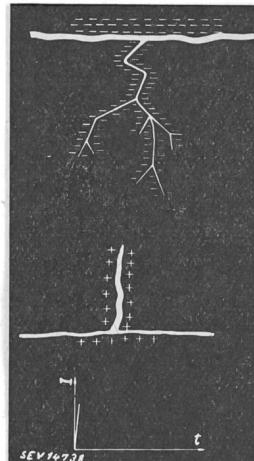


Fig. 17

Beginn der Hauptentladung eines Blitzes aus einer negativ geladenen Wolke zur Erde

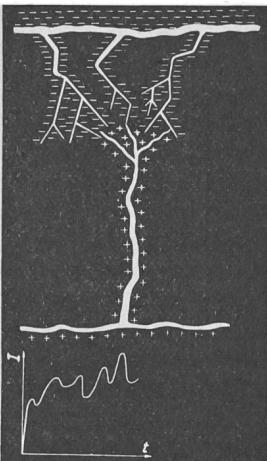


Fig. 18

Übergang zum quasi-stationären Zustand des Blitzstromes

ladung, was eine Abnahme der Frontsteilheit zur Folge hat. Im letzten Stadium ist die Strombahn zwischen Erde und Wolke geschlossen und man kann nach Fig. 18 mit einem quasi-stationären Zustand des Stromes rechnen. Die Nachentladungen folgen auf derselben Bahn.

Um eine Uebersicht über diese Entladungsprozesse zu erhalten und besonders um den Zeitabstand der einander folgenden Entladungen in derselben Blitzbahn zu untersuchen, wurde eine grössere Zahl von Oszillogrammen mit einem langsam arbeitenden Zeitachsen-oscillatoren aufgenommen. Gleichzeitig wurden die entsprechenden Blitzbahnen aufgezeichnet. Ein Beispiel ist in Fig. 19 wiedergegeben, wo man entweder vertikale oder schrägverlaufende Blitzbahnen sehen kann. Die entsprechenden Variationen des magnetischen Feldes, welche von den Mehrfachblitzen hervorgerufen werden, gehen mit ihren entsprechenden Zeitabständen

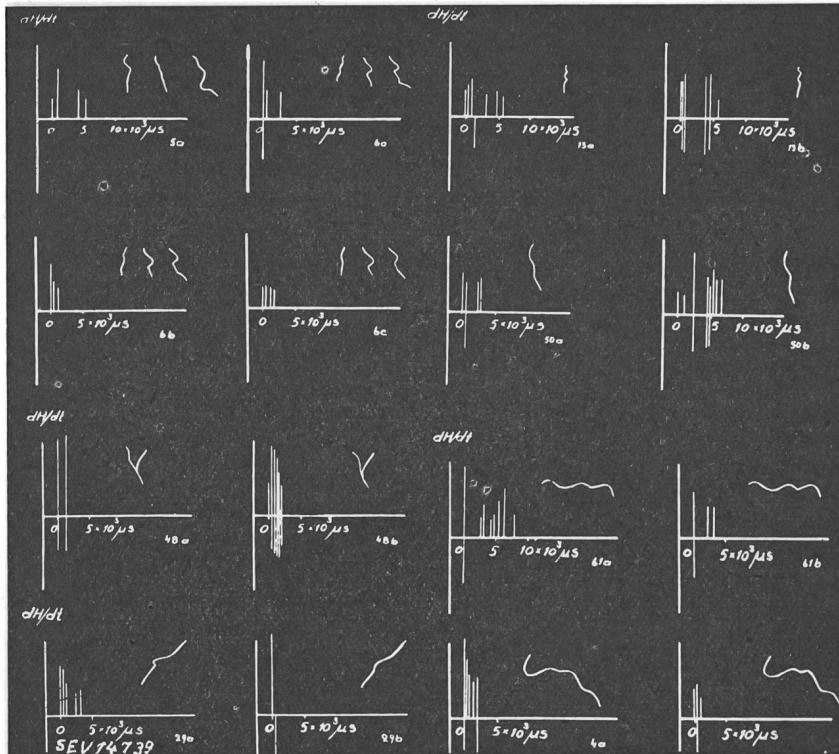


Fig. 19
Variationen des magnetischen Feldes von Mehrfachblitzen im gleichen Blitzkanal

