

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 Gewitterforscher 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 Electriciens, 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.

I. 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, welches letztgenannte 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) durchgeführten Messungen an schweizerischen Hochspannungsleitungen liessen 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 aussergewöhnliche 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 geführt 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 unsern 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 Anlagenteilen in der unmittelbaren Nähe des Blitzeinschlags 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.

a) Nahmessung am Einschlagsort

Schlägt der Blitz an einem bestimmten Ort, z. B. in ausserordentlich hohe Blitzableiter, Türme oder Hochkamme relativ häufig ein, so lässt sich dort der Blitzstromverlauf mit einer ziemlich komplizierten Einrichtung, wie sie ein KO darstellt, nach allen Kanten ausmessen. Sollen aber Blitzeinschläge in übliche Objekte mässiger Höhe, z. B. Masten von Hochspannungsleitungen, gewöhnliche Gebäude usw. untersucht werden, so ist die Wahrscheinlichkeit von Einschlägen so klein, dass Resultate nur dann in nützlicher Frist zu erwarten sind, wenn eine sehr grosse Zahl solcher Objekte zugleich beobachtet wird. Die Messmittel müssen entsprechend einfach und billig sein. In Frage kommen z. B. die sogenannten «Stahlstäbchen» nach *Pockels* und *Töpler*, die durch ihre remanente Magnetisierung den Scheitelwert des magnetisierenden Blitzstromes erkennen lassen, sofern dieser Stossform aufweist [20].

Es mag interessieren, dass in der Schweiz remanent magnetisierte Eisenerze bei Frick beobachtet wurden. Stark geneigte Berghänge zeigen dort sehr verschiedene, teilweise sehr starke Magnetisierungsspuren, die wahrscheinlich auf Blitzeinschläge zurückzuführen sind. Ebenfalls auf sehr einfache Weise lässt sich neben dem Scheitelwert des Stromes auch die Aenderungsgeschwindigkeit des Stromes, d. h. seine sog. Steilheit mit Hilfe einer Induktionsschleife und eines Spannungsmessers (z. B. Funkenstrecke oder Klydonograph) festhalten [13]. Dagegen existieren leider keine zuverlässigen und einfachen Messmittel für die Messung der Blitzladung und der Zeitdauer eines Blitzes.

b) Fernmessung des Blitzstromes mit Hilfe von Antennen

Norinder hat in anschaulicher Weise die von ihm entwickelte Methode der Ausmessung des magnetischen Feldes des Blitzstromes vor Augen geführt²⁾. Die in einer gegen elektrische Felder möglichst abgeschirmte Rahmenantenne vom Magnetfeld des Blitzstromes induzierten Spannungen werden von einem KO aufgezeichnet; daraus muss der Blitzstrom durch Integration berechnet werden.

Was mir an dieser Messmethode sehr schwierig scheint, ist die Auswertung, das heisst der Uebergang vom gemessenen Spannungsverlauf auf den zeitlichen Verlauf des Blitzstromes. Dazu muss in erster Linie der Abstand des Blitzes von der induzierten Rahmenantenne bekannt sein. Durch optische oder akustische Peilung der Blitze scheint diese Forderung erfüllbar. Doch erhebt sich sofort ein zweites, nicht minder wichtiges Bedenken: Da die Induktionswirkungen auch von der Länge des Blitzes abhängen (die Induktionswirkung ist eine Funktion des Dipolmomentes $\text{Strom} \times \text{Länge}$), so muss in jedem Messmoment die gleichzeitige, genauer gesagt, die um die Laufzeit der elektrischen Wellen vom Blitz zum Rahmen verfrühte Länge des Blitzes bekannt

sein. Um diese Forderung zu erfüllen, wären komplizierte optische Messungen über das Wachsen des Blitzes nötig, wie sie etwa von der *Boys*-Kamera ermöglicht werden. Selbst unter der Annahme solcher optischer Messungen, die ein Bild über das zeitliche Wachstum der Blitzlänge und über die jederzeitige räumliche Lage des Blitzes ergeben müssten, bleibt ein grundsätzliches Bedenken gegen die Fernmessung: Man weiss sehr wenig über die Art der Verzerrung und Dämpfung, welche die elektrischen Wellen zwischen ihrem Ursprung beim Blitz und dem Messort der Rahmenantenne erleiden. Es ist anzunehmen, dass die Dämpfung der Wellen in komplizierter Weise von der Frequenz des Wellenspektrums abhängt. Denn die Erde als Spiegelfläche des Blitz-Dipols ist kein idealer Leiter. Sie wird deshalb tiefere Frequenzen tiefer in den Boden eintreten lassen als hohe. Damit ist aber eine frequenzabhängige Dämpfung, das heisst eine Verzerrung der Uebertragung gegeben. Für hohe Frequenzen des Blitzstrom-Spektrums befindet sich die Messeinrichtung gewissermassen in der Fernzone, für tiefe Frequenzen in der Nahzone des «Blitzsenders». So ausserordentlich wertvoll eine Fernmessung an sich ist, so schwerwiegend scheinen mir die Bedenken gegen die Berechnung des Blitzstromes aus der gemessenen Induktionsspannung. Wenn unsere Resultate besonders bezüglich der Blitzstromdauer oft nicht zusammenstimmen, so scheint der Grund wohl darin zu liegen, dass die für die Ausrechnung des Blitzstromes aus der Rahmenspannung zu machenden Annahmen und Voraussetzungen praktisch nicht genügend erfüllt sind.

Solange man die schwerwiegenden Bedenken gegen die Fernmessung nicht zerstreuen kann, bleibt nur der umständliche und unvollständige Weg der Nahmessung mit einfachen Mitteln an vielen Masten, und der genauen, vollständigen Nahmessung mit KO an besonders blitzgefährdeten Objekten. Dazu ist von *K. B. Mc Eachron* bereits seit 1935 der höchste Wolkenkratzer in New York, das Empire State Building (E. St. B.) benutzt worden [21]. Zum gleichen Zweck haben die Russen einen Fesselballon verwendet, an dessen Stahlanker der Blitzstrom gemessen wurde [23]. Beide Untersuchungen benutzen ausserordentlich hohe und spitzige Einschlag-Objekte (Höhe des E. St. B. 388 m über Boden, Ballonhöhe der russischen Messungen bis 800 m). Seither sind weitere Messungen veröffentlicht worden, die in England während des Krieges an den dortigen Ballonsperren mit Hilfe von Magnetstäbchen gewonnen wurden [19].

Als es sich aus den Messungen von *Mc Eachron* ergab, dass der Vorgang der Blitzbildung am E. St. B. in der Regel gerade umgekehrt verläuft als in mehr oder weniger ebenen Gelände von Südafrika, wo es *Schonland*, *Malan* und *Collens* erstmals gelungen war, das Vorwachsen der Blitzentladung mit der *Boys*-Kamera festzuhalten [22], schien es uns in der Schweiz ratsam, im natürlichen Gelände weitere Beobachtungen anzustellen. Als Beobachtungspunkt wurde vorerst ein Berg mässiger Höhe gewählt, nämlich der Monte San Salvatore bei Lugano.

²⁾ *Norinder, H.*: Gewitterforschungen in Schweden; Entwicklung und neuere Resultate. (Bulletin SEV 1947.)

3. Messeinrichtung auf dem Monte San Salvatore

Die Einrichtung wurde bereits im Bulletin des SEV kurz beschrieben [18]. Ein Prinzipschema ist in Fig. 1 gegeben. Die Messmöglichkeiten des sechs-schleifigen Registrier-Oszillographen sind daraus ersichtlich. Der KO ist nur durch die Anschlüsse seiner Messplatten angedeutet. Im Jahre 1946 waren zwei KO vorhanden, wovon einer ein Zeitintervall von rund $1/50$ s über einer linearen Zeitskala aufzeichnet,

abfall des Blitzstromes im Mess-Shunt. Als Mess-Shunt diente bis 1945 ein dreistufiger Metallwiderstand von 0,02, 0,5 und 10 Ω , dessen beide letzten Stufen durch spannungsabhängige Widerstände aus SiC geschützt waren. Leider sind diese den langdauernden Blitzströmen nicht gewachsen, sodass seit 1946 gemäss Fig. 1 ein nur noch zweistufiger Metallwiderstand von 0,02 und 1,0 Ω verwendet wird, der vom gesamten Blitzstrom durchflossen ist. Vom 1,0- Ω -Widerstand werden die Meßströme der Grössenordnung