tionssäule. In dieser wird der Vorentladungsprozess mit nach und nach gegen die Erde vordringenden Entladungen entwickelt. In dem in einer derartigen Weise entstandenen Ionisationskanal dringt die Hauptentladung nach Fig. 17 mit einer Geschwindigkeit vor, die im Anfang $2/3$ der Licht-

geschwindigkeit beträgt. Der entsprechende Teil des Stromanstieges ist sehr steil. Mit zunehmendem Vordringen wächst der Widerstand der Hauptent-

eine Blitzentladung vorhanden war, ist diese mit 100 % bezeichnet. Wenn zwei Mehrfachblitze vorhanden waren, hatte der erste die grösste Intensität;

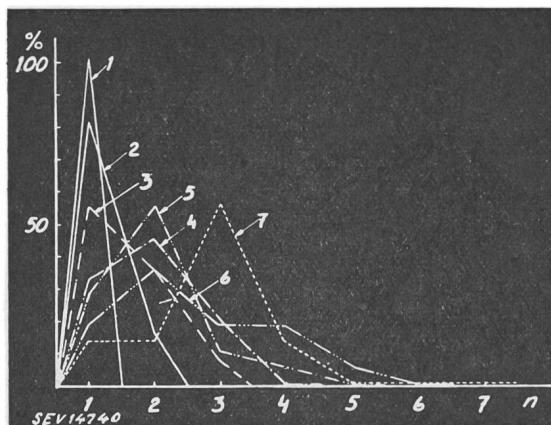


Fig. 20
Verteilung der Intensität des magnetischen Feldes
bei 125 beobachteten Blitzentladungen
(Erklärung im Text)

dasselbe war der Fall bei drei Entladungen. Auch bei mehr als drei Entladungen ist die Tendenz nach höheren Intensitäten der früher erscheinenden Entladungen erkennbar. Die allgemeine prozentuale Verteilung der Zahl von Mehrfachentladungen in 125 Blitzen geht aus Fig. 21 hervor. Am häufigsten sind 3...4 Entladungen.

Einige Beispiele von mit der Rahmenantenne aufgenommenen Originaloszillogrammen sind in

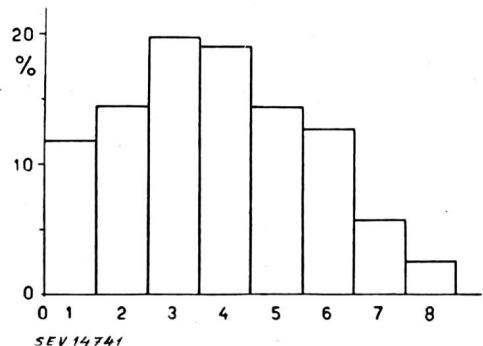


Fig. 21
Prozentuale Verteilung von Mehrfachentladungen
bei 125 Blitzen

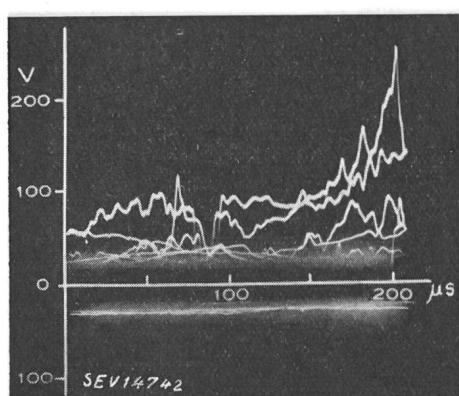


Fig. 22
Originaloszillogramme von Blitzentladungen,
mit Rahmenantenne aufgenommen

Fig. 22 dargestellt. Auf Grund derartiger Oszillogramme sind die in den Fig. 23 und 24 wiedergegebenen Stromstärkevariationen berechnet. Infolge Mangels aller nötigen Daten war es nicht für alle Oszillogramme möglich, die Stromstärkekurven zu berechnen; in derartigen Fällen musste man sich auf die Wiedergabe der magnetischen Feldstärkewerte beschränken. In Fig. 23 bedeuten beispielsweise die Kurven 1a und 1b oder 2a und 2b usw., dass es sich um aufeinanderfolgende Entladungen eines einzigen Blitzes im gleichen Kanal handelt.

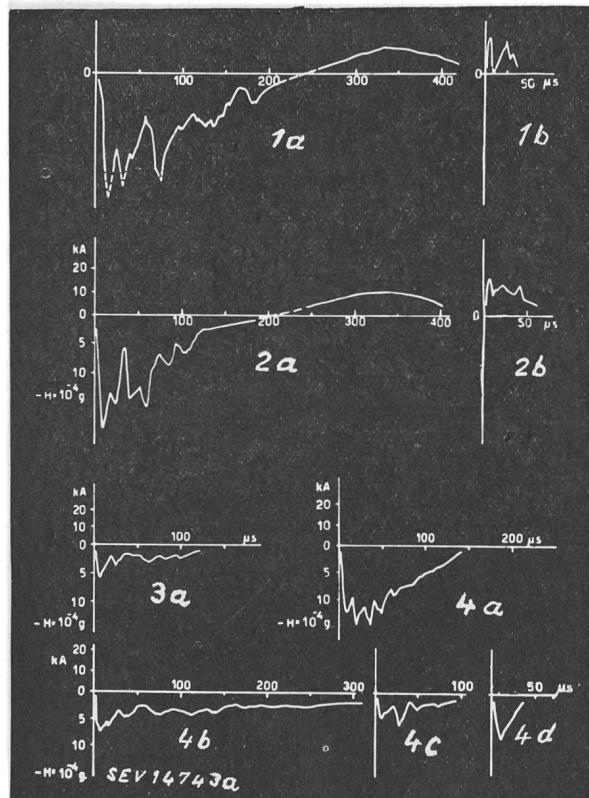


Fig. 23
Variationen des magnetischen Feldes und der Stromstärke
bei Blitzentladungen
(Erklärung im Text)

Die statische prozentuale Verteilung der maximalen Stromstärken bei 46 Hauptentladungen ist in Fig. 25 wiedergegeben. Es geht daraus hervor, dass die Werte sehr gut mit denjenigen, die man in den USA mit der Stahlstäbchenmethode gefunden hat, übereinstimmen. Von 46 Hauptentladungen stammten nur 7 % aus positiven Wolkenentladungen; die überwiegende Anzahl röhrt von negativen Wolkenentladungen her. Dieses Uebergewicht der negativen Wolkenentladungen stimmt mit den amerikanischen Resultaten vom Empire State Building überein.

Die Verteilung der Dauer individueller Blitzentladungen geht aus Fig. 26 hervor. Man findet, dass die gewöhnlichsten Werte unter einer Dauer von 200 μ s liegen; man bemerkt aber auch, dass lange dauernde Entladungen von 800 und 1000 μ s vorkommen. Eine Berechnung der in 46 Hauptentladungen umgesetzten Ladung zeigt Fig. 27. Man

findet, dass die gewöhnlichen Werte unter oder in der Nähe von 5 C liegen; es kommen jedoch auch Werte von 20 und 34 C vor. Die Verteilung der Zahl