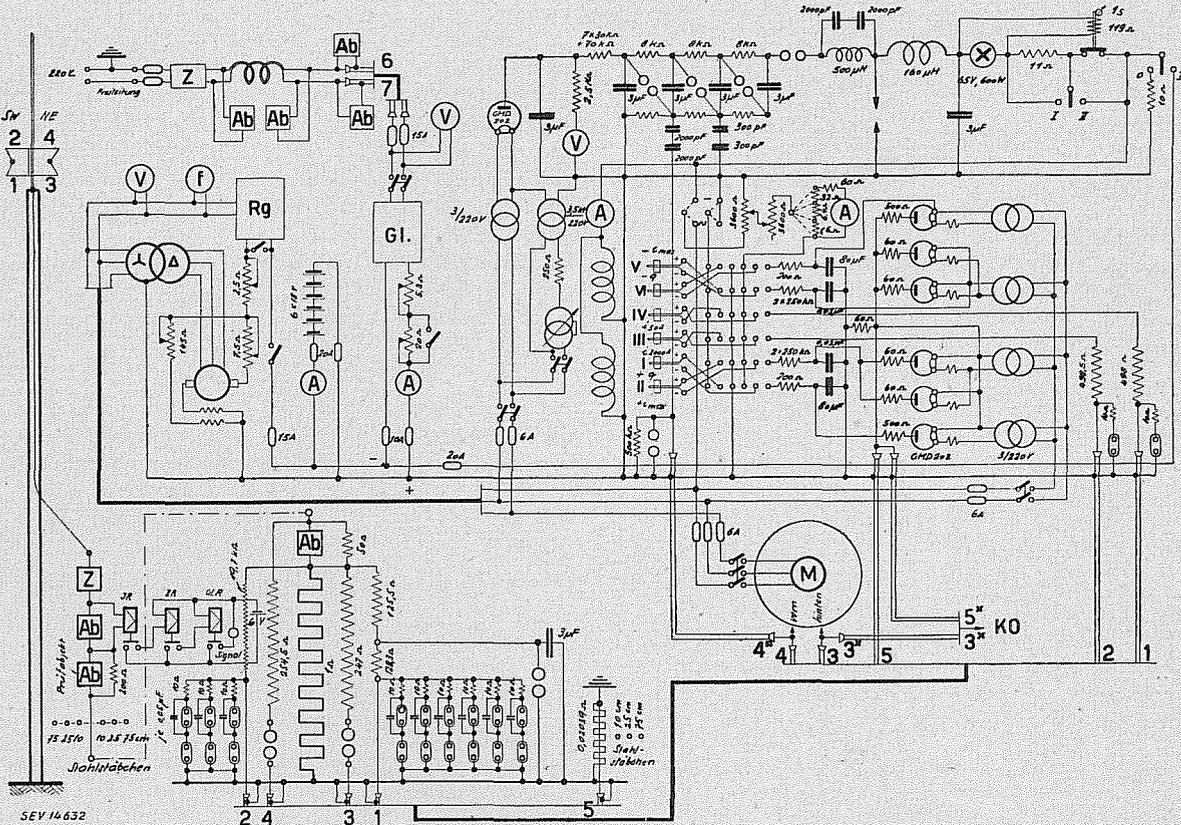


Fig. 1

Prinzipschema der Messeinrichtung auf dem Monte San Salvatore

- | | | | | | |
|-----|-------------------------|--------|------------------------|-------|--|
| Ab | Ableiter | Z | Ansprech- und Energie- | 6...7 | Speisekabel |
| Rg | Spannungsregler | zähler | | 1...4 | Stellheissmesser (auf dem Blitzableiter) |
| Gl. | Gleichrichter | 1...5 | Messkabel im Faraday- | | |
| M | Antriebsmotor zur Film- | käfig) | | | |
| | trommel | | | | |

der zweite ein Zeitintervall von rund 200 μ s über einer logarithmisch-exponentiellen Zeitskala. Der Schleifen-Oszillograph, dessen Meßsysteme uns in liebenswürdiger Weise von Prof. Dr. F. Tank, Vorstand des Institutes für Hochfrequenztechnik an der ETH, zur Verfügung gestellt wurden, zeichnet sich durch drei Strom-Messbereiche von rund 50, 2 000 und 100 000 A aus. Im letzten Bereich werden mit einer Kunstschaltung nur die \pm -Stromscheitelwerte und die Stossladungen aufgezeichnet, da die Dauer so hoher Stromspitzen zu klein ist, um im zeitlichen Verlauf von den Schleifen aufgezeichnet zu werden. Dieses letzte ist Aufgabe des KO.

Die Auslösung der Niederschrift eines Oszillogramms geschieht automatisch durch Zünden der Wolfram-Bogenlampe mit Hilfe eines kleinen vierstufigen Marx-Stossgenerators durch den Spannungs-

100 mA über hochohmige Metallwiderstände entnommen, wobei die empfindlichere Stufe (Voll-Ausschlag 50 A) durch Glimmlampen und Funkenstrecken gegen Ueberlastung geschützt wird. Die Messung ist auf diese Weise wesentlich genauer geworden. Bei den ersten 11 Blitzeinschlägen des Sommers 1946 waren nicht die geringsten Spuren von Ueberlastung des Shunt festzustellen; der 12. Blitz jedoch vermochte den Shunt in Brand zu setzen, sodass er ausgewechselt werden musste.

Eine Neuerung der Einrichtung besteht seit 1946 darin, dass die Messeinrichtung auch während Gewitter am speisenden 220-V-Netz des Elektrizitätswerkes Lugano angeschlossen bleibt. Der Anschluss geschieht über eine grosse Drosselspule, die dem Blitzstrom einige mH Induktivität entgegengesetzt und für den Betriebswechselstrom bifilar ist. Dieser An-

schluss wurde nötig, als es sich erwies, dass die Speicherbatterie mit 100 Ah Ladung bei langen Gewittern nicht mehr genügte.

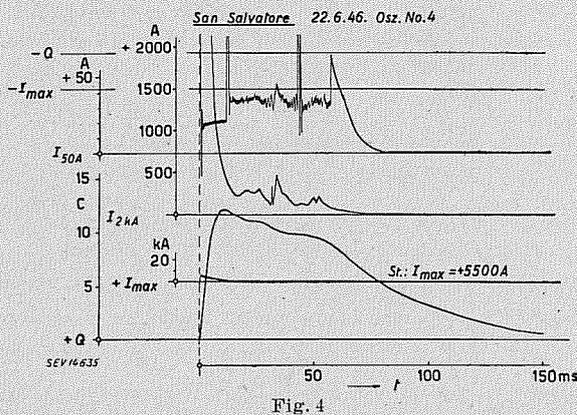
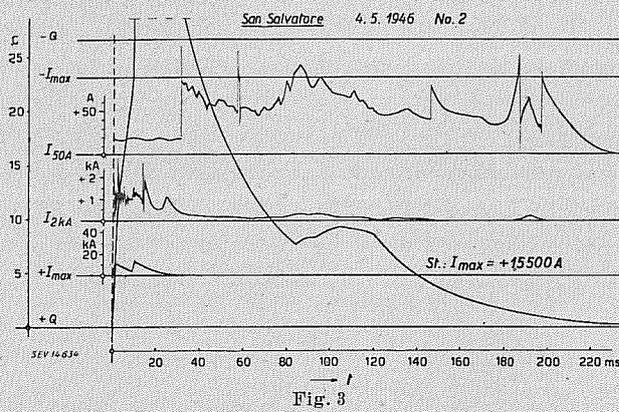
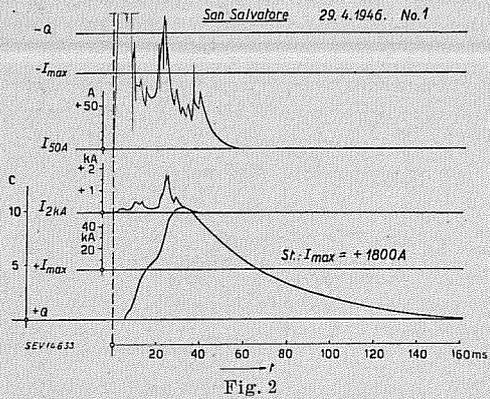


Fig. 2...4

Beispiele positiver Blitzströme des Sommers 1946

Der Beobachter befindet sich mit der ganzen Mess-Einrichtung im Innern eines geschlossenen Faraday-Käfigs aus engmaschigem Gitter zum Schutz gegen elektrische Spannungsdifferenzen. Leider vermag der Käfig langsam veränderliche magnetische Felder nicht fern zu halten, sodass es nötig war, zur Vermeidung von Fehlableitungen in den beiden KO besondere Massnahmen zu treffen.