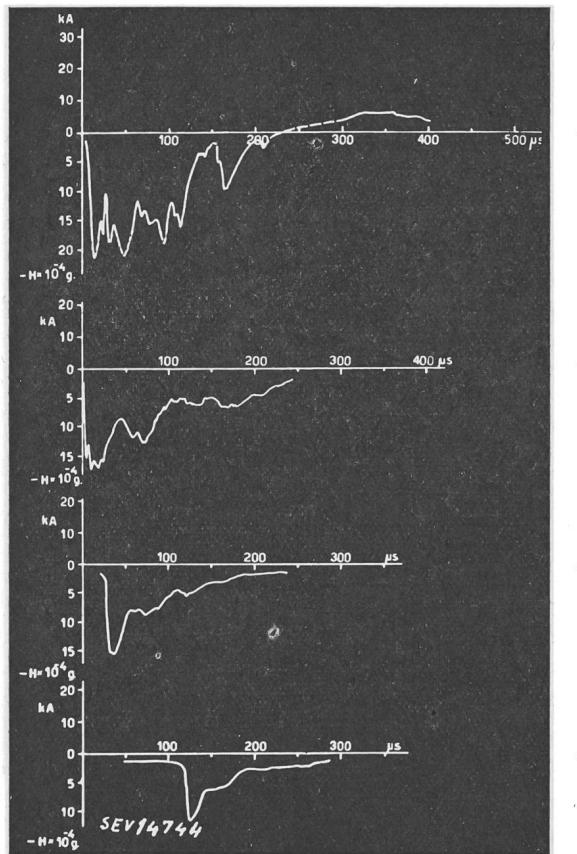


Fig. 24

Variationen des magnetischen Feldes und der Stromstärke bei 4 aufeinanderfolgenden Entladungen (a...d) eines einzigen Blitzes im gleichen Kanal

von Teilentladungen in 138 vertikalen Blitzbahnen geht aus Fig. 28 hervor. Die häufigste Zahl liegt unter 6 Teilentladungen; es sind jedoch auch Zahlen von 12...20 in den Oszillogrammen beobachtet worden.

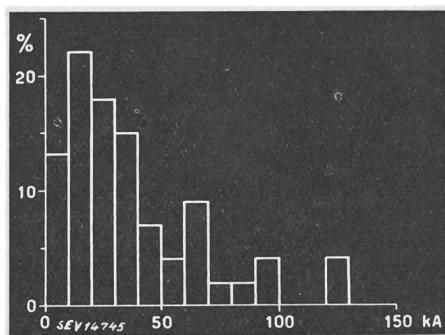


Fig. 25

Prozentuale Verteilung der maximalen Stromstärken bei 46 Hauptentladungen

Die Methode mit Rahmenmessungen hat sich als sehr ergebnisreich erwiesen, und so weit ich bis jetzt die Lage überblicken kann, ist die Methode sehr entwicklungsfähig. Für künftige Untersuchun-

gen habe ich die Absicht, das Programm so zu erweitern, dass Messungen gleichzeitig auf mehreren Stationen vorgenommen werden können. Diese Sta-

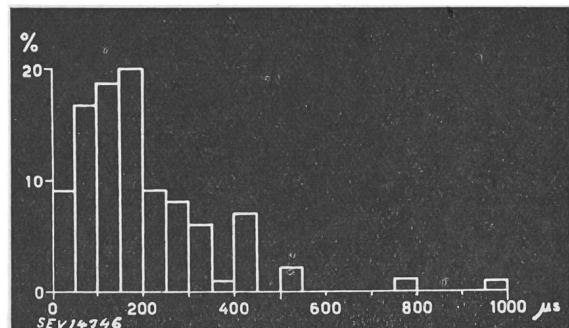


Fig. 26
Prozentuale Verteilung der Dauer der einzelnen Blitzentladungen

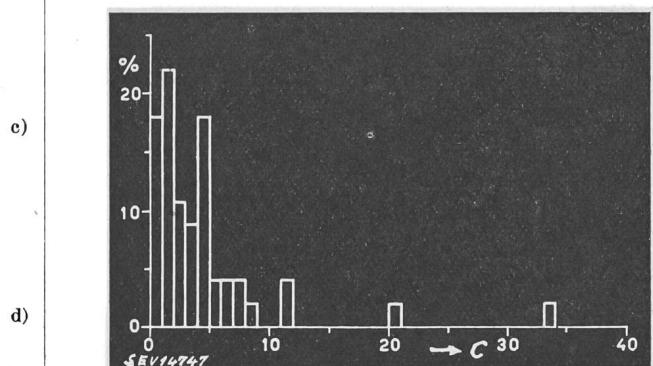


Fig. 27
In 46 Hauptentladungen umgesetzte Ladung

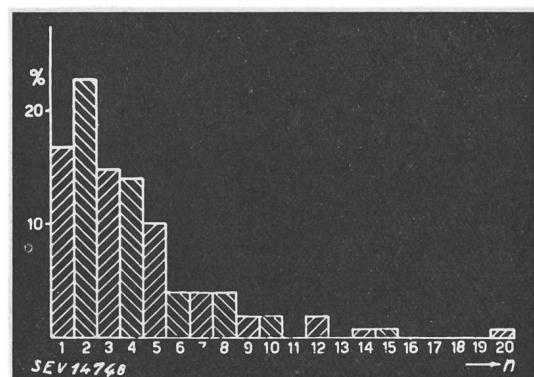


Fig. 28
Zahl der Teilentladungen (n) bei 138 vertikalen Blitzen

tionen müssen mit einem Abstand von beispielsweise zwei Kilometern voneinander in offenes und ungestörtes Gelände verlegt werden.

Oszillographische Aufnahme eines zündenden und tödlichen Blitzes

Zum Schluss will ich noch ein Einzelergebnis nennen, das von besonderem Interesse ist und dem ich bei Würdigung langjähriger Blitzforschung einen besonderen Wert beimesse. Während unserer Beobachtungen bemerkten wir einmal eine sehr drohend aussehende, scharf begrenzte Gewitter-

wolke über dem offenen Gelände in der Nähe des Instituts. Wir richteten unsere Rahmen auf diese, in 4,5 km Entfernung befindliche Wolke. Kaum war alles eingerichtet, blitzte es einmal senkrecht gegen die Erde auf das offene Feld nieder. Das aufgenommene Oszillogramm zeigt Fig. 29; in Fig. 30 sieht man das ausgewertete Oszillogramm. Man beobachtete, dass es 2 Entladungen waren, die aufeinander in derselben Bahn folgten, von denen die kräftigere eine maximale Stromstärke von etwas

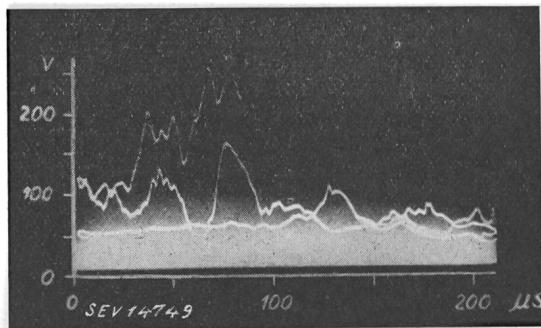


Fig. 29

Originaloszillogramme eines Blitzes, der einen Menschen und ein Pferd auf offenem Felde tötete und einen Heuwagen in Brand setzte

mehr als 20 000 A hatte. Der Blitzschlag hatte schwere Folgen. Ein Bauer stand auf einem Heuwagen und sprach mit seinem Helfer. Der Bauer wurde vom Blitz getroffen und getötet. Das Heu wurde in Brand gesetzt, und Pferd sowie Helfer wurden besinnungslos. Das Pferd kam wieder zu sich, frass während einiger Minuten und fiel dann tot um. Der Helfer kam unbeschädigt davon. Die

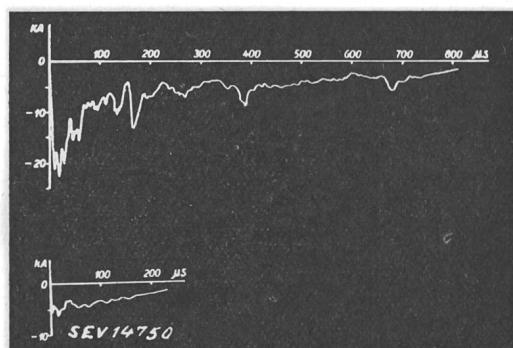


Fig. 30

Variationen der Stromstärke des Blitzes von Fig. 29

Uhrkette des getöteten Bauern und die Uhr zeigten typische Schmelzspuren. Wahrscheinlich war der Blitzstrom durch die Uhrkette geflossen; wir vermuteten dies nach Versuchen, die im Laboratorium mit gleichen Metallketten bei einem Strom mit gleichem Zeitverlauf und mit gleicher Amplitude ausgeführt wurden.