Ausser der oszillographischen Messeinrichtung sind an den Zuleitungen des Blitzstromes vom Blitzturm zum Gebäude mit dem Faraday-Käfig auch magnetische Stahlstäbchen eingebaut, um die Mes-

sung des Stromscheitelwertes zu kontrollieren. Ferner ist zur Avisierung des Beobachters bei heran nahenden Gewittern ein Gewittermelder eingebaut worden, der bei jedem grössern Verschiebungsstrom im Blitzableiter ein vorübergehendes, kurzes, aber lautes Glockensignal auslöst. Diese Gewittermeldung hat sich besser bewährt als ein Radio-Apparat, der viel weniger selektiv ist und auch bei nicht interessanten, fernen Gewittern unnötigen und unbegründeten Lärm macht.

4. Messresultate

Während des Krieges wurde es dank der fortschrittlichen und entgegenkommenden Einstellung des Armeekorps-Kommandos, besonders von Herrn Oberst Mösch, möglich, die Messeinrichtung von Militärpersonen bedienen zu lassen. So sind die in einem früheren Aufsatz [24] gezeigten Oszillogramme der Jahre 1943 bis Anfang 1945 von Soldaten registriert wor-

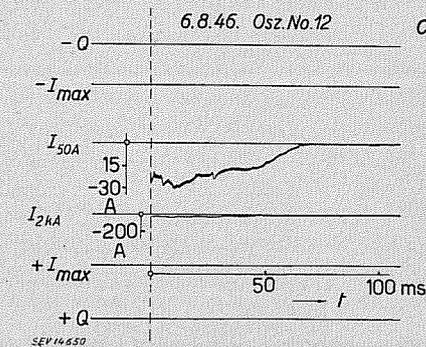
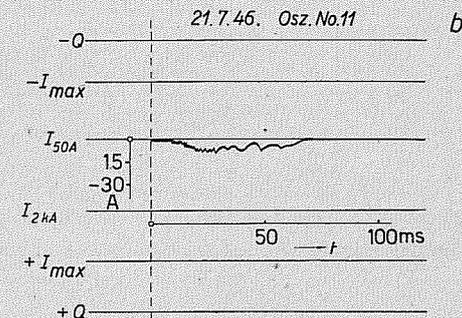
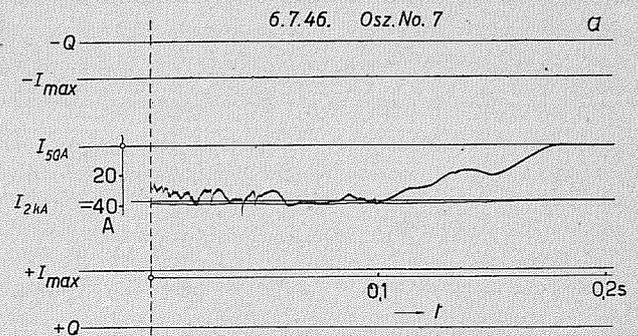


Fig. 5...9

Beispiele negativer Blitzströme des Sommers 1946

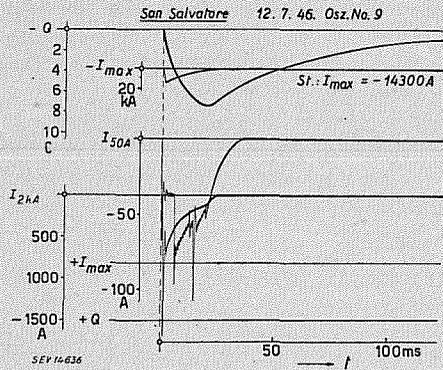


Fig. 5

den. Nach der Demobilisierung der Armee übernahm H. Rutz die Bedienung der Einrichtung, dem wir die meisten Aufnahmen von 1945 und alle Aufnahmen von 1946 verdanken. Der Berichtersteller hatte nur einmal das Glück, bei Umbauarbeiten gerade während einer Gewitternacht im Frühling 1945 auf dem Berg anwesend zu sein, und dabei drei Einschläge zu oszillographieren. Leider ging ein vierter Einschlag des gleichen Gewitters für die Messung verloren, weil ein in den Blitzstromkreis geschaltetes Prüfobjekt vor dem Gebäude explodierte, so dass der nächste Blitz einen vorschriftswidrigen Weg durch die Mauer des Gebäudes nahm, der nicht über den Mess-Shunt führte.

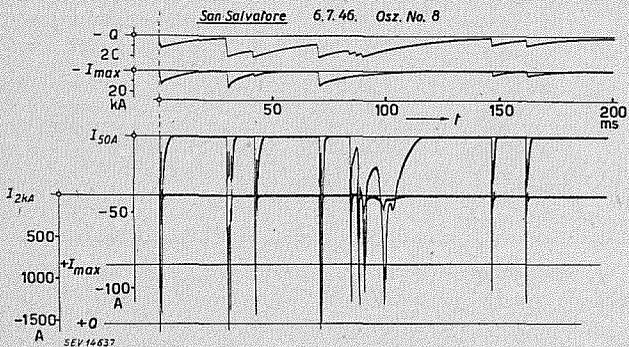


Fig. 6

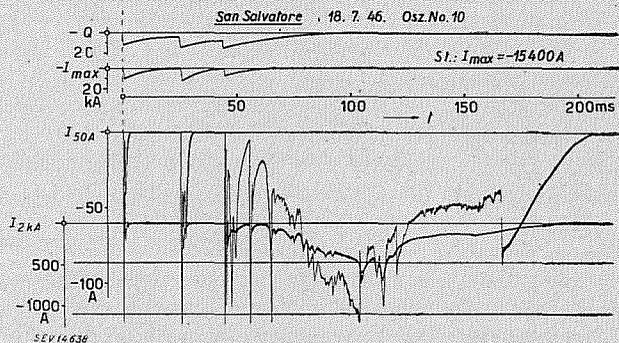


Fig. 7

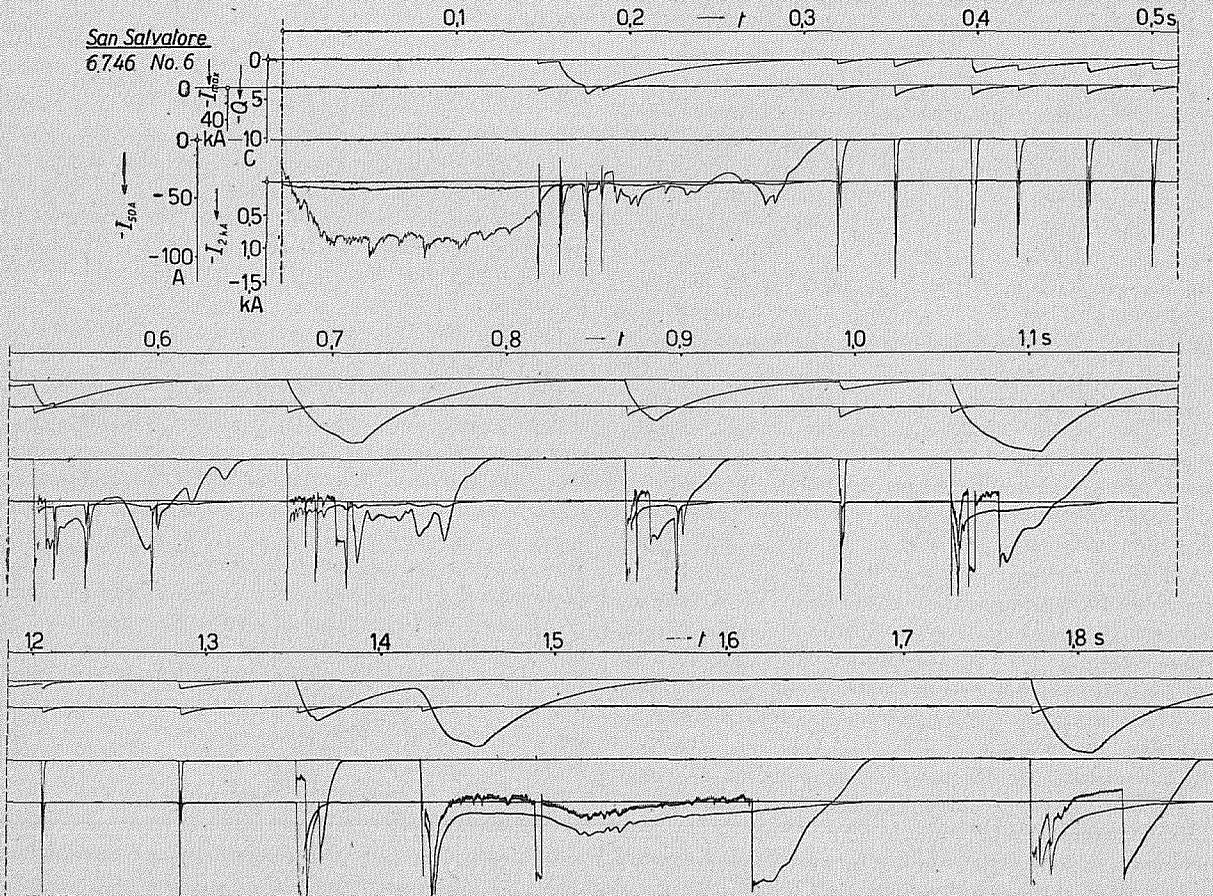


Fig. 8

Insgesamt sind von 1943...1946 rund 25 Oszillogramme von Blitzeinschlägen gelungen. Da in einem früheren Aufsatz einige Bilder bereits veröffentlicht wurden [24], beschränken wir uns nachstehend auf die Oszillogramme des Sommers 1946.