Diese Gewitterentladung hatte sich unter den häufig herrschenden Verhältnissen im Feld entwickelt. Der Erdwiderstand in der Umgebung der Einschlagstelle wurde sofort nachher gemessen, und ein Wert von 10 kΩcm festgestellt. In einer Umgebung von 25 m beobachteten wir entsprechende

Werte von 3...6 kΩcm. Es war nicht möglich, zu entscheiden, ob der erhöhte Widerstand von der Entladung selbst oder von Nachwirkungen des Brandes herrührte. Eine Nachmessung auf der Einschlagstelle im folgenden Frühling ergab einen Wert von 6 kΩcm. Der Erdwiderstand an der Einschlagstelle erlaubt also keinen Rückschluss darauf, warum der Blitz gerade an dieser Stelle einschlug.

Man spricht oft von einem Unterschied zwischen «kalten» und «warmen» Blitzschlägen. Der Unterschied in den Wirkungen dieser beiden Blitzarten ist klar und auf den Unterschied in der Zeitdauer des Blitzes zurückzuführen. In dem angegebenen Fall müssen wir nach den Oszillogrammaufnahmen mit etwa 1000 μ s Dauer für den zündenden Blitz rechnen. Es ist nicht ausgeschlossen, dass gerade Entladungen von langer Dauer vom elektrotechnischen Standpunkt aus die gefährlichsten sind. Wir weisen in diesem Zusammenhang auf die sehr lange dauernde Ueberspannung hin, welche in Fig. 16 wiedergegeben ist. Die Frage, wie weit es sich lohnt, sich gegen lange dauernde Blitzentladungen zu schützen, ist ein statistisch-mathematisches Problem, in dem die relative Häufigkeit solcher lange dauernder Blitzentladungen als wichtigster Faktor in die Rechnung eingeht.

Literatur

- [1] Norinder, Harald: Recherches sur la nature des décharges électriques des orages. CIGRE 1925, Rapp. 82.
- [2] Ackermann, O.: A Cathode Ray Oscillograph with Norinder Relay. AIEE Lightning Reference Book, S. 564...571. New York, 1937; Trans". Amer. Inst. Electr. Engr". (1925), Nr. 31.
- [3] Norinder, Harald: Die Anwendung der Kathodenstrahlröhre als Hochfrequenzoszillograph, besonders bei der Untersuchung von Ueberspannungen. Tekn. T. Bd. 55 (1925), Nr. E 31, S. 152...157.
- [4] Norinder, Harald: The Cathode Oscillograph as Used in the Study of Lightning and Other Surges on Transmission Lines. AIEE Lightning Reference Book, S. 325...334. New York, 1937; Trans". Amer. Inst. Electr. Engr". Bd. 47 (1928), Nr. 2, S. 446...456.
- [5] Berger, Karl: Ueber den Verlauf der von Gewittern auf zwei Mittelspannungsleitungen erzeugten elektrischen Spannungen nach Beobachtungen im Sommer 1928. Diss. ETH Zürich, 1930.
- [6] McEachron, K. B., u. V. E. Goodwin: Cathode Ray Oscillograph Study Of Artificial Lightning Surges on the Turners Falls Transmission Line. AIEE Lightning Reference Book, S. 475...486. New York, 1937; Trans". Amer. Inst. Electr. Engr". Bd. 48 (1929), Nr. 3, S. 953...965.
- [7] Sporn, Philip, u. W. L. Lloyd jr.: Lightning Investigation on the Ohio Power Company's 132-Kv. System. AIEE Lightning Reference Book, S. 659...670. New York, 1937; Trans". Amer. Inst. Electr. Engr". Bd. 49 (1930), Nr. 3, S. 905...916, u. S. 928...948.
- [8] Bell, Edgar, u. A. L. Price: Lightning Investigation on the 220-Kv. System of the Pennsylvania Power & Light Company (1930). AIEE Lightning Reference Book, S. 691...699, u. S. 780. New York, 1937.
- [9] Smeloff, Nicolas N., u. A. L. Price: Lightning Investigation on 220-Kv. System of the Pennsylvania Power & Light Company (1928 and 1929). AIEE Lightning Reference Book, S. 712...721. New York, 1937; Trans". Amer. Inst. Electr. Engr". Bd. 49 (1939), Nr. 3, S. 895...904, u. S. 928...948.
- [10] Cox, J. H., u. Edward Beck: Lightning on Transmission Lines, Cathode Ray Oscillograph Studies. AIEE Lightning Reference Book, S. 732...739, u. S. 761. New York, 1937; Trans". Amer. Inst. Electr. Engr". Bd. 49 (1930), Nr. 3, S. 857...865, u. S. 928...948.