Die Figuren 2...4 zeigen positive Blitzströme, die Figuren 5...9 negative Blitzströme.

Zum besseren Verständnis der Figuren ist folgendes zu bemerken: Die beiden *Meßschleifen* $I_{50\text{ A}}$ und $I_{2\text{ kA}}$ zeigen den Stromverlauf direkt an, soweit der Strom nicht grösser wird als der Messbereich. Im letzten Fall begrenzen die Glimmlampen die Grösse des Ausschlags. Diese Erscheinung ist in der Regel beim 50-A-Messbereich zu sehen, z. B. in Fig. 3, 4, 5, 7, 8. Und zwar wird der Ausschlag bei sehr grossem Strom (mehrere 1 000 A) auf einen kleinen Wert begrenzt (ca. 20 A), bei Strömen von rund 100 bis 1 000 A auf mittlere Werte (rund 50 A). Der grössere Messbereich lässt in diesem Gebiet den Stromverlauf ohne Mühe erkennen. Im kleinen Bereich ist nach dem Löschen der Glimmlampen in der Regel ein sauberes Abklingen des Blitzstromes ersichtlich.

Die *Mess-Schleifen* $\pm I_{\text{max}}$ und $\pm Q$ zeigen durch den grössten Ausschlag den Scheitelwert des Blitzstromes und die stossartige transportierte *Ladung* an, aber nicht den zeitlichen Verlauf dieser Grössen! Der exponentiell abklingende Rücken dieser Kurven ist durch die Entladung eines Speicherkondensators über einen ohmschen Widerstand begründet, und nicht durch den Blitzstrom selber. Die Erklärung dieser Tatsache kann dem Prinzip-Schema von Fig. 1 entnommen werden. Die Kunstschaltung wurde gemacht, um diese kurzzeitig auftretenden Werte auch mit dem Schleifen-Oszillograph festzuhalten. Dagegen ist die *Q*-Messung nicht genau, wenn der Blitzstrom klein, aber von langer Dauer ist. Wie das Schema von Fig. 1 erkennen lässt, wirkt sich dann die Ladespannung des Speicherkondensators spürbar derart aus, dass die Aufladung schliesslich aufhört, trotzdem ein kleiner Blitzstrom noch weiter besteht. In diesem Fall ist die Auswertung der Ladung aus den Kurven der langdauernden Stromkomponenten $I_{50\text{ A}}$ und $I_{2\text{ kA}}$ genauer.

Auffallend ist, dass *alle positiven Blitzströme* (Fig. 2...4) *einen einzigen Teilblitz* zeigen, dessen Dauer zwischen rund 0,055 und 0,23 s liegt. Im Gegensatz dazu weisen die *negativen Blitzströme* (Fig. 5...9) 1...17 Teilblitze pro Gesamtblitz auf. Die Teilblitze dauern wenige ms bis zu rund 0,3 s.

Ausser dem ganz ausserordentlich zusammengesetzten und langdauernden Blitz von Fig. 8 ist das Sammelbild von Fig. 9 noch deshalb zu erwähnen, weil dabei 3 Blitzströme von nur rund 10, 30 und 40 A vorkommen. Für die Auswertung der Ströme, Zeitdauer und Ladungen wird auf den folgenden Abschnitt verwiesen.

Ein interessantes Resultat ist schliesslich als Osz. Nr. 5 in Fig. 10 dargestellt. Bei der Aufnahme dieses Bildes bestand der Eindruck eines direkten Blitzeinschlags in den Blitzableiter. Aus dem Kurvenverlauf scheint es viel wahrscheinlicher, dass die gemessenen Ströme lediglich Verschiebungsströme

eines nahen Blitzeinschlags waren, der den Blitzableiter selber nicht berührte, denn es zeigen sich zwei deutliche Stromstösse, deren Verlauf zuerst negativ, dann kurzzeitig stark positiv wird, sodass für jeden Teilstoss die Gesamtladung $\int i dt$ etwa gleich null beträgt. Ein solches Resultat ist zu erwarten, sofern ein negativer Blitz aus den Wolken gegen den Blitzableiter vorwächst, in diesem durch

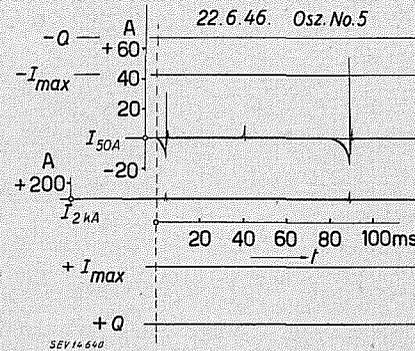


Fig. 10
Wirkung eines dem Blitzableiter benachbarten Blitzeinschlags

die Annäherung einen negativen Verschiebungsstrom induziert, bis der Blitz den Boden in der Umgebung des Ableiters erreicht, so dass die Raumladung im Blitzkanal wieder verschwindet. Damit verschwinden auch die Influenzladungen, das heisst es entsteht ein positiver Verschiebungsstrom. Das Bild von Fig. 10 ist dasjenige der Entladung einer negativen Wolke in den Erdboden in der Umgebung der Messeinrichtung, und zwar im Lauf von zwei Teilblitzen, von denen jeder wieder von der Wolke zum Boden wächst. Ein dritter schwacher Teilblitz ist angedeutet. Der Blitzableiter hat in diesem Fall offenbar die Rolle einer Sonde im atmosphärischen Feld gespielt.

Die *Meßresultate der beiden KO* waren im Sommer 1946 relativ spärlich. Dies ist nicht erstaunlich, wenn die zum Teil recht kleinen Stromamplituden bedacht werden, bei denen der KO gar nicht in Funktion treten kann und soll. Denn der KO soll nur kurz dauernde und hohe Stromspitzen aufzeichnen, für deren Messung der Schleifen-Oszillograph zu träge ist.

Die Fig. 11 und 12 geben zwei Beispiele. Bei jedem sind vom gleichen Blitz 3 Teilblitze im raschen Zeitmaßstab (200 μs) aufgezeichnet worden. Der Rücken des Stromes ist mit einer Ausnahme sehr angenähert exponentiell. In der Front erscheint regelmässig eine Schwingung. Deren Frequenz von rund 0,3 MHz stimmt mit der berechneten Eigenfrequenz der Blitzableiter-Kapazität mit der Induktivität der Erdleitungen überein. Es muss somit angenommen werden, dass diese Schwingung nicht im Blitz, sondern in der Messeinrichtung begründet ist. Sie zeigt jedoch, dass die Steilheit des Blitzstromes *oberhalb* eines gewissen Minimums lag, sonst wäre es nicht möglich gewesen, die Schwingung anzustossen.

Diese Bilder decken sich mit Aufnahmen aus den Vorjahren, bei denen in der Form der kurz dauernden und grossen Stromstösse eine auffallende Regelmässigkeit festzustellen ist.