- [11] *Conwell, R. N., u. C. L. Fortescue*: Lightning Laboratory at Stillwater, New Jersey. AIEE Lightning Reference Book, S. 746...750. New York, 1937.
- [12] *George, R. H., r. J. R. Eaton*: Lightning Voltages on Transmission Lines. AIEE Lightning Reference Book, S. 751...758. New York, 1937; "Trans". Amer. Inst. Electr. Engr". Bd. 49 (1930), Nr. 3, S. 877...884, u. S. 928...948.
- [13] *McEachron, K. B.*: Lightning to the Empire State Building. J. Frankl. Inst. Bd. 227 (1939), Nr. 2, S. 149...217.
- [14] *McEachron, K. B.*: Lightning to the Empire State Building. Electr. Engng., Trans. Sect. Bd. 60 (1941), Nr. 9, S. 885...889.
- [15] *McCann, G. D.*: The Measurement of Lightning Currents in Direct Strokes. Electr. Engng., Trans. Sect., Bd. 63 (1944), December-Supplement, S. 1157...1164 u. S. 1370...1372.
- [16] *Norinder, Harald*: Les surtensions causées indirectement par les coups de foudre. CIGRE 1937, Rapp. 342.
- [17] *Norinder, Harald*: Quelques essais récents relatifs à la détermination des surtensions indirectes. CIGRE 1939, Rapp. 303.
- [18] *Norinder, Harald, u. Robert Nordell*: Influence de la nature de la terre et de la disposition des électrodes sur la résistance des prises de terre aux courants d'impulsion. CIGRE 1939, Rapp. 302.
- [19] *Bellaschi, P. L., R. E. Armstrong u. A. E. Snowden*, Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds. Electr. Engng., Trans. Sect., Bd. 61 (1942), June-Supplement, S. 349...363.
- [20] *Berger, Karl*: Le comportement des prises de terre sous courant de choc de grande intensité. CIGRE 1946, Rapp. 215.
- [21] *Norinder, Harald*: On the Nature of Lightning, Discharges. J. Franklin Inst. Bd. 218 (1934), N. 6, S. 717...738.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. phil. *Harald Norinder*, Institutet för högspänningsforskning der Universität Uppsala (Schweden).

Neuere Resultate der Blitzforschung in der Schweiz

Vortrag, gehalten vor dem SEV am 15. Oktober 1946 in Zürich,
von K. Berger, Zürich

551.594.2(494)

Im Anschluss an einen Vortrag, den der schwedische Ge-witterforscher H. Norinder im Oktober 1946 vor dem SEV in Zürich hielt, berichtete der Autor über den Stand der schweizerischen Gewitterforschung. Dieser Vortrag ist nachstehend wiedergegeben. Dabei werden insbesondere die im Sommer 1946 in der Meßstation auf dem San Salvatore gewonnenen Resultate beschrieben. Durch eine noch auf optischem Weg zu bestätigende Hypothese wird das Auftreten der stossförmigen Blitzstrom-Komponenten zu erklären versucht.