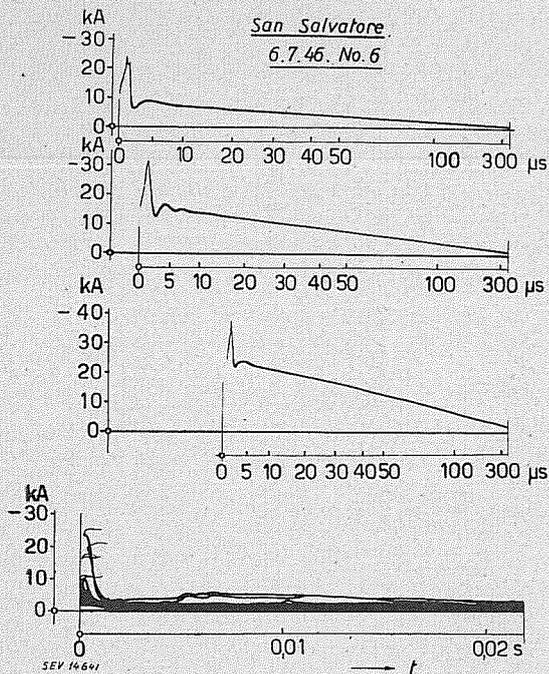


Fig. 11

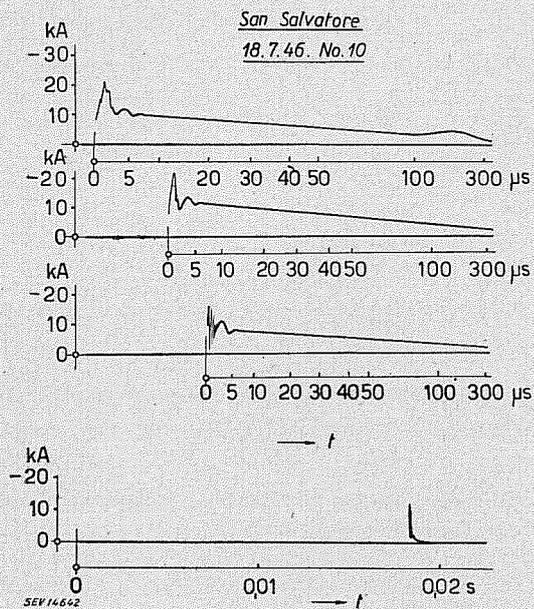


Fig. 12

Fig. 11 und 12

Beispiele von Kathodenstrahl-Oszillogrammen des Sommers 1946

5. Auswertung und Diskussion der Resultate

Zur klaren Beschreibung der Beobachtungen ist es nötig, einige Definitionen festzulegen.

Als *Teilblitz* soll ein Blitzstrom zwischen zwei Stromnullwerten verstanden sein.

Ein *Stoßstrom* soll ein Strom mit weniger als 0,01 s (1 Halbperiode bei 50 Hz) Gesamtdauer bedeuten.

Ein *Dauerstrom* sei ein Strom mit mehr als 0,01 s (1 Halbperiode bei 50 Hz) Gesamtdauer.

Jeder Teilblitz lässt sich nach Schonland zerlegen in einen *Leitblitz* (leader stroke) und einen *Hauptblitz* (main stroke). Durch Auswertung der Oszillogramme ergeben sich die Fig. 13...17.

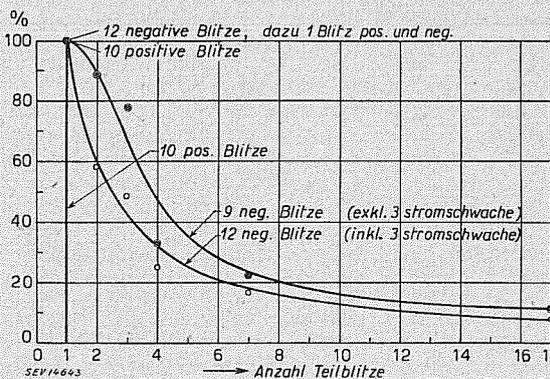


Fig. 13

Häufigkeit der Teilblitze

Als Ordinate ist die prozentuale Zahl der Gesamtblitze aufgetragen, die mindestens soviel Teilblitze aufweisen, als die Abszisse angibt.

In Worten könnte diese Auswertung in folgenden Sätzen ausgedrückt werden:

1. Von 23 Blitzen kommen 12 aus negativen, 10 aus positiven Wolken; ein weiterer einziger Blitz enthält nacheinander eine kleine negative und dann eine grössere positive Ladung.

2. In den 12 genannten negativen Blitzen sind 3 ausserordentliche stromschwache Blitze miteingeschlossen, deren Stromschiebelwert nur 10...40 A beträgt.

3. Alle positiven Blitze (Blitze aus positiven Wolken) sind einfach, das heisst sie bestehen nur aus einem einzigen Teilblitz.

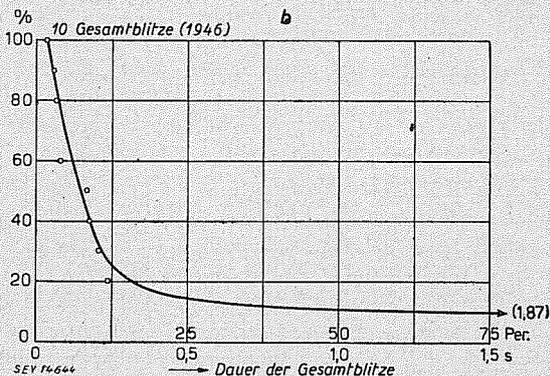
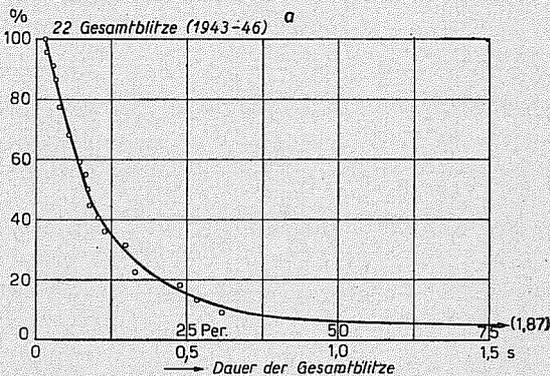


Fig. 14

Häufigkeit verschiedener Dauer des Gesamtblitzes

a Aus 22 Oszillogrammen (1943...1946)

b Aus 10 Oszillogrammen (1946)

4. Die meisten negativen Blitze (aus negativen Wolken) sind zusammengesetzt aus mehreren, bis zu 17 Teilblitzen, der Mittelwert liegt bei 3...4 Teilblitzen.

5. Von 23 Blitzen beginnen 12 mit Dauerstrom, 11 mit Stoßstrom (4 mit positivem, 7 mit negativem Strom). Spätere Teilblitze beginnen mit Stoßstrom, auch wenn der erste Teilblitz mit Dauerstrom begann.

6. Die Gesamtdauer der gemessenen 23 Blitze beträgt bis zu 1,85 s.

7. Die Zeitintervalle zwischen je zwei Teilblitzen liegen meistens in der Grössenordnung weniger Hundertstel-Sekunden.

8. Die elektrische Ladung der Blitze liegt zum grossen Teil nicht im Stoßstrom, sondern in den Dauerströmen. Stoßströme haben Ladungen der Grössenordnung 1 C, Dauerströme Ladungen der Grössenordnung 10...70 C. Die grösste Gesamtladung eines Blitzschlages wurde zu rund 160 C gemessen (in 17 Teilblitzen).

9. Die im Blitzstrom enthaltenen Stoßströme haben oft eine Halbwertdauer von der Grössenordnung 30...100 μ s; 50 μ s scheint ein guter Mittelwert zu sein.

10. Die Stoßströme der verschiedenen Teilblitze eines und desselben Gesamtblitzes haben sehr oft unter sich gleiche Halbwertdauer; sie unterscheiden sich nur durch ihre Amplitude.

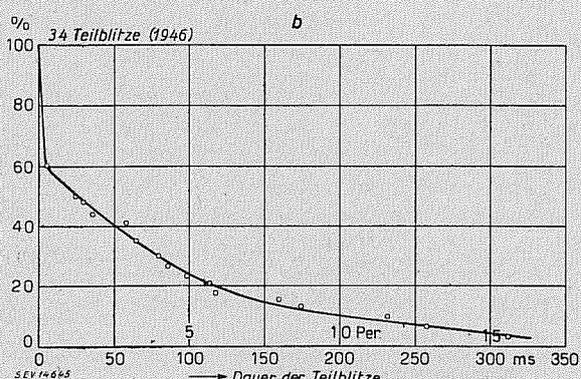
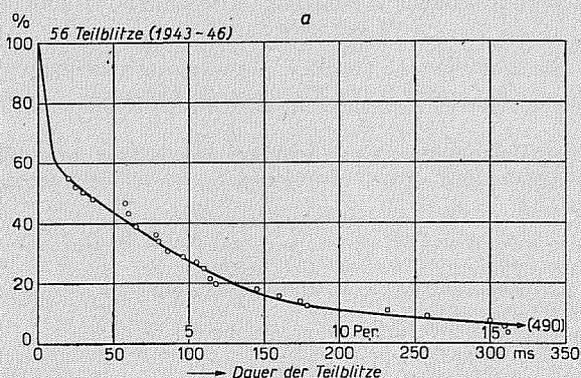


Fig. 15
Häufigkeit verschiedener Dauer der Teilblitze
a Aus 56 Teilblitzen (1943...1946)
b Aus 34 Teilblitzen (1946)

11. Die Steilheit der Stoßströme des Blitzes ist vor allem bei negativen Blitzströmen gross. Ihre Frontdauer beträgt oft weniger als rund 1,5 μ s. Die genaue Messung grösserer Steilheiten bzw. kürzerer Frontdauern ist bei den vorliegenden Untersuchungen nicht gut möglich, weil der Blitzableiter mit seiner Erdleitung eine Eigenfrequenz von rund 0,33 MHz aufweist. Deshalb entsteht bei sehr steilen Blitzströmen kein steilerer Meßstrom als gemäss dieser Frequenz; die Messung sagt lediglich aus, dass die Steilheit oft grösser ist, als der Eigenschwingung entspricht, d.h. dass die Blitzstromfrontdauer dann kürzer ist als 1,5 μ s.

Bei der Diskussion dieser Resultate drängt sich ein Vergleich unserer Messungen mit jenen von

K. B. Mc Eachron am Empire State Building auf. Dort zeigten sich ausschliesslich Blitze aus negativen Wolken, bei uns dagegen etwa zur Hälfte positive und negative Blitze. Die Ladungen des Gesamtblitzes bewegen sich in derselben Grösse mit einem Maximum von rund 160 C an beiden Orten. Die Zahl der Teilblitze wurde von uns bis zu 17 gemessen, in USA bis zu 12. Die Gesamtdauer des Blitzes ist nach unseren bisherigen Messungen 1,85 s, in USA bis 1,5 s.

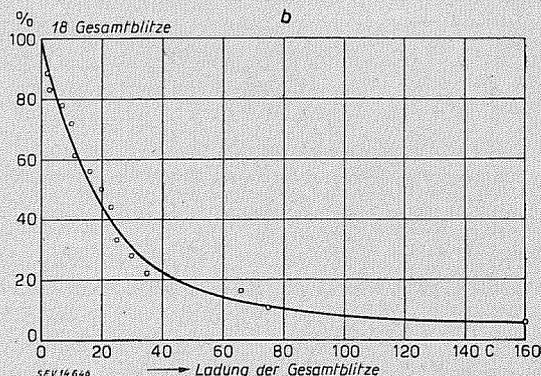
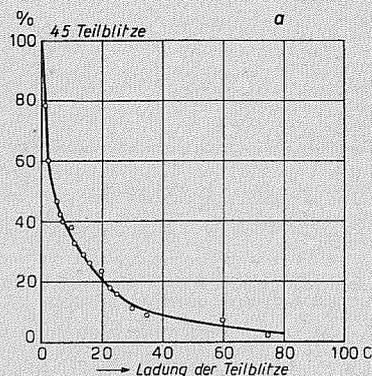


Fig. 16
Elektrische Ladungen in den Blitzen
a in Teilblitzen
b in Gesamtblitzen

Leider verfügen wir noch nicht über Messungen mit der Boys-Kamera, so dass in dieser Beziehung ein Vergleich nicht möglich ist. Auffallend ist der von uns festgestellte Unterschied in der Zusammensetzung der positiven und negativen Blitze, das heisst solcher aus positiven und negativen Wolken. Es scheint, dass an dem ausserordentlich hohen Empire State Building nur der eine Typus vorkommt, nämlich jener, bei dem der Blitzableiter die positive Spitze bildet (Blitze aus negativen Wolken). Mc Eachron hat festgestellt, dass in diesem Fall der erste Leitblitz («leader stroke») mit einer einzigen Ausnahme stets vom Blitzableiter gegen die Wolke hinauf wächst. Spätere Teilblitze wachsen jedoch stets von der Wolke zum Boden herunter. Wie es mit dem Vorwachsen des Blitzes in den von uns auf rund 50 % aller Blitze festgestellten Entladungen aus positiven Wolken steht, wissen wir nicht, weil dieser Fall in USA nicht vorkam. Durch den Vergleich der verfügbaren Daten drängen sich folgende Vermutungen auf:

Vermutung 1: Dauerströme entstehen stets dann, wenn ein Leitblitz vom Blitzableiter gegen die Wolken hinauf wächst.

Vermutung 2: Stoßströme entstehen stets dann, wenn ein Leitblitz von einer Wolke gegen den Blitzableiter vorwächst und diesen trifft, und eventuell, falls weitere Teilblitze aus den Wolken gegen einen bestehenden Blitzkanal vorwachsen und in diesen einmünden.

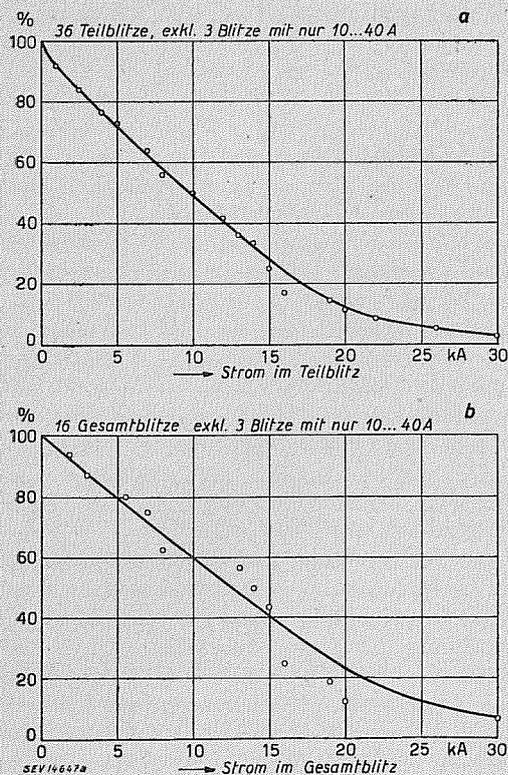


Fig. 17
Scheitelwerte des Blitzstromes
a In 36 Teilblitzen
b in 16 Gesamtblitzen
In der Figur sind 3 Blitze mit nur 10...40 A nicht inbegriffen.

Sollte sich diese Vermutung als richtig erweisen, so könnten wir uns den Vorgang der Blitzbildung wie folgt vorstellen:

a) *Ursprung des Blitzkanals in der Wolke, Vorwachsen gegen die Erde* (dieser Fall scheint in der Ebene der häufigste zu sein, auf dem San Salvatore ist er in rund 50 % aller Fälle zu erwarten). Der Vorgang sei anhand der Fig. 18 für eine z. B. positiv geladene Wolke skizziert.

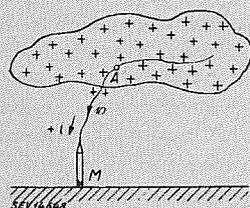


Fig. 18
Schematische Darstellung der Blitzbildung von einer positiven Wolke aus zum Boden
A Ursprung des Blitzkanals
v Vorwachsrichtung des Blitzkanals
M Messpunkt

Vom Gebiet maximaler Feldstärke A in der Wolke ausgehend bildet sich der ionisierte Kanal des Blitzes nach beiden Richtungen hin aus mit einer Vorwachsrichtung b. Der gegen die Erde hin vorwachsende Leitblitz bildet einen stark positiv geladenen Kanal, weil die beim Vorwachsen entstehen-

den, freien Elektronen infolge ihrer kleinen Masse sehr rasch gegen die positive Wolke hinauf befördert und dort neutralisiert werden, so dass nur die positiven Ionen zurückbleiben. Erreicht der positive Raumladungskanal (Leitblitz) den Blitzableiter annähernd, so entsteht dort ein Ueberschlag zwischen beiden, womit sich der Kanal stossartig rasch entladen kann, indem die Blitzableiterspitze Elektronen in den positiven Kanal hinauf sendet (Hauptblitz). Am Messpunkt M ist somit ein Stossraum mit steiler Stirn festzustellen. Die Elektronen aus dem Blitzableiter füllen nicht nur den bestehenden positiven Blitzkanal, sondern bewirken anschliessend auch dessen Verlängerung in die positive Wolke hinein nach oben und nach den Seiten. Während der ganzen Zeit bleibt die Verbindung mit der Elektronenquelle, nämlich dem Blitzableiter, bestehen, denn die Felder der positiven Gewitterwolke und der positiven Raumladung im Blitzkanal verstärken sich in der Nähe des Blitzableiters. Der Blitz wird demnach nicht in viele Teilblitze zerfallen, sondern grundsätzlich nur einen Teilblitz aufweisen.