A la suite d'une conférence donnée par M. H. Norinder, éminent spécialiste suédois, à l'Association Suisse des Électriciens, au mois d'octobre 1946, M. K. Berger avait fait un exposé sur l'état des recherches suisses dans le domaine des foudres. C'est cet exposé qui est reproduit ci-après. L'auteur indique notamment les résultats obtenus en été 1946 à la station de mesures du San Salvatore. La présence de composantes de choc dans la formation du courant de décharge atmosphérique fait l'objet d'une hypothèse qui devra encore être confirmée par des mesures optiques.

1. Ueberspannungsmessung

In der Schweiz entstand die Blitzforschung 1926 zunächst als reine *Zweckforschung*. Sie hat vor allem die Aufgabe, den Ueberspannungsschutz der elektrischen Anlagen auf eine physikalisch solide Basis zu stellen, das heisst besonders die technischen Grundlagen zu liefern für den Bau der Ueberspannungsableiter und für die Bemessung aller Isolationen, welch letztgenanntes Gebiet von den Amerikanern mit dem schönen Wort der Koordination der Isolationen bezeichnet wurde.

Die in den Jahren 1928...1937 mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen (KO) durchgeföhrten *Messungen an schweizerischen Hochspannungsleitungen* lassen bald erkennen, dass für Leitungen hoher Betriebsspannung, nämlich von mehr als rund 50 kV, nur der *direkte Blitzschlag* so hohe Ueberspannungen auf der Freileitung erzeugen kann, dass daraus Erd- und Kurzschlüsse entstehen. Die Resultate dieser Ueberspannungsmessungen, für deren Durchführung uns von den SBB zwei ausgerangierte Eisenbahnwagen als Mess- und Wohnwagen überlassen wurden, sind im Bulletin des SEV periodisch bekannt gegeben worden [1...17] ¹⁾. Aus den Messungen ergab sich die stossartige Ueberspannungsbeanspruchung der Isolation, die in der Folge zur heutigen Prüftechnik mit Stoßspannungen geföhrt hat (einige Oszillogramme aus den genannten Aufsätzen werden als Beispiele hiezu gezeigt). Aus den mehrpoligen Messungen ergab sich auch eine theoretisch nicht vorausgesehene Form der Fortpflanzung von Ueberspannungswellen auf mehrpoligen

Leitungen, die in der Folge mit künstlichen Stoßspannungen geklärt werden konnte. Praktisch bilden diese Ueberspannungsmessungen die Grundlage des Ueberspannungsschutzes, insbesondere für den Bau der modernen Ueberspannungsableiter.

Der dem Messort am nächsten liegende Blitzschlag in die Leitung befand sich bei unsrern Messungen immer noch in 1,9 km Entfernung. Es ist klar, dass der grosse Teil des Blitzstromes nicht längs der Leitung, sondern direkt zur Erde abfliesst. Für den Blitzschutz der Leitung und allgemein von Anlage-teilen in der unmittelbaren Nähe des Blitzschlags sind nicht die vom Einschlagsort ausgehenden *Wellen*, sondern ist schliesslich der Blitzstrom selber massgebend. Weiter lässt sich wohl aus dem Verlauf des Blitzstromes auf die entstehenden Ueberspannungen schliessen, nicht aber umgekehrt. Der Blitzstrom stellt eine wahre Stromquelle dar, entsprechend einer Spannungsquelle mit sehr hohem innerem Widerstand.

2. Blitzstrommessung

Zum Verständnis der Blitzstörungen auf den Freileitungen und zur Ermöglichung ihrer Bekämpfung war es deshalb nötig, den Blitzstrom selber auszumessen. Wie kann dies geschehen?

Theoretisch lässt sich die Aufgabe mit dem KO lösen, wenn dieser *am Einschlagsort* aufgestellt wird. Nun entsteht aber die grosse Schwierigkeit, die darin liegt, dass man den Einschlagsort des Blitzes nicht zum voraus kennt, so wenig wie den Moment des Einschlags. Aus praktischen Gründen müssen deshalb zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen werden.

¹⁾ siehe Literaturverzeichnis am Schluss.