Zahlenmässig lässt sich die Grösse und Dauer des Stoßstromes unter Zugrundelegung nachstehender Werte abschätzen:

- a) Kilometrische Kapazität des Blitzkanals $C \approx 0,01 \mu\text{F}/\text{km}$
- β) Spannung der Wolke und des Blitzkanals vor dem Erreichen des Blitzableiters $U \approx 50 \cdot 10^6 \text{ V}$
- γ) Wellen-Widerstand des Blitzkanals, sofern dieser als guter Leiter aufgefasst wird, $Z \approx 500 \Omega$
- δ) Vorwachs-Geschwindigkeit des Hauptblitzes nach dem Einmünden des Leitblitzes in den Blitzableiter $v \approx \frac{1}{4} c$, wo c Lichtgeschwindigkeit. Dieser Wert entspricht den Messungen von Schonland, nach welchen v innert ziemlich weiten Grenzen variiert.

Daraus würden sich angenähert folgende kilometrische Ladungen Q , Stoßströme I und Zeitdauern T für die Teilblitze ergeben:

$$Q = UC \approx 50 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot 0,01 \mu\text{F}/\text{km} \approx 0,5 \text{ C}/\text{km}$$

$$I = \frac{50 \cdot 10^6}{500} \cdot \frac{1}{4} \approx 10^5 \cdot \frac{1}{4} \approx 25 \text{ kA}$$

$$T = \frac{l}{v} \approx \frac{l}{c/4} \quad l \text{ Länge des Blitzkanals}$$

$$\text{oder für } l = 1 \text{ km} : T = \frac{4}{c} \cdot \frac{4}{3} \cdot 10^5 = 13,3 \mu\text{s}/\text{km}$$

In der Tat ergeben sich für einen Blitz von wenigen km Länge Werte der beobachteten Grössenordnungen, nämlich Ladungen weniger C, Stoßströme der Grössenordnung 25 kA und Zeitdauern der Grössenordnung $50 \mu\text{s}$ für den Stoßstrom.

b) *Ursprung des Blitzkanals an der Blitzableiterspitze, Vorwachsen gegen die Wolke hinauf.* (Dieser Fall bildet am Empire State Building die Regel, er scheint in der Ebene seltener, und ist auf dem San Salvatore in etwa der Hälfte der Fälle zu erwarten.) Der Vorgang ist in Fig. 19 für eine negativ angenommene Wolke skizziert.

Beim Nähern einer negativen Wolke bildet die Blitzableiterspitze den positiven Pol, von dem aus Entladungen bekanntlich bei einer viel kleineren

statischen Feldstärke vorwachsen als aus einer negativen Spitze. Der Leitblitz bildet sich deshalb in diesem Fall von der Spitze des Ableiters aus und wächst gegen die Wolke hinauf. Genauer gesagt werden in diesem Leitblitz Elektronen, welche die Raumladung bildeten, und ferner solche, die aus der Stossionisation im vorwachsenden Leitblitz stammen,

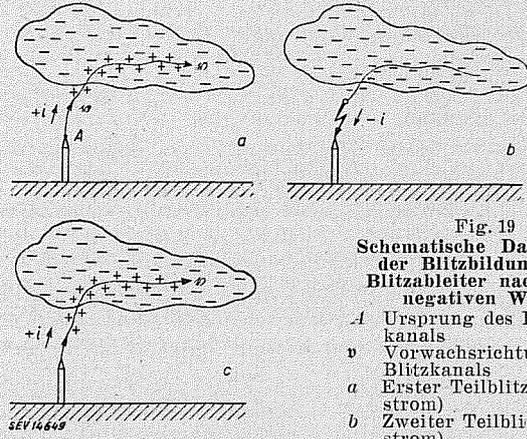


Fig. 19
Schematische Darstellung
der Blitzbildung vom
Blitzableiter nach einer
negativen Wolke

- A Ursprung des Blitzkanals
- v Vorwachsrichtung des Blitzkanals
- a Erster Teilblitz (Dauerstrom)
- b Zweiter Teilblitz (Stossstrom)
- c Zweiter Teilblitz (Dauerstrom)

gegen die Blitzableiterspitze fliegen. Im Leitblitz bleiben positive Ionen als Raumladung liegen. Die Feldstärke ist an der Spitze dieses Kanals sehr hoch wegen dieser positiven Ladungen. Der Kanal wächst deshalb weit in Wolkengebiete hinein, in denen vorher nur ein verhältnismässig schwaches Feld bestand. Der Strom ist daher ziemlich klein; er hat die Tendenz abzureissen.

Diese Tendenz besteht vor allem dort, wo die Feldstärke durch die positiven Raumladungen im Blitzkanal geschwächt wird, so dass keine starke Ionisation mehr stattfindet, das heisst bei der Blitzableiterspitze. Löscht aber der Lichtbogen, so lädt sich der Kanal von seinem vordern Ende her aus der Wolke wieder negativ auf, bis es zu einem Durchschlag vom negativ geladenen Kanal zur Blitzableiterspitze kommt. Damit entsteht ein Stoßstrom, der den Kanal entlädt, wobei er wegen der eintretenden Stossionisation wieder positiv geladen zurückbleibt. Wie vorher, wird dadurch das Feld bei der Blitzableiterspitze wieder geschwächt, während das Blitzende in der Wolke sich weiter vortreibt, so dass ein Dauerstrom anschliessen kann. Die Löschung des Lichtbogens beim Blitzableiter ist erneut wahrscheinlich. Tritt sie ein, so wiederholt sich das Spiel der Umladung des positiv zurückgelassenen in einen negativ geladenen Kanal, der wieder einen Durchschlag zur positiven Ableiterspitze folgen lässt usw.

Aus den Vorgängen vor einer positiven Spitze, das heisst der viel grösseren Beweglichkeit der bei der Stossionisation gebildeten freien Elektronen im Blitzkanal gegenüber den positiven Restionen, und der dadurch stets positiven Raumladung im Ionisationskanal, sowie schliesslich aus der Superposition des statischen Feldes der Gewitterwolke und des dynamischen Feldes dieser Kanalladungen lässt sich das Aussetzen des Stromes im Blitz aus einer negativen

Wolke und das Fehlen dieser Erscheinung bei der positiven Wolke erklären.

Wie aus der geschilderten Hypothese hervorgeht, scheint ein enger Zusammenhang zwischen Stoßstrom und Vorwachsrichtung des Blitzes zu bestehen. Es wäre in dieser Hinsicht zweifellos interessant, mit dem Oszillogramm des Blitzstromes auch eine Boys-Kamera-Aufnahme des Blitzes in den Wolken vergleichen zu können.

Es müsste sich damit der vermutete Zusammenhang zwischen Stromform und Vorwachsrichtung des Blitzes bestätigen oder widerlegen lassen. Im Fall der Bestätigung wäre ein ausserordentlich geschlossenes Bild über die Blitzbildung und die damit zusammenhängende Stromform beim Einschlagpunkt des Blitzes gewonnen. Es fragt sich ferner, in welcher Weise die Vorwachsrichtung des Blitzes auf dem Monte San Salvatore mit der Polarität der Wolke bzw. des Blitzes zusammenhängt. Wir hoffen, dass es der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) möglich sein wird, die Forschung in dieser Richtung zu erweitern.

Bemerkungen über die Gültigkeit der Resultate unserer Blitzbeobachtungen. Der Vergleich unserer Messungen mit jenen in USA zeigt sehr deutlich, dass ein Einfluss der Blitzableiterhöhe auf den Blitzbildungsvorgang besteht: McEachron findet am Empire State Building ausschliesslich die Entladung negativer Wolken gegen den Blitzableiter, und mit einer einzigen Ausnahme ausschliessliches Vorwachsen des Blitzes vom Gebäude gegen die Wolken. Auf dem San Salvatore kommen beide Polaritäten und vermutlich beide Vorwachsrichtungen etwa gleich häufig vor. Die letzte Vermutung bleibt noch durch direkte optische Aufnahmen zu beweisen.

In der Ebene wachsen nach den optischen Aufnahmen von Schonland im Gegensatz zu den Beobachtungen in den USA fast alle Blitze von den Wolken gegen die Erde vor. Aus den Messungen mit Stahlstäbchen scheinen überwiegend negative Wolken sich in die Erde zu entladen. Demnach liegen die Bedingungen für das Vorwachsen des Blitzes am San Salvatore zwischen jenen der Ebene und denen am hohen Wolkenkratzer. Wir haben die Möglichkeit, Blitzvorgänge zu messen, die am hohen Wolkenkratzer nicht vorkommen, weil dort der fast 400 m hohe Blitzableiter stets die in der Hochspannungstechnik wohlbekannte Rolle der positiven Spitze spielt.

Die Uebertragung der Resultate auf Blitzeinschläge in der Ebene scheint demnach für die Messungen auf dem San Salvatore besser möglich zu sein als für jene auf dem Empire State Building. Dass langdauernde Ströme auch in der Ebene vorkommen, beweisen zweifellos die sogenannten Fulguriten, das heisst Röhren aus zusammengesinterter Sand, die in Sandgebieten gefunden werden, ferner die Brandstellen von Holzhäusern, die ebenfalls nur durch langdauernden Strom entstehen können. Nach den Aufnahmen von Schonland überwiegen in der Ebene die negativen Blitze. Gerade diese geben nach unsern Messungen Anlass zu Mehrfachblitzen und grosser Stromdauer.

6. Ausblick

Trotzdem bereits viele Resultate vom Monte San Salvatore vorliegen, wäre es nicht richtig anzunehmen, die Erscheinung des Blitzes sei nun restlos geklärt.

Wie die Ladungen, Zeitauern und Stromformen der Blitzeinschläge *in der Ebene* durch direkte Messung erfasst werden können, ist nach unserer Auffassung heute noch ein offenes Problem. Nachdem die Messmöglichkeiten an besonders blitzgefährdeten Stellen, wie der San Salvatore eine ist, alle Einzelheiten des Blitzes erkennen lassen, wird es sich vielleicht fragen, weniger gefährdete Objekte, Schornsteine, kleine Türme usw. mit einfachern Messmitteln auszurüsten, welche dann bestimmte Grössen (z. B. Ladung, Stromscheidenwert, Zeitdauer, Zahl der Teilblitze usw.) einwandfrei erkennen und mit den am San Salvatore gemessenen Werten vergleichen lassen. So wird ein Analogieschluss auf den gesamten Blitzstromverlauf vielleicht möglich werden.

Selbst wenn dies gelingen wird, können wir eine andere Erscheinungsform des Blitzes noch gar nicht verstehen, nämlich den sogenannten *Kugelblitz*. Trotzdem Beobachtungen von namhaften Physikern vorliegen, z.B. dem Funkenforscher *M. Töpler*, wissen wir von dieser Erscheinung noch nichts als eine Menge mehr oder weniger sagenhafter Schilderungen, z. B. im Büchlein des frühern Physikers *A. Gockel* in Fryburg: *Das Gewitter* (Köln 1895). Es gehört nicht in den Rahmen des Vortrages, darüber zu berichten.

Literatur

- [1] *Berger, K.*: Ueber das Verhalten der Stromwandler bei Hochfrequenz und den Schutzwert von Parallelwiderständen gegen Ueberspannungen. Bull. SEV Bd. 18(1927), Nr. 11, S. 657...692.
- [2] *Berger, K.*: Ueber die Weiterentwicklung des Kathodenstrahl-Oszillographen von Dufour zur Ermöglichung der Aufnahme von Gewittererscheinungen, sowie anderer Vorgänge kürzester Dauer. Bull. SEV Bd. 19(1928), Nr. 9, S. 292...301.
- [3] *Berger, K.*: Der Kathodenstrahl-Oszillograph als Registrierinstrument, speziell für raschverlaufende Vorgänge. Bull. SEV Bd. 19(1928), Nr. 21, S. 688...694.
- [4] *Berger, K.*: Die ersten Beobachtungen des Verlaufes von durch Gewitter verursachten Spannungen in Mittelspannungsnetzen mittels des Kathodenstrahl-Oszillographen des SEV. — Zweiter Bericht des Ausschusses für die Arbeiten mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen. Bull. SEV Bd. 20(1929), Nr. 11, S. 321...338.
- [5] *Berger, K.*: Ueberspannungen in elektrischen Anlagen, erläutert an Hand von Untersuchungen mit den Kathodenstrahl-Oszillographen. Bull. SEV Bd. 21(1930), Nr. 3, S. 77...109, und Nr. 16, S. 558...559.
- [6] *Berger, K.*: Untersuchungen mittels Kathodenstrahl-Oszillograph der durch Erdschluss hervorgerufenen Ueberspannungen in einem 8-kV-Verteilnetz. Bull. SEV Bd. 21(1930), Nr. 23, S. 756...788.
- [7] *Berger, K.*: Les phénomènes de surtension par temps d'orage dans les réseaux aériens. Etat actuel de leur étude en Suisse. Bull. SEV Bd. 22(1931), Nr. 17, S. 421...436.
- [8] *Berger, K.*: Ergebnisse der Gewittermessungen im Jahre 1931. Bull. SEV Bd. 23(1932), Nr. 12, S. 289...302.
- [9] *Berger, K.*: Das Verhalten glasgekapselter Einfachfunkenstrecken gegenüber Stoßspannungen. Bull. SEV Bd. 24(1933), Nr. 2, S. 17...29.
- [10] *Berger, K.*: Die Gewittermessungen der Jahre 1932 und 1933 in der Schweiz. Bull. SEV Bd. 25(1934), Nr. 9, S. 213...229.
- [11] *Berger, K.*: Fortschritte in der Erkenntnis des Blitzes und im Ueberspannungsschutz elektrischer Anlagen. Bull. SEV Bd. 25(1934), Nr. 24, S. 641...652.
- [12] *Berger, K.*: Einige Methoden und Resultate moderner Mikrozeitmessung. Bull. SEV Bd. 26(1935), Nr. 23, S. 651...659.
- [13] *Berger, K.*: Resultate der Gewittermessungen in den Jahren 1934/35. Bull. SEV Bd. 27(1936), Nr. 6, S. 145...163.
- [14] *Berger, K.*: Ein neuer Doppel-Kathodenstrahl-Oszillograph (DKO). Bull. SEV Bd. 31(1940), Nr. 5, S. 113...119.
- [15] *Berger, K.*: Ausgleichsvorgänge beim Ansprechen von Ueberspannungsableitern in Prüfanlagen und Netzen. Bull. SEV Bd. 32(1941), Nr. 12, S. 257...266.
- [16] *Berger, K.*: Der Ueberspannungsschutz von Hausinstallationen. Bull. SEV Bd. 32(1941), Nr. 25, S. 699...703 und S. 710.
- [17] *Berger, K.*, und *E. Schneeberger*: Ein Kabel-Stoßgenerator für grosse Leistung und 1 Million Volt Stoßspannung. Bull. SEV Bd. 24(1933), Nr. 15, S. 325...332.
- [18] *Berger, K.*: Die Blitzmeßstation auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV Bd. 34(1943), Nr. 26, S. 803...805.
- [19] *Davis, R.*: The Parsons Memorial Lecture: «High-Voltage Research at the National Physical Laboratory». J. Instn. Electr. Engr'., Part I, Bd. 93(1946), Nr. 64, S. 177...186.
- [20] *Grünwald, H.*: Recherches sur les perturbations provoquées par les orages et sur la protection des lignes aériennes contre les orages. CIGRE 1939, Rapp. 323.
- [21] *McEachron, K. B.*: Lightning to the Empire State Building. J. Franklin Inst. Bd. 227(1939), Nr. 2, S. 149...217.
- [22] *Schonland, B. F. J.*, u. *H. Collens*: Progressive Lightning. Proc. Roy. Soc., London, Bd. A 143(1934), Nr. 850, S. 654...674.
Schonland, B. F. J., *D. J. Malan* u. *H. Collens*: Progressive Lightning — II. Proc. Roy. Soc., London, Bd. A 152(1935), Nr. 877, S. 595...625.
- [23] *Stékolnikov, I.*, u. *Ch. Valeev*: L'étude de la foudre dans un laboratoire de campagne. CIGRE 1937, Rapp. 330.
- [24] *Berger, K.*: Recherches suisses sur la foudre, Mesures effectuées au Monte San Salvatore, près de Lugano. CIGRE 1946, Rapp. 318, u. Bull. SEV Bd. 37(1946), Nr. 12, S. 319...326.

Adresse des Autors:

Dr. sc. techn. *K. Berger*, Versuchsleiter der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH), Seefeldstrasse 301, Zürich 8.